Российская академия наук
Самарский научный центр
Институт проблем управления сложными системами

Труды XVII Международной конференции

Proceedings of the XVII International Conference

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

COMPLEX SYSTEMS: CONTROL AND MODELING PROBLEMS

22-25 июня 2015, Самара, Россия

June 22-25, 2015, Samara, Russia

Редакторы:

академик Е.А. Федосов

академик Н.А. Кузнецов

профессор В.А. Виттих

Editors:

academician E.A. Fedosov

academician N.A. Kuznetsov

professor V.A. Vittikh

Проблемы управления и моделирования в сложных системах: *Труды XVII Международной конференции* (22-25 июня 2015 г. Самара, Россия) / Под ред.: акад. ***Е.А. Федосова***, акад. ***Н.А. Кузнецова***, проф. ***В.А. Виттиха***. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2015. – 736 с.

ISBN

В сборнике содержатся труды XVII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», распределенные по направлениям: управление ресурсами на машиностроительных предприятиях; управление космическими полётами; процессы управления в обществе (в социальных, экономических и политических системах); информационные технологии в управлении; теория оптимального управления и её приложения; эргатические системы и техногенные среды; управление в сложных технических системах; измерения, контроль и диагностика в экстремальных условиях.

ISBN

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук, составление, оформление, 2015
© Все права принадлежат авторам публикуемых работ, 2015

The XVII International Conference ”Complex Systems: Control and Modeling Problems” (CSCMP’2015), was held on June 22-25, 2015 in Samara (Russia) by the International Association for Mathematics and Computers in Simulation (IMACS), National Committee of Automatic Control of Russia, Samara Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Institute for Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences (ICCS RAS) with the participation of the Volga Region University of Telecommunications and Informatics and Smart Solutions Company (Samara, RF).

The Conference was funded according to the project № 15-08-20411 of Russian Foundation for Basic Research.

The conference reports were presented on the following sections:

- Resources Management at Machinery Plants;
- Aerospace Flights Control;
- Management Processes in the Society (in Social, Economical and Political systems);
- Information Technologies in Control and Management Systems;
- Theory of Optimal Control and its Applications;
- Ergatic Systems and Technogenic Medium;
- Control in Complex Technical Systems;
- Measuring, Control and Diagnostics in Extreme Conditions.

The scientists from universities and research institutes of Bulgaria, Czech Republic, Germany, Great Britain, the Netherlands, and Portugal participated at the conference. The Russian participants represented the Russian Academy of Sciences, research institutes, universities, research and development centers, enterprises and governmental authorities.

XVII Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (ПУМСС-2015) проводилась в г. Самаре (Россия) с 22 по 25 июня 2015 года Международной ассоциацией по математическому и компьютерному моделированию (IMACS), Российским Национальным комитетом по автоматическому управлению, Самарским научным центром Российской академии наук, Институтом проблем управления сложными системами Российской академии наук (ИПУСС РАН) при участии Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, а также научно-производственной компании «Разумные решения» (г. Самара).

Конференция получила финансовую поддержку Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-20411).

На конференции были представлены доклады по следующим направлениям:

- Управление ресурсами на машиностроительных предприятиях;
- Управление космическими полётами;
- Процессы управления в обществе (в социальных, экономических и политических системах);
- Информационные технологии в управлении;
- Теория оптимального управления и её приложения;
- Эргатические системы и техногенные среды;
- Управление в сложных технических системах;
- Измерения, контроль и диагностика в экстремальных условиях.

В конференции приняли участие ученые из университетов и научных учреждений Болгарии, Великобритании, Германии, Нидерландов, Португалии, Чешской республики. Отечественные ученые представляли Российскую академию наук, научно-исследовательские институты, вузы, научно-производственные объединения и промышленные предприятия страны, органы государственной власти.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

1.	*Федосов Е.А.*	- академик РАН, председатель Программного комитета
2.	*Виттих В.А.*	- д.т.н., заместитель председателя, ИПУСС РАН, г. Самара
3.	*Боровик С.Ю.*	- д.т.н., ученый секретарь Программного комитета, ИПУСС РАН, г. Самара
4.	*Аншаков Г.П.*	- член-корреспондент РАН, ОАО «РКЦ «Прогресс», г. Самара
5.	*Васильев С.Н.*	- академик РАН, ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова, г. Москва
6.	*Золотухин Ю.Н.*	- д.т.н, Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
7.	*Кузнецов Н.А.*	- академик РАН
8.	*Лейтао П.*	- профессор, Политехнический институт Брагансы, Португалия
9.	*Лупи С.*	- профессор, Падуанский университет, Италия
10.	*Марик В.*	- профессор, Чешский технический университет, г. Прага
11.	*Наке Б.*	- д-р, Институт электротехнологии Университета им. Лейбница, г. Ганновер, Германия
12.	*Новиков Д.А.*	- член-корреспондент РАН, ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова, г. Москва
13.	*Овчинников Д.Е.*	- к.соц.н., вице-губернатор – руководитель Администрации Губернатора Самарской области
14.	*Рапопорт Э.Я.*	- д.т.н., ИПУСС РАН, г. Самара
15.	*Ржевский Г.А.*	- профессор, Открытый университет, г. Лондон, Великобритания
16.	*Себряков Г.Г.*	- член-корреспондент РАН, ФГУП ГосНИИАС, г. Москва
17.	*Сергеев С.Ф.*	- д.псх.н., ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, г. Санкт-Петербург
18.	*Скобелев П.О.*	- д.т.н., ОАО РКК «Энергия», г. Москва
19.	*Смирнов С.В.*	- д.т.н., ИПУСС РАН, г. Самара
20.	*Соловьев В.А.*	- член-корреспондент РАН
21.	*Филимонов Н.Б.*	- д.т.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва
22.	*Фурсов О.Б.*	- к.соц.н., Глава Администрации г.о. Самара
23.	*Ширрманн А.*	- Европейский аэрокосмический и оборонный концерн (EADS), Германия
24.	*Шорин В.П.*	- академик РАН, СамНЦ РАН, г. Самара

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

1.	*Виттих В.А.*	- д.т.н., председатель Организационного комитета, ИПУСС РАН, г. Самара
2.	*Смирнов С.В.*	- д.т.н., заместитель председателя, ИПУСС РАН, г. Самара
3.	*Моисеева Т.В.*	- к.э.н., ученый секретарь Организационного комитета, ИПУСС РАН, г. Самара
4.	*Андреев В.А.*	- д.т.н., ПГУТИ, г. Самара
5.	*Безруков С.А.*	- к.э.н., заместитель председателя Правительства Самарской области - министр промышленности и технологий Самарской области
6.	*Горбунов Д.В.*	- к.э.н., заместитель министра экономического развития, инвестиций и торговли Самарской области
7.	*Гриценко Е.А.*	- заместитель министра социально-демографической и семейной политики Самарской области
8.	*Ильясов Б.Г.*	- д.т.н., УГАТУ, г. Уфа
9.	*Клещев А.С.*	- д.ф.-м.н., ИАиПУ ДВО РАН, г. Владивосток
10.	*Кузнецов С.В.*	- ИПУСС РАН, г. Самара
11.	*Лазарев Ю.Н.*	- д.т.н., СамНЦ РАН, г. Самара
12.	*Матюшин М.М.*	- д.т.н., ФГУП ЦНИИМАШ, г. Королёв
13.	*Плешивцева Ю.Э.*	- д.т.н., ИПУСС РАН, г. Самара
14.	*Пунда Д.И.*	- к.ф.-м.н., ООО «НАУКОМП – Технологии моделирования», г. Самара
15.	*Чекалов Л.Л.*	- к.т.н., ООО «Транс-Мобил-Спедишн», г. Самара

CONTENTS
СОДЕРЖАНИЕ

Plenary Papers
Пленарные доклады

1. *G. Rzevski*
Self- management in the emerging global society 3

2. *С.Н. Васильев, С.А. Ульянов*
Многорежимное управление движущимися группировками 10

3. *В.А. Виттих*
Что такое «эвергетика»? 26

4. *П.О. Скобелев*
Стратегия развития информационных технологий для управления ресурсами крупного ракетно-космического предприятия 35

Resources Management at Machinery Plants
Управление ресурсами на машиностроительных предприятиях

1. *V. Chepegin, D. Rusu, J.R.N. Baixeras*
Advances in data value chain management: semantic web and a mixture of integration paradigms for holonic systems 45

2. *P. Leitão, J. Barbosa*
Agent-based strategic planner for the production of small lots of complex products: theoretical and practical perspectives 52

3. *V. Mařík, P. Vrba, M. Klíma*
Aircraft assembly process optimization: novel solution for dynamic operations scheduling 58

4. *C.A. Marín, U. Wajid*
Towards an organic system architecture for supporting manufacturing processes 64

5. *Д. Казанская, Я. Шепилов, B. Madsen*
Адаптивное управление мелкосерийным производством 69

6. *И.В. Майоров, П.О. Скобелев*
Модель динамики агентов потребностей и возможностей 79

7. *И.В. Прилепский, И.В. Майоров, Я.Ю. Шепилов*
Опыт внедрения мультиагентной системы управления «SmartFactory» в инструментальном цехе №50 ОАО «АвиаАгрегат» 88

8. *А.В. Шишов, Я.Ю. Шепилов, Д.Н. Казанская, Д.В. Павлова, Л.С. Бесова*
Мультиагентная система стратегического планирования деятельности аэрокосмического предприятия 97

Aerospace Flights Control
Управление космическими полётами

1. *П.Н.Васильева*
Совершенствование методов информационного обеспечения экипажей пилотируемого космического аппарата в случае возникновения аварийной ситуации на борту с использованием современных информационных технологий 107

2. *М.М. Ведерникова, Ю.А. Скурский, А.И. Спирин*
Контроль работы сложных технических систем. Средства информационной поддержки 115

3. *А.В. Донсков*
Применение нечетких множеств при парировании аномальных ситуаций в ходе полета пилотируемого космического аппарата 126

4. *М.М. Матюшин, Д.А. Зеленов, Н.Л. Соколов, Е.В. Бакланов*
Базовый ЦУП Роскосмоса как высокотехнологичный инструмент управления сложными системами космического назначения 138

5. *В.И. Станиловская, А.М. Беляев, О.И. Лахин, А.И.Носков, Д.Н. Иванова*
Подход к адаптивному планированию полетных операций российского сегмента международной космиеческой станции на основе мультиагентных технологий 147

Management Processes in the Society
(in Social, Economical and Political systems)
Процессы управления в обществе
(в социальных, экономических и политических системах)

1. *А.Ю. Акутина, Г.И. Горемыкина, И.Н. Мастяева*
Моделирование системы оценки влияния факторов внешней среды на стратегию поведения вуза на рынке образовательных услуг 161

2. *А.В. Амеличкин, С.П. Ковалёв*
Технология модельно-ориентированной разработки автоматизированных средств эффективного управления энергопотреблением 167

3. *М.Р. Арпентьева*
Эвергетические стратегии и управление развитием сообществ 174

4. *Н.М. Боргест*
Процессы управления в обществе: онтологические доминанты и информационные технологии 181

5. *С.Ф. Боев, Д.Д. Ступин, А.А. Кочкаров, П.О.Скобелев*
Обеспечение государственной безопасности в контексте взаимосвязи оборонных, техногенных, и социальных угроз 192

6. *В.А. Виттих*
Рациональность как обретение смысла и ответственности в проблемных ситуациях 195

7. *В.А. Виттих*
О понятиях «познание» и «осознание» в науке об управлении 200

8. *В.А. Виттих, Д.В. Горбунов, Т.В. Моисеева, С.В. Смирнов*
Принципы управления процессом рождения инновационных идей 202

9. *Л.Ю. Грудцына, И.Ю. Мышкина*
Методика оценки бизнес-проектов самозанятости безработных граждан на основе иерархии нечетких критериев оптимальности 215

10. *Н.Г. Губанов, А.А. Кимлык*
Совершенствование систем управления принятием решений при проектировании объектов нефтегазовой отрасли 220

11. *Б.Г. Ильясов, А.Г. Карамзина, Ю.Р. Фазлетдинова*
Анализ многосвязных процессов обмена знаниями в научной школе 226

12. *М.Н. Кустова, В.А. Марин*
Теоретические предпосылки для разработки современной модели специалиста с высшим образованием 232

13. *О.В. Павлов*
Динамическая задача стимулирования с учетом эффекта кривой обучения 238

14. *В.В. Попков*
Двойственность и целостность экономических систем 244

15. *В.М. Рамзаев, В.Г. Чумак, И.Н. Хаймович*
Теория и практика современного управления конкурентоспособностью территорий с использованием интенсивных данных 252

16. *В.Г. Саркисов*
Коалиции инвесторов с несовпадающими предпочтениями: преимущества и проблемы реализации 257

17. *Л.С. Федосеева, И.М. Назаркина, Л.Ю. Пудовинникова*
Модель организации самостоятельной деятельности медицинской сестры – требование времени 262

18. *М.В. Цапенко, М.Ю. Лившиц*
Способ многокритериального оценивания системной эффективности инновационного потенциала региона 265

19. *Л.Л. Чекалов*
Взаимодействие текущей информации и памяти в процессе управления биологическими системами 275

Information Technologies in Control and Management Systems
Информационные технологии в управлении

1. *А.О. Алексеев, И.Е. Алексеева*
Имитационное моделирование поведения неоднородных агентов в мультиагентных системах (на примере инвестирования в рынок недвижимости) 287

2. *Н.А. Бленда, А.В. Мельников*
Кластеризация текстовых документов с использованием меры семантической близости термов в WordNet 304

3. *Г.П. Виноградов, Ю.А. Воронин, Б.Ф. Зюзин*
Самоорганизующиеся сетевые экспертные среды 311

4. *И.Д. Виноградов*
Интеграция онтологий с учетом динамики их развития 320

5. *Г.В. Горелова, А.Е. Колоденкова, В.В. Коробкин*
Построение комплексной оценки разработки информационно-управляющих систем на основе когнитивных моделей 326

6. *Д.Н. Демьянов*
Интеллектуальный алгоритм оценки сложности продольного профиля автомобильной трассы 332

7. *А.Я. Дмитриев, Т.А. Митрошкина*
Онтология проектирования качества продукции на основе метода MTQFD 338

8. *Ю.И. Еременко, Д.А. Полещенко, А.И. Глущенко*
О влиянии динамики объекта управления на расчетные значения задержек входных каналов нейросетевого оптимизатора параметров пи-регулятора 347

9. *Б.Г. Ильясов, И.В. Дегтярева, Е.А. Макарова, Т.А. Ефтонова*
Система управления взаимодействием предприятий и банков на макроуровне на основе интеллектуальных технологий 354

10. *Т.В. Мальцева, Н.В. Молокова*
О компьютерной системе моделирования процессов нефтезагрязнения 363

11. *А.С. Рагузин, Н.Г. Губанов*
Методы моделирования системных задач при построении системы синхронизации времени региональной электросетевой компании 370

12. *А.А. Родькин*
Управление автоматизированным мобильным объектом в условиях неопределенности внешней среды 376

13. *В.А. Семёнова, В.С. Смирнов, С.В. Смирнов*
OntoWorker: программная лаборатория для онтологического анализа данных 382

14. *И.А. Степановская*
Управляющие системы и технологии для кибер-физических систем 394

16. *Л.Р. Черняховская, И.П. Владимирова, А.И. Малахова*
Синергетические эффекты в управлении взаимодействием деловых процессов на основе менеджмента качества и обработки знаний 406

17. *Л.Р. Черняховская, В.Е. Гвоздев, А.Ф. Галиуллина, А.И. Малахова, Н.И. Ровнейко*
Управление реализацией инновационных проектов на основе методов интеллектуальной поддержки принятия решений 414

Theory of Optimal Control and its Applications
Теория оптимального управления и её приложения

1. *B. Nacke, J. Neumeyer, H. Schülbe*
Control of induction assisted hybrid-welding processes to join heavy-walled steel components 421

2. *Yu. Pleshivtseva, E. Rapoport, B. Nacke, A. Nikanorov*
Multi-objective optimization of induction heaters design: problem solution by means of alternance method 427

3. *D. Schlesselmann, B. Nacke, A. Nikanorov*
Calculation and optimization of temperature and microstructure in induction surface hardening 433

4. *А.В. Банникова, А.В. Медведев*
О непараметрических алгоритмах управления динамической системой 439

5. *В.Б. Демидович, И.И. Растворова, М.Ю. Хацаюк*
Исследования и моделирование безтигельной индукционной плавки титановых сплавов 445

6. *Н.В. Коплярова, А.В. Медведев, Е.А. Чжан*
Об алгоритмах оптимизации технологического процесса производства электрорадиозделий 454

7. *В.А. Кубышкин, С.С. Постнов, Е.А. Постнова*
Оптимальное управление линейными системами нецелого порядка на основе метода моментов 460

8. *В.И. Меркулов, Д.А. Миляков, И.О. Самодов*
Коллективное управление беспилотными летательными аппаратами в составе локальной сети 472

9. *В.И. Меркулов, П.А. Садовский*
Многоцелевое сопровождение в двухдиапазонных радиолокационных системах 475

10. *Э.Я. Рапопорт*
Минимаксная оптимизация программного управления с обратными связями в неполностью определенных системах с распределенными параметрами 481

11. *А.Б. Филимонов, Н.Б. Филимонов*
Методология линейно-квадратичной оптимизации в задачах синтеза следящих систем 491

Ergatic Systems and Technogenic Medium
Эргатические системы и техногенные среды

1. *А.З. Асанов, Д.Х. Валеев, А.С. Савинков*
Архитектура бортовой информационно-управляющей системы автономного транспортного комплекса 503

2. *Б.Н. Герасимов*
Игровые методы в управлении организацией 508

3. *В.Н. Евдокименков, Р.В. Ким, А.Б. Векшина*
Индивидуально-адаптированная нейросетевая модель управляющих действий летчика на этапе посадки 515

4. *Б.И. Крючков, А.А. Карпов, В.М. Усов*
Организация речевого взаимодействия человека-оператора с антропоморфным мобильным роботом для ведения пространственной ориентировки в условиях невесомости 522

5. *А.Ю.Нестеров*
Третья природа: субъективность в техническом сознании 528

6. *С.Ф. Сергеев*
Человек в техногенном мире: проблемы воплощения, взаимодействия и интеграции 531

7. *Я.А. Туровский, С.Д. Кургалин, А.А. Вахтин, С.В. Борзунов*
Альтернативные человеко-машинные интерфейсы: гибридизация интеллекта 539

Control in Complex Technical Systems
Управление в сложных технических системах

1. *A.V. Utkin, D.V. Krasnov*
Tracking problem in nonlinear SISO–systems under disturbances within the restrictions on state variables and control 547

2. *А.З. Асанов, В.С. Каримов*
Синтез квазиадаптивной системы автоматического управления с эталонной моделью для многосвязного объекта с запаздываниями по выходу 555

3. *А.В. Ванин, Е.М. Воронов, А.А. Карпунин, К.К. Любавский*
Реализация сложной двухуровневой системы «наведение-стабилизация» летательного аппарата на основе учета параметрических взаимосвязей подсистем и предварительной адаптации системы стабилизации по наведению 561

4. *И.А. Васильев, Д.А. Вохминцев*
Автономное управление подводным аппаратом для маневрирования в стеснённых условиях 571

5. *О.О. Власова*
Управление неустойчивым процессом горения в ракете на твердом топливе 577

6. *А.В. Волынская, И.В. Сапожников*
Применение адаптивного накопления сигналов для повышения надежности PLC-R канала управления локомотивом 583

7. *В.Е. Гвоздев, Д.В. Блинова*
Концептуальные основы анализа дефектов функциональной безопасности АПК 590

8. *В.А. Жмудь, Л. В. Димитров*
Многоканальное ресурсосберегающее управление единственной выходной величиной: целесообразность, проблемы, результаты 596

9. *О.А. Иванова, В.Ю. Попов, Д.Н. Сузанский, О.О. Царева*
Способ формирования поля желаемых траекторий движения сложной системы 604

10. *Б.Г. Ильясов, Г.А. Саитова, И.И. Сабитов*
Анализ нелинейных многосвязных систем автоматического управления с логическими регуляторами 609

11. *Н.В. Коплярова*
Непараметрические алгоритмы идентификации систем класса Винера 615

12. *С.А. Кочетков, Ю.М. Рассадин*
Синтез инвариантных систем на основе скользящих режимов второго рода при возмущениях, зависящих от состояния системы 621

13. *М.Ю. Лившиц, Е.А. Ларин, Л.П. Шелудько*
Маневренная блочная парогазовая установка для комбинированного энергоснабжения городских районов 627

14. *Ю.К. Машунин*
Моделирование технических систем в условиях определенности и неопределенности 635

15. *Е.Д. Михов, А.А. Корнеева*
Об Н-моделях безынерционных систем 647

16. *Е.Д. Михов, М.Е. Корнет*
О настройке непараметрических алгоритмов идентификации безынерционных систем 655

17. *Н.А. Сергеева, Е.А. Чжан*
Алгоритмы генерации рабочей выборки при решении задачи идентификации многомерных процессов 661

18. *В.Е. Юрин*
Разработка бортовых алгоритмов управления переориентацией космического аппарата дистанционного зондирования земли 667

Measuring, Control and Diagnostics in Extreme Conditions
Измерения, контроль и диагностика в экстремальных условиях

1. *В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, П.Е. Подлипнов*
Предварительная обработка данных кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы на основе адаптивного алгоритма 677

2. *В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова*
Определение экстремума функции изменения кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы 679

3. *В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, П.Е. Подлипнов*
О повышении производительности системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток 681

4. *С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, П.Е. Подлипнов, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев*
Метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и результаты его исследований 683

5. *С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, П.Е. Подлипнов, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев*
Моделирование и экспериментальные исследования переходных процессов в одновитковом вихретоковом датчике 685

6. *С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, П.Е. Подлипнов, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев*
Сравнение результатов моделирования и экспериментальных исследований измерительной цепи с одновитковыми вихретоковыми датчиками 687

7. *В.И. Батищев, И.И. Волков, А.Г. Золин*
Синтез двумерных обратных фильтров для решения задач восстановления изображений 690

8. *О.А. Булыно, Д.В. Скворцов, Н.А. Сергеева*
О задаче группировки результатов испытаний в системе диагностики надежности электрорадиоизделий 694

9. *М.А. Габидулин, П.А. Тупиков*
Синтез и анализ погрешностей адаптивного корректора сигналов синусно-косинусного преобразователя перемещений 701

10. *А.М. Грузликов, Н.В. Колесов, М.В. Толмачева*
Оптимизация дискретно-событийной диагностической модели распределенной системы реального времени 709

11. *Б.К. Райков, П.Е. Подлипнов*
Экспериментальные исследования влияния соседних лопаток сложной формы на функции преобразования и его уменьшение 715

Plenary Papers
Пленарные доклады

SELF- MANAGEMENT IN THE EMERGING GLOBAL SOCIETY

George Rzevski
Professor Emeritus, Complexity Science and Design Group, The Open University, UK
3 Ashbourne Close, London W5 3EF, UK
www.rzevski.net; george@rzevski.net
Tel: +44 7525 746 106

Ключевые слова: *Complexity, Management, Global Society, Self-Organisation, Self-Management*

Abstract
As the rapid development of digital technology caused a step-wise increase in complexity of our socioeconomic environment, it became obvious that we are evolving towards a richly interconnected, complex global society and no nation or any other constituent element of this Global Village will be able to exist and prosper independently. Also, there is ample evidence that under new conditions traditional management approaches are not longer effective. Complex political, administrative and business organisations are capable of self-organisation and therefore they can adapt to changes in their environments without any external management intervention. Does self-organisation inevitably lead to self-management?

Introduction

Complexity is an inherent property of many systems that constitute the environment in which we live and work, namely, ecological, biological, thermodynamic and social systems (including political, administrative, economic, business and socio-technical systems). Until recently levels of complexity of social systems were low and consequently complexity was largely ignored. However, with the rapid development of digital technology the situation has changed, particularly when the Internet transformed the world into a "global village" and linked regional and national markets into a single "global market".

Many researchers have contributed to the understanding of complexity, notably Prigogine [1, 2], Kaufman [3], Holland [4] and many others. As always at the onset of a paradigm shift there are several competing "schools" of complexity science.

This paper is based on pioneering work on developing experimental science and art of Managing Complexity [5] but it goes beyond that and asks a question: Will self-organisation inevitably lead to self-management?

Let us start by reviewing the definition of complexity, re-examining the demarcation between deterministic, random and complex systems and revisiting the co-evolution of technology, economy and society.

What is complexity?

Complexity is a property of open systems that consist of a large number of diverse, interacting components, often called agents. Complex systems can be distinguished from other systems by the seven features: connectivity, autonomy of agents, emergent behaviour, nonequilibrium, nonlinearity, self-organisation and co-evolution.

Connectivity - Agents are interconnected. Complexity of the system increases with the number of links that connect agents to each other. Complexity also depends on the strengths of links. The

weaker the links between agents, the easier is to break them and form new ones, which increases system complexity.

Autonomy of Agents - Agents have certain freedom of behaviour (autonomy), which is always limited by norms, rules, regulations, and/or laws. The increase in autonomy of agents increases complexity and if all constraints on agent behaviour are removed the system switches from complex to random behaviour. Inversely, if autonomy of agents is reduced (by tightening of laws and regulations), the system complexity will decrease, and in the extreme, the system will become deterministic. Complex systems have no central control.

Emergent Behaviour - Behaviour of complex systems emerges from the interactions of agents and is not predictable and yet it is not random. Uncertainty about the outcome of agent interactions is always between 0 and 1.

N**onequilibrium** - Complex systems are subjected to perpetual change experienced either as a succession of discrete disruptive events or as a slow, imperceptible drift into failure. Frequency of disruptive events varies with complexity. In systems of high complexity disruptive events occur so frequently that the system has no time to return to stable equilibrium before the next disruption occurs. When complexity levels are very high the system is said to be at the edge of chaos because the uncertainty of behaviour is close to 1.

Nonlinearity - Relations between agents are nonlinear. Nonlinearity may amplify a small, insignificant disruptive event and cause a catastrophic outcome (an extreme event), the property called butterfly effect. Butterfly effect increases with complexity. In complex systems outcomes are, as a rule, consequences of numerous interacting causes, and therefore the cause-effect analysis is inappropriate.

Self-organisation - Complex systems have a propensity to react to disruptive events by autonomously self-organising with the aim of eliminating or, at least, reducing consequences of the disruption, the property called adaptation. Self-organisation may be also caused autonomously by a propensity to improve own performance, the property called creativity or innovation. To initiate and perform adaptive and creative activities the system must be intelligent. Intelligence, adaptation and creativity are properties exclusive to complex systems and their levels increase with complexity.

Co-evolution – With time, complex systems co-evolve with their environments. Co-evolution is irreversible.

Complex versus Deterministic and Random Systems

The term deterministic implies that uncertainty is equal to zero, whilst the term random means that uncertainty is equal to one. Complex Systems have uncertainty value between zero and one. Low complexity systems have uncertainty close to 0 and their behaviour differs little from the behaviour of deterministic systems. Highly complex systems with uncertainty close to 1 are “at the edge of chaos” and their behaviour is characterised by features such as self-organisation, generation of unpredictable extreme events and co-evolution.

The distinction between complex and deterministic systems is very important and has philosophical repercussions. For centuries eminent philosophers and scientists have believed that the world is deterministic – that it behaves in accordance with natural laws in a predictable manner and that any uncertainty of outcomes is a result of our lack of knowledge how the world works. In other words, for supporters of determinism the world is complex only for those who do not understand it.

A more plausible alternative view has been put forward recently by Prigogine [1, 2]. The world is inherently complex and it evolves with time. Future is not given; it emerges from the interaction of billions of activities performed by constituent agents, including people, animals, plants as well as natural forces such as climate, erosion, volcanic eruptions, and solar spots. Only certain limited parts of the world can be represented by deterministic models, such as Newton\s laws.

Co-Evolution of Technology, Economy and Society

Historically, complexity of social and economic systems increased in steps, driven by the advances in technology and at each step the impact on the way we live and work was dramatic.

During the transition between the agricultural and the industrial societies the rapid migration of the population from the countryside to the cities, to take advantage of new employment opportunities, increased the social connectivity in the increasingly dense cities and, as a result, raised the level of social complexity. The massive movement of population caused well-documented disturbances as a rigid, traditional social order based on land ownership was replaced by a chaotic transition, which then settled into a new social order based on ownership of capital.

The current transition from the industrial to the information society, which began after the end of the World War 2 with the invention of computers, is particularly notorious by the very steep increase in social complexity caused by the rapid spread of digital technology, which offers unparalleled social connectivity (social density) but this time without any need for the population to move. Now we can form communities of interests across the globe. Distances do not matter anymore.

Thanks to digital technology, participants in the information society interact faster, more frequently and with greater number of correspondents than ever before. In the year 2013 approx. 3 billion people have used the Internet, which is more than 40% of the total number of people on the planet and, according to the Time News Feed, up to 6 billion people had access to a mobile phone. An astonishing increase in connectivity causing an accelerated growth of complexity.

As connectivity increased we have experienced a very important shift from nation-centred industrial markets to the global economy dominated by knowledge-based services. In the industrial economy money could buy any knowledge needed for business. In the knowledge economy the knowledge how to solve complex problems can attract investments that are required to start and sustain an economic activity. Pioneers of the knowledge economy, founders of knowledge-based companies such as Apple, Google, Amazon, Microsoft and Facebook, are the new economic elite. The shift of mass manufacturing from the developed to the developing countries is a part and parcel of globalisation. However, the replacement of mass manufacturing by knowledge-based services as the main wealth creation activity occurred only in the countries where there exists expertise in advanced IT and a large number of high-class knowledge workers: researchers, designers and decision makers in financial services, IT, engineering, consulting, construction, architecture, entertainment, media, etc.

Big monolithic corporations are the product of the Industrial economy, which was characterised by stable markets generating steady demands for identical, mass produced goods. Big corporations were designed to be rigid and permanent and they thrived in the era when the Economy of Scale was the key success factor. The new complex global market is the enemy of anything big and rigid. The new critical success factor is Adaptability and therefore we can safely assume that large corporations will not have an easy future, with the exception of those that manufacture uniform products exemplified by nappies or nuts and bolts.

However, big corporations have a remarkable ability to survive and many will re-invent themselves and continue in a more appropriate format. The organisational structure that is the most suitable for delivering to perpetually changing markets is a network of self-contained production units, each having a unique expertise (knowledge resource), often referred to as Virtual or Digital Enterprise.

The concentration of data on financial transactions, on communication with friends and business associates, and on individual mobility in huge “clouds”, by organisations such as Google, raises important questions on individual privacy. It is only natural to expect that those who have knowledge about us will try to use this knowledge to manipulate our behaviour. Knowledge is power. Who will exercise this power acquired by accumulation of digital data about every aspect of our life? Will a private company (possibly in collusion with a government intelligence service) manage to acquire

sufficient quantity of data to establish monopoly of knowledge? Or, can we expect that the process of natural selection will ensure the distribution of knowledge? It is safe to be an optimist. Evolution favours complexity, which implies diversity and distributed decision making rather than centralisation, although the process is slow and by no means smooth.

Fig. 1 shows the emerging global network as all texts, images and videos/films are digitised (the Internet of Documents), more and more people are connecting through mobile devices and the Internet (the Internet of People) and objects of practical importance to humans are furnished with electronic tags enabling them to communicate with each other bypassing their users (the Internet of Things).

Fig. 1 Global Network supporting Global Village

Co-Evolution of Nations, Regions, Cities, Businesses and Social Organisations and their Environment

In a richly interconnected, complex world, which is slowly but inevitably becoming the Global Village, no nation, region, city, corporation or business, big or small, can exist, operate and grow independently. The pull from the other Global Villagers to participate and share is too strong to resist. Co-evolution of constituent agents and their environment leads to the truly global, complex society, which is a dynamic ever-changing network of organisations and individuals rather than a monolithic giant.

Figure 2 illustrates co-evolution of technology, economy and society within every constituent unit of the global village, combined with the co-evolution of constituent units and the global whole.

Society invests into technological innovation; new technology affects the exchange of products and services, which in turn changes society. This process takes place within a nation and between nations, perpetually increasing global connectivity and, consequently, global complexity.

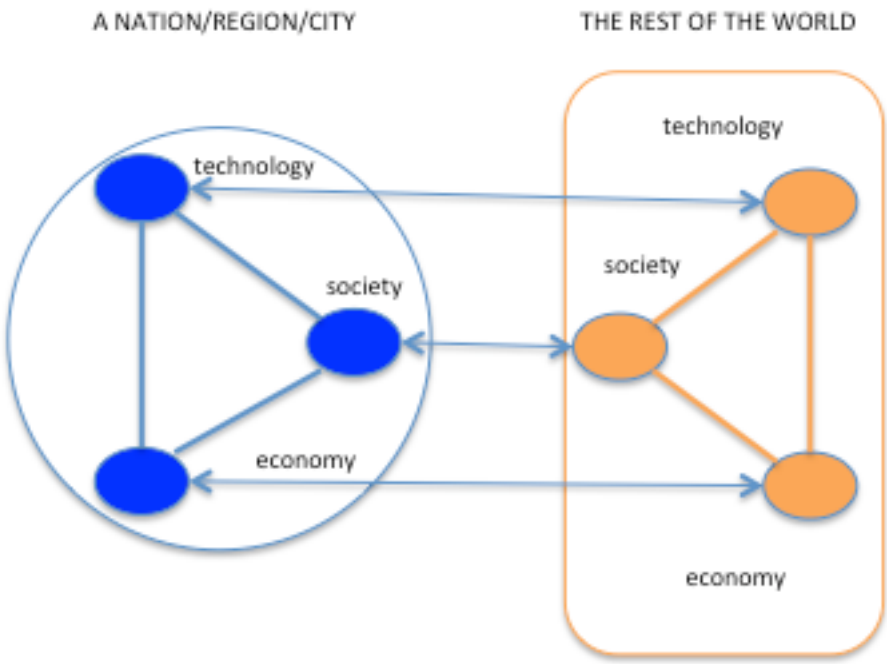


Fig. 2 Co-evolution of organisations and their technological, economic and social environments

Surviving and Prospering in a Complex World

Many of us have been brought up in Newtonian deterministic tradition and feel comfortable in well-defined stable situations. We crave simplicity and predictability. As it happens, complexity of the environment in which we live and work is relentlessly increasing and it now intrudes into every aspect of our existence. The increase in complexity is disruptive; by making our well-established systems and processes ineffective, it forces paradigm shifts *opening up opportunities for creating a new order in society, politics, law, policy, education, research, business, design, engineering and elsewhere.*

To take advantage of new opportunities it is necessary for individuals and organisations to develop the so called "complexity mindset", which, in a nutshell, consists of believes, principles and methods that define the relation between an individual or an organisation and the ever changing world to which they will have to adapt. A new scientific discipline entitled Managing Complexity contains a growing collection of concepts, principles and methods for successfully living and working under conditions of complexity [5]. Some of the key concepts and principles are briefly outlined below.

By definition we don't have control over our environment and therefore we cannot control its complexity. The best strategy for coping with external complexity is to develop capacity for adaptation, which implies designing complexity into our processes and structures remembering that only complex systems can self-organise and adapt.

Adaptability is the most important success factor in the new reality. To be adaptive means to be able to achieve desired goals under conditions of frequent occurrence of unpredictable disruptive events, which are a hallmark of complexity. Adaptability is achieved by rescheduling affected resources to eliminate or, at least, to reduce consequences of a disruptive event before the next one occurs.

Key requirements for adaptability are:

- Distributed rather than centralised decision making
- A sufficient redundancy of resources to enable unpredictable rescheduling
- Availability of technology capable of
  - Early detection of disruptive events
  - Real-time rescheduling of affected resources
  - Continuous improvement of performance to avoid a drift into failure

It goes without saying that to be adaptive an organisation must be complex. And perhaps the most difficult shift in our worldview that we have to make is to accept that complexity can be very useful. There is a well-developed science and art of designing complex adaptive systems. This is largely a trial-and-error process, informed by experience in designing and managing large-scale complex adaptive systems, as described in some detail in [5]. It is sufficient here to note that the level of complexity of systems/organisations, which we design or control, can be adjusted by changing autonomy of constituent agents and agent connectivity. Increasing agent autonomy and connectivity will increase organisational complexity and consequently its adaptability.

Complexity and Management

Management of a social system (a business, an administration, a city, a region or a nation), is concerned primarily with determining goals and then obtaining and allocating required resources to achieve these goals. Resources required for achieving social, political, administrative, or business goals, change with time (see above). In the 21st century key resources are:

- Knowledge
- Capital
- Human resources
- Physical resources

Traditionally, of course, there was always a division of labour – some worked, others managed – and that was true at all levels. At the national, regional or city levels the role of decision making (management) belonged to politicians and administrators, whilst professional managers managed businesses and social organisations.

But how do we manage a complex system, which self-organises when disturbed or when it detects that it drifts into a failure? The simple answer is: self-organising systems cannot be managed in a traditional sense because self-organisation is, in fact, self-management by stakeholders through a process of negotiation. Centralised, separate management hierarchy is incompatible with complexity.

The Concept of Self-Management

Every constituent agent (component) of a complex system has certain autonomy and therefore a power to decide, albeit in consultation with other affected agents, when and how to act. Contrary to the traditional "command and control" type of management, agents do not wait for instructions; they initiate consultation with other agents based on their observation of system behaviour [6].

Let us consider a case study of a very large taxi company in London [7], which operates in a highly complex traffic environment. The company purchased a multi-agent real-time scheduler for taxis capable of supporting devolution of many decisions to drivers, including: when to start and when to stop working, which assignment to accept and which to refuse and whether to ask for an ap-

propriate assignment on their way home at the end of their working day. The devolution of decision making, although modest, considerably increased profitability and improved motivation of drivers.

More case studies can be found in [5].

Conclusions

There are two important trends, which demand attention of politicians, administrators and managers. The first is the rapid increase in connectivity among political and social organisations, businesses and technology, which opens up new opportunities for improving prosperity of every nation, region, city and every commercial or social organisation. The second is the rapid decrease in effectiveness of conventional management methods under conditions of increased complexity of society, economy and technology and the slow but unstoppable acceptance of the new concept of self-management.

It is time to start developing complexity mindset.

References

[1] Prigogine, Ilya, "The End of Certainty: Time, Chaos and the new Laws of Nature". Free Press, 1997. ISBN 0-684-83705-6

[2] Prigogine, Ilya, "Is Future Given?" World Scientific Publishing Co., 2003. ISBN 981-238-508-8.

[3] Kaufman, S., "At Home In the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity". Oxford Press. 1995. ISBN 0-19-511130-3

[4] Holland, J., "Emergence: from Chaos to Order". Oxford University Press, ISBN 0-19-850409-8. 1998.

[5] Rzevski, G., Skobelev, P., "Managing Complexity, WIT Press, 2014. ISBN 978-1-84564-936-4.

[6] Rzevski, G. "Self-Organisation in Social Systems". Ontology of Designing. N 4 (14), 2014. ISSN 2223-9537, pp. 8-17.

[7] Glaschenko, A., Ivaschenko, A., Rzevski, G., Skobelev, P. "Multi-Agent Real Time Scheduling System for Taxi Companies". Proc. of 8th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2009), Decker, Sichman, Sierra, and Castelfranchi (eds.), May, 10–15, 2009, Budapest, Hungary. ISBN: 978-0-9817381-6-1, pp. 29-35.

МНОГОРЕЖИМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖУЩИМИСЯ ГРУППИРОВКАМИ

С.Н. Васильев[1], С.А. Ульянов[2]

[1]Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65, Россия
vassilyev_sn@ipu.ru
тел: +7 (495) 334-89-10, факс: +7 (495) 334-93-40

[2]Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия
sau@icc.ru
тел: +7 (3952) 45-30-85

Ключевые слова: *многорежимные формации, нелинейная динамика, многокомпонентные системы, вектор-функции Ляпунова*

Abstract

In the paper, a general mathematical model of multi-agent formations with decentralized multi-mode control is introduced. The desired dynamic behaviors of formation are formalized as dissipativity and practical stability properties. Unlike known definitions of the formation stability problem, the proposed formalizations take into account incompleteness of measurements of proper and relative agent's motions, control constraints, uncertainties and exogenous perturbation. On the basis of the vector Lyapunov functions, sufficient criteria for a set of the mentioned dynamical properties as a mission stability property are derived with some application to the multi-mode formation control design for autonomous underwater vehicles.

Введение

Рассматривается подход к управлению группировками (формациями), основанный на концепции «лидер-ведомый» [1]. Одной из важных проблем управления формациями движущихся объектов является обеспечение требуемой динамики при наличии навигационных и других ошибок измерительных устройств, ограничений на ресурсы управления и различного рода возмущений. Однако, в большинстве исследований (см., например, [2-8]) используются линейные модели, обычно предполагается доступность измерению всех переменных собственного движения объектов и, что особенно существенно, параметров движения относительно лидеров. Является актуальным по возможности полный учет реальных условий функционирования.

При выполнении сложной групповой миссии может изменяться также структура формации, например, вследствие совершения сложного маневра, предполагающего перестроение, выбытия или присоединения новых агентов, и поэтому система управления группой необходимо становится многорежимной, когда при смене режима, вообще говоря, могут изменяться и регулятор, и характеристики объекта управления. Желаемая динамика формации в различных режимах при этом может определяться разными динамическими свойствами, так или иначе, имеющих смысл устойчивости (асимптотической и практической устойчивости, диссипативности). При этом конечное состояние текущего режима должно находиться в рабочей области начальных состояний последующего, чтобы в дальнейшем обеспечивалась возможность «правильного» выполнения последнего, и для этого полезен «инструмент», позволяющий не только проверять наличие исследуемого динамического свойства в отдельно взятом режиме, но и оценивать количественно показатели динамического

качества, проверяя на их основе условия согласованности. В статье применяется метод анализа нелинейных систем, основанный на векторных функциях Ляпунова (ВФЛ) [9,11].

Адекватным описанием многорежимных систем управления являются системы с переключениями или гибридные системы, активно изучаемые в последнее время. Одним из основных аппаратов исследования устойчивости таких систем, являются общие функции Ляпунова, однако известные результаты применимы пока для анализа довольно узкого класса систем, преимущественно линейных. В литературе рассматриваются и нелинейные постановки, в частности, в [12] с помощью общих функций Ляпунова исследуется устойчивость обобщенно однородных нелинейных гибридных систем, но этот аппарат требует конструктивизации построения функций Ляпунова и оценок динамического качества.

В докладе даются математическая модель формации и определения ее желаемого поведения в условиях неполноты информации, ограничений на управления, погрешностей измерителей, исполнительных органов и др. элементов системы управления объектов, возможных структурных изменений, а также при наличии возмущений. Приводятся основанные на ВФЛ условия исследуемых свойств многокомпонентных каскадных систем с описанием технологии синтеза нелинейных систем управления с неопределенностями [13] и ее приложение к управлению группировкой объектов при обследовании плоской области.

1 Формализация желаемой динамики формаций

Пусть в каждом из режимов, требующих образования или поддержания конфигурации, отношения «лидер-ведомый» между объектами в формации является односторонними (лидер в каждой паре не может рассматриваться в той же паре как ведомый) и кроме того ни один объект не может быть ведомым в паре с объектом, для которого он опосредованно являлся лидером (ориентированный граф названного отношения не содержит замкнутых контуров). Тогда можно поведение группировки можно описывать следующей системой

$$
\begin{aligned}
&\dot{\mathrm{x}}_0^\sigma = f_0^\sigma(t,\mathrm{x}_0^\sigma,u_0^\sigma(t,\mathrm{x}_0^\sigma),p_0^\sigma(t,\mathrm{x}_0^\sigma)),\quad u_0^\sigma(\cdot)\in \mathrm{Y}_0^\sigma,\quad p_0^\sigma(\cdot)\in\Pi_0^\sigma,\\
&\dot{\mathrm{x}}_i^\sigma = f_i^\sigma(t,\mathrm{x}_i^\sigma,s_{J_i}^\sigma,u_i^\sigma,p_i^\sigma(t,\mathrm{x}^\sigma)),\qquad t\in T^\sigma\subseteq[0,\infty).
\end{aligned}
\tag{1}
$$

Здесь $\mathrm{x}_i^\sigma\in X_i^\sigma\subseteq R^{n_i^\sigma}$ – вектор состояния i-го объекта, $\mathrm{x}^\sigma\equiv\operatorname{col}_i\mathrm{x}_i^\sigma$ – полный вектор состояния системы, $\mathrm{x}^\sigma\in X^\sigma=\prod_{i=0}^{N^\sigma}X_i^\sigma$, $i=\overline{0,N^\sigma}$ (индекс 0 соответствует лидеру формации); $\sigma\in\Sigma$ – индекс режима функционирования, N^σ – число агентов формации (за исключением лидера) в режиме σ; для $i=\overline{1,N^\sigma}$ J_i^σ – номера лидеров для i-го объекта в режиме σ, $s_{J_i}^\sigma\equiv\operatorname{col}_{j\in J_i^\sigma}s_j^\sigma$, $s_i^\sigma=s_i^\sigma(\mathrm{x}_i^\sigma)$ – переменные i-го объекта, характеризующие его собственное движение (координаты, углы, скорости и др.); $u_i^\sigma=u_i^\sigma(t,z_i^\sigma,r_i^\sigma,p_{ui}^\sigma)$ – управление i-го объекта в режиме σ; $\mathrm{z}_i^\sigma=\mathrm{z}_i^\sigma(\mathrm{x}_i^\sigma)$ – вектор измерения состояния i-го объекта; $r_i^\sigma(s_i^\sigma,s_{J_i}^\sigma)$ – совокупность измеряемых переменных, определяющих взаимное относительное движение i-го объекта как ведомого и его лидеров; $p_{ui}^\sigma=p_{ui}^\sigma(t,\mathrm{z}_i^\sigma,r_i^\sigma)\in P_{ui}^\sigma$ – погрешности, нестабильность, неопределенности измерителей, исполнительных органов и других элементов системы управления i-го объекта; $p_i^\sigma(t,\mathrm{x}^\sigma)\in P_i^\sigma$ – неопределенности самого i-го объекта, внешние и иные возмущения; Y_0^σ – множество управлений лидера формации, задающее его допустимые маневры, являющиеся причиной непрерывного нарушения желаемой конфигурации, Π_0^σ – множество возмущений, действующих на лидера.

При сделанных предположениях о структуре формаций после подходящей нумерации объектов будет $J_i^\sigma \subseteq \{\overline{0,i-1}\}$ (в частности, $J_i^\sigma = \{j_i\}$ – singl, $j_i \in \{\overline{0,i-1}\}$, если объект как ведомый имеет лишь одного лидера; когда все J_i^σ одноэлементны, граф отношений «лидер-ведомый» имеет структуру дерева).

Можно выделить основные режимы: «сбор» группы; некоторый стационарный рабочий режим; перестроение, восстановление или образование новой конфигурации. В каждом из режимов желаемое поведение естественно формализовать либо как свойство диссипативности [14,15], либо практической устойчивости со своими требованиями к показателям, определяющим эти свойства. Например, к стабилизирующему управлению в зависимости от режима может предъявляться одно из следующих требований: 1) минимизировать ошибки стабилизации группы по завершении переходных процессов (рабочий режим); 2) при заданных требованиях к точности максимизировать область притяжения (образование формации); 3) за данный промежуток времени уменьшить конечные отклонения от желаемой конфигурации (промах) до требуемых значений (восстановление формации) и др. При смене режимов должна обеспечиваться их согласованность.

Для каждого режима σ введем оценочные функции $\rho_0^\sigma(t_0, \mathrm{x}^{0\sigma}) \in \overline{R}_+^{d_0\sigma}$, $\rho_c^\sigma(t, \mathrm{x}^\sigma) \in \overline{R}_+^{d_c\sigma}$ и $\rho_f^\sigma(t, \mathrm{x}^\sigma) \in \overline{R}_+^{d_f\sigma}$ как «меры» отклонения группы от желаемой конфигурации в начальный, текущий и финальные моменты времени соответственно. Тогда, полагая $P^\sigma = \mathrm{Y}_0^\sigma \times \Pi_0^\sigma \times \prod_{i=1}^{N^\sigma}(P_i^\sigma \times P_{ui}^\sigma)$, получим определение желаемого поведения формации на рабочих режимах в виде динамического свойства $(\rho_0^\sigma, \rho_c^\sigma, \rho_f^\sigma)$ - ***диссипативности*** (Δ^σ):

$$
\begin{array}{c}
\Delta^\sigma = \exists \delta^\sigma \in R_+^{d_0\sigma}(\delta^\sigma \pm \overline{\delta}^\sigma)\ \exists \beta^\sigma \in \overline{R}_+^{d_f\sigma}(\beta^{\sigma\circ}\ \overline{\beta}^\sigma)\ \exists \varepsilon^\sigma \in R_+^{d_c\sigma}(\varepsilon^{\sigma\circ}\ \overline{\varepsilon}^\sigma)\ \exists \tau^\sigma \geq 0\ (\tau^\sigma \leq \overline{\tau}^\sigma) \\
\forall t_0 \in T^{0\sigma}\quad \forall \mathrm{x}^{0\sigma} \in X^{0\sigma} : \rho_0^\sigma(t_0, \mathrm{x}^{0\sigma}) \leq \delta\quad \forall p^\sigma \in P^\sigma\quad \forall x^\sigma(\cdot, t_0, \mathrm{x}^{0\sigma}, p^\sigma) \\
\left[\forall t \in T_{t_0}\quad \rho_c^\sigma(t, x^\sigma(t,\ldots)) \leq \varepsilon^\sigma\quad \&\quad \forall t_f \geq t_0 + \tau^\sigma\quad \rho_f^\sigma(t_f, x^\sigma(t_f,\ldots)) \leq \beta^\sigma\right],
\end{array}
\tag{2}
$$

т.е. существует строго положительный вектор $\delta^\sigma \pm \overline{\delta}^\sigma$, такой что, если начальные отклонения формации по функции ρ_0^σ не превосходят δ^σ, то во все время движения текущие фазовые состояния по функции ρ_c^σ не превосходят координат вектора $\varepsilon^{\sigma\circ}\ \overline{\varepsilon}^\sigma$, а по функции ρ_f^σ за время не большее, чем τ^σ, попадают в «трубку точности», определяемую вектором $\beta^{\sigma\circ}\ \overline{\beta}^\sigma$, и далее не выходят из нее.

Здесь: $R_+^k \equiv \{\mathrm{y} \in R^k : \mathrm{y} > 0\}$, $\overline{R}_+^k \equiv \{\mathrm{y} \in R^k : \mathrm{y} \geq 0\}$, где R^k упорядочено покоординатным отношением частичного порядка; $T = [0, +\infty)$, $T^{0\sigma}$ – множество начальных моментов времени в режиме σ, $T_{t_0} \equiv [t_0, +\infty)$; $\pm$ – смешанное покоординатное отношение частичного порядка в R_+^k (например, строгое по одним координатам и нестрогое по другим). Фигурирующие в определении векторы $\overline{\beta}^\sigma \in \overline{R}_+^{d_f\sigma}$, $\overline{\varepsilon}^\sigma \in \overline{R}_+^{d_c\sigma}$, $\overline{\delta}^\sigma \in \overline{R}_+^{d_0\sigma}$ (некоторые компоненты их могут быть и бесконечными) задают количественные требования к оценкам точности, фазовые ограничения в рабочих режимах и требования к размерам области диссипативности $\mathsf{D}^\sigma(t_0)$ (множества начальных состояний $\mathrm{x}^0 \in X^{0\sigma}$ для данного $t_0 \in T^{0\sigma}$, при которых выполняется

вторая часть заключительного утверждения (2) свойства Δ^{σ}). Число $\bar{\tau}^{\sigma}$ определяет максимально допустимое время переходных процессов с $\rho_0^{\sigma}(t_0, \mathrm{x}^{0\sigma}) \le \delta^{\sigma}$.

Свойство Δ^{σ} охватывает и определение диссипативности, в котором заключительное утверждение из (2) заменено на следующее

$$(3) \qquad \left[\forall t \in T_{t_0} \quad \rho_c^{\sigma}(t, x^{\sigma}(t,...)) \le \varepsilon^{\sigma} \ \& \ \overline{\lim_{t\to\infty}} \rho_f^{\sigma}(t, x^{\sigma}(t,...)) \le \beta^{\sigma} \right],$$

причем предельное соотношение в (3) может считаться равномерным по $t_0, \mathrm{x}^{0\sigma}$.

При $\beta^{\sigma} = \bar{\beta}^{\sigma} = 0$ и возможности задавать $\varepsilon^{\sigma} = \bar{\varepsilon}^{\sigma}$ произвольно малым получается свойство $(\rho_0^{\sigma}, \rho_c^{\sigma}, \rho_f^{\sigma})$ - ***асимптотической устойчивости*** ($\mathrm{A}\Sigma^{\sigma}$), интересное для рабочих режимов, когда лидер формации стремится двигаться по предписанной стационарной траектории, лишь отрабатывая отклонения от нее, а возмущения на объекты, погрешности системы управления пренебрежимо малы, либо как предварительная задача при обеспечении диссипативности.

Свойство ***практической устойчивости***, требуемое для начальных и переходных режимов («сбор», перестроение, восстановление формации или реконфигурация), выполняемых на конечном отрезке времени $T^{\sigma} = [t_0^{\sigma}, t_f^{\sigma}]$, определяется как

$$(4) \qquad \begin{array}{c} \Pi\Sigma^{\sigma} = \exists \delta^{\sigma} \in R_+^{d_0\sigma} : \delta^{\sigma} \pm \bar{\delta}^{\sigma} \quad \exists \beta^{\sigma} \in \overline{R}_+^{d_f\sigma} : \beta^{\sigma\circ} \ \bar{\beta}^{\sigma} \quad \exists \varepsilon^{\sigma} \in R_+^{d_c\sigma} : \varepsilon^{\sigma\circ} \ \bar{\varepsilon}^{\sigma} \\ \forall t_0^{\sigma} \in T^{0\sigma} \quad \forall \mathrm{x}^{0\sigma} \in X^{0\sigma} : \rho_0^{\sigma}(t_0^{\sigma}, \mathrm{x}^{0\sigma}) \le \delta^{\sigma} \quad \forall p^{\sigma} \in P^{\sigma} \quad \forall x^{\sigma}(\cdot, t_0^{\sigma}, \mathrm{x}^{0\sigma}, p^{\sigma}) \\ \left[\forall t \in T^{\sigma} \ \rho_c^{\sigma}(t, x^{\sigma}(t,...)) \le \varepsilon^{\sigma} \ \ \& \ \ \rho_f^{\sigma}(t_f^{\sigma}, x^{\sigma}(t_f^{\sigma},...)) \le \beta^{\sigma} \right] \end{array}$$

т.е. равномерно относительно задания начального момента времени t_0^{σ}, если при $t = t_0^{\sigma}$ отклонения формации по функции ρ_0^{σ} ограничены сверху вектором $\delta^{\sigma} \in R_+^{d_0\sigma}$, не меньшим покоординатно, чем заданный вектор $\bar{\delta}^{\sigma}$, то в конечный момент времени t_f^{σ} они по функции ρ_f^{σ} ограничены вектором $\beta^{\sigma\circ} \ \bar{\beta}^{\sigma}$ и во все время движения T^{σ} текущие фазовые состояния по функции ρ_c^{σ} не превосходят вектора $\varepsilon^{\sigma\circ} \ \bar{\varepsilon}^{\sigma}$.

Формализуем теперь желаемое поведение формации при выполнении всей многорежимной миссии. Пусть в момент переключения режима состояния $x^{\varsigma}, x^{\sigma}$ в новом и старом режимах ς, σ связаны соотношением

$$(5) \qquad x^{\varsigma} = w_{\varsigma\sigma}(x^{\sigma}) \in X^{0\varsigma} \quad \forall x^{\sigma} \in X^{\sigma}.$$

Будем называть ***миссией*** М конечную или бесконечную последовательность $\{\sigma_j\}$ ($j = \overline{0, J}$, $J \le \infty$) режимов $\sigma_j \in \Sigma$, для каждого из которых движение описывается системой (1) и момент окончания $t_f^{\sigma_j}$ является начальным $t_0^{\sigma_{j+1}}$ для следующего.

При этом считается $t_0^{\sigma_{j+1}} \in T^{0\sigma+1}$. Если желаемым для режима σ_j является свойство $\Pi\Sigma^{\sigma_j}$, его продолжительность ϑ^{σ_j} полагается заданной ($\vartheta^{\sigma_j} = t_f^{\sigma_j} - t_0^{\sigma_j}$); если же таким свойством является диссипативность Δ^{σ_j}, то продолжительность ϑ^{σ_j} режима может быть сколь угодно большой (в т.ч. бесконечной, когда $j = J < \infty$), и во всяком случае

предполагается достаточной для того, чтобы система достигала требуемой точности β^{σ_j} из (2), т.е. $\vartheta^{\sigma_j} \geq \tau^{\sigma_j}$.

Обозначим P^{σ} то из свойств Δ^{σ} или $\Pi\Sigma^{\sigma}$, которое требуется в режиме σ. Естественно считать миссию M успешной (устойчивой), если для каждого ее режима σ_j имеет место нужное свойство P^{σ_j} и переключения таковы, что при переходе на следующий $(j+1)$-й режим система оказывается для него в начальном состоянии, допустимом требованиями свойства $\mathsf{P}^{\sigma_{j+1}}$. В соответствии с (5) и формулами свойств Δ^{σ}, $\Pi\Sigma^{\sigma}$ для этого достаточно в их заключительные утверждения (2), (4) добавить

$$\& \ (\rho_0^{\sigma_j}(t_0^{\sigma_{j+1}}, w_{\sigma_{j+1}\sigma_j}(x^{\sigma_j}(t_f^{\sigma_j},...))) \leq \delta^{\sigma_{j+1}}).$$

Получаемые после такого добавления формулы будем обозначать $\mathsf{P}^{\sigma_j^{j+1}}$.

Свойство ***устойчивости миссии*** ($M\Sigma$) определяется тогда следующим образом

(6) $\quad M\Sigma = \mathsf{P}^{\sigma_0^1} \& \mathsf{P}^{\sigma_1^2} \& \ldots \mathsf{P}^{\sigma_{J-1}^J} \& \mathsf{P}^{\sigma_J}$ при $J < \infty$; $M\Sigma = \&_{j=0}^{\infty} \mathsf{P}^{\sigma_J^{J+1}}$ при $J = \infty$.

3 Исследование динамики формаций методом ВФЛ

В прикладных исследованиях важно не только иметь возможность проверки наличия желаемых свойств, но и вычислять количественные оценки динамических показателей, характеризующих эти свойства. Для многорежимных формаций эти оценки оказываются востребованными также при проверке условий согласованности режимов. Предлагается применять метод, основанный на использовании ВФЛ, хорошо зарекомендовавший себя в многочисленных приложениях [9-11], особенно в области космической техники [16,17].

С использованием результатов этих работ и результатов по качественной теории квазимонотонных дифференциальных уравнений [18] здесь получаются теоремы о достаточных условиях изучаемых свойств диссипативности, асимптотической и практической устойчивости для многокомпонентных систем с каскадной (треугольной) структурой связей объектов

(7) $\quad \dot{\mathrm{x}}_i = F_i(t, \mathrm{x}, p_i) = F_i(t, \mathrm{x}_i, \overline{\mathrm{x}}_i, p_i), \qquad t \in T,$

где $\mathrm{x}_i \in X_i \subseteq R^{n_i}$, $p_i \in P_i$, $\mathrm{x}_i^0 \in X_i^0 \subseteq X_i$, $\mathrm{x} \equiv \mathrm{col}\, \mathrm{x}_i \in X = \prod X_i \subseteq R^n$, $i = \overline{1,N}$, $\overline{\mathrm{x}}_i \equiv \underset{j \in J_i}{\mathrm{col}}\, \mathrm{x}_j$, $J_i \subseteq \overline{\{1, i-1\}}$ – множество индексов подсистем, связанных с i-ой, $J_1 \equiv \varnothing$, $T = [0, \infty)$ или $T = [t_0, t_f]$. Индекс режима σ здесь и далее для краткости опускается.

Введем некоторые обозначения. Пусть $g(t, \mathrm{y})$ – квазимонотонно неубывающая [9,10,18], полунепрерывная сверху по y, измеримая по t и интегрально ограниченная в компактах функция $T_c \times \overline{R}_+^k \to R^k$ такая, что $g(t, \mathrm{y}) = \underset{i=\overline{1,N}}{\mathrm{col}}\, g_i(t, \mathrm{y}_i, \overline{\mathrm{y}}_i)$, где $T_c = T$ или $T_c = [0, t_f - t_0]$, $\mathrm{y} = \underset{i=1,N}{\mathrm{col}}\, \mathrm{y}_i, \mathrm{y}_i \in \overline{R}_+^{k_i}, k = \sum k_i$, $\overline{\mathrm{y}}_i \equiv \underset{j \in J_i}{\mathrm{col}}\, \mathrm{y}_j$; $g(t, 0) \geq 0$. Согласно результатам из [10,18] система ОП-решений уравнения $\dot{\mathrm{y}} = g(t, \mathrm{y})$ может использоваться как система сравнения (СС).

Обозначим: $g^\tau(\mathrm{y}) \equiv \overline{\lim_{\mathrm{y}'\to\mathrm{y}}} \sup_{t\ge\tau} g(t,\mathrm{y}')$, $\Omega^\tau \equiv \left\{\mathrm{y}\in \overline{R}_+^k : g^\tau(\mathrm{y})=0\right\}$, $\tau \in T = [0,\infty)$;

$g^\infty(\mathrm{y}) \equiv \lim_{\tau\to\infty} g^\tau(\mathrm{y})$, $\Omega^\infty \equiv \left\{\mathrm{y}\in \overline{R}_+^k : g^\infty(\mathrm{y})=0\right\}$; $E_i^\tau(\mathrm{z}) \equiv \left\{\mathrm{y}_i \ge \mathrm{z}_i : g_i^\tau(\mathrm{y}_i,\bar{\mathrm{z}}_i)<0\right\}$,

$E_i^\infty(\mathrm{z}) \equiv \left\{\mathrm{y}_i \ge \mathrm{z}_i : g_i^\infty(\mathrm{y}_i,\bar{\mathrm{z}}_i)<0\right\}$; $K_i(\mathrm{z}) \equiv \left\{\mathrm{y}_i \ge \mathrm{z}_i : \forall\lambda\in(0,1]\ \ \phi_i(\lambda,\mathrm{y}_i,\mathrm{z}_i)\in E_i^0(\mathrm{z})\right\}$.

Здесь $\mathrm{z} = \underset{i=1,N}{\mathrm{col}}\,\mathrm{z}_i \in \overline{R}_+^k$, $\phi_i(\lambda,\mathrm{y}_i,\mathrm{z}_i)$ – непрерывная, неубывающая по $\lambda\in[0,1]$ функция такая, что $\phi_i(0,\mathrm{y}_i,\mathrm{z}_i)=\mathrm{z}_i$, $\phi_i(1,\mathrm{y}_i,\mathrm{z}_i)=\mathrm{y}_i$ (например, $\phi_i = \mathrm{z}_i + \lambda(\mathrm{y}_i-\mathrm{z}_i)$).

Теорема 1 (о (ρ_0,ρ_c,ρ_f)-диссипативности). *Пусть существуют непрерывные, локально липшицевые по* x_i *вектор-функции* $v_i(t,\mathrm{x}_i): T\times X_i \to \overline{R}_+^{k_i}$, *удовлетворяющие* $\forall i=\overline{1,N}$ *условиям*

1) $v_i(t_0,\mathrm{x}_i^0) \le a_i(\rho_0(t_0,\mathrm{x}^0))\quad \forall t_0\in T_0,\ \forall \mathrm{x}^0\in X^0$;

2) $\rho_c(t,\mathrm{x}) \le b_c(v(t,\mathrm{x})),\ \rho_f(t,\mathrm{x}) \le b_f(v(t,\mathrm{x}))\ \ \forall t\in T,\ \forall \mathrm{x}\in X,$ *где* a_i, b_c, b_f *– неубывающие неотрицательные функции,* $\lim_{r\to 0} a_i(r)=0$; $v(t,\mathrm{x}) \equiv \underset{i=1,N}{\mathrm{col}}\, v_i(t,\mathrm{x}_i)$;

3) $v_i'(t,\mathrm{x},p) \equiv \overline{\lim_{\Delta t\to 0_+}} \frac{1}{\Delta t}\left(v_i(t+\Delta t,\mathrm{x}_i+\Delta t\,F_i(t,\mathrm{x},p_i)) - v_i(t,\mathrm{x}_i)\right) \le g_i(t-t_0,v(t,\mathrm{x}))$

$\forall t_0\in T_0,\ \forall t,\mathrm{x},p_i \in T_{t_0}\times X\times P_i$;

4) *существует точка* $z\in\Omega^0$, *для которой* $\forall i=\overline{1,N}$ *множества* $K_i^0(\mathrm{z})$ *не пусты, для чего в случае, когда функции* $g_i^0(\mathrm{y}_i,\bar{\mathrm{z}}_i)$ *субдифференцируемы по* y_i *в точке* z_i *(в частности, выпуклы), достаточно, чтобы позитивные матрицы* $G_i(\mathrm{z})$ *с элементами* $g_i^{\mu\nu} = (g_i^{0\mu})'(\mathrm{z}_i,e^\nu)$, $\mu,\nu=\overline{1,k_i}$, *где* $(g_i^{0\mu})'(\mathrm{z}_i,e_i^\nu)$ *– производная* μ*-той компоненты* $g_i^{0\mu}$ *в точке* z_i *по направлению координатного орта* e_i^ν *в* R^{k_i}, *были гурвицевыми.*

Тогда система (7) обладает свойством диссипативности Δ.

Условия 1), 2) сводят задачу к анализу диссипативности в СС, что в свою очередь, проводится по аналогии с доказательствами теорем 2.3, 2.5 и следствий 2.1, 2.3 из [18].

В отличие от теоремы о диссипативности из работы [14] сформулированная теорема, учитывающая каскадную структуру связей подсистем, является существенно более удобной для практического использования. Во-первых, в ней упрощается выбор ВФЛ, поскольку локальные ВФЛ $v_i(t,\mathrm{x}_i)$ могут теперь для каждой подсистемы строиться независимо, а во-вторых, проверка основного условия 4), обеспечивающего диссипативность системы сравнения, после отыскания точки z, как минимального решения системы $g^0(\mathrm{y})=0$, тоже может осуществляться независимо для каждой k_i-мерной подсистемы $\dot{\mathrm{y}}_i = g_i(t,\mathrm{y}_i,\bar{\mathrm{z}}_i)$.

Теорема 2 (об оценках в свойстве диссипативности). *В условиях теоремы 1 в качестве оценки* β *«предельных состояний» по функции* ρ_f *(оценки предельной точности в заключительном утверждении вида (3)) можно принять вектор* $\beta = b_f(\eta)$, *где* $\eta\in\Omega^\infty$, $\eta = \underset{i=1,N}{\mathrm{col}}\,\eta_i \le z$, $\eta_i = \mathbf{inf}\, K_i^\infty(\mathrm{h})$, $K_i^\infty(\mathrm{h})$ *– связные множества в* $E_i^\infty(\mathrm{h})$, *содержащие* $K_i(\mathrm{z})$ *(такая точка* η *при условии 4) всегда существует).*

В качестве внутренней оценки области диссипативности $\mathsf{D}(t_0)$ *по функции* ρ_0 *можно взять «параллелепипед»* $\Pi^{\delta}(t_0) \equiv \{\mathrm{x}^0 \in X^0 : \rho_0(t_0, \mathrm{x}^0) \le \delta\}$, *где* $\delta \in R_+^{d_0}$ *– любой вектор такой, что при некотором* $\mathrm{y}^0 \ge a(\delta) \equiv \underset{i=1,N}{\mathrm{col}}\, a_i(\delta)$ *для верхнего решения* $y^*(t)$ *уравнения* $\dot{\mathrm{y}} = g^0(\mathrm{y})$ *с* $y^*(0) = \mathrm{y}^0$ *в какой-то момент времени* $t^* \ge 0$ *будет* $y^*(t^*) \in K(\mathrm{z}) \equiv \prod_{i=1}^{N} K_i(\mathrm{z})$ *(в частности,* $\mathrm{y}^0 \in K(\mathrm{z})$*).*

Для всех процессов с $\rho_0(t_0, \mathrm{x}^0) \le \delta$ *на всем промежутке* T_{t_0} *оценкой по* ρ_c *служит вектор* $\varepsilon = b_c(\underset{t\in[0,t^*]}{\max} y^*(t))$, *а более точно – функция* $\varepsilon^*(t - t_0) = b_c(\hat{y}(t))$, *где* $\hat{y}(t)$ *– верхнее решение СС* $\dot{\mathrm{y}} = g(t, \mathrm{y})$ *с* $\hat{y}(0) = \mathrm{y}^0$; *время достижения заданной точности* $\beta^* > \beta$ *(времени* τ^*, *для которого* $\rho_f(t, x(t,...)) \le \beta^*$ *при* $t \ge t_0 + \tau^*$*) не превышает значения* $\tau^* \ge t^*$ *такого, что* $b_f(\hat{y}(\tau^*)) \le \beta^*$.

Возможность эффективного нахождения всех количественных оценок показателей, определяющих диссипативность, очевидно, позволяет применить теорему и для вариантов этого свойства с заданными требованиями на оценку точности, фазовые ограничения или (и) на внутреннюю оценку области диссипативности. Последнее утверждение теоремы позволяет проверить выполнение ограничения на время переходных процессов в варианте свойства D с заключительным утверждением (2).

Как следствие получаются достаточные условия асимптотической устойчивости.

Теорема 3 (о $(\rho_0, \rho_c, \rho_f) - \mathrm{A}\Sigma$). *Пусть существуют вектор-функции* $v_i(t, \mathrm{x}_i)$, *удовлетворяющие условиям 1) - 3) теоремы 1, а также условию*

4) $g_i(t,0,0) = 0$ *при всех* $i = \overline{1,N}$ *и множества* $K_i^0(0)$ *не пусты (матрицы* $G_i(0)$ *– гурвицевы, когда* $g_i^0(\mathrm{y}_i, 0)$ *субдифференцируемы по* y_i *в точке* 0*).*

Тогда система (7) обладает свойством асимптотической устойчивости $\mathrm{A}\Sigma$.

По аналогии с теоремой из [19] формулируются достаточные условия свойства практической устойчивости системы (7).

Теорема 4 (о $(\rho_0, \rho_c, \rho_f) - \Pi\Sigma$). *Пусть существуют вектор-функции* $v_i(t, \mathrm{x}_i)$, *удовлетворяющие условиям 1) - 3) теоремы 1 (при* $T_c = [0, t_f - t_0]$*), а также условию*

4) $b_c(\underset{t\in T_c}{\max} \hat{y}(t)) = \varepsilon^{\circ}\ \bar{\varepsilon}$, $b_f(\hat{y}(t_f - t_0)) = \beta^{\circ}\ \bar{\beta}$, где $\hat{y}(t)$ – верхнее решение системы $\dot{\mathrm{y}} = g(t, \mathrm{y})$ с начальным условием $\hat{y}(0) = a(\delta)$, $\delta \pm \bar{\delta}$ – некоторый вектор из $R_+^{d_0}$.

Тогда система (7) обладает свойством практической устойчивости $\Pi\Sigma$.

Теорема 5 (об устойчивости миссии). *Пусть множество* Σ *различных режимов, входящих в миссию* M, *конечно, для каждого режима* $\sigma \in \Sigma$ *в зависимости от требуемого свойства (*Δ^{σ} *или* $\Pi\Sigma^{\sigma}$*) выполнены условия теорем 1 или 4 с ВФЛ* $v^{\sigma}(t, \mathrm{x}^{\sigma})$ *и оценками допустимых начальных состояний* δ^{σ}, *а также следующие:*

5) $\rho_0^{\sigma}(t_0^{\sigma}, \mathrm{x}^{0\sigma}) \le b_0^{\sigma}(v^{\sigma}(t_0^{\sigma}, \mathrm{x}^{0\sigma}))\ \ \forall t_0^{\sigma} \in T_0^{\sigma},\ \forall \mathrm{x}^{0\sigma} \in X^{0\sigma}$, b_0^{σ} *– неубывающая функция;*

6) $v^{\varsigma}(t_0^{\varsigma}, w_{\varsigma\sigma}(\mathrm{x}^{\sigma})) \le d_{\varsigma\sigma}(v^{\sigma}(t_0^{\varsigma}, \mathrm{x}^{\sigma}))\quad \forall t_0^{\varsigma} \in T_0^{\varsigma}, \forall \mathrm{x}^{\sigma} \in X^{\sigma}$, *если режим* σ *может в миссии* M *переключиться на* $\varsigma \in \Sigma$ *(*$w_{\varsigma\sigma}$ *– функция (5) изменения состояния при переключении режимов),* $d_{\varsigma\sigma}$ *– неубывающая функция;*

7) $b_0^{\varsigma}(d_{\varsigma\sigma}(v_f^{\sigma})) \le \delta^{\varsigma}$, *где* $v_f^{\sigma} = \hat{y}^{\sigma}(\tau^{*\sigma})$, *когда свойством системы (7) в режиме* σ *является* Δ^{σ}, *и* $v_f^{\sigma} = \hat{y}^{\sigma}(t_f^{\sigma} - t_0^{\sigma})$, *когда это – свойство* $\Pi\Sigma^{\sigma}$; $\hat{y}^{\sigma}(t)$ *– верхнее решение СС, определенное в последних условиях теорем 2, 4 (применительно к режиму* σ*).*

Тогда миссия М *устойчива (обладает свойством* МΣ *(6)).*

Теоремы расширяют теоретическое обоснование технологии строгого анализа и синтеза нелинейных робастных систем стабилизации с помощью сублинейных ВФЛ [9,20,21], реализованную в нескольких версиях пакетов программ, последняя из которых – пакет «ВФЛ-РЕДУКТОР» [22]. Технология предполагает представление модели системы в одной из типовых форм, например, достаточно широкий класс нелинейных многосвязных систем с неопределенностями, динамика которых (вместе с наблюдателями состояния, возмущениями и динамикой элементов системы) описывается (при непрерывном управлении) дифференциальными уравнениями вида:

$$(8) \qquad (J_i + \Delta J_i(...))\dot{\mathrm{x}}_i = (A_i + \Delta A_i(...))\mathrm{x}_i + (B_i + \Delta B_i(...))u_i + H_i\Phi_i(t, \mathrm{x}_i, \overline{\mathrm{x}}_i, u_i, p_i),$$

$$(9) \qquad u_i = \phi_i(\sigma_i,...) \in R^{m_i},\ \sigma_i = C_i\psi_i(\eta_i,...) \in R^{m_i},\ \eta_i = D_i\mathrm{x}_i \in R^{l_i},\ \mathrm{x}_i \in R^{n_i},\ p_i \in P_i.$$

Здесь $(...) \equiv (t, \mathrm{x}_i, p_i)$, $\Delta J_i(\cdot)$, $\Delta A_i(\cdot)$, $\Delta B_i(\cdot)$, $\Phi_i(\cdot)$ – функции, задающие неопределенности и нелинейности объекта, внешние и другие возмущения, а также связи между подсистемами, для которых предполагаются заданными лишь ограничения: $\forall p_i \in P_i$ $|J_i^{-1}\Delta J_i(\cdot)| \le J_i^0$, $|\Delta A_i(\cdot)| \le A_i^0$, $|\Delta B_i(\cdot)| \le B_i^0$, $|\Phi_i(\cdot)| \le \Phi_i^0 + Q_i(|\theta_i|) \in R^{p_i}$, $\theta_i = \Theta_i\mathrm{x}_i + \overline{\Theta}_i\overline{\mathrm{x}}_i \in R^{q_i}$, Q_i – неубывающая, полунепрерывная сверху вектор-функция, $Q_i(0) = 0$ (неравенства между матрицами (векторами), модули понимаются как поэлементные); A_i, B_i, H_i, C_i, D_i, J_i^0, A_i^0, B_i^0, Θ_i, $\overline{\Theta}_i$, Φ_i^0 – постоянные матрицы и векторы соответствующих размерностей; $i = \overline{1, N}$.

Функции $\phi_i(\sigma_i,...)$, $\psi_i(\eta_i,...)$ задают характеристики исполнительных органов и измерителей с учетом их погрешностей, неопределенности, нестабильности, нелинейностей, ограниченности сигналов (и других факторов) и считаются функциями класса $SN(\xi_0, \overline{\xi}, K_{\xi}, K_{\xi}^0)$ [9,21], содержащего многие типовые нелинейности, нелинейности стандартного или расширенного секторов теории абсолютной устойчивости и определяемого соотношениями вида

$$(10) \qquad \mathbf{min}\left\{K_{\xi}(\xi - \xi_0) - K_{\xi}^0 |\xi|; K_{\xi}\overline{\xi}\right\} \le \phi(\xi,...) \le \mathbf{max}\left\{K_{\xi}(\xi + \xi_0) + K_{\xi}^0 |\xi|; -K_{\xi}\overline{\xi}\right\}$$

Параметры класса K_{ξ}, K_{ξ}^0 задают соответственно номинальные значения и допустимые неопределенности, нестабильность элементов матрицы коэффициентов усиления, ξ_0 определяет допустимые погрешности, зоны нечувствительности, квантование по уровню и др., вектор $\overline{\xi}$ характеризует ограниченность (насыщение) управления или рабочего диапазона измерителей.

Основными являются задачи исследования наиболее важных с прикладной точки зрения динамических свойств диссипативности, асимптотической, экспоненциальной и практической устойчивости, анализ которых включает (как главную цель) вычисление всех основных количественных оценок (КО), характеризующих эти свойства:

- точности долговременной стабилизации (в свойстве Δ) или точности попадания в целевое состояние (в свойстве $\Pi\Sigma$) по «мере» ρ_f (оценки вектора β);

- возможных фазовых состояний или области достижимости по «мере» ρ_c (оценки вектора ε или функции $\varepsilon(t)$), времени регулирования до заданной точности $\overline{\beta} > \beta$ для процессов из заданного начального множества Π^δ;
- области диссипативности D, притяжения A или других допустимых (с точки зрения последующего выполнения какого-то свойства или оценки, например, оценки «промаха») областей начальных состояний в виде наибольших «параллелепипедов» Π^δ с заданными направлениями векторов δ;
- показателей экспоненциального затухания процессов;
- и других количественных оценок ***прямых показателей динамического качества***.

«Меры» начальных, текущих и финальных состояний удобно задавать в виде

$$\rho_0(\mathrm{x}^0) = |\, R_0 \mathrm{x}^0 \,|,\ \rho_c(\mathrm{x}) = |\, R_c \mathrm{x} \,|,\ \rho_f(\mathrm{x}) = |\, R_f \mathrm{x} \,|, \tag{11}$$

где R_0, R_c, R_f – матрицы соответствующих размерностей, R_0 имеет полный ранг.

Используемые для исследования ВФЛ строятся как сублинейные функции

$$v_i(\mathrm{x}_i) = |\, S_i \mathrm{x}_i \,|^\vee \equiv \underset{j=\overline{1,k_i}}{\mathrm{col}} \,\| S_i^j \mathrm{x} \|_j,\ 1 \le k_i \le n_i,\ i = \overline{1,N}, \tag{12}$$

где S_i – в общем случае комплексная $(\overline{n}_i \times n_i)$-матрица ранга $n_i \le \overline{n}_i$, S_i^j – ее горизонтальные $(\overline{n}_{ij} \times n_i)$-блоки, $\sum_j \overline{n}_{ij} = \overline{n}_i$, $j = \overline{1,k_i}$, $\|\cdot\|_j$ – некоторая норма в $\overline{n}_{ij}$-мерном пространстве; в частности, S_i – неособенная $(n_i \times n_i)$-матрица, преобразующая матрицу $L_i = J_i^{-1}(A_i + B_i K_{i\sigma_i} C_i K_{i\eta_i} D_i)$ «номинальной» линеаризованной системы (8)-(9) к почти диагональному или другому каноническому виду, $\vee$ – операция агрегирования (по типу нормы) «близких» по модулю строк [9,21].

СС, отвечающая ВФЛ (12), находится в явной форме и имеет вид

$$\dot{\mathrm{y}}_i = P_i \mathrm{y}_i + G_i q_i(\mathrm{y}_i, \overline{\mathrm{y}}_i) + R_i \equiv g_i(\mathrm{y}_i, \overline{\mathrm{y}}_i) \in R^{k_i},\ i = \overline{1,N},$$

где P_i – позитивная матрица, G_i, R_i – неотрицательные матрица и вектор, $q_i(\mathrm{y}_i, \overline{\mathrm{y}}_i))$ – неубывающая, субдифференцируемая по y_i функция, $q_i(0,0) = 0$. Явные линейные выражения выводятся также для функций a_i, b_c, b_f, b_0, связывающих значения «мер» (11) со значениями ВФЛ (например, $a_i(\rho(x^0)) = |\, S_i R_0^+ \,|^\vee \rho(x^0))$, а кроме того для функций $d_{\sigma'\sigma}$ в теореме 5, связывающих значения ВФЛ при переключениях. В итоге получаются эффективные процедуры анализа нужных свойств СС и построения КО.

Важным качеством предлагаемой технологии является возможность синтеза систем с требуемой динамикой. Задачи синтеза формулируются как задачи выбора параметров в алгоритмах управления (в т.ч. обратной связи в динамических регуляторах и наблюдателях), оптимизирующих оценку основного для рассматриваемого режима показателя при заданных ограничениях на некоторые из остальных оценок. По самой постановке полученные системы оказываются робастными.

Так, для рабочих режимов в качестве основной, оптимизируемой оценки естественно принимать оценку точности стабилизации, что приводит к следующей задаче математического программирования: найти значения параметров $\zeta \in \mathsf{Z}$ системы (8)-(9) (в качестве ζ обычно выступают элементы матрицы обратных связей C_i и, возможно, элементы других матриц, Z – область допустимых значений искомых параметров), минимизирующих критерий

$J_f = \alpha^T \beta$, где $\alpha \in \overline{R}_+^{d_f}$ – вектор заданных весовых коэффициентов, при условии $\mathsf{D} \neq \varnothing$ (непустоты области диссипативности); или более сильном требовании $\Pi^\delta \subseteq \mathsf{D}$, где Π^δ – заданный «параллелепипед».

Для режимов образования или восстановления формации имеют смысл также задача синтеза параметров управления по критерию минимума времени регулирования до заданной точности из заданного множества начальных состояний или задача нахождения параметров, обеспечивающих максимальный размер области допустимых начальных отклонений при заданных требованиях к точности конечного состояния.

Главное отличие и достоинство разработанной технологии это, с одной стороны, строгость результатов, гарантированный характер получаемых суждений и оценок, а с другой, – конструктивность, возможность довести исследование «до числа». Именно в отношении точности числовых результатов аппарат ВФЛ оказывается предпочтительным по сравнению с другими строгими качественными методами. Важно, что рассматриваемые задачи формулируются непосредственно в терминах инженерных требований к системе (прямых показателей динамического качества), результаты также получаются в этой форме. После приведения моделей к стандартному виду последующие построения и вычисления (ВФЛ, СС, КО) выполняются в значительной мере автоматически. Это позволяет экранировать от исследователя используемые специальные, достаточно сложные в математическом отношении методы.

4 Приложение к задаче сканирования плоской области

Покажем применение описанной технологии, аннонсированной в [13], для анализа и синтеза системы управления группировкой автономных роботов в задаче обследования плоской подводной области путем ее многократного сканирования встречными курсами («туда-обратно») при требовании обеспечения с заданной точностью конфигурации группы во время рабочих ходов. Выделяются следующие участки движения группы: рабочие участки сканирования, участки перестроения и восстановления формации. В предположении, что навигационной системой, приемлемой для отслеживания расчетного движения, обладает только лидер группировки, а остальные ее члены могут измерять лишь взаимное положение (дистанцию и угол пеленга) относительно лидера или друг друга, управление для последних на участках восстановления конфигурации и сканирования будем строить по принципу «лидер-ведомый», а на участках перестроения – как программное.

Будем считать, что в процессе выполнения обследовательской миссии число агентов и лидер остаются неизменными, параметры движения лидера полностью определены, так что синтез управления требуется проводить лишь для ведомых объектов.

В качестве математической модели группы на программных участках примем

$$(13) \qquad \begin{array}{l} \dot{\mathrm{x}}_i = v_i \cos\phi_i, \quad \dot{\mathrm{y}}_i = v_i \sin\phi_i, \quad \dot{\phi}_i = \omega_i, \qquad i = \overline{0, N}, \\ m_i \dot{v}_i = u_i + r_i + p_i, \quad J_i \dot{\omega}_i = u_i^\phi + r_i^\phi + p_i^\phi; \qquad i = \overline{1, N}, \end{array}$$

где x_i, y_i – координаты центра масс o_i i-го объекта в некоторой неподвижной декартовой системе координат (индекс $i = 0$ соответствует лидеру группы), v_i – скорость (абсолютная) центра масс i-го объекта, ϕ_i – угол между направлением вектора скорости и осью x (курс i-го объекта), ω_i – угловая скорость; m_i – масса, J_i – момент инерции i-го объекта; u_i, u_i^ϕ – линейное и угловое управления (тяга и момент); $r_i = r_i(v_i, \ldots)$, $r_i^\phi = r_i^\phi(\omega_i, v_i, \ldots)$ – силы сопротивления движению; $p_i(\ldots)$, $p_i^\phi(\ldots)$ – силы и моменты, рассматриваемые как

возмущения (многоточием обозначена совокупность переменных, включая t, от которых могут зависеть названные величины).

Для описания динамики группы на участках, где управление строится по принципу «лидер-ведомый», будем использовать модель, получаемую из (13) добавлением к ней кинематических соотношений

$$\begin{aligned} &\dot{s}_i = v_{j_i}\cos(\phi_{j_i} - \phi_i + \delta_i) - v_i\cos\delta_i, \\ &s_i\dot{\delta}_i = s_i\omega_i + v_i\sin\delta_i - v_{j_i}\sin(\phi_{j_i} - \phi_i + \delta_i), \quad i = \overline{1,N}, \end{aligned} \tag{14}$$

определяющих движение ведомых относительно своих лидеров. Здесь δ_i – угол между вектором скорости и направлением на лидера (пеленг), s_i – расстояние между центрами масс объекта и его лидера (дистанция), j_i – номер лидера для i-го объекта (для каждого ведомого возможен только один лидер). Здесь и далее индекс режима движения группы опускается, так как в каждом из режимов с точностью до перестановки номеров объектов модель, описывающая динамику формации, одинакова.

Безотносительно изучаемого режима будем полагать, что каждый ведомый объект может измерять лишь некоторые параметры собственного движения такие, как v_i, ϕ_i, ω_i, а также параметры относительного движения своих лидеров s_i, δ_i. Таким образом, управление каждого объекта группировки является полностью автономным и не предполагает какого либо обмена информацией между объектами (например, для скрытности). Выходы измерителей (с учетом их ошибок, нестабильности и др.) обозначим соответственно через $\hat{v}_i$, $\hat{\phi}_i$, $\hat{\omega}_i$ и т.д., их совокупность – η_i.

Режимы стабилизации. В режимах сканирования (рабочих) и предшествующих им режимах образования («сбора») или восстановления группы, предполагающих стабилизацию формации, управление берется в виде

$$u_i = u_{is} + u_{ic}, \qquad u_i^{\phi} = u_{is}^{\phi} + u_{ic}^{\phi}$$

где $u_{ic} = u_{ic}(t,\eta_i)$, $u_{ic}^{\phi} = u_{ic}^{\phi}(t,\eta_i)$ – компенсирующие слагаемые управления, формируемые с целью преодоления сопротивления и парирования возмущений на основе известной части определяющих их зависимостей так, что

$$|u_{ip} - (r_i + p_i)| \le p_i^0, \quad |u_{ip}^{\phi} - (r_i^{\phi} + p_i^{\phi})| \le p_i^{\phi 0} \quad (p_i^0, p_i^{\phi 0} - const \ge 0);$$

$$u_{is} = \Phi_i(\sigma_i), \quad u_{is}^{\phi} = \Phi_i^{\phi}(\sigma_i^{\phi}) \tag{15}$$

– составляющие управления, создаваемые именно с целью стабилизации формации; σ_i, σ_i^{ϕ} – входные сигналы исполнительных органов тяги и вращающего момента. Предполагается, что, исходя из измерительных возможностей, стабилизирующее управление формируется по принципу обратной связи как ПД-регулятор с использованием наблюдателей первого порядка для получения оценок относительных скоростей. Таким образом,

$$\begin{aligned} &\sigma_i = k_{is}\Delta\hat{s}_i + k_{i\delta}\Delta\hat{\delta}_i + l_{is}\hat{z}_i + l_{i\delta}\hat{z}_i^{\phi}, \quad \sigma_i^{\phi} = k_{is}^{\phi}\Delta\hat{s}_i + k_{i\delta}^{\phi}\Delta\hat{\delta}_i + l_{is}^{\phi}\hat{z}_i + l_{i\delta}^{\phi}\hat{z}_i^{\phi}, \\ &\Delta\hat{s}_i = \Psi_i(\Delta s_i), \quad \Delta\hat{\delta}_i = \Psi_i^{\phi}(\Delta\delta_i), \quad \hat{z}_i = \Psi_i^{z}(z_i), \quad \hat{z}_i^{\phi} = \Psi_i^{z\phi}(z_i^{\phi}), \\ &\dot{z}_i = -a_i(z_i - \Delta\hat{s}_i), \quad \dot{z}_i^{\phi} = -a_i^{\phi}(z_i^{\phi} - \Delta\hat{\delta}_i); \quad \Delta s_i \equiv s_i - s_i^*, \quad \Delta\delta_i \equiv \delta_i - \delta_i^*, \end{aligned} \tag{16}$$

где s_i^*, δ_i^* – заданные значения дистанций и углов пеленга в желаемой конфигурации.

Считается, что с учетом всех погрешностей, неопределенностей, нелинейностей, нестабильности характеристик квантования, гистерезиса, ограниченности управления или

диапазонов измерителей и др. факторов в (15), (16) $\Phi_i \in SN(\sigma_i^0, \overline{\sigma}_i, 1, \Delta_i)$, $\Phi_i^\phi \in SN(\sigma_i^{\phi 0}, \overline{\sigma}_i^\phi, 1, \Delta_i^\phi)$, $\Psi_i \in SN(\Delta s_i^0, \overline{\Delta s}_i, 1, 0)$, $\Psi_i^\phi \in SN(\Delta\delta_i^0, \overline{\Delta\delta}_i, 1, 0)$, $\Psi_i^z \in SN(z_i^0, \infty, 1, 0)$, $\Psi_i^{z\phi} \in SN(z_i^{\phi 0}, \infty, 1, 0)$. Здесь $SN(\ldots)$ – класс нелинейностей (10).

Примем в качестве «невозмущенной» формацию, движущуюся с постоянной скоростью v^*, с требуемыми дистанциями s_i^* и углами пеленга δ_i^*. Выбором системы отсчета можно считать, что в невозмущенной формации $\phi_i = 0$ и $\omega_i = 0$.

Тогда в качестве «меры» начальных отклонений естественно взять вектор

$$\rho_0 = \mathrm{col}((|\, v_0^0 - v^* \,|, |\, \phi_0^0 \,|, |\, \omega_0^0 \,|)^T, \underset{i=\overline{1,N}}{\mathrm{col}}(|\, s_i^0 - s_i^* \,|, |\, v_i^0 - v^* \,|, |\, \phi_i^0 \,|, |\, \omega_i^0 \,|, |\, \delta_i^0 - \delta_i^* \,|)^T) \in R^{5N+3}.$$

Множество возможных начальных состояний X^0 представляет $(5N+3)$-мерное многообразие в общем пространстве состояний системы $X = X_0 \times \prod X_i = R^{9N+3}$ $(X_0 = R^3, X_i = R^9, i = \overline{1,N})$, в котором $z_i = 0$, $z_i^\phi = 0$ и переменные $\mathrm{x}_i, \mathrm{y}_i, \phi_i, s_i, \delta_i$ связаны $2N$ соотношениями $s_i^2 = (\mathrm{x}_{i-1} - \mathrm{x}_i)^2 + (\mathrm{y}_{i-1} - \mathrm{y}_i)^2$, $(\mathrm{x}_{i-1} - \mathrm{x}_i)\mathrm{tg}(\phi_i - \delta_i) = (\mathrm{y}_{i-1} - \mathrm{y}_i)$.

Текущие и финальные состояния естественно оценивать вектор-функциями

$$\rho_c(\mathrm{x}) = \underset{i}{\mathrm{col}}(|\, \phi_i - \phi_{i-1} \,|, |\, s_i \,|, |\, \delta_i \,|, |\, v_i - v^* \,|, |\, \omega_i \,|)^T, \quad \rho_f(\mathrm{x}) = \underset{i}{\mathrm{col}}(|\, s_i \,|, |\, \delta_i \,|)^T, \quad i = \overline{1,N}.$$

Зададим, наконец, ограничения на маневры лидера формации

$$|\, v_0 - v^* \,| \le v_0^0, \quad |\, \omega_0 \,| \le \omega_0^0, \quad |\, \dot{v}_0 \,| \le w_0^0, \quad |\, \dot{\omega}_0 \,| \le \varepsilon_0^0,$$

где $v^* \ge 0$ – заданное значение номинальной скорости формации.

Кроме названных неопределенностей и возмущений, учтем еще параметрические неопределенности масс и моментов инерции объектов, полагая

$$m_i = m_i^* + \Delta m_i(\ldots), \qquad J_i = J_i^* + \Delta J_i(\ldots), \qquad i = \overline{1,N},$$

где m_i^*, J_i^* – известные (номинальные) значения, Δm_i, ΔJ_i – неопределенности, вообще говоря, переменные, зависящие, возможно, от v_i, ω_i и др. (например, неопределенности несомых грузов, присоединенных масс жидкости в случае подводных объектов), для которых предполагаются ограничения $|\, \Delta m_i(\ldots) \,| \le m_i^0$, $|\, \Delta J_i(\ldots) \,| \le J_i^0$.

В итоге, для *рабочего режима* получается задача исследования свойства диссипативности, состоящая в оценке допустимой области начальных состояний по функции ρ_0, оценке предельной области, т. е. точности стабилизации формации по вектору ρ_f, либо достижимости требуемой точности при заданном уровне допустимых возмущений и неопределенностей, либо синтеза параметров (например, k_i, l_i, k_i^ϕ, l_i^ϕ, a_i, a_i^ϕ), обеспечивающих нужные или наилучшие оценки.

Анализ свойства практической устойчивости, характерного для *режима сбора-восстановления*, состоит в оценке области достижимости по вектору ρ_c в любой момент времени или области конечных состояний («промаха») по вектору ρ_f для процессов из начального множества с заданной оценкой по ρ_0, оценке времени регулирования до заданной точности, либо синтезе параметров управления, обеспечивающих, например, из заданного

начального множества достижение за заданный промежуток времени конечного состояния с наилучшей гарантированной точностью по ρ_f.

При решении перечисленных задач уравнения движения (13)-(14) приводятся к виду (8)-(9) путем их линеаризации в окрестности невозмущенного движения с оцениванием в разложениях в ряд членов выше первого порядка малости.

Ясно, что переключение управления с режима сбора-восстановления формации на рабочий режим для каждого агента группировки должно осуществляться не позднее момента его подхода к зоне сканирования. Рабочий режим для каждого агента не должен заканчиваться раньше, чем его прямые или опосредованные ведомые (для лидера формации – вся группировка) выйдут из зоны сканирования.

Программный режим. Управление в режиме перестроения возьмем в виде

$$u_i = u_{ip} + u_{is} + u_{ic},\ u_i^{\phi} = u_{ip}^{\phi} + u_{is}^{\phi} + u_{ic}^{\phi},$$

где u_{ip}, u_{ip}^{ϕ} – программные составляющие управления, реализующие некоторый заданный маневр (программное движение); u_{is}, u_{is}^{ϕ} – стабилизирующие слагаемые управления, призванные отслеживать программные движения; u_{ic}, u_{ic}^{ϕ} – компенсирующие составляющие, вводимые с той же целью, что и для рабочего режима.

Программное движение (перестроение) в рассматриваемой задаче сканирования разобьем на три этапа: гашение скорости с ее расчетного значения v^* в рабочем режиме до скорости во время разворота, основной этап – движение с разворотом объекта на угол $\pm\pi$ и, наконец, этап восстановления скорости снова до рабочего значения v^* к моменту переключения на режим восстановления конфигурации.

Будем считать, что при выполнении разворота линейная скорость v_{ip} объекта постоянна, а угловая скорость изменяется по треугольному закону

$$\omega_{ip}(t) = \frac{\gamma_i t}{\lambda_i \tau_i},\ t \in [0, \lambda_i \tau_i] = T_{i1};\quad \omega_{ip}(t) = \frac{\gamma_i (\tau_i - t)}{\tau_i (1 - \lambda_i)},\ t \in [\lambda_i \tau_i, \tau_i] = T_{i2}, \tag{17}$$

где $\lambda_i \in [0,1]$, γ_i ¤ 0 – некоторые параметры, $\tau_i > 0$ – время разворота.

Проинтегрировав (17) и воспользовавшись очевидным соотношением $|\gamma_i|\tau_i = 2\pi$, имеющим место при развороте на π, получим выражение для изменения угла $\phi_{ip}(t)$.

Полагая начальное $(x_{ip}^0, y_{ip}^0, \phi_{ip}^0)$ и конечное $(x_{ip}^f, y_{ip}^f, \phi_{ip}^f)$ положения объекта на этапе разворота заданными, из первых двух уравнений системы (13) с учетом постоянства линейной скорости получим систему интегральных уравнений

$$x_{ip} = x_{ip}^f - x_{ip}^0 = v_{ip} \int_0^{\tau_i} \mathbf{sin}\, \phi_{ip}(t) dt, \qquad y_{ip} = y_{ip}^f - y_{ip}^0 = v_{ip} \int_0^{\tau_i} \mathbf{cos}\, \phi_{ip}(t) dt,$$

связывающую неизвестные параметры v_{ip}, λ_i и τ_i. Задав один из них, например, v_{ip}, нетрудно численно решить эту систему относительно остальных двух.

Таким образом, найдя согласованные значения параметров $v_{ip}, \lambda_i, \tau_i$, с учетом (14) и (17) будем иметь следующий программный закон управления

$$u_{ip}^{\phi}(t) = \frac{2\pi J_i}{\lambda_i \tau_i^2},\ t \in T_{i1};\quad u_{ip}^{\phi}(t) = -\frac{2\pi J_i}{(1 - \lambda_i)\tau_i^2},\ t \in T_{i2};\quad u_{ip} = 0,$$

переводящий за время τ_i движущийся с постоянной линейной скоростью v_{ip} объект из заданного начального положения (x_{ip}^0, y_{ip}^0) в заданное конечное положение (x_{ip}^f, y_{ip}^f) и одновременно осуществляющий разворот на угол π ($|\phi_{ip}^f - \phi_{ip}^0| = \pi$).

На 1 и 3 этапах, на которых проводится коррекция скорости, программное движение будем считать прямолинейным и программное управление возьмем в виде

$$u_{ip} = m_i w_{ip} \quad (w_{ip} - const), \qquad u_{ip}^{\phi} = 0.$$

Очевидно, окончание режима сканирования, скорость v^*, время и путь торможения на этапе 1 должны быть согласованы так, чтобы при точном выполнении движения к моменту начала разворота объекты имели расчетное положение $(x_{ip}^0, y_{ip}^0, \phi_{ip}^0)$ и скорость v_{ip}. К моменту же окончания этапа 3 из положения $v(t, \mathrm{x}) \equiv \underset{i=1,N}{\mathrm{col}}\, v_i(t, \mathrm{x}_i)$ объекты должны в идеале образовать рабочую конфигурацию. Действительная конфигурация будет уточняться в последующем режиме восстановления формации, который обеспечивает попадание объектов в область диссипативности режима сканирования.

Стабилизирующие управления в режиме перестроения, естественно брать в виде

$$u_{is} = \Phi_i(\sigma_{is}), \ \sigma_{is} = l_{iv}\Delta\hat{v}_i; \quad u_{is}^{\phi} = \Phi_i^{\phi}(\sigma_{is}^{\phi}), \quad \sigma_{is}^{\phi} = k_{iv}\Delta\hat{v}_i + k_{i\omega}\Delta\hat{\omega}_i + k_{i\phi}\Delta\hat{\phi}_i,$$

где $\Delta\hat{v}_i = \Psi_i^v(\Delta v_i)$, $\Delta\hat{\omega}_i = \Psi_i^{\omega}(\Delta\omega_i)$, $\Delta\hat{\phi}_i = \Psi_i^{\phi}(\Delta\phi_i)$ – выходы измерителей скоростей (линейной и угловой) и углового положения объекта; $\Delta v_i \equiv v_i - v_{ip}(t)$, $\Delta\omega_i \equiv \omega_i - \omega_{ip}(t)$, $\Delta\phi_i \equiv \phi_i - \phi_{ip}(t)$ – отклонения текущих скоростей и угла от их программных значений. Синтез параметров $l_{iv}, k_{iv}, k_{i\omega}, k_{i\phi}$ может проводиться, например, по критерию минимума ошибки конечного состояния $\mathrm{col}(x_i - x_{ip_f}, y_i - y_{ip_f}, v_{i_f}, \omega_{i_f}, \phi_{i_f})$.

Общее число последовательно выполняемых режимов в рассматриваемой задаче может быть сколь угодно большим (неограниченным), число же различных режимов в миссии не более шести: сканирование в прямом и обратном направлениях, перестроение влево или вправо и два последующих режима восстановления конфигурации. Соответственно, число пар стыкуемых режимов тоже равно шести. В случае симметричной формации с идентичными ведомыми эти числа сокращаются до трех.

Численные расчеты проводились для группы из трех роботов (один лидер и два ведомых ($i = 1,2$)) с параметрами $m_i^* = 150$, $J_i^* = 130$, неопределенностями $m_i^0 = 1$, $J_i^0 = 0.5$, ограничениями на нелинейности и возмущения $p_1^0 = p_2^0 = 1$, $p_1^{\phi 0} = p_2^{\phi 0} = 0.5$, погрешностями исполнительных устройств и измерителей $\sigma_i^0 = 0.3$, $\delta_i^0 = 0.01$ (приведены лишь наиболее существенные параметры ведомых, которые соответствуют малым автономным необитаемым подводным аппаратам). Ограничения на маневры лидера в рабочем режиме – $v_0^0 = 0.05$, $\omega_0^0 = 0.05$, $w_0^0 = 0.01$, $\varepsilon_0^0 = 0.01$. Для простоты скорость сканирования v^* и скорость при развороте v_{ip} считались одинаковыми, поэтому этапы «торможения-разгона» отсутствуют.

Средствами пакета «ВФЛ-РЕДУКТОР» для рассматриваемой задачи сканирования синтезирована многорежимная система управления группировкой. В рабочем режиме для начальных отклонений формации до 4.25 м по s_i и 0.3 по δ_i, при всех допустимых неопределенностях и возмущениях она обеспечивает ошибки стабилизации не более 1.44 м по дистанции и 0.11 по углу.

Результаты численного моделирования системы представлены на рисунке 1. Многочисленные эксперименты показали приемлемое качество синтезированной системы.

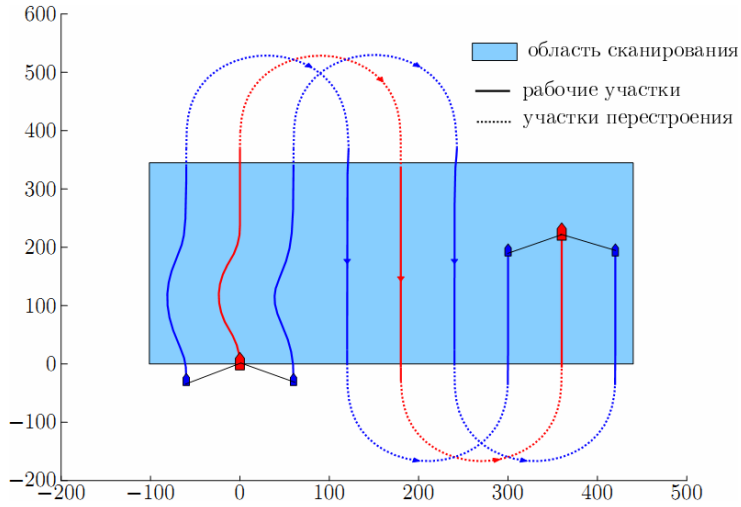


Рисунок 1 – Траектории движения роботов при сканировании плоской области

Заключение

В работе предложена общая математическая модель формаций с децентрализованным многорежимным управлением. Для типовых режимов движения группы дано строгое определение желаемой динамики в виде свойств диссипативности и практической устойчивости, которые в отличие от большинства известных постановок задач устойчивости формаций, ориентированных в основном на линейные модели, учитывают неполноту измерения параметров собственного и взаимного движения агентов, погрешности, ограниченность управления и измерителей, неопределенности объектов и внешние возмущения. Для описания желаемого поведения формации в многорежимном движении введено понятие устойчивости миссии. Получены основанные на методе ВФЛ достаточные условия названных динамических свойств формаций, существенно использующие структурные особенности графа связей между движущимися объектами. Описана базирующаяся на сублинейных ВФЛ технология исследования динамики нелинейных систем с неопределенностями с приложением к исследованию динамики формаций и синтезу стабилизирующего управления группировкой автономных роботов в задаче сканирования плоской области.

Благодарности

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 14-07-31192 мол_а, № 14-07-00740 а, № 13-08-00948.

Список литературы

[1] Chen Y.Q., Wang Z.M. Formation control: a review and a new consideration // In Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2005. P. 3181–3186.

[2] Tanner H.G., Pappas G.J., Kumar V. Leader-to-formation stability // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2004. Vol. 20. Issue 3. P. 443–455.

[3] Fax J.A. Murray R.M. Information flow and cooperative control of vehicle formations // IEEE Transactions on Automatic Control. 2004. Vol. 49, No 9. P. 1465–1476.
[4] Liu S.C., Tan D.A., Liu G.J. Robust leader-follower formation control of mobile robots, based on a second order kinematics model // Acta Automatica Sinica. 2007. Vol. 33, No. 9. P. 947–955.
[5] Dunbar W.B., Caveney D.S. Distributed Receding Horizon Control of Vehicle Platoons: Stability and String Stability // IEEE Transactions on Automatic Control. 2012. Vol. 57, No 3. P. 620-633.
[6] Consolini L., Morbidi F., Prattichizzo D., Tosques M. On a Class of Hierarchical Formations of Unicycles and Their Internal Dynamics // IEEE Transactions on Automatic Control. 2012. Vol. 57, No 4. P. 845–859.
[7] Belabbas M.A. On Global Stability of Planar Formations // IEEE Transactions on Automatic Control. 2013. Vol. 58, No. 8. P. 2148-2153.
[8] Yang A., Naeem W., Irwin G.W., Li K. Stability Analysis and Implementation of a Decentralized Formation Control Strategy for Unmanned Vehicles // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2013.
[9] Метод векторных функций Ляпунова в теории устойчивости / Под ред.: А.А. Воронов, В.М. Матросов. М.: Наука, 1987. 312 с.
[10] Матросов В.М. Метод векторных функций Ляпунова: анализ динамических свойств нелинейных систем. М.: Физматлит, 2001. 384 с.
[11] Васильев С.Н. Метод редукции и качественный анализ динамических систем, I-II// Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 2006. № 1. С. 21–29; № 2. С. 5–17.
[12] Васильев С.Н., Косов А.А. Анализ динамики гибридных систем с помощью общих функций Ляпунова и множественных гомоморфизмов // Автомат. и телемех. 2011. № 6. С. 27–47.
[13] Васильев С.Н., Козлов Р.И., Ульянов С.А. Устойчивость многорежимных формаций // Доклады академии наук. 2014. Т. 455, №3. С. 269-274.
[14] Васильев С.Н., Козлов Р.И., Ульянов С.А. Анализ координатных и других преобразований моделей динамических систем методом редукции // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2009. Т. 15, № 3. С. 38–56.
[15] Козлов Р.И., Максимкин Н.Н., Ульянов С.А., Киселев Л.В. Устойчивость конфигураций группового движения автономных подводных роботов в условиях неопределенности // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 1 (9). С. 40-46.
[16] Козлов Р.И., Бурносов С.В. Синтез систем гироскопической стабилизации упругих космических аппаратов методом ВФЛ // Динамика и управление космическими объектами. Новосибирск: Наука СО, 1992. С. 85–101.
[17] Kozlov R.I. VLF-method of nonlinear dynamic investigations in designing of systems for stabililization of spacecrafts // Proc. First Internat. Conf. on Nonlinear Problems in Aviation & Aerospace (ICNPAA-96). Daytona Beach. Florida, USA, 1997. P. 319-324.
[18] Козлов Р.И. Теория систем сравнения в методе векторных функций Ляпунова. Новосибирск: Наука, 2001. 137 с.
[19] Козлова О.Р. Применение метода сравнения к задаче нормирования внешних воздействий // Труды X Международной Четаевской конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление». Казань, Изд-во КГТУ, 2012. Т.3: Управление, ч.2. С. 266–276.
[20] Бурносов С.В., Козлов Р.И. Состояние и перспективы развития ППП по построению количественных оценок динамики и синтезу систем управления методом ВФЛ // Интеллектуализация программных средств. Новосибирск: Наука, 1990. С. 142-152.
[21] Матросов В.М., Козлов Р.И., Матросова Н.И. Теория устойчивости многокомпонентных нелинейных систем. М.: Физматлит, 2007. 184 с.
[22] Козлов Р.И., Ульянов С.А., Хмельнов А.Е. Программный модуль для качественного исследования непрерывных динамических систем ВФЛ-РЕДУКТОР-Н. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2007613832 от 07.09.2007.

ЧТО ТАКОЕ «ЭВЕРГЕТИКА»?

В.А. Виттих

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
vittikh@iccs.ru
тел: +7 (846) 333-27-70, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *процессы управления в обществе, эвергетика, интерсубъективное управление, повседневность, проблемная ситуация, неоднородный актор, ценности, смыслопорождающая деятельность актора, коммуникативное действие, мир систем*

Abstract

The article substantiates, for the purpose to improve effectiveness of management processes in society, the necessity to complement the classical Management Science dealing with management of the "Systems World", by Evergetics - science of intersubjective management processes in the "World of Everyday Life", which has in its field of vision regulatory processes of problem situations involving heterogeneous actors, i.e. people with their individual intellectual and volitional resources, value priorities, with the ability to communicate and reach a mutual understanding among them. Heterogeneous actors, which consciousness appeals not to the natural (physical) essence of the situation, but to its meaning, together, in on-line mode, produce intersubjective knowledge of the problem situation, with the use of which they make decisions about how to settle it. For actors – these "ordinary managers-theoreticians" – the scientists in the field of management create methods and tools necessary to carry out their activities. Heterogeneous actors define priorities for the development of the situation, formulate problems to be solved, establish criteria and constraints under which these problems should be solved, i.e. they answer the question "why?" and "what to do?" in order to settle the problem situation that has arisen in their everyday life.

Введение

Любой человек, в своей *повседневной жизни* всегда находящийся в той или иной ситуации, может оказаться совместно с другими людьми в *проблемной ситуации*, которая характеризуется тем, что людьми, «погруженными» в неё, осознаётся неудовлетворительное состояние дел, неопределённость их положения или социальная напряжённость, но они ещё не знают, что нужно делать для изменения ситуации в некотором, устраивающем всех, направлении. Тогда и появляется *потребность в управлении ситуацией в повседневности*, трактуемом в таком «ситуационном» контексте скорее как регулирование ситуации, снижение уровня её неопределённости со стороны заинтересованных участников ситуации - *неоднородных акторов*, каждый из которых, имея своё собственное, субъективное видение ситуации, готов выполнять необходимые познавательные и деятельностные функции для её урегулирования [1]. Такие акторы, коммуницируя и договариваясь между собой, определяют приоритетные направления развития ситуации, формулируют задачи, требующие решения, устанавливают критерии и ограничения, при которых должны решаться эти задачи, т.е. отвечают на вопросы *«зачем?» и «что нужно делать?» для урегулирования проблемной ситуации, возникшей в их повседневной жизни* [2].

Неоднородные акторы, на начальной стадии процесса управления ситуацией, «внутри» которой они находятся, занимаются *постановкой задач*, от решения которых зависит, будет ли ситуация, сложившаяся в «*мире повседневности*», выведена из разряда проблемных. На

вопрос о том, «как?» решать поставленные задачи, ответ будут давать специалисты из соответствующих предметных областей, являющиеся «функционерами» из «*мира систем*». Таким образом, неоднородный актор рассматривается в повседневном мире как «*нерасчленённая духовная и телесная целостность*», а в «мире систем» действует только его «*проекция*» на ту роль (функцию), которую он должен исполнять в соответствии с возложенными на него обязанностями [1]. Результативность решения задач в мире систем будет оцениваться по тому, насколько оправдались ожидания акторов относительно изменения ситуации в желаемом для всех направлении, т.е. снова произойдёт возврат в мир повседневности. Если новое положение дел всех устраивает, ситуация считается урегулированной, а если – нет, то описанная процедура управления ситуацией повторяется.

Однако, в отличие от описанной «идеализированной» схемы управления, существующая практика управления в жизни общества фактически всё сводит к деятельности органов государственного и корпоративного управления, которые берут на себя, в том числе, и постановку задач, которые требуется решить для урегулирования проблемных ситуаций. Они, конечно, привлекают экспертов, системных аналитиков, представителей общественности и т.п., но принятие решения о том, что делать, оставляют за собой. Подобным же образом они действуют, оценивая результаты практического внедрения принятых решений. Получается противоречие: *люди (неоднородные акторы), осознающие себя в проблемной ситуации и совместно продуцирующие её смысл, оказываются отторгнутыми от принятия решений, касающихся постановки задач по урегулированию ситуации и оценки результатов их решения*.

В таких условиях, когда руководящие органы, находящиеся не в жизненном мире, а в мире систем, наблюдая ситуацию «со стороны», берут на себя «бразды правления», «отодвигая в сторону» людей-акторов, способных «на местах» адекватно оценить проблему и предложить подходы к её решению, говорить об эффективности управления не приходится. И дело здесь не только в сложившейся практике управления, а в том, что в основе изложенного традиционного подхода к организации процессов управления лежат *классические научные представления об «управлении системами»* [3], которые *«выносят за скобки» людей из ситуации в повседневности*, не принимая во внимание их субъективные взгляды на мир, ценностные приоритеты, интеллектуальные способности и многое другое, что характеризует их как личности. Эти представления восходят к Научной революции XVII века, которая в интересах приобретения объективно-истинного знания, абстрагировавшись от субъектов как личностей, трактовала мир науки как сферу только телесных вещей и «состояла в освобождении знания от этических ценностей» [4].

В начале XX века, опираясь на эти идеи, М. Вебер определил ключевыми принципами созданной им модели бюрократического управления «механистичность» и «обезличенность», превращающих людей в «винтики» бюрократической машины. Для этого живые люди из мира повседневности трансформируются в абстрактные «элементы» самых разнообразных систем, которые исследуются, моделируются, проектируются, создаются, модифицируются и эксплуатируются, т.е. не жизненный мир, а мир систем становится предметом внимания классической теории управления. Однако оптимизация таких «бессубъектных» ценностно-инвариантных систем с целью получения некоторого «системного эффекта» вовсе не означает, что ситуация в повседневности (с точки зрения находящихся в ней людей) изменится к лучшему.

Здесь уместно отметить, что о противоречиях между жизненным миром и миром систем писал Ю. Хабермас в своей работе [5], полагая, что в отличие от коммуникативно структурированного жизненного мира - сферы частной и общественной жизни, мир систем, включающий в себя подсистемы экономики и политики, является формально организованным. И несмотря на то, что современные общества, построенные на демократических принципах, утверждают примат жизненного мира над подсистемами, по его мнению, «происходит *колонизация жизненного мира*: императивы автономных подсистем, сбросив идеологические

покровы, завоёвывают, подобно колонизаторам, пришедшим в первобытное общество, жизненный мир извне и навязывают ему процесс ассимиляции».

Исходя из изложенного, следует вывод, что *наука о процессах управления в обществе должна иметь две составляющие: классическую науку, занимающуюся управлением в мире систем, и науку о процессах управления в повседневности*, в поле зрения которой находятся процессы регулирования проблемных ситуаций, включающих человека с его индивидуальными интеллектуальными и волевыми ресурсами, ценностными приоритетами, а также способностью коммуницировать и достигать взаимопонимания с другими людьми. В данной статье рассматривается вторая составляющая, которая связывается с созданием эвергетики - науки о процессах интерсубъективного управления в повседневности.

Концепция интерсубъективного управления

Становление и развитие индустриального общества, как известно, ознаменовалось экспансией веберовской «идеальной бюрократии» во все сферы государственного и корпоративного управления и его концепции «инструментального разума» в общественное сознание. Модель целерационального «экономического человека», калькулирующего только свою выгоду и издержки, но который не задумывается о каких-то нравственных проблемах, стала общепринятой. По мнению М. Хоркхаймера, «*мышление же теперь призвано служить какой-угодно цели - порочной или благой*. Оно инструмент всех социальных действий, устанавливать нормы социальной или частной жизни ему не дано, ибо нормы установлены другими …*Всё решает «система»-«власть»* [6]. А в работе «Диалектика просвещения», написанной им совместно с Т. Адорно, утверждается, что те формы, которые приняла рационализация сознания, привели к утрате обществом способности к разумному обоснованию целей. «Дух расчётливости», о котором говорил М. Вебер, подавлял различение моральных ценностей [4].

При этом происходило утверждение системного подхода в науке об управлении (management science), объявившего, что окружающая нас действительность - это «системы, состоящие из систем» [3]. Внимание исследователей стало концентрироваться на проблемах мира систем, а не мира повседневности, поскольку изучались, как правило, процессы управления в организациях, как в системах, представляющих собой «ансамбли взаимодействующих человеческих существ» [7]. Когда же речь заходила о целях управления, то рассматривались «процессы возникновения целей в организациях, как они изменяются со временем и как организация следит за ними» [8]. Но эти цели могут не только не соответствовать, но и противоречить тем целям, которые нужно достигать в процессах регулирования жизненных проблемных ситуаций в повседневности.

Дело в том, что системный подход, как это утверждается в [3], «помогает руководителю уяснить сущность сложных проблем и принимать решения на основе чёткого представления об окружающей обстановке». Однако речь идёт об обстановке, окружающей руководителя, а не о той ситуации, которая должна быть урегулирована. В лучшем случае руководитель может «познавать» ситуацию «со стороны», но он не может её «осознавать», поскольку для этого он должен «погрузиться» в мир повседневности. Ведь «повседневность суть «место» сохранения человеческих смыслов, последнее убежище распадающейся личности в современном мире, т.к. в других областях жизни люди уже передоверили (реифицировали) свои интересы экспертам, компьютерам, бюрократам и т.д. Вне мира повседневности (т.е. в мире систем – прим. автора) происходит «внешняя» для человека игра, к которой он не имеет никакого отношения» [6].

Только лица, осознающие себя участниками проблемной ситуации в повседневности, понявшие её смысл, могут судить о целях, задачах, критериях и ограничениях, при которых эти задачи могут решаться. А это означает, что они *должны рассматриваться* в науке о процессах управления в обществе *не как обезличенные «элементы систем»*, *а как живые люди*

– *неоднородные акторы*, каждый из которых имеет свой субъективный взгляд на мир, будучи способным выполнять и познавательные, и деятельностные функции при урегулировании проблемной ситуации. Более того, неоднородный актор продуцирует смысл проблемной ситуации с учётом смыслообразующей деятельности других акторов, также осознающих себя в этой ситуации.

Такую структуру индивидуального сознания, отвечающую факту существования других индивидов Э. Гуссерль назвал *интерсубъективностью*, а в феноменологической социологии А. Шюца интерсубъективность указывает на внутреннюю социальность индивидуального сознания. Акторы коммуницируют между собой и образуют сообщества, в которых в режиме on-line вырабатывают *интерсубъективные знания* о ситуации, с использованием которых принимаются решения о способах её урегулирования, т.е. неоднородные акторы осуществляют *интерсубъективное управление* [9] и выступают в роли «обыденных управленцев-теоретиков», участвующих в приобретении знаний наряду с профессиональными научными работниками-управленцами, создающими для акторов методы и средства, необходимые для осуществления их деятельности. Только с помощью такого «тандема» обыденных и профессиональных управленцев-теоретиков может быть создана наука о процессах управления в обществе, поскольку любой представитель социума не только познает, но и творит окружающую его действительность.

Следует отметить, что представление об «обыденном теоретике» находится в соответствии с социологической концепцией Э. Гидденса, согласно которой «каждый член общества является практикующим социальным теоретиком», а социологи, в отличие от учёных, работающих в сфере естествознания, должны интерпретировать социальный мир, который уже интерпретирован населяющими его акторами [10].

Процесс интерсубъективного управления начинается с самоорганизации: акторы постепенно (не одномоментно) обнаруживают не устраивающее их положение дел, вступая во взаимодействие между собой, и в какой-то момент времени фиксируют, что в окружающем их жизненном мире (в повседневности) сложилась проблемная ситуация. Каждый из них одновременно может находиться и в мире систем, т.е. может входить в состав одной или нескольких систем. Самоорганизация акторов напоминает процесс кристаллизации металла из расплава, который начинается с непрогнозируемого появления центра кристаллизации. По аналогии с этим при формировании интерсубъективного сообщества инициативу берёт на себя один из акторов, приступающий (без какой-либо команды «сверху») к координации коммуникативных действий других акторов.

Поскольку акторы являются неоднородными, они должны создать объединяющую их «платформу знаний». С этой целью они вырабатывают интерсубъективные конвенциональные (по А.Пуанкаре) знания, достигая договорённости в рамках пяти типов интерсубъективности - семантической, эмпирической, логической, операциональной и нормативной [9, 11]. Семантическая интерсубъективность предполагает достижение ясности и общего согласия относительно понятий и построенных из них суждений. Эмпирическая интерсубъективность признаёт необходимой обоснованность суждений фактами и наблюдениями. Логическая интерсубъективность считает рационально обоснованными такие высказывания, которые являются результатом логического вывода. Операциональная интерсубъективность исходит из воспроизводимости образцов действия или рассуждения. Нормативная интерсубъективность предполагает общепринятость норм и правил поведения и оценки.

На основе разработанной «платформы знаний» акторы начинают искать пути выхода из проблемной ситуации, договариваться о том, какие задачи, по каким критериям и при каких ограничениях необходимо решать для урегулирования ситуации. Несмотря на различные позиции, интересы и ценностные приоритеты неоднородных акторов, при принятии решений по упомянутым вопросам *в процессе интерсубъективного управления достигается их взаимопонимание и консенсус*, т.е. общее согласие, полученное благодаря сближению позиций

акторов при проведении переговоров. Точнее, достигнутый консенсус - это не единогласие, он не означает, что «все - за», он означает лишь, что «никто не против».

Таким образом, интерсубъективное управление начинается с осознания сообществом неоднородных акторов проблемной ситуации в повседневности и заканчивается принятием решений о том, какие задачи и при каких условиях должны решаться для урегулирования этой ситуации. Затем задачи передаются в мир систем, где они формализуются и решаются с применением методов и средств классической теории управления, в результате чего ситуация как-то изменяется. Осуществляющие мониторинг ситуации акторы могут признать её урегулированной, но могут посчитать, что этого не произошло. Тогда в мире повседневности ставятся новые задачи (или корректируются старые), после чего снова включается мир систем. Иными словами, процессы управления в обществе разбиваются на две составляющие: интерсубъективное управление в повседневности (в жизненном мире) и классическое управление в мире систем.

Но если классическая наука об управлении всегда успешно развивалась, то наука о процессах управления в повседневности, как правило, выпадала из поля зрения учёных, и не вызывает большого интереса до сих пор. Вот что по этому поводу пишется в «Новейшем социологическом словаре» [6]: «*Проблематика и тематика повседневности (обыденной жизни людей), как правило, игнорировалась и третировалась как лежащая вне научной дисциплинарности*… А. Шюц ввёл данный термин для понятийного схватывания интерсубъективной реальности, значимой для социальных акторов (деятелей) как репрезентация нерасчленённой целостности мира человеческого бытия… Разделяемые «всеми» в повседневных ситуациях значения образуют мир первичных типизированных (анонимизированных) значений, оперирование которыми и позволяет совмещать перспективы деятелей (акторов), действующих как «обыденные социологи»… За пределами (первичного) мира повседневности находятся (вторичные) области профессионализированных «конечных смысловых сфер», значения которых доступны в полной мере только вовлечённым в эти сферы специализированным в них деятелям (акторам) и «непрозрачны» для «непосвящённых»».

Создание науки о процессах интерсубъективного управления в повседневной жизни общества имеет не только теоретическое, но и важное практическое значение, обусловленное прежде всего упомянутой «колонизацией жизненного мира системами», о которой писал Ю. Хабермас [5]. Системы госорганов и бизнеса, реализующие процессы управления с помощью власти и денег, возлагая на себя решение проблем, связанных с повышением качества жизни людей в повседневности, тем не менее очень часто исходят из своекорыстных соображений - карьерного роста сотрудников, повышения уровня их доходов и прибыли, сохранения «себя во власти» и т.п. Системы, создаваемые поначалу для удовлетворения потребностей общества, со временем начинают действовать в своих интересах, вырабатывать и диктовать свои «правила игры», «налаживать» коррупционные отношения, «раздувать» штаты и т.д. Поэтому интерсубъективное управление, призванное если не устранить, то минимизировать подобные негативные проявления в общественной жизни путём включения в процессы управления «противовеса» - заинтересованных людей из мира повседневности, должно иметь соответствующий научный фундамент. С этой целью и создаётся наука о процессах интерсубъективного управления в обществе - эвергетика [2, 12].

Эвергетика

Эвергетика, создаваемая, как и классическая наука об управлении, профессиональными научными работниками в области управления, тем не менее имеет принципиальное отличие от неё: *эвергетику как науку о процессах интерсубъективного управления в обществе «творят» также и включаемые в неё «непрофессионалы» - неоднородные акторы* (упомянутые выше

«обыденные управленцы-теоретики»), которые самостоятельно на основе on-line созданной ими интерсубъективной теории принимают решения о том, по какому пути стоит пойти и какие задачи решать для урегулирования проблемной ситуации, смысл которой они же и продуцируют. *Учёные разрабатывают методы и средства для акторов*, которые создают интерсубъективную ad hoc теорию [9] применительно к уникальному объекту - ситуации (классическая наука, как известно, строит свои теории для универсальных объектов «на века»).

Здесь можно провести аналогию с джазовой музыкой. Джазовый композитор («учёный») сочиняет музыкальную тему и создаёт её аранжировку для оркестра, в составе которого имеются музыканты–импровизаторы («неоднородные акторы»). После того как импровизаторы, овладев темой, гармонией и особенностями аранжировки, выступят вместе с оркестром, получится законченное джазовое произведение. Однако при сохранении темы, аранжировки, состава оркестра и импровизаторов при последующих исполнениях будут звучать разные музыкальные произведения, поскольку импровизации будут отличаться одна от другой. Предсказать, как прозвучит в очередной раз джазовая композиция, практически невозможно. Аналогично нельзя прогнозировать процессы интерсубъективного управления ситуациями в повседневности, в которых действуют акторы–«импровизаторы».

Главными «действующими лицами» в эвергетике, таким образом, являются неоднородные акторы, каждый из которых является субъектом, рассматривающим ситуацию не в её пространственно–временных параметрах, а как носитель смысла [13]; его сознание апеллирует не к природной сущности ситуации, а к её смыслу, поскольку здесь «…мир задан человеку не вещно–натуралистически, а духовно–смысловым образом как ценностная сущность, подлежащая пониманию и истолкованию» [14]. Один актор не может продуцировать всё многообразие смыслов, поэтому он воспринимает от других акторов, осознающих себя в той же ситуации, то, чего не достаёт в его собственном опыте. *Смыслопорождающая деятельность актора оказывает влияние на всё интерсубъективное сообщество, в результате чего создаётся общее смысловое пространство*.

В. Франкл [15] рассматривал стремление человека к поиску смысла как врождённую мотивационную тенденцию, присущую всем людям и являющуюся основным двигателем поведения и развития личности. Он писал, что восприятие смысла есть «осознание возможности на фоне действительности, или, проще говоря, осознание того, что можно сделать по отношению к данной ситуации». А. Лэнгле уточнял [16]: «*Та возможность, которая по своей ценности и значимости выделяется нами как наилучшая в данных обстоятельствах, несёт в себе полноту актуального бытия, и есть смысл текущего момента…* Смысл - это всегда реалистичный, сообразный обстоятельствам путь».

Опираясь на введённое понятие смысла, В. Франкл в [15] изложил своё представление о ценностях. «Есть смыслы, которые присущи людям определённого общества, и даже более того - смыслы, которые разделяются множеством людей на протяжении истории. Эти смыслы относятся к человеческому положению вообще, чем к уникальным ситуациям. Эти смыслы и есть то, что понимается под ценностями. Таким образом, *ценности можно определить как универсалии смысла, кристаллизующиеся в типичных ситуациях, с которыми сталкивается общество или даже всё человечество*. Обладание ценностями облегчает для человека поиск смысла, так как, по крайней мере в типичных ситуациях, он избавлен от принятия решений».

А. Лэнгле, используя данные В. Франклом определения смысла и ценности, сформулировал в [16] понятие ответственности. «*Ответственность* - это мой ответ на тот смысл, который входит в резонанс с моей высшей ценностью. Поэтому ответственность не имеет ничего общего с обязанностями, которые кто-то на меня возлагает. Ответственность - проявление свободы. Её нельзя подменить соблюдением предписаний, законов, руководящих указаний и инструкций по эксплуатации. Ответственность - выражение моей привязанности к человеку, идее или другой ценности. Ответственность - проявление отношения!»

Уяснение системы ценностей, обретение смысла и ответственности неоднородными акторами являются актуальными проблемами эвергетики, призванной вооружить акторов соответствующими методами и средствами. С этой точки зрения *эвергетику можно рассматривать как субъектно- и ценностно–ориентированную науку о процессах управления в обществе, связанную в большей степени с решением плохо формализуемых социогуманитарных проблем управления, в отличие от классической науки об управлении, отдающей предпочтение при решении задач строгим математическим методам. Обе эти научные дисциплины совместно образуют междисциплинарную единую теорию управления.* Важным для эвергетики направлением исследований является организация взаимодействия акторов, обеспечивающая достижение взаимопонимания и консенсуса при принятии решений относительно устраивающих всех способов урегулирования проблемных ситуаций. При решении этой задачи эвергетики в качестве методологического фундамента представляется целесообразным использование теории коммуникативного действия Ю. Хабермаса [17].

Коммуникативное действие исходит из необходимости нахождения и использования рациональных механизмов для поиска путей к достижению согласия. При этом в качестве неотъемлемых элементов взаимодействия людей предполагается применения таких понятий как взаимопонимание, консенсус, аргументации и др. Но главное состоит в том, что *субъект-актор осмысливает свой жизненный путь в аспекте блага, а не целесообразности* [18] (кстати сказать, от греческого слова «эвергет», означающего «благодетель», и происходит «эвергетика»). Сам Ю. Хабермас пишет в [17]: «Я говорю о коммуникативных действиях, если планы действия актёров координируются не посредством эгоцентрической калькуляции успеха, а через акты взаимопонимания. В коммуникативном действовании ориентация на собственный успех не является первостепенной для участников, которые преследуют свои индивидуальные цели при том условии, что они могут согласовывать планы своих действий на основе общих определений ситуации». Возникают сообщества, в которых *нормы и ценности свободно вырабатываются, а не навязываются*. Тем самым рационализированный жизненный мир (повседневность) делает возможными такие взаимодействия, которые руководствуются не нормативно предписанным согласием, а *аргументированно достигаемым консенсусом* [6].

Коммуникативный разум, таким образом, «предполагает такую позицию, при которой мы разделяем *ценности и нормы как интерсубъективно значимые*. Индивид может признавать любое знание, восприятие, понимание субъективно «истинным» для себя самого. Но если в той или иной ситуации или в том или ином сообществе это знание, восприятие, понимание притязает на то, чтобы стать интерсубъективно значимым, оно может быть признано таковым (то есть нормой) только при условии, что все участники данной ситуации или сообщества согласны признать это как норму и выражают своё согласие в процессе аргументированной дискуссии, имеющей целью найти взаимопонимание. Интерсубъективная перспектива, таким образом, предполагает, что ни один из субъектов взаимодействия не может единолично утверждать свои значения или вершить свою волю в ситуации, где затрагиваются интересы других участников» [19].

В концепции коммуникативной рациональности Ю. Хабермаса заложено убеждение в *консолидирующей силе аргументированного дискурса*, который должен преодолеть разногласия неоднородных акторов и достичь рационально обоснованного соглашения между ними. Однако эта концепция подвергалась критике за необоснованный идеализм, недостаток прагматизма, невнимание к механизмам силы и власти, господствующим в обществе, и т.д. Тем не менее, нельзя отрицать «конструктивности идей коммуникативной рациональности в качестве необходимого ценностного ориентира современного сознания, подобно тому как несовпадение реального поведения людей с нравственными идеалами и нормами не отменяет значимости последних» [20]. В этом смысле эвергетика, как субъектно- и ценностно–ориентированная наука о процессах управления в обществе, нацелена на *повышение роли*

культуры (в широком смысле) в жизни общества и трансформацию целерационального «экономического человека» в коммуникативно рационального «человека культуры» [12].

Заключение

Резервы повышения эффективности процессов управления в обществе следует искать не в модернизации «обезличенных» бюрократических механизмов, построенных на основе ценностно-инвариантной классической науки об управлении, фокусирующей своё внимание на проблемах мира систем, а в самих людях из мира повседневности, в каждом человеке, в использовании его интеллектуальных и волевых ресурсов. С этой целью и создаётся эвергетика – наука о процессах интерсубъективного управления в повседневности, в которой ключевую роль играет сообщество неоднородных акторов, каждый из которых имеет свою субъективную шкалу ценностей, осознаёт себя (вместе с другими акторами) «внутри» проблемной ситуации в повседневности и готов выполнять необходимые познавательные и деятельностные функции для урегулирования ситуации.

Именно такие акторы, коммуницируя и договариваясь между собой, определяют направления развития ситуации, формулируют задачи, требующие решения, устанавливают критерии и ограничения, при которых должны решаться эти задачи, т.е. отвечают на вопросы «зачем ?» и «что нужно делать ?» для урегулирования проблемной ситуации, возникшей в их повседневной жизни. Неоднородные акторы, вырабатывающие совместно в режиме on-line интерсубъективные конвенциональные (по А.Пуанкаре) знания о ситуации, выступают в роли «обыденных управленцев – теоретиков» в тандеме со специалистами в области управления, создающими для акторов методы и средства, необходимые для осуществления их деятельности.

Эвергетика, являясь субъектно- и ценностно–ориентированной наукой о процессах интерсубъективного управления в повседневности, фокусирует своё внимание на этапах постановки задач, вытекающих из проблемной ситуации, и оценки того, насколько изменилась ситуация в результате решения этих задач. С этой точки зрения эвергетика связана в большей степени с плохо формализуемыми социогуманитарными проблемами управления, в то время как классическая наука отдаёт предпочтение при решении задач строгим математическим методам. Обе эти научные дисциплины дополняют друг друга, образуя совместно междисциплинарную единую науку о процессах управления в обществе.

В качестве методологического фундамента эвергетики целесообразно использовать теорию коммуникативного действия, которое исходит из необходимости нахождения и использования рациональных механизмов для поиска путей к достижению согласия. При этом неотъемлемыми элементами взаимодействия людей полагаются взаимопонимание, консенсус, аргументация и др. Но главное состоит в том, что субъект осмысливает свой жизненный путь в аспекте блага, а не целесообразности, а поэтому эвергетика нацелена на повышение роли культуры в жизни общества и трансформацию целерационального «экономического человека» в коммуникативно рационального «человека культуры».

Список литературы

[1] 1. Vittikh V.A. Heterogeneous Actor and Everyday Life as Key Concepts of Evergetics. – Group Decision and Negotiation. – http://link.springer.com/article/10.1007/s10726-014-9423-5/fulltext.html. Published online : 29 November 2014.

[2] 2. Виттих В.А. Проблемы эвергетики. – Проблемы управления, № 4, 2014, с.69 – 71.

[3] 3. Johnson R.A.,Kast F.E.,Rosenzweig J.E. The Theory and Management of Systems (second edition)// McGraw-Hill Book Company, New York, 1967 (перевод с английского, М.: Советское радио, 1971.- 648 с.)

[4] 4. Кара-Мурза С.Г.Кризисное обществоведение / Курс лекций. Ч.1 – М.: Научный эксперт, 2011. – 464 с.

[5] 5. Хабермас Ю. Отношения между системой и жизненным миром в условиях позднего капитализма. – Thesis, вып.2, 1993. – с.123 – 136.
[6] 6. Новейший социологический словарь. – Мн.: Книжный дом, 2010. – 1312 с.
[7] 7. March J.G., Simon H.A.. Organizations. – John Wiley and Sons, Inc., New York, 1958.
[8] 8. Cyert R.M., March J.G.. A Behavioral Theory of the Firm. – Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1963.
[9] 9. Vittikh V.A. Introduction to the Theory of Intersubjective Management. – Group Decision and Negotiation, volume 24, issue 1, January 2015, p.67 – 95. – http://link.springer.com/article/10.1007/s10726-014-9380-z/fulltext.html. Open Access Date : 09 March 2014.
[10] 10. Климов И.А. Социологическая концепция Энтони Гиддеса. – http://www.nir.ru/sj/sj/sj1-2-00klim.html.
[11] 11. Хюбнер К. Истина мифа. – М.: Республика, 1996.
[12] 12. Vittikh V.A. Evolution of Ideas on Management Processes in the Society : from Cybernetics to Evergetics. – Group Decision and Negotiation. - http://link.springer.com/article/10.1007/s10726-014-9414-6/fulltext.html. Published online : 14 September 2014.
[13] 13. Виттих В.А. Феноменологический подход к построению теории управления обществом// Сборник трудов XII Всероссийского совещания по проблемам управления. – Москва, ИПУ РАН, 16 – 19 июня 2014 г. – М., 2014. – с. 6182 – 6186.
[14] 14. Ильин В.В. Теория познания. Введение. Общие проблемы. – М.: Издательство МГУ, 1993, с.80-81.
[15] 15. Франкл В. Человек в поисках смысла : Библиотека зарубежной психологии. – М.: Книга по требованию, 2012. -366 с.
[16] 16. Лэнгле А. Жизнь, наполненная смыслом. Логотерапия как средство оказания помощи в жизни. – М.: Генезис, 2014. – 144 с.
[17] 17. Habermas J. Theorie des Kommunikativen Handelns. Bd.II. Zur Kritik der funktionalistischen Vermunft. Fr.a.M., 1981.
[18] 18. Чекушкина Е.Н. Коммуникативная теория Ю.Хабермаса и культура информационного общества. – Теория и практика общественного развития, вып.1, 2014. - http://teoria-practica.ru/rus/files/arhiv_zhurnala/2014/1/fil%D0%BEs%D0%BEfiy%D0%B0/chekushkina.pdf
[19] 19. Вайзер Т. Эгоцентризм и интерсубъективность во взаимоотношениях человека и окружающей среды. – Логос, № 1 (97), 2014, с.171 – 184.
[20] 20. Швырев В.С. Рациональность как ценность культуры. Традиции и современность. – М.: Прогресс – Традиция, 2003. – 176 с.

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ КРУПНОГО РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

П.О.Скобелев

ОАО "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королёва"
141070, Королев, ул. Ленина, 4А, Россия
post@rsce.ru
тел.: +7 (495) 513-80-19, факс: +7 (495) 513-86-20

Ключевые слова: *информационные технологии, эффективность, Industry 5.0, интернет вещей, мультиагентные технологии, интеллектуальная система управления*

Abstract
The article is dedicated to the problem of resource management in large rocket-and-space enterprises describing directions of information technology implementation for effective project and production operation. Moreover, it shows that increasing enterprise efficiency demands reforming project management and changing IT product and technology paradigm.

Введение

Вызовы современного мира, проявляющие себя в растущей сложности решаемых задач, априорной неопределенности и высокой динамике изменений спроса и предложения, заставляют пересматривать сложившиеся подходы к управлению и реформировать предприятия для повышения эффективности деятельности.

В работах по управлению [1] все чаще отмечается, что причины многих актуальных и значимых проблем менеджмента предприятий следует искать в чрезмерно разрастающемся использовании принципов «идеальной» бюрократии, создающей многоуровневые иерархии власти и обычно игнорирующей знания и личные качества исполнителей.

В данной статье рассматривается опыт и предложения по развитию информационных технологий (ИТ) в ОАО «РКК «Энергия» (далее – Корпорация), описываются основные цели, задачи и ожидаемые результаты внедрения ИТ на предприятии.

1 Цели развития

В условиях современной новой экономики, в особенности, на фоне резкого обострения международных отношений в последнее время многие отечественные крупные предприятия аэрокосмической отрасли начинают искать новые пути своего реформирования для повышения эффективности.

Как отмечают многие аналитики, ключевыми проблемами российской аэрокосмической промышленности являются не «технологическое отставание и износ оборудования, а устаревшие вертикально-интегрированные бизнес-модели и нехватка ключевых компетенций» [2].

Основными стратегическими целями развития ИТ в Корпорации являются:

1) Повышение эффективности деятельности Корпорации при управлении проектами по разработке, производству и эксплуатации сложных изделий;
2) Улучшение качества результатов, продуктивности и удобства работы с Корпоративными системами для пользователей всех категорий;

3) Обеспечение высокой оперативности, гибкости, производительности, надежности и безопасности работы корпоративных систем;
4) Внедрение перспективных информационных систем и технологий в работу подразделений корпорации на всех уровнях;
5) Поэтапное импортозамещение стратегически важных программных продуктов на отечественные инновационные разработки;
6) Сокращение затрат на разработку новых и поддержку эксплуатации существующих корпоративных систем.

2 Краткий анализ текущего положения

За последнее время в 2007 – 2014 гг. в Корпорации была заложена основа общекорпоративной информационной платформы для ведения договоров, кадров т.д., которая включает в себя следующие системы для управления предприятием:
1) Управление ресурсами (ERP): ИС «Эверест», 1С, Oracle e-Business Suite.
2) Управление жизненным циклом изделия (PLM): PTC Windchill, PTC Creo.
3) Другие: информационные системы для бизнес-анализа, корпоративной отчетности, портальные решения: КСЭД на базе Documentum, КСБА на базе Oracle BI, специализированные системы для поддержки сопровождения проектной деятельностью и др.

Внедрение этих систем позволило на деле автоматизировать ряд рутинных функций учета и контроля для административно-управленческого персонала, включая отдел кадров, бухгалтерию и другие общих служб. Однако по мнению пользователей, общая эффективность внедрения указанных учетных систем по соотношению «Ценность / Затраты» является, как правило, средней или низкой, так как часть корпоративных систем мало используется для реального управления ресурсами в проектах и требует доработки или замены.

По результатам анализа используемых в Корпорации информационных систем можно сделать следующие ключевые выводы:
1) Существующие системы реализуют лишь учетные функции ведения проектов и мало применяются проектными офисами;
2) Разработанные системы были ориентированы на устаревающую «затратную» экономику Корпорации;
3) Пользователи не удовлетворены наличием многочисленных разнородных систем, которые, по их мнению, не учитывают сложившуюся бизнес-практику работы по проектам в Корпорации и трудно применимы на практике;
4) Корпоративные системы не поддерживают работу в реальном времени, что ведет к задержкам в принятии решений;
5) Данные в корпоративных системах являются неполными и не дают корректную, надежную и достоверную картину ведения проектов;
6) Многие системы морально устарели и не имеют современного интерфейса, удобного для пользователей.

Для космической отрасли, в которой обеспечение качества работ и надежности изделий является первостепенной задачей, внедрение ИТ для обеспечения сквозного цикла конструирования и производства изделий является критически важным.

3 Краткий анализ современных трендов ИТ развития

Процессы управления и непосредственной предметной работы на современных крупных предприятиях, в особенности, зарубежных, сегодня уже совершенно невозможно представить без применения самых передовых информационных технологий.

Основные тенденции ИТ развития предприятий [3] в современном мире показаны на рисунке 1.

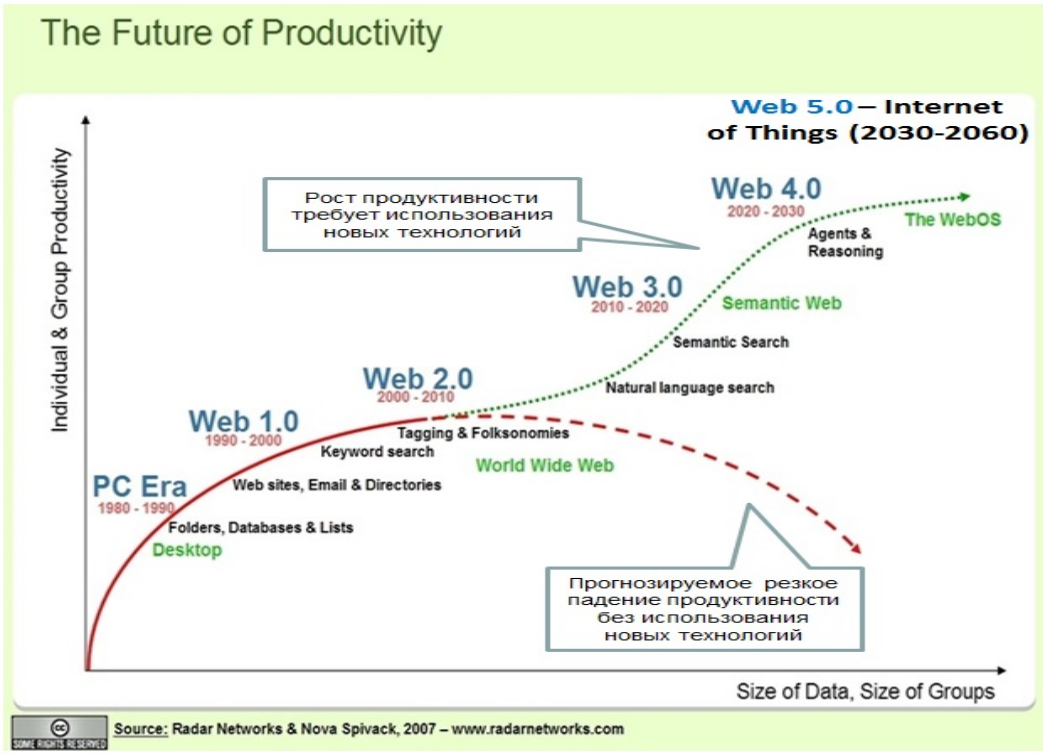


Рисунок 1 – Тенденции развития ИТ современных предприятий: рост продуктивности с ростом объемов данных при использовании новых технологий (зеленая линия) и без них (красная) [4]

Во всем мире сейчас в стадии формирования грядущий будущий новый облик развитых промышленных предприятий, так называемых предприятий поколения Industry 5.0 (названных так по аналогии с создаваемым в настоящее время новым поколением программных систем класса Интернет-5.0), характеризуемых тотальным внедрением информационных технологий на совершенно новом уровне.

По аналогии с развитием Интернета можно утверждать, что облик современных предприятий будет меняться определенными стадиями следующим образом:

- Интернет - 1.0 – пассивное хранилище документов;
- Интернет - 2.0 – поддержка коммуникации между пользователями (социальные сети);
- Интернет - 3.0 – семантический Интернет документов (Semantic Web);
- Интернет - 4.0 – Интернет программных агентов, действующих от лица и по поручению пользователей;
- Интернет - 5.0 – Интернет вещей, которые воспринимают среду, планируют и выполняют работу.

Для поддержки новой методологии управления проектами в Корпорации наиболее важными и перспективными представляются новые информационные технологии, представленные на рисунке 2.

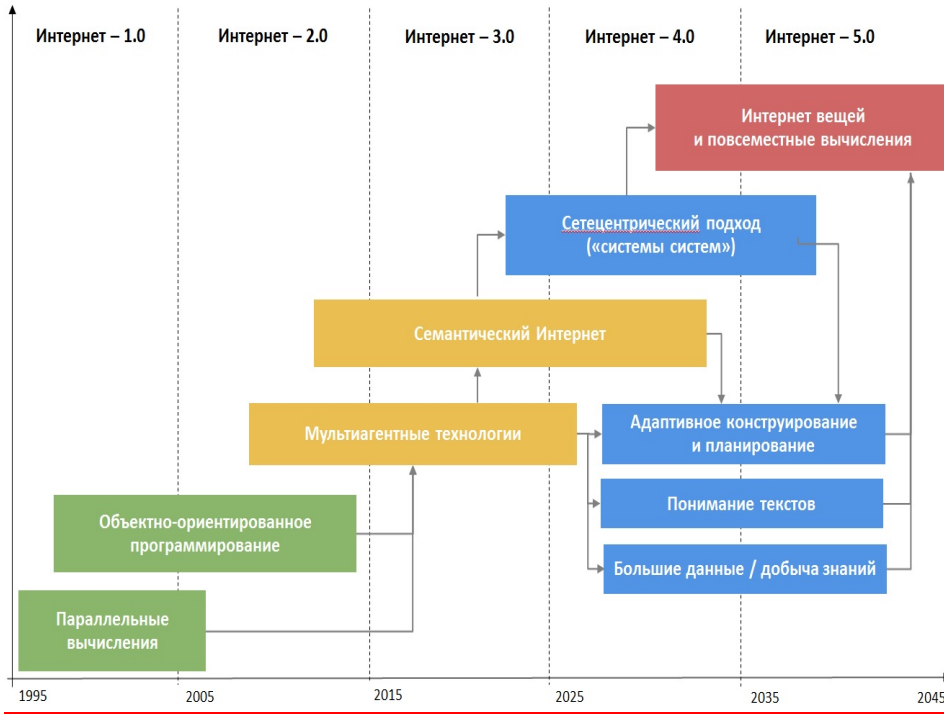


Рисунок 2 - Ключевые информационные технологии для управления проектами

Данные ключевые технологии будут во многом предопределять разработки будущих информационных систем в ближайшие 5-10-15 лет:

1) Параллельные вычисления.
2) Объектно-ориентированное программирование.
3) Мультиагентные технологии.
4) Семантически Интернет.
5) Адаптивное конструирование и планирование.
6) Понимание текстов.
7) Большие данные и добыча знаний.
8) Сетецентрический подход.
9) Интернет вещей и повсеместные вычисления.

4 Основные задачи ИТ развития

Для достижения поставленных выше целей основными задачами ИТ развития в Корпорации являются следующие:

1) Экономика реального времени при управлении проектами (ERP – контур).
2) Сквозная поддержка ЖЦ изделия: от идеи – до утилизации (PLM – контур).
3) Бесшовная интеграция ERP и PLM (связь контуров).

В качестве основного стратегического направления ИТ подразделений Корпорации предлагается создание распределенной интеллектуальной системы управления ресурсами корпорации (ИСУ РВ / «Эффективное предприятие») для поддержки принятия решений в реальном времени, которая бы строилась «поверх» существующих традиционных систем (Рисунок 3).

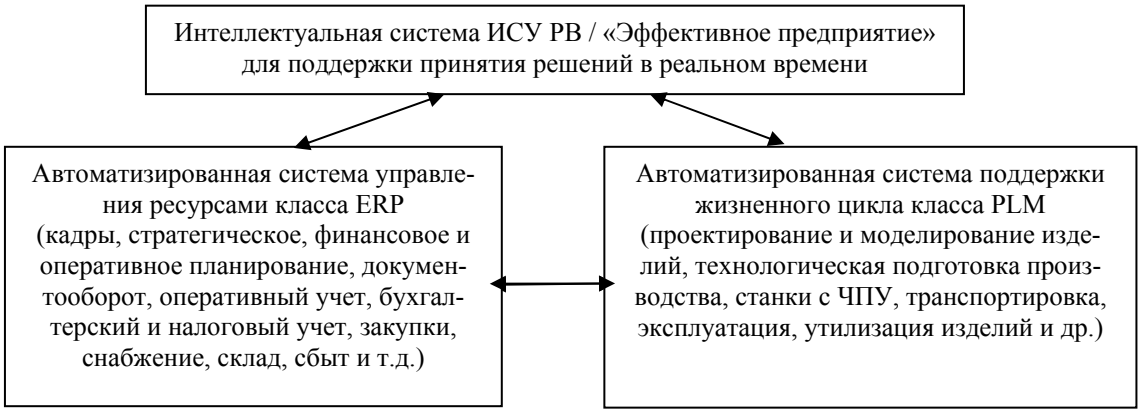


Рисунок 3 - Общая структура системы управления работой корпорации

Предлагаемая система ИСУ РВ / «Эффективное предприятие» по своему классу первоначально будет являться автоматизированной системой для поддержки принятия решений, в которую поэтапно будут встраиваться методы и средства интеллектуализации управленческой деятельности, связанные с оперативным выявлением и анализом проблем, опережающим прогнозированием развития ситуаций, разрешением конфликтов по целям, задачам и ресурсам, моделированием вариантов решений, накоплением и обработкой данных для выявления скрытых закономерностей и т.д.

Цель создания ИСУ РВ – повышение качества и эффективности работы Корпорации за счет перехода к согласованному принятию решений по управлению ресурсами на всех этапах жизненного цикла изделий.

В этих целях ИСУ РВ создается как сетецентрическая система («система систем»), постоянно асинхронно работающих и согласованно взаимодействующих по принципам P2P (Peer-to-Peer, что означает «Каждый с каждым» и «Равный с равным») через общую информационную шину Корпорации для реализации подходов параллельной разработки сложных изделий (от англ. Concurrent Engineering - противостоит «Нисходящему») [5-7].

Перспективная архитектура интеллектуальной системы управления предприятием в реальном времени (ИСУ РВ) на 2015-2025 гг. представлена на рисунке 4.

Ключевой частью ИСУ РВ должна стать База знаний Корпорации (БЗ), позволяющая накапливать, систематизировать и использовать знания об организации, изделии и порядке проведения работ, номенклатуре частей, подразделениях и сотрудниках, результатах испытаний и т.д.

В каждый момент времени всем участникам должна быть доступна Кибер-физическая модель изделия (КФМ), например, полная виртуальная модель МКС, параллельно «летящая» с изделием в космосе или создаваемая на Земле.

Принцип действия системы ИСУ РВ включает в себя непрерывный цикл работы из следующих шагов:

- Реакция на событие
- Распределение ресурсов
- Планирование и перепланирование
- Оптимизация расписание
- Мониторинг и контроль исполнения
- Согласование с пользователями
- Перепланирование по план/факт

- Обучение из опыта

В качестве первого шага предлагаемая архитектура строится на базе существующих и работающих ERP и PLM систем, в которые добавляются системы адаптивного планирования ресурсов (ASP) и системы поддержки принятия решений (DMS).

В свою очередь, предлагаемая архитектура ASP системы может строиться как две взаимоувязанные системы для адаптивного планирования проектов и производства.

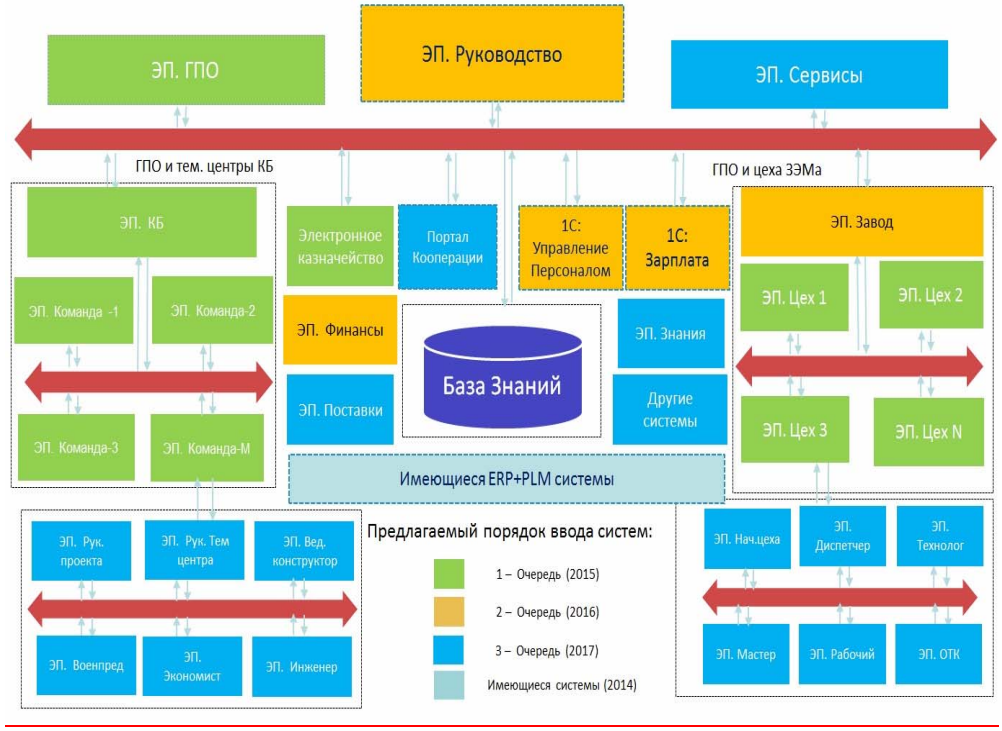


Рисунок 4 - Перспективная архитектура интеллектуальной системы управления Корпорацией на 2015-2025 гг.

При этом каждая такая система также строится как сетецентрическая «система систем», которая состоит из взаимодействующих планировщиков различных уровней: стратегического (укрупненного) планирования, оперативного планирования подразделений и проектных офисов, а также в будущем – личных планировщиков сотрудников.

5 Функции ИСУ РВ для управления Корпорацией

Предлагаемая система позволит руководству и сотрудникам Корпорации принимать более активное участие в процессах принятия решений на всех уровнях и одновременно видеть на общей «плазме» или индивидуальных компьютерах, планшетах и сотовых телефонах прогресс разработок по корпорации, подразделениям и проектам, а также личный вклад каждого в результат с любой степенью детализации с точностью за квартал, месяц, неделю и день, включая потоки важных событий, движение по работам, показатели в динамике изменений как на бирже и т.д.

Для руководителей проектов и руководства корпорации появится возможность получать «баланс» по оперативному прогрессу решения задач в проектах на каждый день (как в банке) с одновременным опережающим прогнозированием и подсветкой проблемных ситуаций, и вы-

работкой мер по их разрешению, включая перераспределение задач, вовлечение новых ресурсов, сверхурочные и др. В этих целях такая система должна быть способна «владеть» текущей ситуацией с заказами и ресурсами на основе данных возможно из других систем, оперативно реагировать на любые важные для выполнения планов события, опережающим образом выявлять возможные проблемы по ресурсам или риски их возникновения, порождать варианты решений для реакции на события по ходу развития ситуации, сопоставлять эти варианты и рекомендовать решения пользователям, поддерживая процесс их согласования, строить гибкие планы по их исполнению, вести мониторинг исполнения созданных планов и перестраивать эти планы по мере расхождения плана и факта, оценивать как достигаемые результаты, так и возможный ущерб от несвоевременного принятия решений, ведущих к избытку и простою или дефициту ресурсов, с учетом поставленных подразделениям целей, предпочтений и ограничений, и даже обучаться каждый день из результата (Рисунок 5).

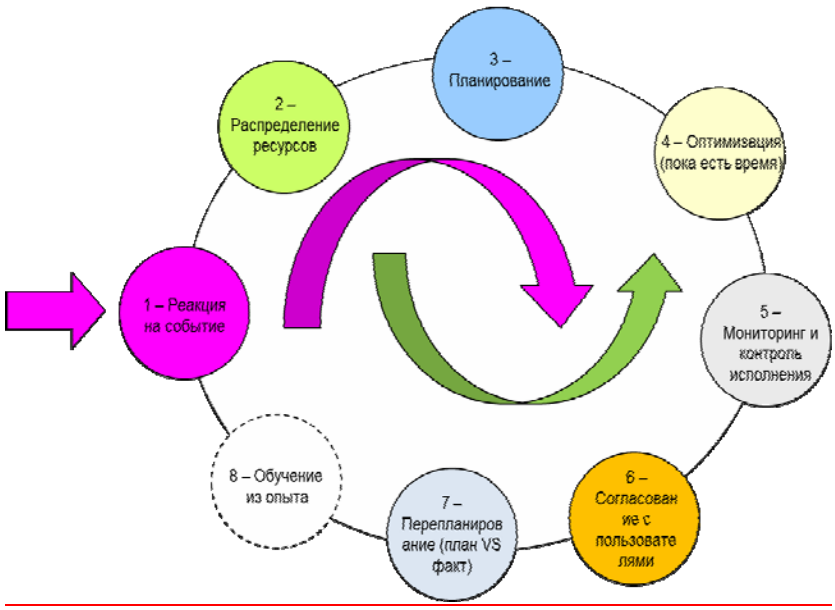


Рисунок 5 - ИСУ РВ: непрерывный ежедневный цикл управления корпорацией

Данный цикл соответствует непрерывному циклу управления «восприятие – планирование – исполнение» любого живого организма.

6 Ожидаемые результаты

Реализация рассмотренной стратегии позволит уже на первых шагах получить следующие основные результаты:

1) Повышение качества и эффективности ИТ продуктов и услуг для конечных пользователей при снижении затрат на содержание и развитие существующих систем.
2) Внедрение перспективных интеллектуальных систем поддержки принятия решений в проектах разработки, производстве и эксплуатации изделий ракетно-космической техники.
3) Повышение оперативности, прозрачности, гибкости и эффективности в управлении проектами.
4) Снижение трудоемкости управления проектами создания и эксплуатации РКТ и уменьшение негативного человеческого фактора при распределении ресурсов.

5) Сокращение сроков проектирования и производства изделий и повышение прибыли по проектам корпорации.
6) Создание линейки продуктов и собственной масштабируемой программной платформы для разработки и развития программных систем управления корпорацией.
7) Превращение ИТ центра (как затратного) - в инновационный центр, разрабатывающий и тиражирующий новые решения по отрасли.

Заключение

Современные особенности развития предприятий России заставляют искать новые пути повышения эффективности управления проектами.

В настоящей статье предложена ИТ стратегия развития ОАО «РКК «Энергия», ориентированная на внедрение наиболее перспективных интеллектуальных технологий для повышения эффективности управления ресурсами и поддержки жизненного цикла изделий при реализации проектов создания новых изделий ракетно-космической техники.

Дана оценка ожидаемых результатов и достигаемых преимуществ реализации предложенной стратегии.

Список литературы

[1] Виттих В.А. Введение в теорию интерсубъективного управления // Самара: СНЦ РАН, 2013. – 64 с.
[2] Шадрина Т. Деньги витают в облаках [Электронный ресурс] // Российская бизнес-газета от 27.08.2013. - URL: http://www.rg.ru/2013/08/27/aviaprom.html
[3] Spivack N. How the WebOS Evolves? [Электронный ресурс] // 09.02.2007. – URL: http://novaspivack.typepad.com/nova_spivacks_weblog/2007/02/steps_towards_a.html
[4] Spivack N. Diagram: Beyond Keyword (and Natural Language) Search [Электронный ресурс] // 01.03.2007. – URL: http://novaspivack.typepad.com/nova_spivacks_weblog/2007/03/beyond_keyword_.html
[5] Иващенко А. В., Карсаев О. В., Скобелев П. О., Царев А. В., Юсупов Р. М. Мультиагентные технологии для разработки сетецентрических систем управления. // VI Всероссийская научно-практическая конференция "Перспективные системы и задачи управления", 4 - 6 апреля 2011 г. Таганрог. – Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №3 (116). С. 11-23.
[6] П.О. Скобелев. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии». – 2013. №1. – С. 1–32.
[7] О.И. Лахин, А.С. Полников, Е.В. Симонова, П.О. Скобелев. Теория сложности и проблема управления жизненным циклом изделий аэрокосмической промышленности // Информационно-управляющие системы. – 2015. №1(74). – С. 4-12.

Resources Management at Machinery Plants

Управление ресурсами на машиностроительных предприятиях

ADVANCES IN DATA VALUE CHAIN MANAGEMENT: SEMANTIC WEB AND A MIXTURE OF INTEGRATION PARADIGMS FOR HOLONIC SYSTEMS

Vadim Chepegin, Dan Rusu, Jose Rafael Navalon Baixeras
TIE Kinetix
De Corridor 5d□3621 ZA, Breukelen, the Netherlands
Vadim.Chepegin@gmail.com, Dan-Victor.Rusu@TIEKinetix.com, Jose.NavalonBaixeras@TIEKinetix.com
tel.: +31-88-369 8079

Keywords: *service oriented architecture, event-base architecture, microservice, Semantic Web*

Abstract
The ARUM platform makes use of *Multi-Agent Systems (MAS) that build schedules in real time* based on the information collected from a wide variety of resources including legacy systems, data generated by workers, sensors, MAS themselves, etc. To bring the necessary information *enterprise integration platforms that supports different paradigms* in order to guarantee fast delivery of business value, maximal coverage of systems accepted by the platform, and security. Innovative solution described in this paper is based on TIE Smart Bridge (TSB), - a lightweight cloud-based integration bus, and TIE Smart Integrator (TSI), - a schema mapping and data transformation tool that intensively use Semantic Web technologies in order to overcome limitations of syntactic based approaches. The solution is delivered as SaaS and business functions are packaged as a set of microservices to speed up a time-to market. This paper focuses at one part of the ARUM platform, namely data transformation and integration aspect of it.

Introduction

ARUM (Adaptive Production Management) is a collaborative project within the European Commission (EC) "Factory of the Future" initiative and is funded under the 7th Framework Programme. The project addresses the development of innovative Information Communication Technology (ICT) solutions to handle new challenges in production and ramp-up of complex and highly customized products. Its focus is the developments of mitigation strategies to respond faster to unexpected events and the implementation of systems and tools for decision support in planning and operation. ARUM project has received funding from the European Union's Seventh Framework Programme for research, technological development and demonstration under grant agreement no. 314056.

Production data is usually distributed across various heterogeneous data sources such as legacy systems, event producers, sensors, planning and scheduling tools, etc. Thus, in order to pave the road towards sensing enterprise, there is a need for a robust communication layer, which allows seamless data exchange and integration. An extra challenge of this project lay in the fact that any MAS needs a massive information flow up-front for initial set up and then continuously during an execution to make its work effective. This is a well-known so-called "knowledge bottleneck" problem, but, in the case of ARUM, velocity and volume of data are also playing an important role since a schedule for workers that is based on e.g. the out-dated number of screws, connectors, etc. would have no value. And to make it even more challenging, providers of business tools in ARUM requested platform providers to support ontologies and triple stores for the convenience of their communications among each other and with other data sources. This solution also helps business services such as planners and schedulers to focus on their primary functionality and delegate all the rest to the platform. This paper is focused on the enterprise service and data integration aspects of the proposed platform.

The rest of the article is organized as follows. The next section explains the typical usage scenario. Section 2 sheds a light on the various types of integration approaches and how they supported in ARUM platform by TIE solutions. Section 3 provides an overview of the innovative semantically driven mapping tool that is used for data transformation and integration within the ARUM project but which is stemmed from another EU project STASIS. Finally, "Conclusions" section draws the summary of the work.

1 ARUM in action: usage scenario

A typical ARUM scenario starts when a factory-floor worker sends a message via a specialised mobile application to the ARUM platform regarding finishing the current task. This message is accepted by the platform using REST API and the appropriate data entry will be added or updated. Other devices or software services that are connected through RESTful APIs or use native drivers, e.g. ODBC or JDBC, can get access to this new state right away. But this is not it, since ARUM has to support ontologies TIE has developed a publish-subscribe end-point (pub/sub) that accepts queries in SPARQL – a W3C standard for querying Web ontologies and triple stores. ARUM Ontology Service is subscribed to this end-point with many queries following its internal logic and requests from its main clients, namely planners, schedulers and other knowledge-based tools. Although, in theory any service can subscribe to this pub/sub point, the only one practical subscriber at the moment is the Ontology Service. This is done as a part of implementing the focused responsibilities of the services. Ontology Service focuses on providing a clean API and language understood by knowledge-based systems, it intensively manipulates knowledge in a triple store, searches for implicit relationships using different inference mechanisms and it is ready to reply to complicated analytical queries. The data warehouse focuses on effectively performing data integration from multiple sources and does not provide analytical capabilities out-of-the-box. This differentiation helps avoid the trade-off between performance and providing a consistent unified ontological view over the diverse and dispersed data silos.

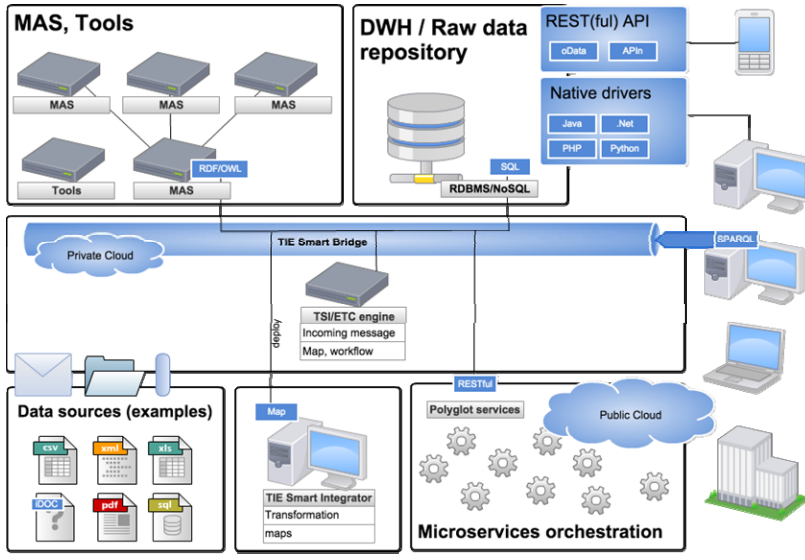


Figure 1 – ARUM scenario: data integration and transformations

TIE Smart Integrator is described in section 3 in more details. Here it is important to understand that its role is in creating mappings between various data sources and then performing the transformations of data based on those mappings. Within the ARUM context and in order to satisfy the needs of knowledge-based systems, TSI was enriched to deal with transforming data into Web Ontology for-

mat OWL and thus when SPARQL request arrives, it is 1) rewritten into one or more SQL queries, 2) data is retrieved from the target systems, and 3) transformed using existing maps into the destination format. All those three steps are implemented via microservices and they can be executed in parallel when possible. Implementation of a scale out strategy here also helps in increasing the throughput of the system and decreases its latency. The similar situation exists between ARUM DWH and legacy systems. TSB is used to subscribe or to pull legacy resources through its gateways. When data is emitted by any of the data providers, TSB starts an appropriate workflow that contains necessary transformations, and data is finally pushed into the DWH.

TSB and TSI can be provided within the Cloud as Software-as-a-Service (SaaS) and they can help in integrating business services dispersed all over the Internet running on their own distributed Virtual Machines (VM) and Virtual Environments (VE such as Docker) with a diversity of operating systems. Thus, the proposed solution speeds up and facilitates delivery of the new value for the businesses by quickly setting up a foundation for communications in heterogeneous distributed environments that require intensive data exchange among context bubbles but run on various platforms and speak different vernaculars.

2 From SOA to REST and back: data value chain to its full potential

At the moment, there are two major paradigms for enterprise and application integration competing on the market, which many researchers and practitioners consider mutually exclusive: namely, Service-Oriented Architecture (SOA) and REST. The former one is built on top of the Enterprise Service Bus (ESB) integration pattern, functional decomposition, SOAP messages, and star topologies [1], [2]. It is usually associated with large investments in IT infrastructures in terms of time and funds.

In contrast, REST integration style capitalizes on the existing Web infrastructure [3]. It supports P2P communications, lightweight protocols and message formats, and it does not require large upfront investments especially when combined with the microservices paradigm. The success and rapid growth of the Internet is often provided as a proof for opting for the REST style. REST web services are used by many large players such as Amazon, eBay, Netflix to name just a few, for delivering new business functions fast (sometimes within a few days) through exploiting existing polyglot infrastructures along with a decomposition of functionality and delivering this functionality in form of single purpose applications often called microservices [4].

Both of the approaches facilitate the loose coupling (time and availability aspects, location transparency, asynchronous calls) of communicating components if done right but SOA can outreach sources and services outside of HTTP boundaries that is not possible for REST Web Services because RESTful integration is done using HTTP as a transport and application protocol. Thus, it cannot communicate over other protocols such as TCP, SMTP, JMS, IIOP, etc. where traditional SOA has all its merits.

Within the realm of Internet of Things and Knowledge-based systems such as Multi-agent systems (MAS) there is a plethora of independent services and data sources that reside on various platforms spanning from legacy monoliths to notebooks, and tablet PCs. The legacy nature of many of the involved systems such as MES, ERP, CRM, HR, etc. also means that those systems most of the time do not have Web Service interface and cannot communicate via HTTP protocol. They also need transformation of their messages since they often talk in EDI/EDIFACT, iDoc, XML, XLS, SQL, and many other dialects incompatible to each other. Integration with legacy and off-the-shelf monolith systems is important because tons of valuable data are already there and those systems are tightly integrated into the enterprise business processes and they will not be replaced anytime soon, if ever.

However, REST often is the only way to integrate with the applications and sources that reside in the Cloud environments, e.g. for integration of smartphones, tablet PCs, sensors, wearables and other emerging devices. Cooperation via interaction of all those systems (hardware and software) is

the intrinsic characteristic of the ARUM platform and thus support of both integration paradigms is a must.

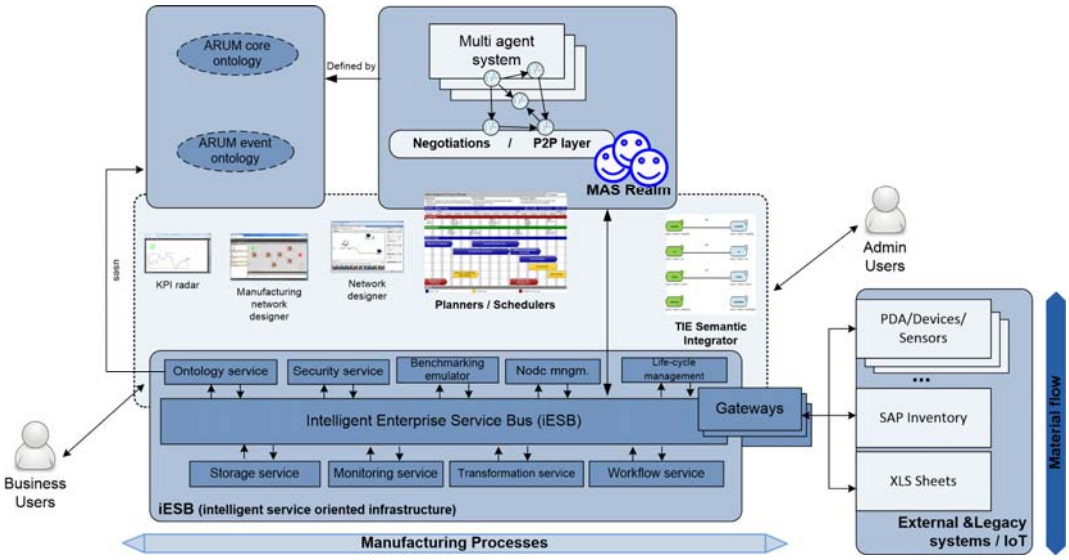


Figure 2 – ARUM platform: conceptual architecture

The bare bone of the ARUM platform is a so-called Intelligent ESB (iESB), which is a combination of Enterprise Service Bus, e.g. TIE Smart Bridge (TSB), with added value services that realise the specifics for production planning and managing of the platform. All ARUM added-value services that constitute the complete iESB are deployed in the cloud and can benefit from using the dynamic discovery and elasticity along with a polyglot persistency and polyglot service execution environments. This became especially valuable when ARUM had faced a need of integrating new wave of services and data providers that reside on the hand-held devices of the shop floor personnel such as tablets or notebooks used by workers and managers next to the working stations.

TSB was selected due to its successful history of business brokerage acknowledged by Gartner in their quadrant for Integration Brokerage and a successful in different size commercial projects and a rich set of out-of-the-shelf functionality for integration with a wide spectrum of legacy systems as well as with services and data providers that hosted in the Internet cloud. TSB relies on TSI for doing explicit declarative maps that describe how elements of a source schema correspond to elements of a destination schema. Transformation engines use those maps in the data exchange and integration scenarios. Both of these tools can be exposed and used via REST APIs, and altogether this solution paves the road between two integration paradigms, SOA and REST.

3 TIE Semantic Integrator: managing heterogeneity with Semantic Web technologies

Within the ARUM context TSB is using a powerful semantically enriched tool for mappings and data transformations, called TIE Smart Integrator (TSI). TSI can be used for integration of data coming from variety of resources in different formats and this step is executed as one of the major routines by TSB via replying to the requests coming from business services.

Figure 1 shows the basic data flow from legacy systems to the business services via TSB that include a transformation step in the middle, legacy system gateways on the left hand side and two examples of interfaces for business services on the right hand side.

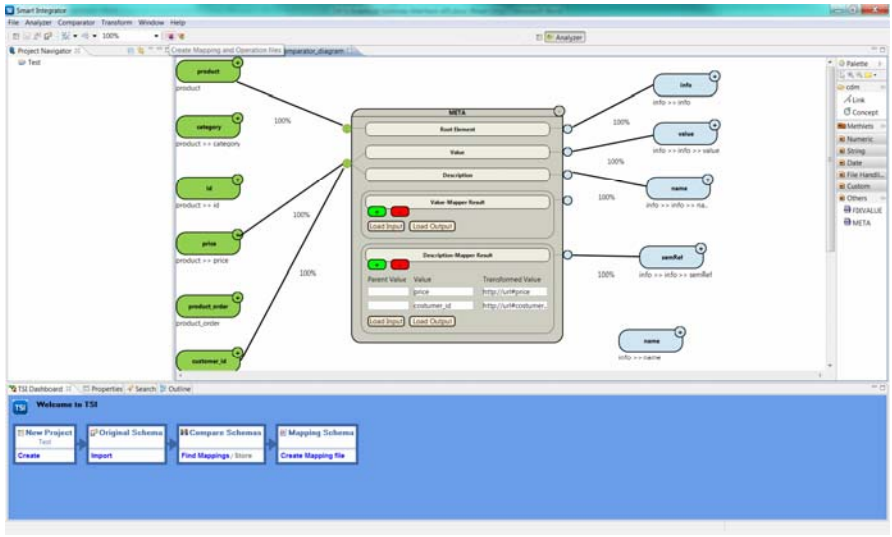


Figure 3 – TIE Smart Integrator: Semantic Entities (SE) on the left and right sides (green and blue colours) with a complex mapping that goes via a so-called Methlet (specific transformation rule)

TIE Smart Integrator (TSI) [5] (see fig. 3) performs transformation between two given data formats, namely between the source and the destination schemas. TSI project aims at addressing many of the problems that occur in the traditional syntax-based mappings and also both introduces the concept of user-driven semantics and to promote a neutral standard mapping format which can be taken advantage with existing transformation tools and technologies. This way TSI can be classified as one of the modern user-centred ontology-based semiautomatic annotation tools. The main difference of a TSI approach lies in a fact that it offers a usage of "folksonomy" (end-user defined categorization system) without a necessity of establishing a real common ontology prior to be able to do any mapping. In order to achieve a semantic mapping, TSI is using the following main steps (in order they used within the normal TSI workflow): 1) Import Schema Information; 2) Identify Semantic Entities; 3) Map Semantic Entities to each other; 4) Generate Mapping File compatible with a data transformation tool of choice; 5) Deploy generated mapping file into data transformation engine of choice.

TSI provides implementations for importing and automatically converting syntactical schema files into a content neutral format (called STASIS Neutral Format - SNF). For example, these inputs can be an XML schema specification (XSD), or a relational database schema (SQL), or even Microsoft Excel files marked-up in a specific way (schema importers from noSQL data sources).

STASIS has created a completely content neutral representation for schemas that internally is based on OWL and is referred to as the 'STASIS Neutral Format' (SNF) in the project. This way schema is extendible and could be read, manipulated, analysed and reasoned over with help of existing semantic web tools including RDF/OWL reasoners.

Instead of focusing on syntactical mappings, TSI concentrates on identifying semantic entities and mapping those semantic pieces. For this purpose, TSI/STASIS has defined the idea of allowing users to define so-called "STASIS Semantic Entities" (SSEs). These SSEs represent elements with a semantic meaning for the user. These semantic entities are the essence of the TSI/STASIS approach. They allow users (e.g. catalogue manager, business analyst, engineer) to define that they believe should be a semantic element and then they connect their syntax elements (being derived from their schema files) to those semantic entities using a graphical editor. SSEs are not limited in size, for example they can be as 'small' as a work order identifier or as large as a whole working station or a shop-floor for Airbus 380, although most will be more elemental. While the example that has been given is a rather simple, TSI supports the specification of more complex relationships between ele-

ments. For example, TSI reuses the concept of so called Methlets – functions, which allow users to connect their syntax elements to semantic entities by using logical expressions, concatenations, basically using any type of logic that a user wants to apply while transforming specific schema elements. Those links are referred to as 'complex links' in the TSI terminology and are fully supported in the TSI/STASIS specification and partially in the current implementation.

All semantic elements within TSI are expressed in Ontology Web Language (OWL) in order to benefit from existing libraries for ontology processing. Obviously, technological details are hidden in the background without involving users. The usage of a standards-aware semantic end-point gives TSI another significant advantage over traditional mapping tools as TSI participants may reuse semantic entities, mappings or schema definitions. It allows TSI to make mapping suggestions by reusing mapping information from earlier semantic links.

Once a user has performed all other steps, they may create the actual mapping between their data schema and the data schema of a partner. In order to do so, they will search and select two schemas (SNF entries in TSI/STASIS terminology). This results in a display of all semantic entities that have been defined in each SNF. TSI allows users to map their information schemas to the schema of another partner system by simply connecting their Semantic Entities. This allows users to create mappings in a more natural way by considering the meaning of elements rather than their syntactical structure.

When a user decides that a mapping is satisfactory the next step is to generate and export a mapping file compatible with a data transformation engine of a user choice. Deployment of mapping files on a transformation engine of one's choice is the final step of the process.

Conclusion

This paper reports on the ARUM approach to knowledge-driven distributed service-oriented platform. The work presented here demonstrates how the industry can benefit from using both the enterprise integration paradigms and the Semantic Web technologies based on the case taken from the European R&D project ARUM, funded from the EU FP7, that aims at solving hard planning problems during production ramp-up of complex and highly customized products such as new aircrafts with the help of Multi-Agent Systems. This class of systems, in order to build accurate prognosis and advices, requires massive volumes of data that should be ingested from legacy systems, mobile devices, sensors, and cloud services.

The ARUM team took up this challenge by having started with a traditional SOA approach and then gradually extending it with the REST style of integration in order to support new types of data sources and to open the door to the promising polyglot microservices that can help deliver business functions faster by fine-grained functional decomposition and the usage of standard ways of communication.

References

[1] M. Fowler. *Patterns of Enterprise Application Architecture*. Addison-Wesley Longman Publishing, 2002.

[2] Vadim Chepegin, and Stuart Campbell. "NEXOF-RA: A Reference Architecture for the NESSI Open Service Framework. ", *IBIS journal*, Vol. 8, 2009, pp. 53-56.

[3] Jim Webber. REST in Practice: Hypermedia and Systems Architecture O'Reilly, Beijing, 2010.

[4] Sam Newman. Building Microservices. Designing Fine-Grained Systems. O'Reilly Media, February 2015.

[5] Sven Abels, Vadim I. Chepegin, Stuart Campbell. "Semantic Interoperability for Technology-Enhanced Learning Platforms." ICALT 2009, pp. 564-568

Biography

Vadim Chepegin is a project coordinator and senior software engineer at TIE Kinetix. Vadim received his engineer (ing/MSc) degree from Kazan State Technological University, Russia. He worked in various Universities and research organizations in Russian and in the Netherlands. He is a co-founder of Russian e-journal "Learning Technologies & Society". Vadim is a member of a reviewers' board of an international IFETS journal and a constant member of a peer review committee of IEEE ICALT series of conferences. He combines a working experience in academia and industry. He worked as a consultant on different size software projects based on cutting-edge technologies, e.g. AJAX, SOA, Web 2.0, JEE5, semantic web. Last years he is tightly involved into the projects for industrial automation, business integration, and highly distributed systems as a software architect and as a project manager. He can be reached at vadim.chepegin@gmail.com.

Mr. Dan Rusu graduated in 1989 the Technical University of Cluj-Napoca (Romania) with a diploma grade of 10 (on a 10.00 point scale), where he returned in 1991 as Assistant Professor. In the meantime he was also active in commercial companies ranging from design of microprocessor-based systems to design and implementation of Integrated Information Systems for small and medium size companies. In 1999 Dan-Victor joined TIE Kinetix as Senior Software Developer, technical team lead, and since 2007 Chef Software Architect. Currently he is responsible for the TIE Kinetix Product Development, making sure that the quality of Software Development in TIE is constantly improving, and that the different subsystems of the TIE Kinetix Platform can smoothly integrate with each other on a SO architecture, in order to provide the customers with tailor-made solutions based on standard subsystems. He can be reached at Dan-Victor.Rusu@TIEKinetix.com.

Jose Navalon is a senior software engineer at TIE Kinetix. Jose graduated as engineer (ing/MSc) from Polithecnical University of Valencia, Spain. Since 1999 he has been working as a consultant in various commercial companies designing and developing solutions with the latest technologies for different sectors of industry. He is passionate about OOP and thus his main stack of languages includes C#, Java and C++ although functional languages are also in his focus. Jose is up to speed with the latest technologies and he always works with the leading technologies of the moment. He can be reached at Jose.NavalonBaixeras@TIEKinetix.com

AGENT-BASED STRATEGIC PLANNER FOR THE PRODUCTION OF SMALL LOTS OF COMPLEX PRODUCTS: THEORETICAL AND PRACTICAL PERSPECTIVES

Paulo Leitão[1,2], José Barbosa[1]

[1] Polytechnic Institute of Bragança,
Campus Sta. Apolónia, Apartado 1134, 5301-857 Bragança, Portugal

[2] LIACC - Artificial Intelligence and Computer Science Laboratory,
R. Campo Alegre 102, 4169-007 Porto, Portugal

{pleitao,jbarbosa}@ipb.pt

Keywords: *Strategic planning, multi-agent systems, mathematical optimization solver, what-if games.*

Abstract

This paper presents a strategic planner that assists the decision-makers to take strategic decisions on short term to respond faster and efficiently to unexpected events in the ramp-up production of complex and highly customized products, namely in situations of peak of demand, late change requests and immature technology. This tool combines the flexibility of multi-agent systems with the optimization capability of mathematical optimization solvers. The application of the strategic planner is illustrated by playing iterative what-if games supporting implementation of mitigation strategies addressing a real use case of a peak demand of a specific product.

1. Introduction

The ARUM (Adaptive Production Management) project [1] is addressing the challenging problem of the production planning and control in the ramp-up production of complex and highly customized products, particularly in small lot sizes, as in aircraft and shipbuilding industries. In fact, the daily occurrence of unexpected events creates significant risks during the initial phase of the production of a series, e.g. in situations of peak of demand, late change requests and immature processes and technology. This problem becomes hardly to be handled when the products are made in short series, since learning from these events becomes difficult and slow.

Having this in mind, the challenge is to consider innovative real-time decision-support tools that provide optimized solutions to respond faster and efficiently to these unexpected events, incorporating in a short notice the learning from these unexpected events. An example of such tools is the strategic planner that supports the decision-makers to take strategic decisions by producing and analysing alternative planning solutions for situations where unexpected events may provoke strong impact on the running plans. The traditional approach for the production planning problem considers a classical mathematical solver that runs an optimization method for a particular problem formulation using the current context [2]. In spite of the optimization levels, this approach lacks the responsiveness to achieve solutions in short term, which is crucial in industrial environments that are usually subject to condition changes. An alternative is to consider a distributed approach, e.g. using the Multi-Agent Systems (MAS) paradigm, to implement the optimization method, allowing to achieve better flexibility, robustness and responsiveness. However, the optimization level reached is degraded.

This paper introduces a hybrid approach for the production planning problem, combining the maturity, robustness and optimization provided by a classical solver and the flexibility and responsiveness provided by MAS solutions. The application of the proposed strategic planner is illustrated by playing iteratively the tool for a real use case related to the peak production demand for a specific product, allowing to foresee in advance the best strategy to mitigate the demand increase.

The rest of the paper is organized as follows: Section 2 overviews the current architectural approaches to develop strategic planning solutions and Section 3 presents the architecture of the agent-based strategic planning tool as part of the ARUM system. Section 4 describes the implementation of the planning tool and the case study scenario used for experimental validation. Section 5 illustrates the use of the strategic planning tool by playing what-if games simulation for a case study scenario of a peak product demand. Finally, Section 6 rounds up the paper with the conclusions.

2. Existing Approaches to Strategic Planning Decision

The production planning problem is traditionally faced by using a mathematical optimization solver. The solver is a software application that runs an optimization algorithm to solve a mathematical problem determining the optimum solution for given constraints. Solvers may implement different optimization algorithms, ranging from linear programming to meta-heuristics, such as local search methods and evolutionary algorithms, being possible to choose the algorithm according to the problem type. Several solvers are currently available, e.g., IBM ILOG CPLEX Optimizer, Xpress Optimization Suite, MOSEK, Gurobi Optimizer, KNITRO and Choco (see [3] for a comparative analysis).

These solvers are usually mature and robust computational applications that provide optimal solutions for the strategic planning problem. However, the majority of these solutions are commercial and lacks flexibility in situations of iterative rounds. In fact, in situations of re-parameterization of constraints and criteria, the decision-maker must manually introduce the new parameters making this solution to be hardly managed and very time consuming (i.e. sequential achievement of solutions).

An alternative is to implement the optimization method for the production planning using a distributed approach, e.g. considering the MAS principles. MAS paradigm [4] advocates the use of a set of distributed and autonomous entities, called agents, to solve complex problems. In such solutions, the agents representing the system components (e.g. orders and resources) interact with each other trying to achieve an optimized solution in a more robust, flexible and agile manner. Examples of the application of MAS principles in the production planning are [5-7].

In addition to the robustness and responsiveness, other potential advantage of the MAS based solver is the possibility of adaptive re-scheduling that increases the reaction time in case of small changes in the input data. This allows the strategic planner to analyze more exploratory options in a given time frame. In spite of these benefits, this approach presents several disadvantages, namely the need to develop the solver from scratch, the missing maturity of the approach, the non-optimal solution reached, and the missing scalability of MAS technology for a huge size of the problem search.

An alternative solution is to consider the best features of the previous described approaches, i.e. integrating a classical mathematical solver into an agent based infra-structure. This hybrid approach combines the maturity, robustness, stability and optimization of the solver with the MAS principles to explore the achievement of alternatives solutions for the strategic planner. Some works considering these ideas are reported in the literature, e.g. [8-9].

3. Agent-based Strategic Planning Architecture

A hybrid approach combining a mathematical solver and a MAS infrastructure is used to design the strategic planning addressing the ramp-up problem of production of small batches of complex and highly customized products. The main innovation regarding the similar approaches is centred on using the MAS principles to provide a what-if game simulation to explore different Degrees of Freedom (DoF), e.g., the different possibilities to expand the capacity to accommodate the demand fluctuation.

The MAS infrastructure is established to manage the exploration of alternative planning solutions supporting the decision-makers to take strategic decisions. This ecosystem comprises the following classes of agents, as illustrated in Figure 1 [10]:

- *Resource agent* (enterprise, facility or production line according to the scope), representing the physical resources in the enterprise, being responsible for the interaction with the decision-maker

(to insert simulation data and visualization of alternative planning solutions) and to initiate the production planning process.

- *Scenario agent*, responsible to generate scenarios for the production planning, exploring different DoF.
- *Planning agent* (strategic, tactical or operational according to the scope), responsible to calculate the solutions for a planning problem (formulated as a mathematical model), considering a certain scenario and applying an optimization method. This agent integrates a commercial solver, e.g., IBM ILOG CPLEX Optimizer, which implements optimization algorithms, e.g. the Mixed Integral Programming technique.
- *Simulation agent*, responsible to assess the achieved production plans through simulation to anticipate the stochastic behaviour in the production system.

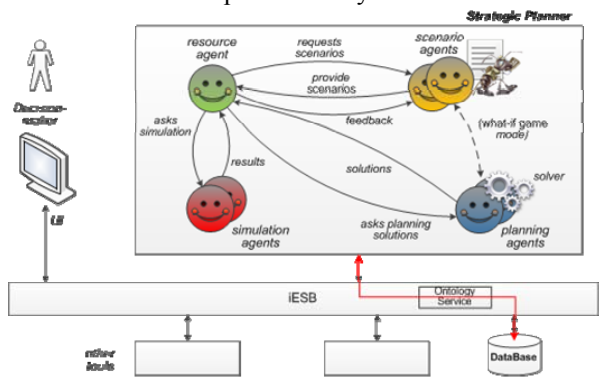


Figure 1 – Agent-based architecture for the strategic planning architecture [10].

The global system behaviour emerges from the interactions among the individual agents according to proper cooperation processes. Initially, the resource agent defines the set of DoF that can be handled to find alternative planning solutions and asks the scenario agents for exploratory scenarios that can be used for a specific situation (that includes the product demand and the production system capacity). The generation of scenarios explores the possibilities of capacity expansion to accommodate the demand fluctuation.

After receiving the generated scenarios, the resource agent requests the planning agents to solve the planning problem. The planning agent, using the mathematical formulation for the planning problem and the set of criteria defined by the resource agent, triggers the solver to run an optimization method. Several planning agents can run simultaneously aiming to parallelize the planning process to achieve faster the alternative solutions.

The resource agent compiles the alternative planning solutions provided by the planning agents and performs a pre-evaluation analysis by filtering and sorting these solutions according to predefined Key Performance Indicators (KPIs). In particular, the resource agent, articulated with the decision-maker, can iteratively modify the criteria and ask new solutions to the planning agents or to decide accepting one planning solution to be implemented. Optionally, the resource agent may send the alternative planning solutions for the simulation agents for assessment and sends the simulation results to the scenario agents for classification and posterior usage in the generation of scenarios.

This agent-based solution allows the implementation of what-if games simulation supporting the strategic decision-making based on the analysis of exploratory alternative planning solutions.

4. Instantiating the Strategic Planning for the Use Case

The described strategic planner architecture was applied to a real case study related to a manufacturing company that produces modular equipment used during the airplanes' flights.

4.1 Description of the Use Case

The company produces coffee machines, trash compactors, ovens and trolleys. Four production lines are dedicated to produce around 20 coffee makers per week. Each production line is composed by two working places, equipped with the necessary tools and accessories, where two skilled workers are performing the assembly steps.

The planning problem considered in this study is related to a situation occurred in 2012, where a major customer asked to deliver within only four months a number of coffee makers that almost exceeded the annual production volume. The time to confirm or decline the request was very short, while any possible response strategy required complex decisions about deep changes of current production and capacity plans, including the need to abandon a significant volume of orders from other customers respectively for other products. In this way, the problem of a peak of 100% in the production demand for the coffee makers during the weeks 15 and 30 requires a strategic decision about how to balance the production to fulfil the book of orders with the limited resources.

The strategic planner will assist the decision-makers to anticipate, assess and prepare mitigation strategies to for this kind of problem. Several DoF are used to mitigate the demand increase, namely considering additional production lines and extra working hours [10]. The first one refers to the possibility to add new production lines comprising skilled workers, which implies additional costs, composed by a fixed term related to the setup of the working bench, and a variable cost related to the workers' salary. The second DoF refers to the possibility to extend the daily working hours, which introduces an additional cost related to a percentage increase of the worker's salary.

4.2 Implementation of the Strategic Planner

The strategic planning tool was developed using the JADE [11] agent-based development framework to implement the MAS infra-structure. The communication between the agents is performed over the Ethernet network using the TCP/IP protocol, with the messages encoded using the FIPA-ACL (Foundation of Intelligent Physical Agents - Agent Communication Language). The planning agents use the ILOG CPLEX Optimizer solver to run the optimization techniques that solves the planning problem. The connection between the planning agent and the solver is performed through the ILOG Java API.

Several User Interfaces (UIs) were developed as desktop applications built on top of the NetBeans platform, being the several charts used to display the outputs of the planner developed using the JFreeChart API.

5. Playing with the Strategic Planning Tool

The decision-maker interacts with the strategic planner through a UI (User Interface), particularly to introduce input data, pre-select alternative scenarios to explore, and to visualize the alternative planning solutions, as illustrated in Figure 2. In order to achieve this, the component comprises several screens. After inserting the input data related to the mathematical model, the planning process is started by clicking the "*Start Planning*" button. The alternative planning results can be visualized as bar charts, navigable in several dimensions (e.g., production lines or products). The evaluation of the planning solutions can be performed according to several KPIs. In this work, the analysis considers the backlog control since the non-deliveries have significant impact for the company.

Considering the peak demand and the current operational configuration, i.e. 4 production lines and 40 working hours, the backlog is shown in Figure 3, ending the year with a total amount of 87 products. This backlog level is unaffordable and consequently some mitigation measures must be taken.

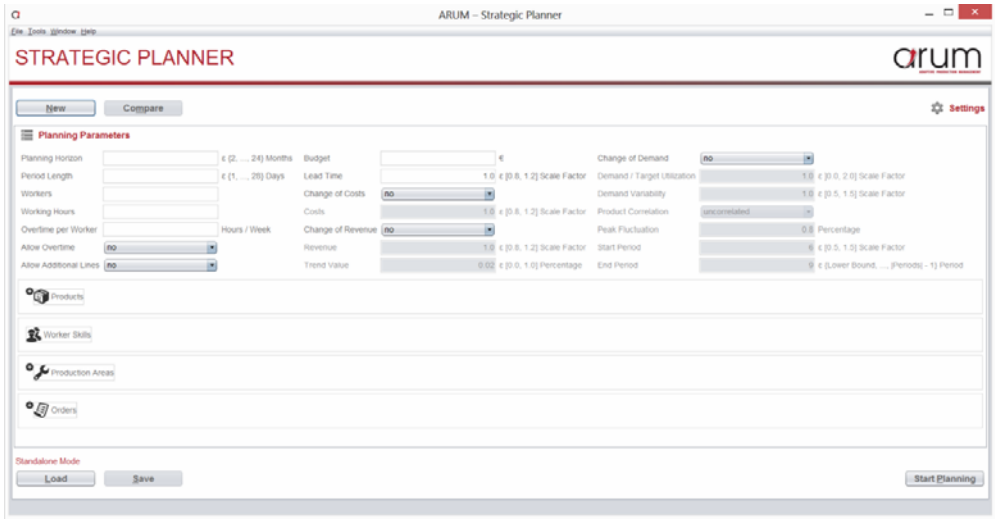


Figure 2 – UI for the input of data.

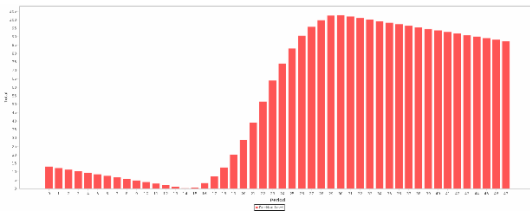


Figure 3 – Backlog for the demand increase without acting in DoF (max value: 102.8).

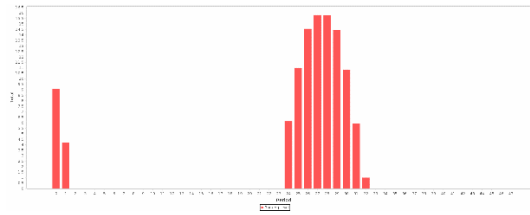


Figure 4 – Backlog for the peak demand considering 10h of overtime hours (max value: 15.8).

Considering the previously described DoF, the decision-maker can play with the possibility of have more overtime hours of work and/or allowing additional production lines. The first possibility could be to use 10hours/week of overtime for each production line, which allows to reduce the majority of backlog, remaining only the backlog concentrated in the peak demand period (see the planning solution illustrated in Figure 4). Additionally, the decision-maker can also play with the DoF related to the production lines, e.g., considering the use of two additional production lines allows reducing the backlog (see Figure 5). Acting individually on these DoF allows to reach acceptable backlog values, having each one an additional production cost (16.224€ for the first case and 15.880€ for the second one).

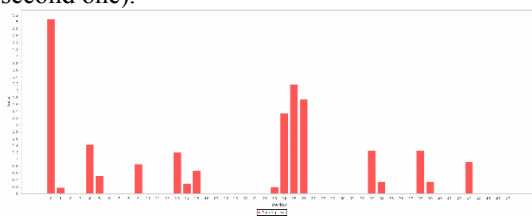


Figure 5 – Backlog for the peak demand considering 2 extra production lines (max value: 5.1).

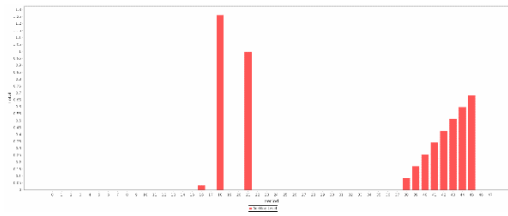


Figure 6 – Backlog for the demand increase considering both DoF (max value: 1.3).

The backlogs are now under control but the decision-maker may decide to analyse other mitigation strategies, e.g. extend the overtime to the weekend (i.e. working at Saturdays) and even consider the combination of both DoF. As example, the combination of 2 additional production line with 10

weekly overtime hours have further reduced the backlog with an additional cost of 7.720€ for the use of the extra production line and 21.418€ for the overtime, giving an overall price of 29.138€. As illustrated in Figure 6, the scattered backlog is now completely residual, which naturally requires the use of more financial resources.

Playing the iterative what-if games, the decision-maker can foresee in advance the better strategies to mitigate the impact of the unexpected event and take the proper actions to solve the problem.

6. Conclusion

This paper describes a strategic planning solution that combines the reliability and optimization of mathematical optimization solvers with the flexibility, robustness and responsiveness of MAS principles, supporting decision-makers to take strategic decisions on short notice with a high level of confidence for unexpected events, such as peak of product demand.

The agent-based strategic planner was implemented using the JADE framework and integrates the ILOG CPLEX Optimizer solver. The application of the strategic planner solution was illustrated by considering a real use case problem related to the peak product demand, where what-if games can be iteratively played to explore the impact of acting on different DoF related to the capacity expansion possibilities (in this case extra production lines and working hours) to minimize the backlog.

Acknowledgment

The research leading to these results has received funding from the European Union Seventh Framework Programme FP7 ARUM project, under grant agreement n° 314056.

References

[1] ARUM - Adaptive Production Management, at: http://www.arum-project.eu/ (accessed in 13/02/15).

[2] L. Wanyu, H. Leyi, T. Murata, “Production Planning in Dynamic Cellular Manufacturing System using Optimization of Cell Reconfiguration Planning Time Horizon with Uncertain Demand”, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Automation and Logistics, pp.466-470, 2011.

[3] B. Meindl, M. Templ, “Analysis of Commercial and Free and Open Source Solvers for Linear Optimization Problems”, Eurostat and Statistics Netherlands within the project ESSnet on common tools and harmonised methodology for SDC in the ESS, 2012.

[4] P. Leitão, “Agent-based Distributed Manufacturing Control: A State-of-the-art Survey”, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 22, n. 7, pp. 979-991, 2009.

[5] T. Hasegawa, L. Gou, S. Tamura, P.B. Luh, J.M. Oblak, “Holonic Planning and Scheduling Architecture for Manufacturing”, Proc. of the International Working Conference on Cooperating Knowledge Based Systems, pp. 125-139, 1994.

[6] B. Denkena, H.K. Tonshoff, M. Zwick, P. Woelk, “Process Planning and Scheduling with Multi-agent Systems” Knowledge and Technology Integration in Production and Services: Balancing Knowledge and Technology in Product and Service Life Cycle, pp. 339-348, 2002.

[7] M. Caridi, S. Cavalieri. “Multi-agent Systems in Production Planning and Control: an Overview”, Production Planning & Control, vol. 15, n. 2, pp. 106-118, 2004.

[8] L. Florin, “Design of a Multiagent System for Solving Search Problems”, Journal of Engineering Studies and Research, vol. 16, n. 3, pp. 51-64, 2010.

[9] L. Qin, Q. Li, “A New Construction of Job-Shop Scheduling System Integrating ILOG and MAS”, Journal of Software, vol. 7, n. 2, pp. 269-276, 2012.

[10] A. Ferreira, A. Pereira, N. Rodrigues, J. Barbosa, P. Leitão, “Integration of an Agent-based Strategic Planner in an Enterprise Service Bus Ecosystem”, Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN’15), 22-24 July, Cambridge, UK, 2015.

[11] F. Bellifemine, G. Caire, D. Greenwood, “Developing Multi-Agent Systems with JADE”, Wiley, 2007.

AIRCRAFT ASSEMBLY PROCESS OPTIMIZATION: NOVEL SOLUTION FOR DYNAMIC OPERATIONS SCHEDULING

Vladimír Mařík[1], Pavel Vrba[2], Martin Klíma[1]

[1]Certicon, a.s.
Evropská 11, Praha 6, Czech Republic
{martin.klima, vladimir.marik}@certicon.cz

[2]Czech Technical University in Prague
Zikova 4, 166 36 Praha 6, Czech Republic
pavel.vrba@ciir.cvut.cz

Keywords: *assembly, scheduling, multi-agent systems, ontology, Enterprise Service Bus*

Abstract
The paper reports on a solution developed within the European FP7 project ARUM targeted towards the optimization of assembly processes of Airbus aircraft manufacturer. The new software provides a decision-making support to assembly lines managers, which are responsible for organization of work in highly complex environments and under frequently changing conditions. There are various disruptive events such as missing parts, non-conformities, or late change requests that impact the running production and cause unexpected delays in final deliveries of products to customers. The designed solution includes a Scheduler that determines the proper sequencing of jobs and allocation of workers and materials to jobs. The Scheduler is based on a combination of multi-agent systems and classical mathematical optimization methods. The station manager is provided with a new user interface in which he/she can monitor the current status and performance of a running production. For the assembly line workers there is a mobile application designed to run on a smart phone or tablet, which re-places the paper-based list of assigned jobs and paper-based reporting of the progress and identified issues. The software is designed according to the Enterprise Service Bus architecture and features the use of ontologies for explicit modeling of information in the production system.

1 Context and Motivation

This paper reports on the achievements of the European project ARUM – Adaptive Production Management, which is carried out within the EU's Seventh Framework Programme. The ARUM project is aimed at optimizing the production lines for assembly of highly complex and individualized products. The main focus of ARUM is the aircraft assembly ramp-up, which is characterized by frequent perturbations that halt the assembly operations and significantly delay the deliveries to customers. The missing parts, non-conformant parts or late change requests from customers imply the need to dynamically adapt the production processes so that the whole assembly line is not halted.

The main goal of the ARUM project is to design new software tools providing decision-making support to production managers as well as to workers. The new software is designed as complementary to existing ERP systems, such as SAP, which is not flexible enough to dynamically react to perturbations by adapting job shop scheduling in real time. Currently, the detailed assignment of workers and other resources to jobs over time are done by the assembly station managers manually, only with the help of pen and pencil or a spreadsheet. The scheduling problem is however very complex, considering thousands of jobs and their dependencies, the varying availability of workers possessing different skills, fluctuating availability of materials, occurring disruptive events such as non-conformities, etc. These challenges resulted in a requirement for a new scheduling software (Scheduler) that is used by station managers for allocation of resources to jobs over time, and the mobile user interface for workers (Worker console) that is used by the workers to view the list of assigned jobs, report on progress of work and notify the production managers about disruptive events.

2 Agent-based Scheduler

The job scheduling is a very complex taks, in fact NP-hard one, where there is a set of jobs that have to be placed in time, while satisfying multiple constraints, such as duration of each job, required resources, capacity constraints, precedence constraints, etc. The result of the scheduling process is the calculation of exact start and end times of each job and determining proper allocation of resources to the jobs. The objective function is used to select the "good" solution(s) from the set of valid solutions computed for the same input parameters. The typical objective function is a *makespan* that says that the end time of the last job should be minimal, translating as "all jobs have to be finished as soon as possible".

There are various approaches to deal with the job shop scheduling problem, including the *mathematical optimization* methods, such as branch and bound method [1], shift bottleneck [2], tabu search [3], simulated annealing [4], or genetic algorithms [5], and *artificial intelligence (AI)* inspired methods, such as rule-based scheduling [6], constraint-directed search [7], or expert systems [8].

Specific subclass of AI techniques are the *multi-agent systems* (MAS). The basic principle of MAS is the decomposition of complex decision-making process into a set of small, autonomous and intelligent agents that interact via messages. There are multiple works on applying the multi-agent systems for production planning and scheduling, such as the FABMAS multi-agent-system for semiconductor manufacturing [9], the Production 2000+ system for car engine cylinder manufacturing [10], the ExPlanTech system for engine assembly workshop [11], or MAS-based system for electronics manufacturing [12].

The approach taken by ARUM project is a hybrid one – the combination of mathematical optimization methods and the multi-agent systems. The main reason to employ the agents is to reduce the complexity of the problem to be solved. The Airbus A350 XWB assembly line is organized as a sequence of six work stations, in which the semi-finished fuselages are equipped with various components such as electric installations, hydraulic installations, windows, insulations, etc. In total, there are thousands of assembly operations to be done by approx. hundred of workers having different skills. The time period for doing all operations in a station is called a *cycle time* – when it finishes, the product moves to the next station. As there can be only one product in one station at the moment, the cycle times have to be synchronized across all the stations. To complicate the situation even bit more, there can be so-called traveling jobs – the jobs that cannot be completed in an original station can be postponed and shifted together with the fuselage to a next station, utilizing either resource of this station or resources of the original station.

As a result, the scheduling has to consider the whole sequence of six stations (S1→S2→…→S6) as well as six cycle times ahead to cover the complete pass of the fuselage in the first station through the line. The Scheduler thus considers a 6x6 matrix show in Fig. 1. Due to the NP-hard character of this problem it is impossible to feed the Scheduler with the data from the whole matrix (approx. 18 000 jobs) and use mathematical optimization methods to solve it.

In the proposed hybrid MAS-based solution, each cell in the matrix is held separately by the *Station agent*, which task is to compute a schedule for given product and cycle time separately. Internally, this agent uses a constraint logic programming engine, the open-source Choco solver (http://choco-solver.org/), to solve the scheduling problem.

The decomposition of work among the station agents is done by the *Scheduler agent*, which obtains complete data set for the scheduling matrix, decomposes it, prepares the data sub-sets for the station agents, and finally aggregates their results into a final solution. First, it is done for the first column in the matrix, thus for the first (current) cycle time. In the next iteration, the station agents for the second column are created and fed with data. In case there are some traveling jobs (jobs that could not be completed in a previous cycle), the subsequent station agent (diagonally in the matrix) is given its own set of jobs plus the traveling jobs from the previous station. If the strategy of "borrowing" the resources from previous station is selected, then e.g. the station agent at position [S_2, C2] that

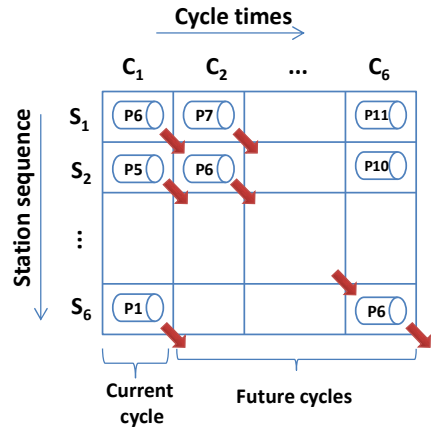


Fig. 1 Organization of Airbus A350 assembly line into six stations (S1, …, S6), considering also 6 cycle times ahead for scheduling

was given some extra jobs from [S_1, C_1] has to borrow resources from [S_1, C_2]. Such a situation is solved in a way that instead of two agents only a single one representing both [S_2, C_2] and [S_2, C_1] is created and the jobs from both stations are put into a single model solved by the Choco solver. This procedure is repeated until the computation for the last cycle time is finished. The objective function of the solver is the lead time, which the solver tries to minimize.

Using such a hybrid approach the computation time for the whole matrix on a standard PC takes approximately 2 minutes, which is enough to satisfy the requirements of the station managers.

3 Worker Console – Mobile User Interface for a Worker

Worker console is the mobile application designed to support the assembly line worker in his/her daily working activities. In particular it provides him with a list of currently assigned jobs and their real-time status and enables him to report on the progress of work, like starting a new job, finishing a job, and reporting the non-conformity (NC) or missing resource events. In fact, it displays the list of jobs assigned to the logged worker, including the start and end times computed by the Scheduler. It also generates events to the iESB as the user reports on his activities (see Sect. 4).

Fig. 2 (left part) shows the initial screen that the worker can see after he logs into the application. On the left-hand side there is a list of all jobs that are assigned to the worker. There is a time axis that marks start and end times of each job; the current time is indicated with a green dot so that the worker can quickly see if he is on time with his work or behind/ahead of schedule. Next to the job its status (pending, running, halted, terminated, and finished in different colors) is shown together with the information about if it is in time or delayed. On the right-hand side there are details of the selected job together with control buttons shown. The details include the job identifier (3300), job description, start and end times, and its status. If the job is in initial state there is only a single `Start` button on which the user can click. After doing so, the user is asked to confirm its action and then the job goes into the running state.

In the running state shown on the right part of Fig. 2 there are two control buttons: `Finish` and `Delay/PNC`. When clicking on `Finished` the job is reported as finished and the worker can select another job for execution. The worker can also report on either delay or on potential non conformity (PNC) via `Delay/PNC` button. In the latter case a PNC event is generated and delivered over the iESB to the user interface of a responsible team leader to request him to go to the worker and make a

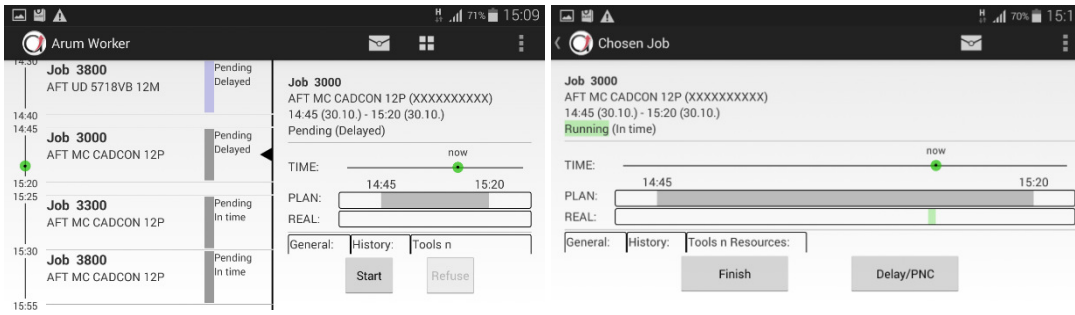


Fig. 2. Worker console - job list and job details (left), running job view (right)

decision regarding the rejection or confirmation of the NC. When the PNC is rejected the job returns automatically into the running state. If it is confirmed then is goes into the terminated state, which is indicated by the red color. Then the worker is expected to select another job from the list and start executing it.

4 Integration via Enterprise Service Bus and Use of Ontologies

The overall ARUM architecture is shown in Fig. 3. An original solution based on the integration of three similar architectonical concepts was developed.

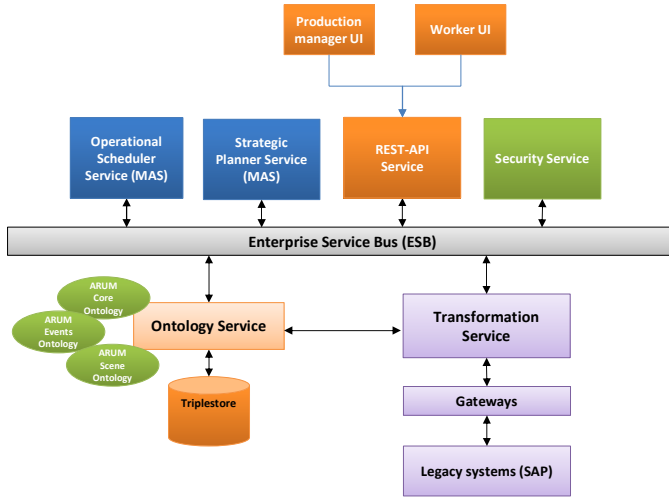


Fig. 3. The overall ARUM architecture

First, it is the Service Oriented Architectures (SOA), according to which the software components, such as the Scheduler or Planner, are implemented as loosely coupled services that interact via messages. The Enterprise Service Bus (ESB) architecture model (JBoss ESB) was used as a specific SOA implementation. Second, it is the multi-agent systems technology, which is used to implement the inner functionality of some of the developed services. It is for instance the Scheduler, which is described in this paper. To make the integration of agents and ESB services possible we have developed a framework for inserting the multi-agent system, implemented in JADE platform (http://jade.tilab.com/) into the JBoss ESB service. It includes the MAS-ESB gateway for transformation of agent messages to ESB messages and vice versa [13]. Third, it is the REST architectural style that was employed to enable the integration of lightweight mobile clients with the heavyweight Enterprise Service Bus (ESB) messaging system.

As shown in Fig. 3 the communication backbone is provided by the Enterprise Service Bus. The JBoss ESB messaging system is surprisingly trivial, with messages containing only a simple header (containing a sender and receiver information) and a body bearing the content of the message. There is no support for conversation protocols that would define sequences of messages exchange between the services on a given topic. To overcome this issues, we have enhanced the JBoss ESB messages with additional attributes, according to the FIPA-ACL agent communication language principles [14] to take the full advantage of combination of SOA and MAS.

The *REST API Service* is the service that provides means for integration of lightweight clients, typically mobile applications, such as the Worker console described in Sect. 3, with the ESB messaging infrastructure. It is based on the HTTP-based RESTful API that converts the ESB messages with the content encoded in RDF (Resource Description Format) into HTTP-based REST messages with the Javascript Object Notation (JSON) content and vice versa [15].

The *Ontology service* is responsible for retrieving data from the legacy software systems and converting them into a common data format. The representation of knowledge in ARUM is based on ontology, which was developed to provide a semantic model of knowledge related to discrete production processes. The OWL ontology is composed of three major modules: (i) the *Core ontology* defining core manufacturing concepts such as jobs, stations, resources, workers, etc., (ii) the *Scene ontology* designed for production steering, planning and scheduling, and (iii) the *Event ontology* for handling variety of possible production events, such as starts/ends of jobs, disturbances, etc. The Ontology service obtains the data from the *Transformation service*, which interacts over *Gateways* with particular legacy systems, such as relational databases or SAP. The Transformation service transforms data from its original format to RDF according to developed ontologies. The Ontology service aggregates data from multiple sources and stores them in the triple store. In this way the input data for the Scheduler service are prepared. When the scheduling is finished, the output of the scheduling (the assignment of resources to jobs, and job's planned start and end times) are also stored by the Scheduler service.

The *Security service* is designed to secure the communication over the ESB. It features user/service authentication and authorization and encoding of the messages. The *Worker console* has been already presented in the previous section. Another user interface is the *Station manager UI*, which provides the station manager with the detailed overview of progress of work in the stations, including the KPIs such as current throughput, utilization of resources, number of unhandled disruptive events, etc. Via this UI the station manager can launch the scheduling process, either at the beginning of a new shift, or in a situation when the events impact the current schedule to such extent that it is necessary to re-organize the production and re-allocate the workers.

Conclusion

This paper presents a solution developed for job shop scheduling of Airbus assembly line in Hamburg. It features the hybrid MAS-based scheduler, the Enterprise Service Bus communication infrastructure, the use of ontologies to give a common semantic model of data, the integration of legacy ERP systems, and the modern user interfaces supporting both the managers of work stations as well as workers by replacing the paper-based assignment of jobs and paper-based reporting of events by electronic system based on a mobile application.

Acknowledgment

This research was supported by the European Union FP7 Programme under the ARUM project No. 314056, and also by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic under the grant No. 7E13001. It reflects only the author's views, and the European Community is not liable for any use that may be made of the information contained therein.

References

[1] Jain, A.S., Meeran, S.: Deterministic job-shop scheduling: Past, present and future. European Journal of Operational Research, vol. 113, no. 2, 390-434 (1999)

[2] Adams, J., Balas, E., Zawack, D.: The shifting bottleneck procedure for job shop scheduling. Management Science, vol. 34, no. 3, 391-401 (1988)

[3] Amico, M.D., Trubian, M.: Applying tabu search to the job-shop scheduling problem. Annals of Operations Research, vol. 41, no. 3, 231–252 (1993)

[4] Van Laarhoven, P.J.M., Aarts, E.H.L., Lenstra, J.K.: Job shop scheduling by simulated annealing. Operations Research, vol. 40, no. 1, pp. 113-125 (1992)

[5] Jensen, M.T.: Generating robust and flexible job shop schedules using genetic algorithms. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 7, no. 3, 275-288 (2003)

[6] Bruno, G., Elia, A., Laface, P.: A rule-based system to schedule production. IEEE Computer, vol. 19, no. 7, 32-40 (1986)

[7] Fox, M.S., Smith, S.F.: ISIS-a knowledge-based system for factory scheduling. Expert systems, vol. 1, no. 1, 25-49 (1984)

[8] Metaxiotis, K.S., Askounis, D., Psarras, J.: Expert systems in production planning and scheduling: a state-of-the-art survey. Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 13, 53-260 (2002)

[9] Mönch, L., Stehli, M., Zimmermann, J., Habenicht, I.: The FABMAS multi-agent system prototype for production control of water fabs: design, implementation and performance assessment. Production Planning & Control, vol. 17, no. 7, 701–716 (2006)

[10] Bussmann, S., Schild, K.: An Agent-based Approach to the Control of Flexible Production Systems. In: 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, vol. 2, 481-488 (2001)

[11] Pěchouček, M., Říha, A., Vokřínek, J., Mařík, V., Pražma, V. ExPlanTech: Applying Multi-agent Systems in Production Planning. International Journal of Production Research, vol. 40, no. 15, 3681-3692 (2002)

[12] Andreev, M., Ivaschenko.A., Skobelev P., Tsarev A.: Multi-Agent Platform Design for Adaptive Networks of Intelligent Production Schedulers. In: 10th International IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, pp. 78-83 (2010)

[13] Vrba, P., Fuksa, M., Klíma, M.: JADE-JBossESB Gateway: Integration of Multi-Agent System with Enterprise Service Bus. In: IEEE Conference on System, Man, and Cybernetics, San Diego, USA, pp. 3663-3668 (2014).

[14] Foundation for Intelligent Physical Agents. (2002). Agent Communication Language Specifications. [Online]. Available: http://www.fipa.org/repository/aclspecs.html

[15] Harcuba, O., Vrba, P. Unified REST-API for supporting the UI integration in the ESB-based environment for production planning and scheduling. In: IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 3000-3005 (2015).

Biography

Pavel Vrba, Ph.D., assoc. prof., is the researcher at the Czech Institute of Informatics, Robotics, and Cybernetics at CTU in Prague. He leads the Intelligent Systems for Industry group aiming at research and development of intelligent distributed solutions for various fields including industrial automation, planning and scheduling, smart energy grids, and others. He was with the Rockwell Automation Research Center in Prague (2000-2012), where he led the Distributed Intelligent Control lab (2005-2012). His main research interests are intelligent industrial control systems, holonic and multi-agent systems, cyber-physical systems, systems of systems, Internet of Things, semantic technologies, ontologies, service-oriented architectures and agent-based modelling, simulation and visualization, and big data. Dr. Vrba has published more than eighty conference papers, journal articles and book chapters related to his research area (Web of Science's h-index: 9) and co-authored five filed and one pending U.S. patents.

Martin Klíma, PhD., is the head of the Applied research department at CertiCon, a.s. He focuses on research projects in the area of distributed systems, web technologies, human-computer interaction, and multi agent technologies.

Prof. Ing. Vladimír Mařík, DrSc., Dr. h.c., is the director of the Czech Institute of Informatics, Robotics, and Cybernetics at CTU in Prague. He was the head of the Department of Cybernetics at CTU (1999-2013) that received the EU Center of Excellence in 2000 and the managing director of Rockwell Automation Research Center in Prague (1992-2010). Professor Mařík's area of expertise is artificial intelligence, knowledge-based systems, multi-agent systems, machine learning, manufacturing planning, scheduling and control, and intelligent industrial decision support system. Prof. Mařík is the author or co-author of five monographs, eight textbooks, and more than 110 papers (h-index 11). Prof. Mařík is the Vice President for Cybernetics of the IEEE SMC Society, and was the Editor-in-Chief of the IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C. He was awarded the Honorary Cross for Science and Art by the President of Austrian Republic in 2003.

TOWARDS AN ORGANIC SYSTEM ARCHITECTURE FOR SUPPORTING MANUFACTURING PROCESSES

César A. Marín, Usman Wajid
The University of Manchester
{firstname.lastname}@manchester.ac.uk

Keywords: *Holonic architecture, organic systems, complex systems, multi-agent systems, service-oriented architectures*

Abstract
Increasing complexity in manufacturing domain requires radically new approaches for planning, design and coordination in manufacturing processes. In this paper we introduce an organic system architecture for supporting complex manufacturing processes. The architecture brings different approaches, legacy systems and services to work together in an interoperable manner for real time decision support, detect early warning and to accelerate learning. The architecture design is supported by ground breaking studies in service oriented systems, multi-agent systems, ecosystem based approaches and devolved ontologies. The architecture provides foundation for a new generation of service oriented enterprise information platform that can address the increasingly complex needs of real industrial environments.

1 Introduction

This paper presents an organic system architecture for supporting complex manufacturing processes. The architecture design was carried out by considering latest advancements in four complementary areas: service-oriented systems, multi-agent systems, ecosystem inspired adaptation approaches and devolved ontologies. Based on the recent developments in these areas, the architecture is able to support the integration of multiple legacy systems, services and agent-based tools in a truly distributed manner without the need to pre-agree on a highly specialized ontology.

The architecture proposed in this paper is seen as the next evolution step of the architecture implemented in the EU-funded project ARUM that aims to address the challenges of planning and control in the manufacturing of complex and highly customizable products, especially in small lot production. The architectural support for different but complementary components in ARUM enables the system to run in two modes: predictive and real-time simulation. The predictive mode supports the planning phase, whereas the real-time operations mode will support dynamic, time-, cost- and risk-oriented re-planning of operations. In case of immaturity or late requests for changes, alterations of engineering information provided are supported equally.

The recent developments in the complementary areas leading to the design of the architecture are described in the following sections of the paper. In brief, Section 2 presents an overview of a recent work in the area of web-services and agents. The results from empirical assessment of web-service and agent-based approaches for composition and optimization inform the design of an intelligent enterprise service-bus (iESB) in Section 3. The iESB serves as the backbone of the architecture. Section 4 presents an overview of ecosystem based approaches that support the creation of an ecosystem of intelligent services in the manufacturing domain. Section 5 describes the work carried out in the area of devolved ontologies. Section 6 presents the organic system architecture that brings together the aforementioned approaches to address some of the key challenges in complex and adaptive manufacturing domains.

2 Study of Web Services and Agent Systems

Web services and agents are often seen as two key technologies that can be used to design decentralized. In a study conducted within the context of EU BonFIRE project we tested two approaches service system optimization that can be used in the development of dynamic service based system. The first approach uses web-service compositions as a way to bring together different functionalities in a system [1]. At any time during or after the composition, the services can change their offerings, cease to exist or new services can enter in the system to represent new opportunities for the composition and dynamic nature of the environment. However, the experimental results of this web-service composition approach reveal that this approach is suitable for one-off optimization and/or when unprecedented numbers of services are involved in the composition. This can be case in travel booking applications or financial applications that consider huge number of services before producing a composition that is best suited for the user.

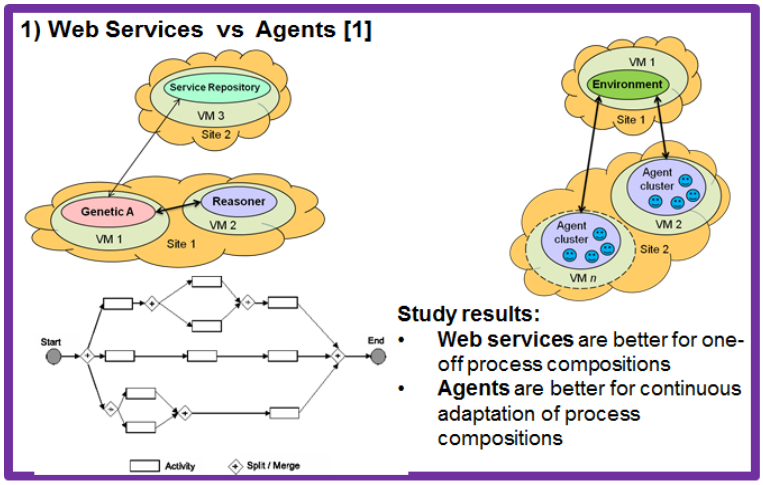


Figure 1 - Assessment of web services and agent based approaches for composition

The other approach tested in the study uses software agents and agent-based interactions to simulate the emergence of service value chains while dealing with unexpected disturbances [1]. It is inspired by ideas from natural ecosystems where local, dynamic interactions are fundamental to the creation of ecosystems. Contrary to the one-off nature of web-service based composition approach, the agent-based approach for composition of multiple functionalities was found suitable for continuous processes as in the case of optimizing traffic infrastructure or complex manufacturing processes [1]. For example, in the manufacturing domain the agents can represent different entities such as sensors, workstations and resources that communicate with each other in order to optimize the overall utilization of the available resources.

3 Intelligent Enterprise Service-based Bus (iESB)

The Intelligent Enterprise Service-based Bus Enterprise Service Bus or iESB [2] for short is a representation of SOA principles in practice and it is one of the corner stones of the infrastructure since it can enable the delivery of an optimized solution to the end user based on the information extracted from the information sources such as ERPs, sensors, etc. The main responsibility of any ESB is the reliable delivery of messages between the connected services. Different situations impose diverse requirements and thus communication patterns can vary. Apart from enabling communication among heterogeneous components and services, the role of iESB is also to enable the integrating a variety of data sources and services located across multiple platforms under one architecture and

provide necessary support for communications among applications running on diverse platforms and based on different execution environments. Since iESB is a central component through which all the services communicate, it makes it ideal for monitoring and analysing the data exchange between connected services. There are many well-established implementations of Enterprise Service Bus that can be used to facilitate the connection between other systems usually known as services, components, actors, agents, etc.

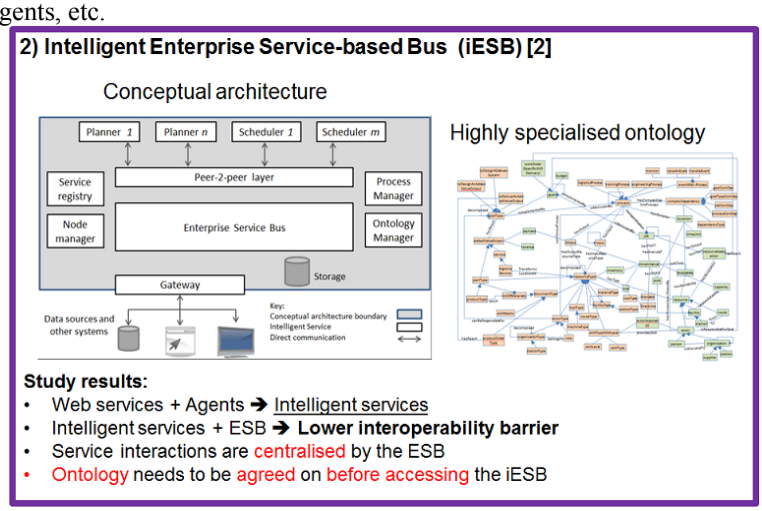


Figure 2- iESB for integration of different systems and services

4 Ecosystem of Intelligent Services

iESB enables the integration and communication of a variety of systems and services. However, the use of nature inspired ecosystem principles within a system can enable the migration of services in a seamless manner and ease some of the concerns about centralization of services, in iESB. In this respect, the proposed architecture allows the implementation of iESB as an ecosystem to enable the migration of intelligent services that can be plugged and unplugged as and when required to achieve different goals.

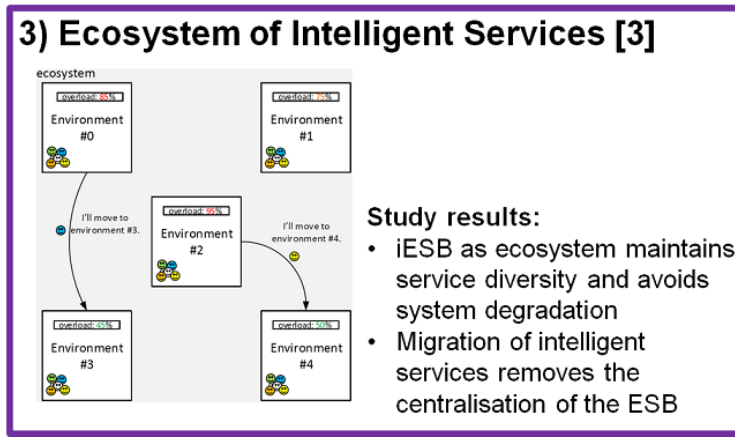


Figure 3- iESB as ecosystem of intelligent services

5 Devolved Ontology

The integration of different systems and services through iESB raise questions about their interoperability. The lack of a semantic alignment between collaborating services and systems causes frequent misinterpretations when exchanging information To address such concerns the architecture design allows the use of ontologies to provide sematic support for the communication between iESB services and systems or components. To enable ontological support for the iESB, a devolved ontology based approach was adopted. The devolved ontology approach employs a conceptual model which does not rely on agreeing in advance on a centralised standard for information exchange, but instead allows individual services to maintain localised ontologies structuring allowing the services to automatically establish a semantic alignment, taking into account the ripple effects that such an alignment could trigger.

The basic concepts of devolved ontology were discussed in a previous study [4] that shows how the conceptual model of devolved ontology is engineered and tested to support such a scenario.

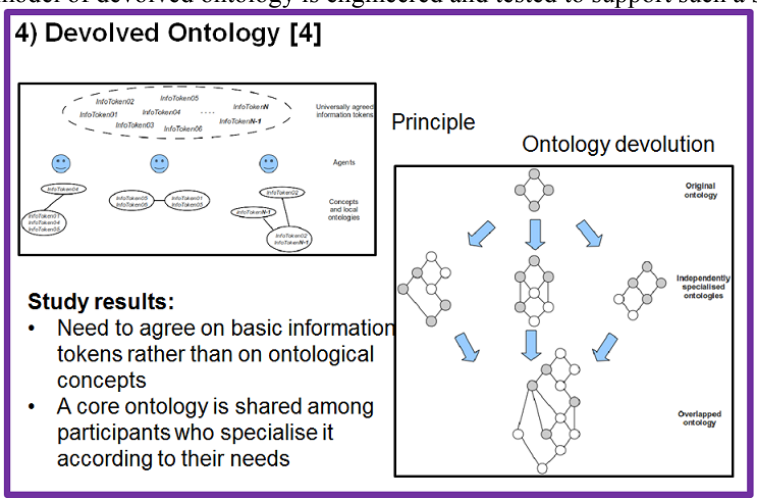


Figure 4 - Devolved ontology to support interoperability between different services

6 Overall Architecture

Based on the extraction of useful ideas from previous sections the overall architecture includes various components that can be integrated in manufacturing processes.

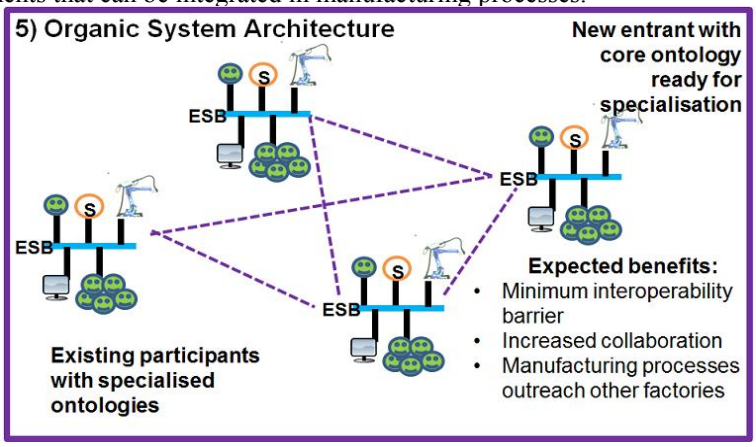


Figure 5- Overall architecture

To address some of the key challenges in complex manufacturing processes and industrial requirements the proposed architecture integrates the key features of service-oriented-architecture, holonic multi-agent systems and legacy systems and links them via an enterprise service bus (iESB), providing communication, monitoring, interoperability and aggregation of information across existing legacy systems at all production levels to support real-time automatic negotiation, planning, scheduling and optimization within and across factories. The envisaged support for distributed multi agent systems combined with the support for the ecosystem inspired service migration is expected to help in integrating legacy systems, information aggregation from high level systems (MES, ERP, etc.) to factory floor automation (e.g. metal cut and assembly systems). The architecture also supports ontology devolution in the iESB thus enabling interactions and ensuring interoperability between different constituents of the system.

7 Conclusion

An Organic System Architecture for Supporting Manufacturing Processes has been discussed in this paper. The architecture, associated modules and functionality can contribute towards ensuring purposeful and unobstructed flow of information between decision makers, intelligent planning, scheduling, optimisation, control tools and legacy systems while minimizing the interoperability barrier created with heterogeneous implementations. In this respect, the architectural design has the potential to improve collaboration between factories by lowering the entry requirements to a network of consumers and suppliers.

The design of the architecture can support the implementation of a flexible and adaptive ICT solution for production management and control of highly complex, small lot productions such as in aircraft and shipbuilding industries. Small lot manufacturers have to deal with specific challenges such as the high investments in the product design and ramp-up due to the complexity of the final product and very small production batches. To support the stakeholders in small lot manufacturing and complexity of product design and ramp-up stages, the architecture presented here promotes the view of services as Intelligent Services that are defined as independent pieces of software that are expected to provide a particular result either produced by the intelligent services themselves or by requesting support from other intelligent services. Seamless communication between intelligent services is supported by a centralised Enterprise Service Bus in the architecture. The iESB also facilitates other operational features such of knowledge acquisition and sharing by exploiting different ontologies, monitoring of dynamic interactions by reviewing the flow of high volume of message exchanges, service lifecycle management and platform distribution.

In the future work, we would like to implement the different components in the architecture in order to realise an adaptive manufacturing system. The implemented system can be tested in industrial environment to unravel the potential benefits of the architectural design, as discussed in this paper.

8 References

[1] U. Wajid, C.A. Marín, N. Mehandjiev. Optimizing Service Ecosystems in the Cloud. In The Future Internet, p 115-126. Springer-Verlag, 2013.

[2] C.A. Marín, L. Mönch, P. Leitão, P. Vrba, D. Kazanskaia, V.I. Chepegin, L. Liu, N. Mehandjiev. A Conceptual Architecture Based on Intelligent Services for Manufacturing Support Systems. In IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, p 4749-4754. IEEE Computer Society, 2013.

[3] C.A. Marín, J. Barbosa, P. Leitao. Ecosystems Enabling Adaptive Composition of Intelligent Services. In Seventh International Conference on Adaptive and Self-Adaptive Systems and Applications, p 85-91. IARIA, 2015

[4] C. Marín, M. Carpenter, U. Wajid, and N. Mehandjiev. "Devolved Ontology in Practice for a Seamless Semantic Alignment within Dynamic Collaboration Networks of SMEs." Computing and Informatics 30, no. 1(2011)

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МЕЛКОСЕРИЙНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Дарья Казанская[1], Ярослав Шепилов[1], Bjorn Madsen[2]
[1]ООО «НПК «Разумные решения»
Московское шоссе 17, Самара, Россия
{kazanskaya, shepilov}@smartsolutions-123.ru
[2]Multi-agent technology Ltd.
3 Ashbourne Close, London, UK
bm@multiagenttechnology.com

Ключевые слова: *адаптивное планирование, мелкосерийное производство, ввод в производство новых продуктов, мультиагентные технологии, управление производством.*

Abstract
Currently the methodology of eliminating the negative effects of the issues in ramp-up stage mostly involves the increase in investment and updating the design data. In the paper the authors consider an approach that can be applied on every level of ramp-up production: from suppliers to shopfloor operators. The architec-ture of the system is described and the first implementation results are given.

Введение

Ввод в производство новой продукции является характерным этапом современных предприятий, поскольку для того чтобы отвечать требованиям рынка, часто разрабатываются и внедряются новые продукты. Основная сложность управления производством на данном этапе состоит в том, чтобы справиться с непредвиденными событиями и при этом увеличить объем производства в короткие сроки. В данном контексте, производство, как правило, оперирует планами на определенный период (обычно на месяц, или в лучшем случае, на день).

Однако такой идеальный план редко соответствует реальности. На самом деле, на его выполнение влияет ряд непредвиденных факторов:

1) сбои в работе поставщиков (в том числе, несоответствие требованиям, отсутствие доставки деталей и задержка доставки);
2) переоценка производительности труда;
1) непредвиденное время, затраченное на принятие решений;
2) срочные дополнительные заказы.

Поскольку план не изменяется после запуска в производство, отсутствие возможности настроек становится причиной увеличения количества невыполненных заказов. Для последующих периодов (неделя, месяц, год) это воздействие накапливается. Основная задача управления, в связи с этим, состоит в том, чтобы увеличить производительность и систематически устранять задержку заказов.

Несмотря на понимание этого, современные системы планирования производства все еще склонны использовать традиционные методы, не отражающие окружающие условия, которые меняются практически ежесекундно [1].

Попытка осветить типичные проблемы ввода в производство новой продукции вместе с цепочкой поставок была предпринята в проекте Адаптивного управления производством (ARUM) в 7-ой Рамочной Программе Европейского союза. Подход, рассматриваемый в данном проекте, описан в нескольких работах [2,3] и основан на сочетании использования муль-

тиагентного планирования для решения проблемы непредвиденных изменений в планировщике, онтологии для сбора и хранения информации о предметной области и интеллектуальной сервисной шине предприятия для обеспечения взаимодействия между различными модулями.

В первом разделе статьи описывается текущий производственный процесс одного из промышленных партнеров данного проекта (Iacobucci Holding Ferentino, IHF). Во втором разделе выделяются основные производственные проблемы. Третий раздел характеризует архитектуру системы ARUM. В четвертом разделе описывается, как система реагирует на основные трудности, а в пятом представлены результаты экспериментов.

1 Исследуемый производственный процесс

Исследование, рассматриваемое в проекте ARUM, охватывает производство (включая тестирование, склад и управление), связано с разработкой, финансами, снабжением и логистикой IHF. В центре исследования находится производственная сфера, которая разделяется на несколько направлений производства по типам продукции:

1) Кофе-машины и эспрессо-машины, которые являются наиболее популярными продуктами. Сборочные линии данных продуктов взаимозаменяемы, в том числе и их операторы, которые могут использовать один и тот же набор навыков.
2) Уплотнители мусора, которые представляют собой дорогостоящий продукт для долговременного использования. В настоящее время спрос на уплотнители мусора меньше, чем на кофе-машины, но профиль заказов более изменчивый.
3) Индукционные нагревательные элементы – более известные как термостаты – представляют не так давно внедренный продукт, на который в настоящее время наблюдается увеличение спроса. Термостаты производятся в относительно медленном темпе, обладая при этом потенциалом увеличения производительности при внедрении системы ARUM.

Производство IHF включает в себя 8 задач:

1) Технологическое проектирование предоставляет спецификации для производства и поставщиков, например, инструкции по сборке, чертежи и т.д.
2) Снабжение отвечает за контракты с поставщиками и заказ деталей, необходимых для оснащения производственных линий.
3) Обслуживание клиентов осуществляет коммуникацию с клиентами и проводит обзор запланированных и прогнозируемых заказов.
4) Производственное планирование составляет расписание производства, по которому все работают (от снабжения до отправки сертифицированных продуктов). Производственное планирование взаимодействует с обслуживанием клиентов, для того чтобы удостовериться, что клиенты осведомлены о результатах.
5) Входной контроль на сладе отвечает за получение и проверку поставок и сообщает, если детали доставлены в недостаточном количестве, отсутствуют, имеют брак или каким-либо еще образом не соответствуют требованиям.
6) Комплектация и упаковка формирует сборочные комплекты, которые используются на производственных линиях.
7) Производство гарантирует сборку в соответствии с сертифицированными процессами.
8) Контроль качества – тестирование всей продукции перед отправкой клиенту. Финальный контроль качества взаимодействует с отделом управления качеством разработки продукции, который занимается исследованием любых несоответствий сертифицированных процессов и обратной связью по развитию производства.

Информация о заказах, спецификациях и инвентарных ведомостях хранится и обрабатывается в базе данных AS400 собственной разработки. Вся информация обрабатывается в документах офисного пакета (PDF, Excel).

Система ARUM влияет на процесс «заказ-доставка». В связи с этим, необходимо понять последовательность действий, когда система ARUM может способствовать увеличению производительности в период ввода в производства нового продукта. Данный процесс изображен ниже (Рис.1):

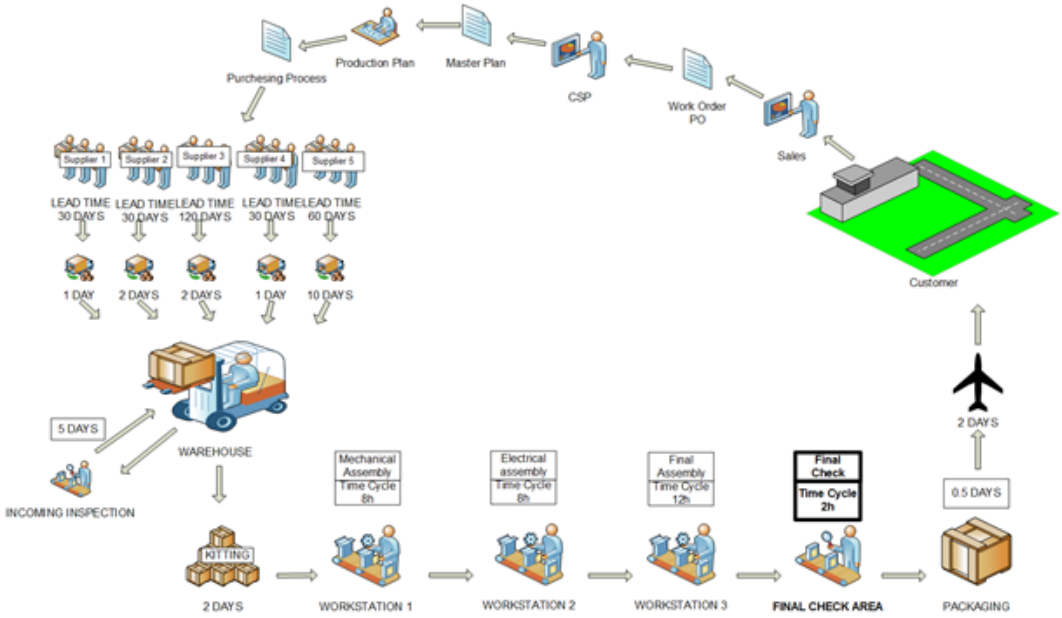


Рисунок 1 – Процесс «заказ-доставка» на предприятии IHF

Обработка нового заказа начинается, когда отдел по работе с клиентами получает заказ с указанной датой доставки. Заказы варьируются по количеству, частоте и содержанию продуктов. Как правило, заказы поступают за 90 дней, чтобы предприятие успело получить детали от поставщиков и доставить продукт клиенту. Некоторые клиенты делают долгосрочные заказы, чтобы организовать периодическую доставку продукции в течение года, другие же уведомляют о доставке за 45 дней. Ключевой приоритетный критерий – поставляется ли заказ для совершенно нового самолета или для замены компонентов старых воздушных судов, поскольку задержка доставки для новых самолетов влечет за собой задержку доставки самого самолета в целом, что, соответственно, недопустимо. В обоих случаях отдел по работе с клиентами является главным пунктом анализа коммерческих приоритетов и оценки последствий любых изменений, о которых менеджеры по работе с клиентами сообщают в короткий срок.

Возможность своевременного выполнения заказа сверяется с другими отделами (проверка производственных возможностей, производительности, поставки необходимых деталей и т.д.), которая в итоге утверждается генеральным директором и вносится в базу данных AS400 как утвержденная заявка, требующая включения в производственные планы. Производство координируется на самом высшем уровне с привязкой к общему плану, отдел планирования производства предоставляет детализированный производственный план, в котором разъясняется, какая продукция должна быть произведена к концу месяца на уровне серийных номеров, включая все единицы, производимые «на склад». Данный план затем группируют в наряды, отражающие количество продуктов, которые может произвести в неделю одна сборочная линия. Затем каждый заказ-наряд направляется на сборочные линии, согласно типу продукции, для производства которого сертифицирована данная линия. Запуск наряда во все отделы явля-

ется поводом для набора персонала, закупки деталей отделом снабжения, оснащения сборочных линий и т.д.

Материальный поток логичен: закупаемые материалы получают, проверяют, отправляют на хранение, собирают в комплекты, используют на сборочной линии, тестируют, маркируют для отслеживания, упаковывают в паллеты и отправляют клиенту.

Отдел производственного планирования еженедельно предоставляет отчет о результатах, который является обязательным условием регулярных совещаний руководителей, в то время как отделы ежедневно напрямую производят диагностику и устранение неполадок в работе.

2 Основные проблемы производства

Исходя из анализа процессов IHF и опросов сотрудников, был выявлен широкий круг проблем, препятствующих эффективности на стадии ввода в производство новых продуктов. На пути «планирование-производство-доставка клиенту» наибольшее значение имеют следующие непредвиденные события (следуя последовательности процесса «заказ-доставка»):

1) Отдел продаж и работы с клиентами:

- Дополнительные заявки. Примером является срочный заказ крупной авиакомпании на доставку около 100 уплотнителей мусора в течение четырех месяцев (при запланированной возможности выпуска 140 единиц продукции в год). При необходимости производства большого объема продукции в короткий срок нужно решить две проблемы:
    - Перераспределение ресурсов. Заявка на один тип продукции может потребовать перемещения операторов с линий, производящих другой тип продукции. Если ресурсов по-прежнему не хватает, дополнительной производительности можно добиться путем привлечения офисных служащих, которые прошли необходимую сертификацию или персонала с линии 45 Европейского агентства по авиационной безопасности (EASA), который, в основном, осуществляет обслуживание элементов, контролируемых этим агентством.
    - Соблюдение сроков доставки. Очевидно, что сроки доставки уже имеющихся заказов должны быть соблюдены как можно более точно. Однако если нет возможности предотвратить нарушение сроков, заказы следует запланировать таким образом, чтобы сократить штрафные санкции. Новое время доставки должно быть обговорено с клиентом.
- Проблемы с контрактами (поставщики и клиенты): Цены основаны на годовом количестве деталей, позволяющем поставщику эффективно осуществлять свою деятельность, но объемы, заказанные отделом снабжения, не делятся на партии, подходящие поставщику для доставки. Это приводит к недостатку или переизбытку поставок.
- Обновления по заказам. Изменения сроков доставки или необходимого количества продуктов, отмена заказов вызывают изменения, которые приводят к совершенно новому расписанию доставок на текущий период. Это влечет за собой проблемы с поставками материалов и влияет на сроки доставки других заказов.
- Обновления по прогнозам. Когда прогноз неверный, от клиента приходит заявка на дополнительное количество продуктов. Обычно компания может выполнить заявку, если дело касается 2-3 продуктов. Однако дополнительные заказы должны быть утверждены складом, отделом снабжения и отделом производства.

2) Производственное планирование. Производственное планирование занимается ежедневными обновлениями производства и продаж. Все данные собираются вручную, обычно путем переговоров и телефонных звонков. Затем план должен быть вручную обновлен в Excel.

3) Снабжение:

- Задержка доставки. Несмотря на то, что заказы на поставку деталей обговариваются за год, поставщики со своей стороны могут иметь проблемы, что вызывает нарушение установленных сроков.
- Брак. Детали, полученные от поставщика, могут отличаться от заданного проекта вследствие производственных дефектов или несоответствия проектных данных, переданных поставщику, что приводит к недостатку продукции на складе

4) Входной контроль. Материалы не соответствуют чертежам и инструкциям, предоставленным отделом проектирования. Входной контроль является потенциальным узким местом, поскольку нет возможности узнать, доставлены материалы или нет и соответствуют ли они требованиям до тех пор, пока они не пройдут входной контроль. Следовательно, любая крупная проблема с привлечением персонала по входному контролю может вызвать задержку доставки материалов на производство.
5) Склад: работники склада выявляют потребность в определенных деталях, только когда начинают формировать сборочные комплекты.
6) Производственная линия:

- Производственные возможности. В случае IHF, в первую очередь ожидаемы проблемы с поставками. Тем не менее, эта выгодная с точки зрения стоимости и качества технология может быстрее вызывать новые заявки, чем планируется в данный момент. Типичной проблемой при вводе в производство новой продукции является следующая ситуация. Входной контроль проверяет соответствие детали чертежу (который обычно представлен на бумажном носителе, а также доступен в электронном виде в общей папке). Если электронный вариант в этот момент меняется или обновляется, то детали уже не соответствуют чертежу. Это приводит к тому, что детали, которые были проверены по старым инструкциям, следует перепроверять в соответствии с новыми инструкциями.
- Брак: Инструкция по сборочной линии отличается от реальных материалов. Брак может привести к непригодности части продукции. Кроме того, иногда для принятия решения по поводу бракованных изделий требуется согласование нескольких отделов предприятия.
- Неполные сборочные комплекты. Иногда сборочные комплекты попадают в производство с недостатком некоторых деталей. Это значит, что сборочные узлы не могут быть собраны. Если необходимые материалы не прибудут до того, как начнется сборка узлов, руководство должно будет решить эту проблему.

3 Система ARUM

Архитектура системы ARUM разработана в контексте стадии ввода в производство новых продуктов, когда есть конфликты между необходимостью контроля и реальностью быстрых изменений. Стадия ввода в производство новых продуктов часто требует непрерывной интеграции, начиная со стратегий и систем, заканчивая уровнем инструментов (т.е. на всех ступенях контроля и оптимизации). Кроме того, нужна вертикальная интеграция от Системы Управления Производством (MES) вплоть до уровня цехов, и горизонтальная интеграция - от проектирования до планирования производственной системы для того, чтобы обеспечить устойчивость процессов государственного производства.

Для решения вышеуказанных проблем и соответствия промышленным требованиям архитектура ARUM интегрирует основные компоненты сервис-ориентированной архитектуры, а также холонических мультиагентных систем и сторонних систем и объединяет их с помощью сервисной шины предприятия (ESB), обеспечивая коммуникацию, мониторинг, взаимодействие и агрегирование информации в существующих сторонних системах на всех уровнях производства с целью обеспечения поддержки автоматического согласования, планирования верхнего уровня, составления расписаний и оптимизации внутри одного предприятия и между несколькими в режиме реального времени. Рассматриваемые технологии распределенной

мультиагентной системы в холонической архитектуре, как ожидается, помогут интеграции сторонних систем, агрегированию информации от систем высшего уровня (MES, ERP и т.д.) до автоматизации на уровне заводского цеха (например, резка металла и сборочные системы). На основании таких требований, отраженных в архитектуре системы, основные функциональные возможности системы ARUM включают в себя составление расписаний, планирование верхнего уровня, управление производством и производственные процессы, поддерживаемые фактической информацией, поступающей из различных источников, таких как сторонние системы, датчики и данные, вводимые пользователями.

На основе конкретных требований заказчика и предметной области, а также результатов предыдущих исследований и внедрения [4,5] логическое представление системы ARUM не только определяет ключевые компоненты и сервисы, которые составляют систему ARUM, но также демонстрирует взаимосвязи между ними, как изображено на Рисунке 2.

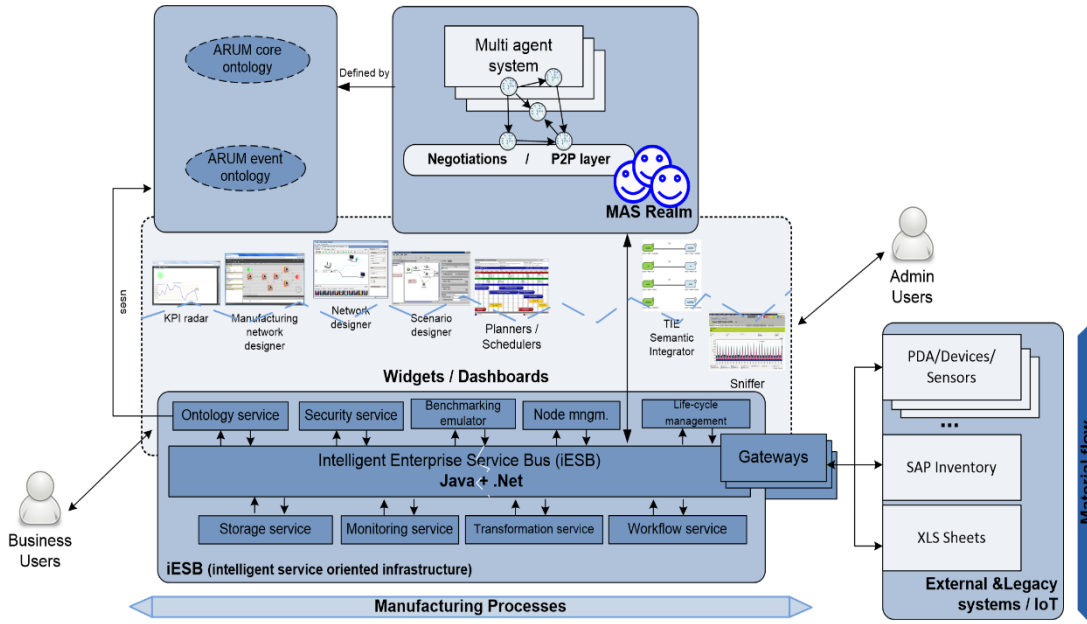


Рисунок 2 – Архитектура системы ARUM

Эта архитектура была более подробно рассмотрена в [6]. В данной же работе мы выделим только ключевые элементы архитектуры для того, чтобы поддержать пример компании IHF:

- шлюзы для извлечения данных из сторонних систем;
- онтология для описания предметной области системы;
- мультиагентный адаптивный планировщик для создания планов производства;
- пользовательский интерфейс для менеджеров производства и планирования: для составления расписания и обеспечения его выполнения;
- пользовательский интерфейс для операторов цехов: для получения задач в соответствии с расписанием, а также сообщения об их выполнении и обнаруженных проблемах.

4 Применение системы ARUM

Как было показано в предыдущем разделе, система ARUM охватывает большинство аспектов работы предприятия благодаря своей структуре и архитектуре. Чтобы дать читателю

более четкое представление, рассмотрим проблемы, которые были выделены выше, и опишем, как система их решает.

В случае дополнительного спроса, полученного отделом по работе с клиентами, решение обеспечивается согласованной работой стратегического планировщика и оперативного планировщика. Стратегический планировщик позволяет менеджерам рассмотреть различные возможные решения (дополнительные линии, изменения в планировке цеха и т.д.) и выбрать лучший с точки зрения прибыли. Оперативный планировщик гарантирует, что средства будут распределены наиболее эффективным образом (чтобы сократить расходы и соблюсти сроки) в рамках условий, установленных руководством.

Проблемы по контрактам с поставщиками и заказчиками решаются с помощью оперативного планировщика, который учитывает не только производственный процесс, но и профиль необходимого запаса. Таким образом, руководство может сделать заказ на поставки в соответствии с потребностями производства, что позволяет устранить дефицит и затоваривание.

Любое изменение в заказах или прогнозах, которое отражается в одной из сторонних систем (Excel или AS400), тут же обрабатывается оперативным планировщиком, который обновляет текущий план производства.

Вопросы планирования производства решаются с помощью автоматических обновлений в плане, осуществляемых оперативным планировщиком, что позволяет сократить время коммуникации между отделом планирования производства и другими отделами. Вместо того, чтобы обновлять многочисленные таблицы, менеджер по планированию может сосредоточиться на обеспечении требуемых ключевых показателей эффективности (KPI) путем корректировки свойств планирования.

Если необходимый запас не был предоставлен поставщиком вовремя или был поставлен в недостаточном количестве, оперативный планировщик укажет на эту проблему и перераспределит ресурсы соответствующим образом.

Оперативный планировщик может расставить приоритеты фактического порядка при входном контроле, таким образом, персонал будет знать, какие детали должны быть обработаны в первую очередь. Работа операторов входного контроля может быть распланирована так же, как работа операторов производства, в то время как эти два отдела и их планировщики могут общаться с помощью p2p («равный с равным») сети. Более того, когда проблема обнаружена на складе, оперативный планировщик может перераспределить ресурсы.

Что касается производственной линии, операторы с помощью своих планшетов с установленным пользовательским интерфейсом следят за тем, чтобы все сотрудники имели доступ к обновленным техническим данным, которые актуализируются автоматически, когда новый продукт назначается на линию. Время на переоборудование линии сокращается, тем самым делая производство более гибким. Пользовательский интерфейс оператора также помогает сообщить о проблеме без оформления документации. Отчет может быть впоследствии получен руководством и использован в процессе решения проблем, в то время как планировщик будет перераспределять ресурсы для предотвращения простоя. В случае неполных сборочных комплектов оперативный планировщик может ставить в расписание операции текущей партии до тех пор, пока материалов в комплектах достаточно. Затем будут запланированы операции из следующей партии для предотвращения простоя.

Кроме того, система ARUM может обеспечить поддержку в применении принципов бережливого производства, выделяя узкие места и реагируя на события и полученную информацию. Система сокращает время, затрачиваемое на коммуникацию между отделами, а также количество соответствующей бумажной работы путем предоставления пользовательских интерфейсов для всех ролей, имеющих отношение к процессу.

5 Результаты

В данной работе рассматривается влияние системы ARUM на производственные процессы на предприятии IHF с помощью следующей серии экспериментов:

- Фактический сценарий. Описывает работу IHF, основываясь на данных, предоставленных за 2013 год.
- Идеальный сценарий. Предполагается, что все заказы известны заранее, и они планируются наиболее эффективным образом.
- Реалистичный сценарий. Заказы принимаются по данным 2013 года и планируются эффективным образом.

Принимая идеальный сценарий в качестве наилучшего примера, мы будем использовать его ключевые показатели эффективности для измерения двух других сценариев.

Рассмотрим более подробно показатели, представленные в таблице. Производительность рассчитывается следующим образом:

(1) $N = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{Q_{output}}{Q_{pt}+Q_{empl}}$,

где Q_{output} – выход единиц в евро, Q_{pt} – затраты на деталь в евро, Q_{empl} – затраты на сотрудников в евро.

Задержки рассчитываются следующим образом:

(2) $D = T_{actual} - T_{contract}$,

где T_{actual} – фактическая дата поставки, $T_{contract}$ – дата поставки по контракту.

Коэффициент использования ресурсов вычисляется следующим образом:

(3) $U = \frac{\sum_{i,k} j_{i,k}}{N_r \cdot (t_2 - t_1)}$,

где $j_{i,k}$ – продолжительность конкретной работы, N_r – количество ресурсов, t_1, t_2 – начало и конец рассматриваемого интервала времени.

Исходные предположения по ресурсам на основе матриц навыков и данных, предоставленных представителями IHF, были рассмотрены в ходе оценки, представленной в Таблице 1.

Таблица 1 – Данные, используемые в тестах

Продукт	Количество линий	Количество операторов на линию	Общее количество единиц продукции за 2013	Производство заказа в человеко-часах	Стоимость оператора за час, €	Стоимость деталей единицы продукции, €
CM	4	2	768	20	6	679,5
TC	1	4	200	35,68	6	4737,8
IHU	1	2	12	61,07	6	5615

В ходе экспериментов для каждого из трех сценариев, описанных выше, было составлено расписание на период одного года. Результаты приведены в Таблице 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментов

Сценарий	Производительность	Задержки в днях			Коэффициент использования ресурсов, %
		Мин.	Макс.	Среднее	
Фактический сценарий	1,45	01	434	32,5	99
Идеальный сценарий	1,47	0	287	0	70
Реалистичный сценарий	1,47	0	363	0	67

Незначительное увеличение производительности в идеальном и реалистичном сценариях достигается за счет снижения штрафов, выплачиваемых за задержки выполнения заказов. Этот показатель может быть увеличен путем принятия дополнительных заказов (по сравнению с данными за 2013 год).

Коэффициент использования ресурсов снижается в идеальном и реалистичном сценариях за счет более эффективного планирования. Это означает, что новые заказы могут быть приняты для достижения полной загрузки. Тем не менее, компания может захотеть сохранить тот же уровень потребительского спроса, но при этом уменьшить или перераспределить ресурсы. Еще одна возможность для эффективного использования мощности – это выполнение внешних заказов.

Эффективное планирование привело к сокращению задержек поставок заказов, таким образом, уменьшая штрафы, выплачиваемые заказчикам.

Заключение

Результаты эксперимента показывают, что улучшение координации в планировании может привести к сокращению задержек поставок заказов и свободной мощности. Это означает, что, несмотря на потенциальное влияние непредвиденных событий, предприятие может принимать дополнительные заказы или ликвидировать задолженности по заказам за предыдущие годы. Таким образом, применение системы ARUM дает возможность увеличить прибыль компании с тем же количеством ресурсов

Более того, эксперименты показали, что общение с клиентами играет важную роль, так как производительность компании зависит не только от производства, но и от дат, в которые были размещены заказы на поставку. Это открывает широкие возможности для дальнейших экспериментов и исследований.

Благодарности

Научные исследования, приведшие к этим результатам, получили финансирование от Седьмой Рамочной Программы FP7/2007-2013 Европейского Союза в рамках соглашения о субсидировании №314 056.

[1] Пожалуйста, обратите внимание, что нулевое значение означает на самом деле отрицательную задержку (т.е. опережение в производстве), однако в данном случае мы просто предполагаем, что задержки нет, и заказ был поставлен вовремя, независимо от того, насколько ранее установленного срока.

Список литературы

[1] P.Skobelev. Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. In Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry (Invited Chapter). – Elsevier. – 2014. (in publishing).

[2] Paulo Leitão, José Barbosa, Pavel Vrba, Petr Skobelev, Alexander Tsarev, Daria Kazanskaia. “Multi-agent System Approach for the Strategic Planning in Ramp-up Production of Small Lots”. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2013), October 13-16, 2013, Manchester, UK. – 2013. – P. 4743-4748.

[3] Alexander Tsarev, Daria Kazanskaia, Petr Skobelev, Sergey Kozhevnikov, Vladimir Larukhin, Yaroslav Shepilov. “Knowledge-driven adaptive production management based on real-time user feedback and ontology updates”. Proceedings of the EEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2013), October 13-16, 2013, Manchester, UK. – 2013. – P. 4755-4759.

[4] Paul De Bra, Lora Aroyo, and Vadim Chepegin. "The next big thing: Adaptive web-based systems." Journal of Digital Information 5.1 (2006).

[5] Vadim Chepegin, Ferando Perales, Silvia de la Maza. “CREATE Software architecture”, https://itea3.org/project/workpackage/document/download/862/10020-CREATE-WP-2-D21Architecture.pdf (2012).

[6] Cesar Marin, Lars Moench, Paulo Leitao, Pavel Vrba, Daria Kazanskaia, Vadim Chepegin, Liwei Liu, Nikolay Mehandjiev. “A Conceptual Architecture Based on Intelligent Services for Manufacturing Support Systems”. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2013), October 13-16, 2013, Manchester, UK. –2013. – P. 4749-4754.

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ АГЕНТОВ ПОТРЕБНОСТЕЙ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ

И.В. Майоров, П.О. Скобелев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
imayorov@smartsolutions-123.ru
тел: +7 (846) 332-39-27

Ключевые слова: *мультиагентные системы, планирование, сеть потребностей и возможностей, динамика*

Abstract

A macroscopic model of demand and resource agents dynamics of multi-agent scheduling system is suggested in the form of rate equations of satisfaction. The model considers order inflows, orders processing by resources, their accumulation in queues for scheduling and rescheduling due to a virtual profit share. The model demonstrates equilibrium conditions formation, relaxation to them in different modes, agents' satisfaction dissipation and other phenomena.

Введение

Системы планирования ресурсов современных предприятий в условиях неопределенности изменений спроса и предложения должны позволять оперативно, гибко и эффективно принимать решения, отражающие баланс интересов многих участников. В этой связи развитие вычислительных алгоритмов распределения, планирования и оптимизации ресурсов идет по пути создания адаптивных систем управления ресурсами, пригодных для быстроизменяющихся ситуаций окружающей среды.

Решение классических задач планирования ресурсов (также известных как NP-трудные задачи) обычно формулируется как пакетный процесс, в котором все заказы и ресурсы известны заранее и не изменяются в процессе работы [1]. Традиционные ERP системы реализуют различные версии линейного или динамического программирования, программирования с учетом ограничений и других методов, основанных на комбинаторном поиске вариантов [2]. Для уменьшения сложности комбинаторного поиска новые методы используют эвристики и мета-эвристики [3], которые при некоторых условиях позволяют получать приемлемые решения за разумное время за счет сокращения вариантов поиска. Также используются «жадные» локальные методы поиска, методы имитации отжига, программирование в ограничениях, табу поиска, генетические и муравьиные алгоритмы и др.

Вышеуказанные методы, в основном, также основаны на пакетной обработке и с трудом расширяются дополнительными целевыми критериями, не позволяя учитывать множественные факторы, используемые в реальной жизни, которые могут задаваться не только формулами и неравенствами, но также таблицами, графиками и даже алгоритмами.

В отличие от классических больших, централизованных, неделимых и последовательных программ, мультиагентные системы (МАС) построены в виде распределенных групп небольших автономных программных объектов, работающих асинхронно, но согласованно, для получения результата.

Мультиагентные технологии применяются для решения задач оптимизации и планирования в распределенных системах [4]. Для решения задач планирования производства были разработаны также биотехнологические методы, например, роевая оптимизация, гибридные методы на основе искусственной иммунной системы, оптимизация методом роя

частиц [5-7]. В то же время, в связи с разработкой и применением мультиагентных систем [8], необходимы модели, в которых поведение МАС может быть рассмотрено макроскопически, не вдаваясь в детали конкретного механизма обмена сообщениями между агентами [9]. Такие модели коллективного поведения используются при моделировании трафика и пропускной способности дорог [10-11], в исследованиях поведения автономных роботов [12] и др. Однако модели динамики поведения МАС планирования в доступных источниках не обнаружены.

Далее предлагается динамическая модель агентов ресурсов и задач, развивающая подходы сетей потребностей и возможностей.

1 Сети потребностей и возможностей

Реализация мультиагентного подхода к разработке интеллектуальной системы динамического планирования основана на использовании концепции сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей) и метода сопряженных взаимодействий для управления ресурсами предприятий в реальном времени на виртуальном рынке [13-14].

Согласно данной концепции, каждой заявке, заказу и другим потребностям и возможностям (производственные ресурсы, станки, оборудование, транспортные средства, персонал) сопоставляются программные агенты, которые договариваются с другими агентами и планируют выполнение заказов “точно-в-срок” (JIT) или “как можно раньше” (ASAP), что позволяет обеспечить поддержку коллективного согласования и принятия решений в реальном времени на различных этапах планирования и исполнения производственного плана в различных подразделениях, работающих совместно над решением общих задач.

1.1 Агенты потребностей и возможностей

Задача агентов потребностей D (Demand Agent) – найти возможности (ресурсы) для удовлетворения потребностей, а задача агентов возможностей S (Supply Agent) состоит в том, чтобы найти потребности для использования своих возможностей. В результате успешного поиска D и S агенты могут заключать или пересматривать контракты на требуемые услуги на виртуальном рынке системы с выплатой бонусов в случае успешного их выполнения или штрафов в случае разрыва связей, а также компенсаций за ухудшение позиций при уступках в ходе переговоров.

Постоянный поиск соответствий между конкурирующими и кооперирующимися агентами потребностей и возможностей на виртуальном рынке системы позволяет строить решение любой сложной задачи как динамическую сеть связей между задачами (операциями), гибко изменяемую в реальном времени (Рисунок 1).

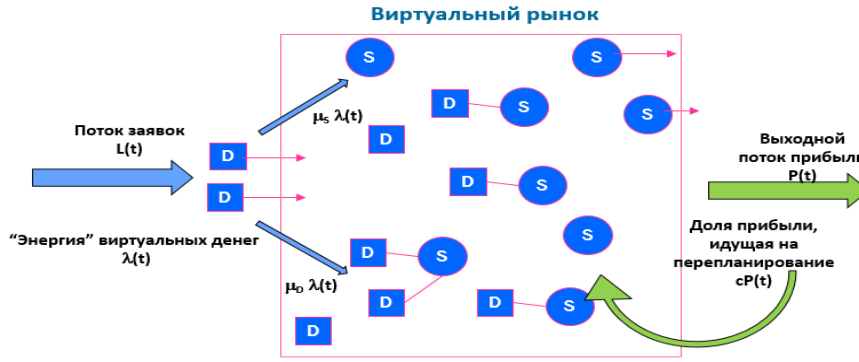


Рисунок 1 – Виртуальный рынок ПВ-сети построения расписаний

1.2 Функции удовлетворенности и штраф-бонусные функции агентов

Формализованная постановка задачи, в основе которой лежит поиск консенсуса между агентами на виртуальном рынке в ПВ-сетях, может быть сформулирована следующим образом. Предполагается, что все агенты спроса и предложений имеют собственные цели, критерии, настройки и ограничения (например, срок, стоимость, риск, приоритет, тип требуемого оборудования или квалификация рабочего). Важность каждого критерия может быть представлена в виде весовых коэффициентов в линейной комбинации критериев для заданной ситуации планирования и может изменяться в ходе формирования или выполнения расписания.

Вводится функция удовлетворенности для каждого агента (Рисунок 2(а)), которая будет показывать отклонение текущего значения данной функции от заданного идеального значения по любому из критериев на данном шаге нахождения решения для расписания данного агента. Действия агентов также зависят и от функции бонусов/штрафов и текущего бюджета в виде виртуальных денег (которые могут идти на перепланирование), доступных каждому агенту (Рисунок 2(б)).

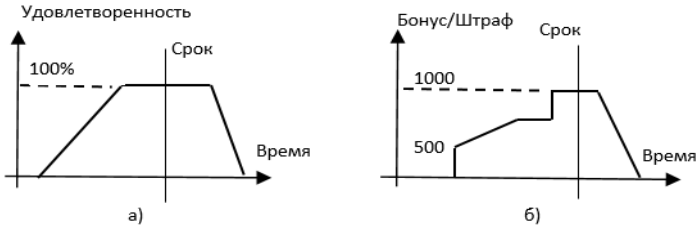


Рисунок 2 – Пример функции удовлетворенности (а) и функции бонуса/штрафа (б)

Агенты ПВ сети непрерывно пытаются улучшить свои показатели по различным критериям путем переговоров и поиска лучшего места в расписании. Этот процесс основан на методе компенсаций [15]. В результате взаимодействий агентов ПВ-сети строится расписание, непрерывно улучшающееся в проактивном процессе. Улучшения могут планироваться в несколько шагов, поэтому локально возможны колебания параметров, которые затухают при отсутствии внешних изменений и “диссипации энергии”, связанной с виртуальной валютой агентов.

2 Динамическая модель удовлетворенности агентов

Динамика поведения агентов ПВ сети зависит от конкретного значения удовлетворенности каждого агента и от наличия виртуальных денег для осуществления перестановок в заданной системе ограничений. Она определяется топологией образовавшейся сети и может быть достаточно сложной. Для моделирования динамики была создана мультиагентная платформа (Рисунок 3), позволяющая строить прототипы приложений для различных предметных областей и исследовать их характеристики [16].

Экспериментальные исследования поведения агентов показывают, что глобальные характеристики поведения агентов могут быть определены с помощью рассмотрения средних по ансамблю показателей. Поэтому для предварительной оценки возможных режимов поведения мультиагентных систем можно развить упрощенную модель без учета топологии сети и деталей функций удовлетворенности конкретных агентов.

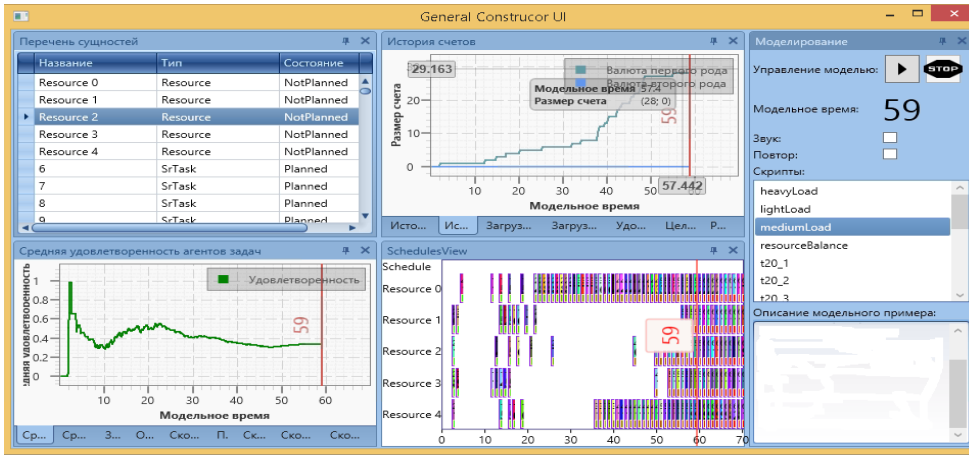


Рисунок 3 – Внешний вид интерфейса МА платформы

2.1 Формальная постановка задачи

При описании системы взаимодействующих агентов ПВ сети представляется возможным рассматривать поведение агентов макроскопически, отвлекаясь от деталей внутренней динамики планирования, с целью выяснить общие характеристики системы. В таком приближении предлагается рассматривать систему агентов потребностей (D) и возможностей (S) при помощи суммарных функций удовлетворенностей ($y(t)$), которые в общем случае пропорциональны количеству агентов соответствующего вида:

$$(1) \qquad y_{S,D}(t) = \sum_i^{N_{S,D}} y_{i,S,D}(t) \sim N_{S,D}(t) \cdot \overline{y_{S,D}(t)},$$

где $\overline{y_{S,D}}$ – средняя удовлетворенность одного агента потребности (D) или возможности (S), $N_{S,D}$ – количество соответствующих агентов, зависящее от времени.

Для упрощения обозначений предлагается описывать удовлетворенность агентов потребностей через D, агентов возможностей – через S. Поступление заявок и их выполнение – дискретный по времени процесс, однако, при большом количестве заявок и малом интервале времени между ними по сравнению с периодом моделирования его можно приближенно рассматривать как непрерывный [17].

В систему, которая находится в некотором состоянии по удовлетворенности (D_0, S_0), поступает поток заявок $L(t)$ (Рисунок 1), которые планируются на ресурсах, создавая очереди. В результате переговоров часть агентов потребностей перепланируется, очереди динамически изменяются. Поэтому в терминах удовлетворенности можно сказать, что входной поток L дает часть энергии для роста удовлетворенности агентов потребностей $\mu_D\lambda$ (t) и возможностей $\mu_S\lambda(t)$, $\mu_D+\mu_S=1$, где μ_D и μ_S – коэффициенты доли входного потока удовлетворенности $\lambda(t)$, преобразующегося в удовлетворенность агентов потребностей (D) и возможностей (S) соответственно. Точный характер этой зависимости неизвестен, поэтому предполагается, что он пропорционален входному потоку L.

Ресурсы перерабатывают заявки, при этом увеличивается прибыль P. Часть прибыли поступает обратно в систему, увеличивая скорость планирования. Поэтому динамику такой системы приближенно можно описать системой кинетических уравнений удовлетворенности и прибыли. Доля прибыли, идущая на перепланирование, играет роль катализатора. Скорости взаимодействий (планирований) зависит от “концентрации” агентов потребностей и возможностей, от длин очередей в ресурсах, скорости переработки и скорости разрушения очередей. С другой стороны, интенсивность перепланирований будет зависеть от активности

агентов (количества переговоров), которые определяются текущими значениями удовлетворенности.

Поэтому в динамике системы потребностей и возможностей могут наблюдаться процессы, сходные с автокаталитическими реакциями. Входной поток заказов играет роль потока энергии, доля генерируемой прибыли аналогична катализатору, а обратная величина удовлетворенности системы сходна с температурой.

2.2 Кинетические уравнения удовлетворенности

Для описания скорости изменения удовлетворенности агентов потребностей будем учитывать входной поток, преобразующийся в удовлетворенность агентов $\mu_D\lambda(t)$. Удовлетворенность потребностей снижается в результате ухода в зону планирования на ресурсах, пропорционально существующей концентрации агентов потребностей и концентрации агентов возможностей $\sim N_D \cdot N_S$. Согласно (1), эту составляющую можно выразить через $\beta \cdot D(t) \cdot S(t)$, где β – некоторый коэффициент, характеризующий темп изменения удовлетворенности за счет планирования. Далее, увеличение количества агентов потребностей, связанное с выходом из очереди, зависит от концентрации агентов потребностей и некоторой колоколообразной функции $f(S,S')$, зависящей от агентов ресурсов, S' – предельное значение удовлетворенности ресурсов, выше которого очередь постепенно распадается, агенты потребностей опять поступают в систему (Рисунок 4):

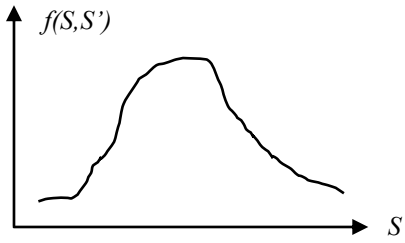


Рисунок 4 – Функция распада очередей агентов на ресурсах в зависимости от удовлетворенности ресурсов S и предельного значения S', после которого начинается спад

Данную функцию можно аппроксимировать кусочно-линейной трапециевидной или даже треугольной функцией.

Также учтем, что рост удовлетворенности зависит от доли γ прибыли P, идущей на повышение активности агентов потребностей в планировании: $\alpha' \cdot \gamma \cdot f(S,S') \cdot D \cdot P$, где

α' – соответствующий коэффициент роста удовлетворенности из-за перепланирований очереди, $\alpha=\alpha' \cdot \gamma$ для упрощения обозначений.

Получаем кинетическое уравнение динамики удовлетворенности агентов потребностей (D):

$$\frac{dD}{dt} = \alpha \cdot f(S,S') \cdot D \cdot P + \mu_D\lambda - \beta \cdot D \cdot S \quad (2)$$

Получим уравнение динамики агентов возможностей (S). Прирост за счет перехода на ресурсы описывается слагаемыми, связанными с частью входного потока $\mu_S\lambda$ (t) и слагаемым, связанным с генерацией удовлетворенности ресурсов за счет планирования $\beta \cdot D \cdot S$ пропорционально концентрациям агентов потребностей и возможностей. Разумеется, коэффициент β может отличаться от соответствующего коэффициента в уравнении (2). Кроме того, удовлетворенность в системе ресурсов уменьшается при безвозвратном уходе за счет выполнения задач со скоростью $q \cdot S$. Здесь для простоты пренебрегаем возможными

нелинейными эффектами. В результате получим уравнение динамики системы возможностей (ресурсов *S*):

(3) $$\frac{dS}{dt} = \beta \cdot D \cdot S + \mu_S \lambda - q \cdot S$$

И, наконец, генерация прибыли за счет выполнения работы с коэффициентом "*c*", пропорционально числу ресурсов и, соответственно, удовлетворенности ресурсов S

(4) $$\frac{dP}{dt} = c \cdot S$$

Область допустимых решений определяется условиями $D,S,P \geq 0$. Явления диссипации могут быть рассмотрены на той же системе уравнений (2)-(4), достаточно считать поток $\lambda(t)$ отрицательным.

3 Примеры динамики планирования с моделью ПВ-сети

Ниже рассматриваются примеры динамики удовлетворенности агентов в различных условиях. Вид функции *f(S,S'),* описывающий скорость распада очереди, для целей моделирования был выбран в виде трапеции. Предварительные эксперименты с MAC платформой [16] показали типичные зависимости средней удовлетворенности агентов, имеющие характер затухающих колебаний (Рисунок 1).

3.1 Существование стационарных состояний и реакция на входной поток

Производится моделирование поведения удовлетворенности агентов потребностей и возможностей при постоянном входном потоке заказов с нулевыми начальными условиями удовлетворенности (Рисунок 5).

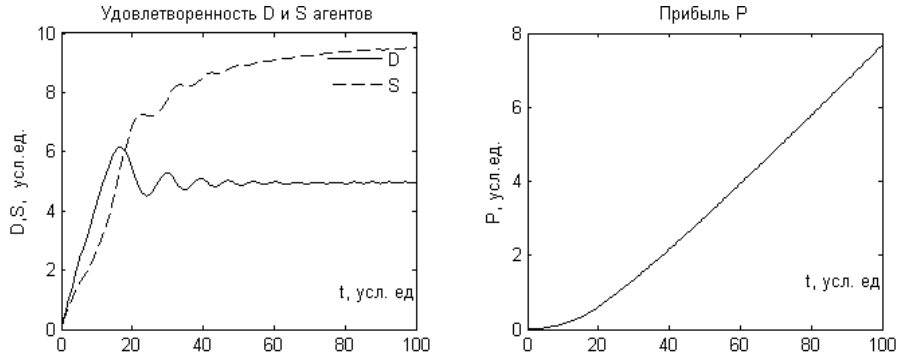


Рисунок 5 –Динамика поведения удовлетворенности агентов потребностей и возможностей при постоянном потоке заказов и прибыль

В момент включения потока планирования удовлетворенность ресурсов и задач вначале растет различным образом из-за соотношения параметров планирования и скорости ухода агентов потребностей на ресурсы (α=0.9, β=0.05). Затем рост очереди на ресурсах приводит к распланированию (спад после первого максимума удовлетворенности агентов потребностей), за счет этого удовлетворенность ресурсов растет, отставая по времени. На скорость роста влияет и доля поступающей на перепланирование виртуальной прибыли. Из-за эффекта уменьшения скорости изменения очереди возникают колебания удовлетворенности, которые постепенно затухают и система переходит в стационарное состояние.

3.2 Влияние доли прибыли системы на скорость перепланирований

При увеличении на 50% доли прибыли (γ), используемой агентами потребностей на перепланирование, “амплитуда” перепланирований увеличивается, что означает большую по сравнению с предыдущим случаем интенсивность переговоров агентов. При этом суммарная прибыль увеличивается (Рисунок 6):

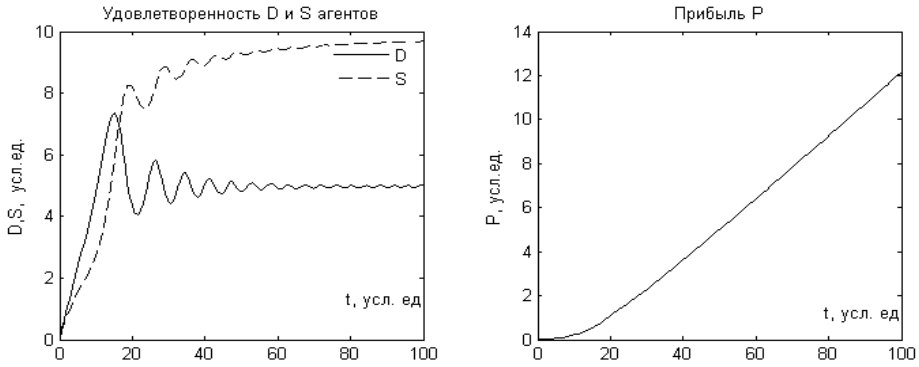


Рисунок 6 –Изменение динамики колебаний удовлетворенности при увеличении доли прибыли на перепланирование

3.3 Влияние начального запаса виртуальных денег на активность агентов

Если у агентов потребностей задан начальный запас виртуальных денег, которые они могут использовать в процессе улучшения своего состояния, эта ситуация моделируется изменением начальных условий. Начальное значение прибыли, поступающей на перепланирование, задано ненулевым (P=0.3), что приводит к увеличению активности агентов, а в модели дает увеличение амплитуды колебаний удовлетворенности (Рисунок 7).

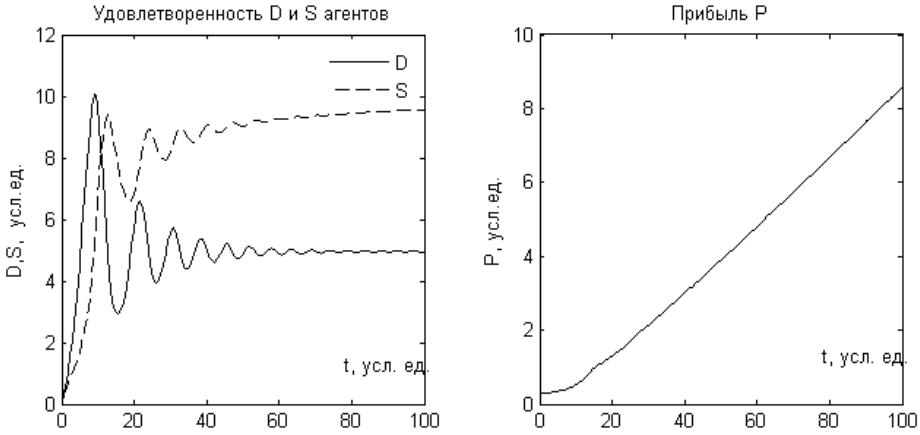


Рисунок 7 –Динамика удовлетворенности агентов при ненулевой начальной сумме виртуальных денег

3.4 Деградация удовлетворенности при наличии процессов диссипации

Если в системе агентов потребностей и возможностей, находящейся в стационарном состоянии, начинаются процессы диссипации виртуальных денег (например, производятся

непрерывные выплаты за нахождение агента в данном месте расписания), это приводит к падению удовлетворенности агентов системы. При этом прибыль остается постоянной, поскольку потеря удовлетворенности связана с уменьшением виртуальных денег, влияющих на активность агентов потребностей и возможностей.

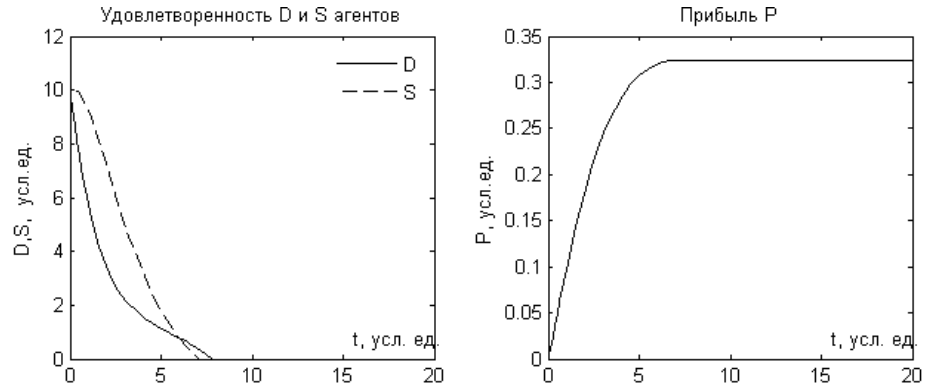


Рисунок 8 – Функция распада очередей агентов на ресурсах в зависимости от удовлетворенности ресурсов S и предельного значения S', после которого начинается спад

Заключение

Разработана макроскопическая модель поведения мультиагентных систем на основе общих эвристических соображений и кинетических нелинейных уравнений динамики агентов потребностей и возможностей. Несмотря на относительную простоту, модель описывает явления, аналогичные процессам планирования задач на ресурсах, наблюдаемых с помощью мультиагентной платформы:

- наличие квазистационарных состояний;
- переходные процессы в системе агентов;
- колебательный характер установления равновесий;
- зависимость процессов установления равновесий от виртуальной доли прибыли, направляемой на перепланирование.

Далее подход кинетических уравнений для удовлетворенности будет развит для учета динамики связей агентов, что позволит учесть топологию сети агентов потребностей и возможностей.

В дальнейших исследованиях планируется произвести идентификацию параметров модели по экспериментальным данным и использовать ее для анализа поведения реальных мультиагентных систем планирования ресурсов [18-21].

Список литературы

[1] Leung, Y-T, 2004, Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis, CRC Computer and Information Science Series, Chapman & Hall, London.

[2] Shirzadeh Chaleshtari, A, Shadrokh, Sh, 2012, 'A Branch and Bound Algorithm for Resource Constrained Project Scheduling Problem subject to Cumulative Resources', World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 6, pp. 23-28.

[3] Vos, S. 2001, "Meta-heuristics: The State of the Art" in Local Search for Planning and Scheduling, eds A Nareyek, Springer-Verlag, Berlin, pp.1-23.

[4] Rolf CR, Kuchcinski, K, 2011, ‘Distributed constraint programming with agents’, in Proceedings of the second international conference on Adaptive and intelligent systems, Springer-Verlag, Berlin, pp. 320-331.
[5] Gongfa, L, 2011, ‘A hybrid particle swarm algorithm to JSP problem’, IEIT Journal of Adaptive & Dynamic Computing, pp. 12-22.
[6] Xueni, Q, Lau, H, 2010, ‘An AIS-based Hybrid Algorithm with PSO for Job Shop Scheduling Problem’ in Proceedings of the tenth IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Lisbon, pp. 371-376.
[7] Pinedo, M., 2008, Scheduling: Theory, Algorithms, and System, Springer, Berlin.
[8] Skobelev P. Multi-Agent Systems for Real Time Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling: Industrial Application // 10-th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2011). France, Toulouse.2011. Springer, pp.5-14.
[9] Rzevski, G., Skobelev, P., 2014, Managing complexity, WIT Press, UK-USA, 198 p.
[10] Wei Chen at al., "Approximate Dynamic Programming using Fluid and Diffusion Approximations with Applications to Power Management", Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, December 2009.
[11] Garavello, M., Piccoli, B. On fluido-dynamic models for urban traffic. NETWORKS AND HETEROGENEOUS MEDIA, 2009, vol 4, 1, pp 107-126.
[12] Wenguo Liu, Alan F. T. Winfield. Modeling and Optimization of Adaptive Foraging in Swarm Robotic Systems. International Journal of Robotics Research, Volume 29 Issue 14, December 2010, Pages 1743-1760.
[13] Виттих В. А., Скобелев П. О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и Телемеханика. 2003. №1. С. 162-169.
[14] Виттих В. А., Скобелев П. О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. – 2009. – №2. – С. 78-87.
[15] Скобелев П. О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. №12. – С. 33-46.
[16] Petr Skobelev, Denis Budaev, Vladimir Laruhin, Evgeny Levin, Igor Mayorov. Multi-Agent Platform for Designing Real Time Adaptive Scheduling Systems // Proceedings of the 12th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS 2014), 4-6 June, 2014, Salamanca, Spain. 2014. – Lecture Notes in Computer Science series, vol. 8473. – Springer, Switzerland, pp. 383-386.
[17] Michael H. Veatch. Using Fluid Solutions in Dynamic Scheduling, Analysis and Modeling of Manufacturing Systems, International Series in Operations Research & Management Science Volume 60, 2003, pp. 399-426.
[18] М.Ю. Тугаев, А.В. Речкалов, П.О. Скобелев. Управление машиностроительной корпорацией в реальном времени» // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, Москва,16 – 19 июня 2014 г.: Труды. [Электронный ресурс] М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 9030-9043.
[19] P. Skobelev, A. Ivanov, E. Simonova, V. Travin, A. Jilyaev. Multi-agent scheduling of communication sessions between microsatellites and ground stations network // Онтология проектирования. – 2014. №2(12). – С. 92-100.
[20] Баклашов В.И., Казанская Д.Н., Скобелев П.О. Шпилевой В.Ф., Шепилов Я.Ю. Мультиагентная система Smart Factory для адаптивного стратегического и оперативного управления цехами производства «точно в срок» и «под заданную стоимость» // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 16, №1(5), 2014. – С. 1292-1295.
[21] Е.М. Клейменова, П.О. Скобелев, В.Б. Ларюхин, И.В. Майоров, Д.С. Косов, Е.В. Симонова, А.В. Царев, А.Л. Феоктистов, Е.В. Полончук. Интеллектуальная система «Smart Projects» для оперативного управления ресурсами в проектах НИР и ОКР в реальном времени // Информационные технологии. – 2013. №6. – С. 27–36.

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ «SMART FACTORY» В ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ЦЕХЕ №50 ОАО «АВИААГРЕГАТ»

И.В. Прилепский[1], И.В. Майоров[2], Я.Ю. Шепилов[2]

[1]Открытое акционерное общество «Авиаагрегат»

Россия, 443009, Самара, Заводское шоссе, 55

E-mail: oksup@aviaagregat.net

[2]ООО «Научно-производственная компания «Разумные решения»

Россия, 443013, Самара, Московское шоссе, 17, офис 1201

E-mail: kalmychkov@smartsolutions-123.ru

Ключевые слова: *задачи управления, инструментальный цех, мультиагентные технологии, результаты внедрения*

Abstract

The problem of management of Workshop #50 in JSC AviaAgregat is described. The brief overview of functionality of production management system "Smart Factory" is given. Main stages and results of implementing the system in the named workshop are described.

Введение

ОАО «Авиаагрегат», входящий в холдинг «Авиационное оборудование» – одно из крупных современных предприятий авиационного машиностроения, которое специализируется на проектировании и изготовлении шасси, рулевых приводов самолетов, элементов ракетного вооружения, летательных аппаратов, гидроцилиндров для дорожной, строительной, сельскохозяйственной, железнодорожной техники, а также вязкостных муфт для автомобилей УАЗ и ГАЗ и т.д. [1].

Чтобы активно развиваться в условиях острой конкуренции, предприятие постоянно ищет инновационные пути повышения эффективности использования ресурсов, улучшения качества продукции, минимизации сроков поставки, индивидуализации своих решений и т.д. Особенную сложность при этом представляет постепенный переход от массового – к индивидуальному производству продукции «на заказ», что требует более гибкого и оперативного управления в реальном времени заказами, издержками и распределением ресурсов, чтобы избегать простоев и дефицита, в первую очередь, дефицитных кадров и дорогостоящего оборудования.

В этих целях предприятие внедряет новые информационные технологии для управления ресурсами, в числе которых важное значение приобретает мультиагентная система «Smart Factory» для управления цехами машиностроительных предприятий в реальном времени. В настоящей статье описывается успешный опыт внедрения данной системы в инструментальном цехе №50 и первые полученные результаты от ее использования, а также перспективы дальнейшего развития системы, в настоящее время интегрированной с модулями Team Center, 1С Предприятие, Симфония и рядом других

1 Основные задачи управления предприятием

В связи с растущим спросом на продукцию ОАО «Авиаагрегат», предприятию требуется обеспечить высокую эффективность использования своих производственных ресурсов, что во многом зависит от методов и средств, применяемых для планирования производства. При этом важной задачей предприятия является планирование изготовления инструмента и оснастки,

необходимой всем цехам основного производства, что является основой бесперебойной работы всего предприятия. В качестве перспективы рассматривается возможность на базе инструментального производства ОАО «Авиаагрегат» создать инструментальный центр компетенций для всех предприятий Холдинга «Авиационное оборудование» и сторонних предприятий.

Инструментальное производство ОАО «Авиаагрегат» представлено цехом №50 (малогабаритная оснастка) и частично №53 (крупногабаритная оснастка).

В цехе №50 используется 130 единиц оборудования, а кадровый состав составляет 112 человек, 84 из которых – производственные рабочие. Цех поделен на участки режущего инструмента, мерительного инструмента и оснастки, а каждый участок, в свою очередь, разделен на группы. Номенклатура цеха – примерно 700 изделий в месяц, а суммарная трудоемкость составляет приблизительно 17 тыс. нормо-часов в месяц.

Основной управленческой задачей цеха №50 в части планирования является необходимость выполнения заказов по изготовлению средств специального технического оснащения (ССТО) точно в срок. Даже небольшие задержки в производстве ССТО приводят к срыву сроков большого объема производства основных изделий.

Основными типовыми причинами срыва сроков производства ССТО являются поступление срочных, незапланированных заказов на изготовление ССТО (40% от всех заказов) и задержки в поставке материалов и комплектующих, что вызывает необходимость постоянного оперативного маневрирования между заказами, чтобы исключить простои оборудования и рабочих и несогласованность действий внутрицехового плана. При этом следует учитывать высокую трудоемкость оперативного управления, наличие человеческого фактора в лице пожилых мастеров и рабочих, превалирование бумажной технологии и отсутствие опыта работы персонала цеха с компьютерными системами.

В результате, уровень изменчивости плана цеха в ходе работы на горизонте планирования оценивается в 25-35% объема, что требует применения развитых методов и средств адаптивного планирования в реальном времени.

2 Предлагаемый подход к решению проблемы

Для решения задачи был предложен мультиагентный подход для адаптивного построения и исполнения планов в реальном времени на основе концепции «живого расписания», механизма ПВ-сетей и метода сопряженных взаимодействий [2, 3].

В разработанном подходе планирование никогда не останавливается, а план лишь уточняется и корректируется, оптимизируется и дополняется по мере прихода новых событий в скользящем режиме на базе фактически выполненных работ или проактивно, когда у системы есть время улучшить результаты, например, до выдачи очередной работы сменно-суточного задания, что также позволяет с опережением формировать прогнозные показатели выполнения плана цеха. Переход от статичных планов, построенных на большой горизонт времени вперед, к динамичным, меняющимся непрерывно по событиям в реальном времени, является принципиальным, помогая предприятиям делать шаг к управлению в реальном времени, когда от самого момента времени зависит качество и эффективность работы, затоваривание или дефицит по позициям и т.д.

При этом план лишь адаптивно корректируется и оптимизируется по мере появления событий в реальном времени, причем динамическая оптимизация охватывает сколь угодно длинную цепочку изменений, если для этого есть запас времени. Такая автоматизированная адаптация планов «на лету», в ходе их исполнения, осуществляется непрерывно путем выявления конфликтов в доступных ресурсах, проведения переговоров и достижения компромиссов между агентами потребностей и возможностей.

Основные функции системы «Smart Factory» включают:

1) ввод заказов на производство инструментов и оснастки и их декомпозиция до уровня отдельных операций с учетом заданных технологий производства;
2) автоматическое формирование сменно-суточных заданий для рабочих с учетом их квалификации, возможностей, обеспеченности и приоритетов задач;
3) адаптивная корректировка планов по событиям;
4) оптимизация распределения ресурсов и планов цеха (при наличии времени);
5) мониторинг и контроль выполнения работ в режиме реального времени;
6) прогнозирование «узких мест» в производственном плане;
7) подготовка отчетов и ведение бизнес-радаров для опережающего оповещения мастеров и менеджеров о проблемах производства.

Повышение оперативности принятия решений при возникновении непредвиденных событий в цехе достигается за счет автоматизации выполнения цепочек изменений в производственном плане путем подвижек и перераспределения задач с учетом технологической взаимосвязей между операциями в реальном времени.

Система предназначена для использования руководством цеха, отделом управления технологической подготовкой производства, сотрудниками планово-диспетчерского бюро (ПДБ) и мастерами цеха, специалистами ОТК и бюро зарплаты, нормировщиками, а также имеется выход и на рабочих цеха через терминал.

Начальник цеха и его заместители осуществляют контроль и управление работой сотрудников цеха, отслеживая работы каждого производственного участка и группы, а также получая сводную и индивидуальную информацию по различным показателям работы цеха, вплоть до каждого рабочего. Начальник цеха может просматривать плановую загрузку и фактическую выработку рабочих, а также корректировать и контролировать все стадии заказов от поступления в цех до выпуска готового изделия, включая технологическую проработку, нормирование и обеспеченность материалами, приемку работы.

Сотрудник отдела управления технологической подготовкой производства (ОУТПП) получает возможность работы с заказами цеха (создание, просмотр и редактирование), формирования планов и отчетов, контроля процесса и сроков производства.

Технолог и нормировщик могут работать с технологическими процессами изготовления изделий, создавать и редактировать, печатать технологии, устанавливать нормы.

Сотрудник ПДБ получает возможность контролировать поступающие заказы, сроки их выполнения, а также обеспеченность заказов материалами, формировать заявки на материалы и покупные изделия с учетом плана производства.

Мастер может получать и корректировать план работы группы рабочих на каждый день, учитывающий персональные квалификации, знания и опыт рабочих при работе с тем или иным оборудованием, при этом он так же может вводить незапланированные события и контролировать загрузку рабочих и оборудования своей группы. Мастер формирует наряды на выполнение работ, сменно-суточные задания и различные отчеты в электронном и печатном виде.

Сотрудник ОТК получает возможность фиксировать факт выполнения работ, а также годность или брак обработанных изделий с возможной частичной сдачей и повторным предъявлением. Для сотрудников ОТК предусмотрено формирование отчетов по браку и второму предъявлению.

Более подробно предлагаемый мультиагентный подход и функции разработанной системы, а также предшествующий опыт внедрений рассмотрены в [4-6].

3 Краткое описание процесса планирования заказов

Рассмотрим процесс работы над заказами с использованием системы подробнее.

На основе ведомости подготовки производства и заказов цехов ОУТПП при наличии конструкторской документации открывает заказы на производство ССТО. Раз в месяц из этих заказов формируется план на проработку и изготовление ССТО, который доступен для ПДБ цеха №50. Совместно с Начальником цеха в ПДБ среди заказов из полученного плана устанавливаются внутрицеховые приоритеты, исходя из оперативных заводских совещаний и реальной потребности в производстве.

Технологи цеха в Системе просматривают заказы и для каждого заказа формируют структуру изделия (на основании чертежа) и разрабатывают технологию. Затем инженеры ПДБ просматривают обработанные технологами заказы и проверяют для них обеспечение материалом. Из заказов, для которых материала и комплектующих нет в наличии, в Системе формируется ведомость потребности, которая распечатывается и отправляется в управление материально-технического снабжения и комплектации. В ответ на нее снабженцы передают в цех возможные сроки поставки материала, которые вводятся в Систему. Затем инженеры по нормированию труда в Smart Factory просматривают все проработанные технологом и обеспеченные в ПДБ заказы (нормы зависят от материала), рассчитывают трудовые нормативы на каждую технологическую операцию (ТО) и вносят их в Систему (Рисунок 1).

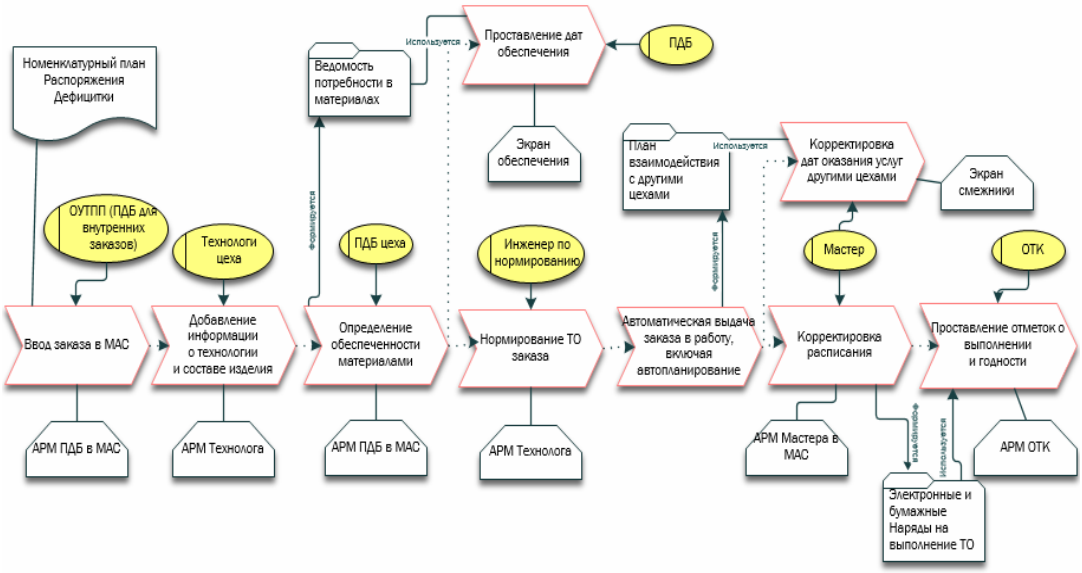


Рисунок 1 – Схема процесса обработки заказов на изготовление ССТО

После нормирования заказы выдаются мастеру и автоматически планируются в Системе, исходя из срока сдачи, общего приоритета по изделию, а также специального приоритета начальника цеха. Мастера каждый день просматривают новые заказы, корректируют расписание (если требуется) и печатают наряды на каждую операцию заказа для каждого рабочего. Получив наряд, рабочий приступает к выполнению задания в указанное время. По завершении операции рабочий относит наряд и детали на контрольный стол отдела технологического контроля (ОТК), где производится проверка качества и в Системе фиксируется факт выполнения операции и годность детали. Для этого сотрудник ОТК считывает штрих-код с наряда сканером штрих-кодов, в Системе открывается окно фиксирования годности/брака, где контролер при необходимости корректирует информацию о работе.

Когда последняя операция заказа была отмечена на ОТК завершенной, заказ в Системе считается выполненным.

4 Доработки «Smart Factory» для ОАО «Авиаагрегат»

Проект внедрения «Smart Factory» был начат в июле 2012 года с этапа разработки технического задания, который длился 3 месяца. В ходе этого этапа был произведен ряд интервью с будущими пользователями системы, включая начальника цеха, сотрудников ПДБ, начальников участков и мастеров, а также технологов и нормировщиков. В результате этапа был сформулирован перечень задач как по доработке «Smart Factory», так и доработке существующих систем предприятия, с целью интеграции систем и поддержки внедрения новых бизнес-процессов.

Далее начался второй этап, который также длился около 3 месяцев и сопровождался закупкой необходимого серверного и клиентского оборудования, включавший доработки системы с учетом выявленной специфики предприятия.

Третий этап включал поставку системы и обучение сотрудников цеха, а также доводку АРМов основных специалистов непосредственно по замечаниям пользователей, что также потребовало около 3 месяцев.

С июня 2013 года система находилась сначала в опытной эксплуатации, а с октября 2013 была переведена в штатную эксплуатацию.

5 Внедрение системы «Smart Factory»

Работы по вводу системы в опытную эксплуатацию начались с технического оснащения рабочих мест пользователей. Так же в ходе внедрения были проведены работы по переводу технологической документации из бумажной формы в электронную для нескольких основных изделий, производимых цехом. Т.к. новая номенклатура у цеха появляется каждый месяц, работы по наполнению и поддержке этих справочников ведутся в оперативном режиме и в настоящий момент времени, но теперь уже сотрудниками цеха при поддержке информационной службы предприятия.

Одной из проблем, возникшей в начале проекта, был низкий уровень компьютерной грамотности у будущих пользователей, для решения этой проблемы было проведено обучение, которое в дальнейшем повторялось многократно для каждого рабочего места системы, требуя большого желания, терпения и соответствующей квалификации исполнителя. На этом этапе были так же разработаны руководства пользователей и регламент их взаимодействия с системой, поскольку с внедрением системы начали кардинально меняться бизнес-процессы предприятия.

Непосредственно запуск системы в работу цеха осуществлялся поэтапно.

Предварительно была реализована возможность импорта журнала заказов цеха из MS Excel. Затем, после проведения обучения, технологи перевели технологическую информацию о первых 20-ти наиболее приоритетных отобранных изделиях из плана участка мерительного инструмента. Отработка бизнес-процесс на небольшом количестве заказов для участка мерительного инструмента позволила собрать новые замечания и новые требования к системе, которые сразу же дорабатывались. В ходе такого многоитерационного процесса были поэтапно учтены все требования, и далее система была запущена для обработки всех заказов, поступающих на участок мерительного инструмента. На большем и быстро растущем объеме данных система начала замедляться, но причины были быстро выявлены и замечания пользователей устранены путем оперативной оптимизации программного кода.

Следующим важным этапом стал запуск системы на участке режущего инструмента, в процессе которого так же были выявлены новые замечания, связанные с особенностями производства режущего инструмента. После устранения этих замечаний в ходе аналогичных итераций, в работу были включены участок оснастки и отдел технологического контроля, а также другие подразделения.

В целом, в процессе внедрения было получено 162 замечания, из них 58 – новые требования для до-работки системы, не учтенные в ходе подготовки ТЗ на первом этапе.

В процессе внедрения разработка велась по гибкой методологии Agile, что позволило поставлять доработки и новые функциональные возможности каждые две недели, без остановки функционирования системы.

6 Результаты внедрения

В настоящее время в Системе ежедневно работает 15 человек, в числе которых: руководство цеха, ПДБ, инженеры по нормированию, мастера, технологи, нормировщики, контролеры и сотрудники ОУТПП.

В системе заведено 130 сотрудников, причем 84 из них – производственные рабочие, на которых планируются задания. Общее количество моделей различных ДСЕ в базе данных – 20687. За период внедрения сотрудниками ОУТПП введено 3369 заказов, из них 371 заказ не был обработан технологами, 153 заказа не обеспечено материалами и покупными изделиями, запланировано и в работе – 154, выполнено и сдано – 2673. 18 заказов было аннулировано.

Запланированные и выполненные заказы содержат 11857 операций (заданий рабочим), из них з-планировано 4143, а выполнено 7327. Горизонт планирования при этом составляет 2 месяца.

Планирование одной выполненной операции занимает 1 секунду, а планирование всего объема операций – 2 минуты. При этом перестроение плана производства при изменении приоритета среднего по количеству операций заказа составляет 4 секунды. Непредвиденные события, такие как поступление нового заказа, изменение приоритета существующего заказа, недоступность ресурсов, вводятся в систему в среднем 4 раза в день.

При работе сервер приложения занимает от 1 до 3,5 ГБ оперативной памяти, в зависимости от частоты обращений к данным и их разнообразию. Клиентская часть может использовать от 140 МБ до 1 ГБ оперативной памяти.

Одним из результатов внедрения является снижение временных затрат сотрудников на действия, связанные с обеспечением процесса управления инструментальным производством. В среднем процесс подготовки производства и планирования сократился в 1,5 раза. Результаты хронометража затрат времени сотрудников цеха на основных этапах планирования работ «до» и «после» внедрения приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Результаты замеров длительности процесса работы над заказами в Системе

Этапы работы	Оценка	После внедрения	До внедрения
ОУТПП. Формирование плана заказов на следующий месяц	Длительность на процесс	16 часов	24 часа
	Результаты	При необходимости, все участники процесса имеют возможность просмотреть план в электронном виде.	Необходимо распечатать и отнести в ПДБ цеха
ТБЦ. Технологическая проработка заказа на новое изделие	Длительность на заказ (при повторном использовании / в первый раз)	0,1 / 0,4 часа	0,3 часа

	Результаты	Формируется цифровая модель технологии изготовляемого заказа. Технология может быть заполнена на основе введенных в Систему подобных заказов, обеспечено повторное использование информации. Нет необходимости использовать бумажные формы.	Формируется список технологических операций в MS Word, результатом является печатная форма.
БТЗ. Нормирование заказа на новое изделие	Длительность на заказ	0,5 часа	1 час
	Результаты	На нормирование одного заказа в среднем уходит 30 минут. Отпала необходимость выписывать наряды вручную. Нет необходимости вписывать вручную нормы в технологическую карту. Расценка в наряде подсчитывается автоматически.	Наряды на работу выписываются вручную, сверяясь с информацией из бумаги «технологии изделия». Приходится дублировать информацию по нормам для мастеров. Приходится самостоятельно рассчитывать расценку по каждому наряду.
ПДБ. Проверка обеспеченности материалами	Длительность на заказ	0,1 часа	0,3 часа
Мастер. Планирование работ и доведение задания до исполнителя	Длительность на сутки	0,1 часа	0,5 часа
	Результаты	Используются результаты работы системы планирования при распределении заданий по рабочим, необходимо лишь сверить назначение и распечатать наряды на работу. Вся необходимая информация сосредоточена на одном экране и всегда перед глазами. Имеется механизм контроля загрузки каждого рабочего. Освободилось время для дополнительного контроля и улучшения процесса производства.	Сверяясь с технологической картой, вручную вписывались фамилии рабочих в наряды и доводились до каждого рабочего, не имея возможности видеть текущую загрузку рабочих своей группы и гибко планировать. Много времени уходило на анализ полученных данных и заполнения необходимых печатных форм вручную.
ОТК. Ежедневное проставление	Длительность на сутки	0,2 часа	0,4 часа

отметок о годности изделий и факта выполнения работ	Результаты	С помощью сканирования штрих-кодов на нарядах контроллер быстро находит соответствующие операции в Системе и проставляет количество годных изделий. Расписывается на наряде и ставит отметку о предъявлении. Ведет автоматический журнал сдачи.	Контролер расписывается на наряде и ставит отметку о предъявлении, ведет журнал сдачи, сообщает мастерам результаты.

В результате, в ходе внедрения были получены следующие основные результаты:

1) эффективность использования ресурсов цеха увеличена на 10-15%;
2) уменьшена трудоемкость цикла управления от заказа до наряда до 25% за счет использования единой системы и сокращения дублирования информации;
3) снижение трудоемкости до 80% за счет частичного исключения работы по дефициту (до 15% от общей трудоемкости цеха);
4) снижена в 2-3 раза трудоемкость планирования срочных заказов за счет адаптивного планирования в режиме реального времени;
5) сокращены на 40% сроки разработки технологической документации и ее поиска;
6) введенные данные по объектам и технологическим процессам используются повторно, что приводит к постепенному росту производительности труда технологов и нормировщиков;
7) план работы цеха может теперь в любой момент перестраиваться и пересчитываться быстро, гибко и с учетом индивидуальных особенностей каждого заказа и ресурса;
8) важные субъективные знания мастеров о станках, технологиях и рабочих (плохо формализуемые) становятся объективными и могут быть использованы для повышения качества планирования;
9) принимаемые решения становятся более надежными, обоснованными и точными, избавленными от ошибок людей;
10) сокращены затраты за счет сокращения сроков разработки изделий, поиска информации, на бумагу и копировальную технику, коммуникацию и отчеты по готовности работ и др.

Заключение

Авторы надеются, что предложенная помощь в оформлении материалов оправдает внимание и время, потраченные на изучение этой инструкции.

Благодарности

Внедрение «Smart Factory» в цехе №50 ОАО «АвиаАгрегат» позволило уменьшить трудоемкость планирования деятельности цеха, более эффективно использовать материалы и трудовые ресурсы, а также получить ряд других важных результатов.

При этом новая возможность адаптивно перераспределять задачи в режиме реального времени в соответствии с изменяющимися потребностями основного производства является одним из важнейших факторов в исполнении запланированных сроков.

Опыт разработки и внедрения системы в инструментальном цехе доказал эффективность заложенных подходов и открывает перспективы ее использования для цехов основного производства.

Список литературы

[1] Сайт ОАО «Авиаагрегат». – Режим доступа: http://aviaagregat-samara.com/

[2] Скобелев П. О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений // Автометрия. 2002. № 6. С. 45-61.

[3] Виттих В. А., Скобелев П. О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. 2009. № 2. С. 78-87.

[4] Скобелев П. О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. №12. С. 33-46.

[5] П.О. Скобелев. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии». 2013. №1. С. 1–32.

[6] Тюрин И.Ю., Вылегжанин А.С., Андреев М.В., Кольбова Э.В., Скобелев П.О., Шепилов Я.Ю. «Опыт разработки и внедрения мультиагентной системы для оперативного управления инструментальным цехом ОАО «Ижевский мотозавод – Аксион-Холдинг» // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 11. С. 15-19.

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А.В. Шишов[1], Я.Ю. Шепилов[2], Д.Н. Казанская[2], Д.В. Павлова[2], Л.С. Бесова[2]

[1]ОАО «Кузнецов»
443009, Самара, ул. Заводское шоссе, 29
ashishov@kuznetsov-motors.ru
тел/факс: +7 (846) 279-37-78

[2]ООО «НПК «Разумные решения»
443013, Самара, ул. Московское шоссе, 17, офис 1201, Россия
shepilov@smartsolution-123.ru
тел/факс: +7 (846) 279-37-78

Ключевые слова: *мультиагентная система, стратегическое планирование, управление производством, объемно-календарное планирование*

Abstract
The article describes the developed multi-agent system for strategic planning for aerospace industry. The main problem of strategic planning is described. The explanation of the multi-agent planning engine is give. To conclude the ideas of the article, the results of the experiments are provided.

Введение

В современном мире термин «планирование» используется практически во всех областях жизни человека, включая организацию работы производства, предприятия, общественного транспорта и перевозок. Одной из трудно разрешимых задач является организация производства, в котором задействовано сотни и тысячи людей. Грамотно составленный план организации производства позволяет учитывать максимальные возможности всего производственного процесса при принятии необходимых мер к использованию резервов, окажет положительный эффект в виде роста прибыли и рентабельности производства, позволит расширить долю предприятия на рынке, поднимет конкурентоспособность собственной продукции [1]. В подтверждение значимости повышения качества стратегического планирования приведем два высказывания известных ученых: «Стратегическое планирование имеет дело не с будущими решениями, а с будущим решений, принимаемых сегодня» (П. Друкер), «Для полного совершенства надо, чтобы подготовка была труднее самого дела» (Ф. Бэкон) [2].

В данной статье описывается мультиагентная система стратегического планирования деятельности аэрокосмического предприятия (МАС), которая решает основные проблемы при составлении плана, такие как: ручное формирование планов, неполный учет мощностей цехов, отсутствие точных сроков выполнения заказов.

1 Задача стратегического планирования на ОАО «Кузнецов»

Основной задачей стратегического планирования на ОАО «Кузнецов» [3] является повышение качества и эффективности среднесрочного и долгосрочного объемно-календарного планирования и обеспечения работы предприятия в условиях высокой динамики рыночной среды, связанной с получением новых заказов на создание новых сложных изделий и проведения их ремонтов, изменением приоритетов существующих, задержками в поставках материалов.

МАС стратегического планирования эффективно применяется для объемно-календарного планирования долгосрочных производственных программ аэрокосмического предприятия, обладающих следующими особенностями:

- Изготовление технически сложной продукции (много компонентов или операций) в условиях работы по заказам и большого объема ручной работы;
- Постоянные инновации, связанные с изменением технологий, вводом новых изделий и т.д.;
- Работа в условиях загрузки оборудования, близкой к максимальной (в том числе круглосуточной), когда размещение нового заказа немедленно влияет на сроки предыдущих, ранее согласованные;
- Производство разнообразных изделий, а также большого количества различной номенклатуры изделий на одном типе рабочих центров и конкуренции изделий за доступное время работы ресурса;
- Высокая турбулентность событий (20-40%) - влияние на производственный процесс большого количества непредсказуемых событий, происходящих в произвольные моменты времени: задержек, отказов, брака и доработки и т.п.

МАС применяется в планово-диспетчерских и производственных подразделениях предприятия. Основными пользователями являются Главный диспетчер и планово-диспетчерский отдел.

МАС позволяет обеспечить автоматизированную корректировку плана выпуска готовой продукции, стратегических планов по каждому цеху в ходе получения предприятием новых заказов, изменении приоритетов уже принятых, возникновения задержек и срывов сроков работ.

За счет использования предприятием МАС ожидается получить следующие эффекты:

- Повышение эффективности работы предприятия.
- Обеспечение оперативной реакции на непредвиденные события в реальном времени.
- Учет всех факторов при планировании.
- Обеспечение гибкости плана и готовности к любым изменениям «на лету», учитывающим индивидуальные особенности заказов и ресурсов.
- План гораздо лучше отражает реальность – поскольку корректируется в ходе ежедневного выполнения работ по факту.
- Сокращение трудоемкости планирования, контроля и прогнозирования результата работы предприятий.
- Повышение дисциплины и ответственность за результат.
- Уменьшение человеческого фактора (ошибки, искажение данных и т.д.).
- Рост производства без увеличения численности управленческого персонала.

Кроме того, система в будущем обеспечит вертикальное и горизонтальное согласование планов между различными цехами производства при планировании сложных заказов по новым изделиям и ремонтам в сочетании с уже разработанной (и внедренной в 18 цеху ОАО «КУЗНЕЦОВ») мультиагентной системой оперативного управления цехами, формируя сетецентрическую систему управления предприятием.

2 Мультиагентная система стратегического планировния

2.1 Использующийся механизм планирования

Мультиагентная система планирования (МАС) – система, базирующаяся на нескольких взаимодействующих агентах.

Для возможности создания мира агентов необходимы данные, на основе которых будут базироваться агенты. Для этого в МАС загружаются данные из внешних систем. Затем для

каждой сущности, загружаемой из внешнего мира в систему, создается соответствующий ей агент (например, агент операции, агент рабочего и т.д.) [4].

Процесс планирования начинается с того, что на вход МАС подается набор данных предприятия, исходя из которых, на выходе должен получиться план работ для этого предприятия на заданный горизонт времени. Данные загружаются из системы предприятия в определенном формате, либо вводятся в систему вручную. Построение плана происходит путем взаимных переговоров агентов и достижения состояния компромисса между ними:

1) Включение – на этом этапе создается так называемый мир агентов, в котором существуют и взаимодействуют между собой экземпляры программ, реализующие все требуемые функции агентов, в том числе и базовые механизмы взаимодействия агентов;
1) Загрузка данных – загружаются все исходные, а в последствии обновленные данные для работы системы;
2) Создание агентов – мир агентов рассылает всем созданным на первом этапе агентам сообщения о том, что они созданы и им необходимо активироваться (сообщение «пробуждение»);
3) Инициализация агентов – агенты определяют для себя свои цели, свои приоритеты, свои критерии исходя из данных, полученных ими из мира агентов. Каждый агент сам выбирает, на какие обновления от каких агентов подписываться. На данном этапе запускаются потоки и дают возможность начать параллельную работу агентов;
4) Валидация агентов – агенты определяют, насколько точно они обозначили для себя цели, выбрали приоритеты и критерии.
5) Работа агентов – в параллельном асинхронном режиме агенты начинают работать согласно своим инструкциям для достижения своей цели;
6) Достижение согласия – путем переговоров с другими агентами, либо самостоятельно агент находит для себя наилучшее решение, после чего работа агента останавливается;
7) Сохранение результатов – сохраняется найденное агентами решение;
8) Получение событий – из реального мира в мир агентов приходит оповещение о каких-либо изменениях;
9) Повторение цикла – исходя из полученного события загружаются или обновляются данные (этап 2) и цикл повторяется.

После завершения цикла агенты переходят в состояние ожидания, когда они не выполняют никаких действий, пока не получат определенное сообщение от других агентов.

2.2 Описание системы

На рисунках 1-6 отображены основные экраны МАС стратегического планирования: обеспечение заказов партиями, загрузка цеха и цехов, график запасов, график комплектации, номенклатурный план.

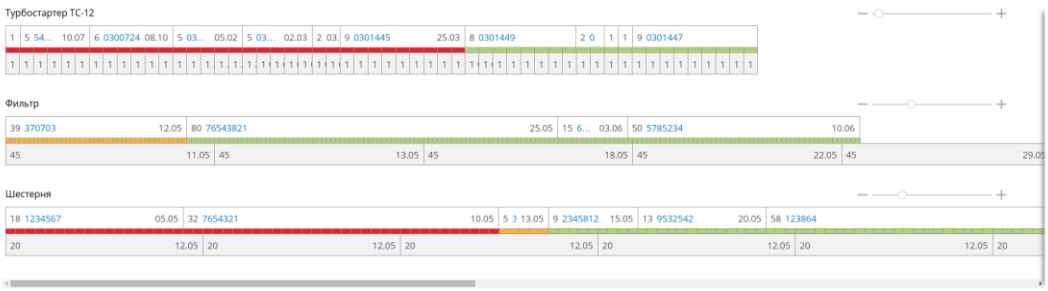


Рисунок 1 – Обеспечение заказов партиями

На экране «Обеспечение заказов партиями» на рисунке 1 можно отследить обеспечение заказов партиями изделий. Заказы могут обеспечиваться как со склада, так и из цеха. Цветовая индикация показывает узкие места в производстве, успеет ли цех изготовить ДСЕ для покрытия заказа в срок.

Рисунок 2 – Загрузка цеха

На экране «Загрузка цеха» на рисунке 2 отображается загрузка цеха изготавливаемыми ДСЕ. Пользователь имеет возможность проанализировать насколько цех загружен, или наоборот о недостатке загрузки.

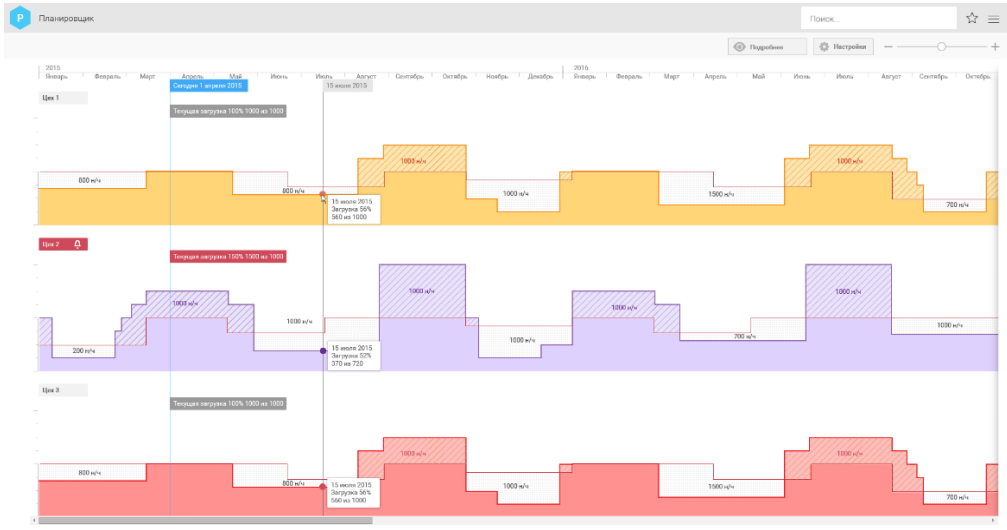


Рисунок 3 – Загрузка цехов

Экран «Загрузка цехов» на рисунке 3 позволяет проанализировать загрузку цеха на определенный промежуток времени.

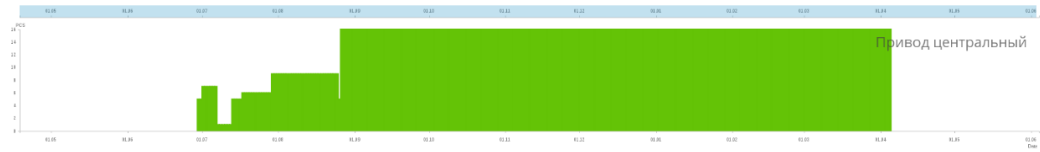


Рисунок 4 – График запасов

Экран «График запасов» на рисунке 4 позволяет увидеть фактическое состояние склада, и планируемое поступление деталей на склад.

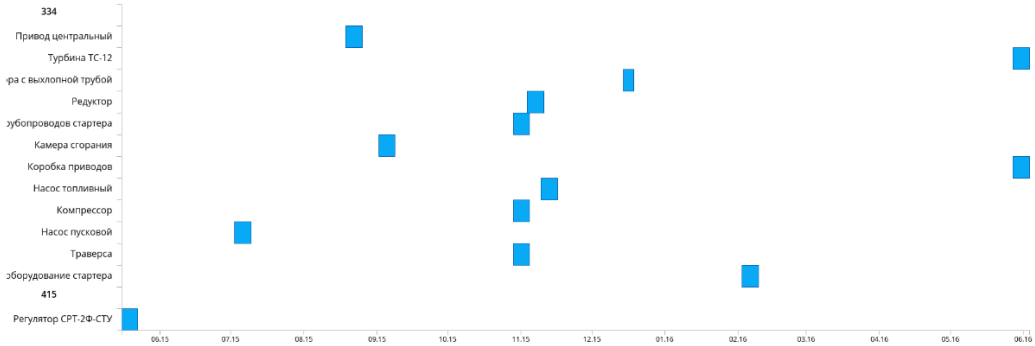


Рисунок 5 – График комплектации

Экран «График комплектации» на рисунке 5 предоставляет пользователю информацию о сроках изготовления комплектующих для выбранной сборочной единицы. Благодаря этому экрану можно проанализировать изготовление какой детали опаздывает к началу процесса сборки сборочной единицы.

Цех ×

ДСЕ	Цех	April 15	May 15	June 15	July 15	August 15
Цех: 317						
Шайба регулировочная	317	45	120			
Крышка	317	10	25	20		
Втулка (Распорное кольцо)	317		70	40		
Фланец	317	30	80			
Втулка	317		250	300		
Планка стопорная	317		280	160		
Клапан обратный	317	180	450	360		
Гайка	317		70	40		
Кольцо регулировочное	317	120	300	240		
Шайба регулировочная	317	90	405			
Турбинка уплотнения	317		490	280		
Кольцо регулировочное	317	30	80			
Кольцо регулировочное	317	30	80			

Рисунок 6 – Номенклатурный план

Экран «Номенклатурный план» на рисунке 6 позволяет отследить количество сдаваемых цехом деталей в течение выбранного промежутка времени – год и более.

3 Результаты экспериментов

В данной работе рассматривается серия экспериментов, призванная оценить результаты влияния системы:

- Фактический сценарий. Описывает работу предприятия, основываясь на реальных данных.
- Идеальный сценарий. Все заказы известны заранее, и они планируются наиболее эффективным образом.
- Реалистичный сценарий. Заказы принимаются в случайном порядке и планируются эффективным образом.

Принимая идеальный сценарий в качестве наилучшего примера, мы будем использовать его ключевые показатели эффективности для измерения двух других сценариев.

Рассмотрим более подробно показатели, представленные ниже в таблице. Производительность рассчитывается следующим образом:

(1) $N = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{Q_{output}}{Q_{pt}+Q_{empl}}$,

где Q_{output} - это выход единиц в евро, Q_{pt} – затраты на деталь в евро, Q_{empl} – затраты на сотрудников в евро.

Задержки рассчитываются следующим образом:

(2) $D = T_{actual} - T_{contract}$,

где T_{actual} - это фактическая дата поставки, $T_{contract}$ - дата поставки по контракту.

Коэффициент использования ресурсов вычисляется следующим образом:

(3) $U = \frac{\sum_{i,k} j_{i,k}}{N_r \cdot (t_2 - t_1)}$,

где $j_{i,k}$ - это продолжительность конкретной работы, N_r - количество ресурсов, t_1, t_2 - начало и конец рассматриваемого интервала времени.

В ходе экспериментов для каждого из трех сценариев, описанных выше, было составлено расписание на период одного года. Результаты приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментов

Сценарий	Производительность	Задержки в днях			Коэффициент использования ресурсов, %
		Мин.	Макс.	Среднее	
Фактический сценарий	2,45	0	50	22,5	95
Идеальный сценарий	2,59	0	0	0	65
Реалистичный сценарий	2,57	0	0	0	67

Как видно из таблицы, производительность меняется незначительно, в основном за счет более оптимального использования ресурсов.

Коэффициент использования ресурсов снижается в идеальном и реалистичном сценариях за счет более эффективного планирования. Это означает, что новые заказы могут быть приняты для достижения полной загрузки. Еще одна возможность для эффективного использования мощности - это выполнение внешних заказов.

Кроме того, эффективное планирование привело к сокращению задержек поставок заказов, таким образом, уменьшая штрафы, выплачиваемые заказчикам.

Заключение

Как видно из результатов проведенных экспериментов, система потенциально позволяет увеличить производительность компании, а также обеспечить наиболее оптимальное распределение ресурсов.

Кроме того, дальнейшее развитие существующего прототипа включает в себя полный учет запасов и их поставок, интеграцию с внутрицеховым оперативным планировщиком, а также информационными панелями. Таким образом, выстраивается полноценная система, покрывающая все участки производства, от закупок комплектующих до сборки готовой продукции на местах.

Список литературы

[1] http://www.profiz.ru/peo/4_2014/stroi_industriya/
[2] Фатхутдинов, И. Р. (2003). Производственный менеджмент: Учебник для вузов. 6-е изд. Издательский дом" Питер"
[3] Сайт ОАО «Кузнецов». – Режим доступа: http://www.kuznetsov-motors.ru/
[4] Скобелев П.О. Мультиагентные технологии для управления ресурсами в реальном времени // Механика, управление и информатика (Таруса, 2-4 марта 2011 г.) — Таруса, 2011; URL: http://www.iki.rssi.ru/seminar/2011030204/presentation/20110303_03.pdf (дата обращения 02.06.2013)

Aerospace Flights Control
Управление космическими полётами

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКИПАЖЕЙ ПИЛОТИРУЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В СЛУЧАЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ НА БОРТУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

П.Н.Васильева

ОАО "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королёва"

141070, Россия, Московская обл., г. Королёв, ул. Ленина, 4А

vpolinca@mail.ru

тел: 8 (916) 327-49-98

Ключевые слова: *бортовая документация, Arbortext, многофункциональная информационная система, визуальный редактор полётных процедур, XML.*

Abstract

In this article the problem of methodical providing crew of the Russian Segment of the International Space station (RS ISS) is considered. Characteristics of submission of the onboard documentation (OD) which is used by crew onboard RS ISS during flight when working different function are analysed. Need of improvement of methods of representation of a DB is revealed and proved, and also the task of expeditious providing crew of RS ISS with actual information is formulated. On the basis of the conducted research by authors use of modern instruments of information technologies, namely text editors on the basis of XML technologies is offered. Justification of their choice and application for development of the multipurpose information system (MIS) for various operational platforms is presented in article (Windows and IOS). Screen appendix forms of MIS are presented in article.

Введение

Методическое обеспечение действий экипажа – это предоставление экипажу информации, необходимой для эффективной эксплуатации комплекса РС МКС и выполнения заданной программы полета, а также для безошибочного действия по парированию нештатных ситуаций (НС). Бортовая документация является основным способом информационного обеспечения экипажей КА.

БД представляет собой комплект инструкций, регламентирующих действия экипажа по управлению служебными системами и целевыми нагрузкам, который необходимо поддерживать в соответствии с текущим состоянием РС МКС.

В данной работе представлена возможность применения одного из современных инструментов информационных технологий для совершенствования методов информационного обеспечения экипажа КА. В качестве такого инструмента при разработке многофункциональной информационной системы (МИС) предполагается использовать современные редакторы на базе XML технологий.

Бортовая документация.

Бортовая документация разрабатывается с использованием специальных приемов представления информации, основная цель и назначение которых заключаются в том, чтобы максимально сжато выразить смысл в тексте бортовых инструкций [1].

БД доставляется на МКС в двух видах: в бумажном – в виде книг, и электронном - в формате pdf. В основном, на борту Российского сегмента используется бумажная версия БД.

Большая ее часть предоставлена экипажу в одном экземпляре, в случае одновременной работы по одной книге приходится распечатывать дополнительные листы с процедурами или разделять БД на несколько частей, что может привести к потере части листов.

Бумажная версия БД обладает следующими недостатками:

- ограниченный срок службы бумаги;
- усложнен оперативный поиск необходимой информации;
- используемые ссылки замедляют ориентирование в бортовых процедурах;
- нет возможности использования современной графической информации (3d анимации, видео информации);
- нет связи с бортовым планом полета, системой инвентаризации.

Преимущества:

- удобство использования в любой точке МКС;
- не требуется никаких технических средств;
- повышенная надежность в случае парирования критических нештатных ситуаций вследствие независимости от электропитания.

Электронная бортовая документация доставляется на борт РС МКС на CD-дисках, на которых размещены файлы с бортовой документацией в формате pdf. Каждый файл представляет собой полную бортовую инструкцию, ничем не отличающуюся от бумажной версии, кроме типа носителя.

Как и бумажная версия, электронная БД в таком виде имеет ряд недостатков и преимуществ.

Недостатки:

- зависимость от электропитания;
- обновление электронной документации возможно только после доставки на транспортных средствах (ТПК, ТГК);
- отсутствие быстрого поиска информации во всем массиве файлов;
- ограничена возможность использования перекрёстных ссылок.

Преимущества

- практически не занимает места;
- при необходимости любой фрагмент документации можно распечатать на бортовом принтере;
- длительный срок службы при постоянном применении.
- оперативный поиск необходимой информации;
- использование в любой точке МКС при работе с БД, размещенной на планшетных компьютерах.

В настоящее время БД разрабатывается и хранится в разных форматах (doc и docx) и достаточно часто при разработке возникают проблемы, связанные с несовместимостью документов. Эту и ряд других проблем можно решить при помощи использования XML.

Многофункциональная информационная система.

В настоящее время разрабатывается многофункциональная информационная система (МИС). Цели данной системы: повышение уровня оперативности принимаемых решений, улучшение методического обеспечения экипажей космических станций и транспортных кораблей на основе использования современных программно–технических средств формирования электронной бортовой документации (бортовых процедур), обеспечивающих информационную поддержку работы членов экипажа на всех этапах полета.

Для унифицирования и упрощения форматирования БД в процессе её формирования и корректировки было принято решение использовать систему Arbotext.

Arbotext.

Формат документов в Arbortext представляет собой XML-файл определенной структуры, позволяющий сформировать документы в стандартах оформления бортовой документации ODF (Operations Data File Standards).

Arbortext — семейство продуктов компании PTC (Parametric Technology Corp.), предназначенное для создания технической документации. В своей основе Arbortext использует принцип единого источника, в основе которого лежит формат XML. [2]

XML (Extensible Markup Language, расширяемый язык разметки) – это язык разметки, описывающий класс объектов данных, называемых XML – документами. Языком разметки документов называется набор инструкций (их называют тегами или управляющими дескрипторами), предназначенных для формирования в документах какой либо структуры и определения отношений между различными элементами этой структуры. Теги выделяются относительно основного содержимого документа специальными синтаксическими элементами и служат в качестве инструкций для программы, производящей отображение содержимого документа или выполняющей содержащиеся в документе инструкции. Для выделения тегов используются символы « < » и « > », внутри которых помещаются имена тегов и их параметры. [4]

Данные в XML очень легко преобразовываются и легко передаются между разными приложениями. Также к преимуществу XML можно отнести:

- независимый формат данных – данные сохраненные в XML - формате можно открывать в любом совместимом XML - приложении;
- общий принцип – используется один источник данных (в формате XML), который имеет несколько представлений (данные используются несколькими приложениями);
- улучшенные возможности поиска данных - благодаря иерархической структуре XML - документов облегчается поиск необходимой информации.

В Arbortext осуществлена разработка схемы и стиля для публикации в PDF. При этом обеспечено соответствие исходного формата БД в Word и создаваемого формата в Arbortext. Пример использования тегов XML в Arbortext представлен на рисунке 1.

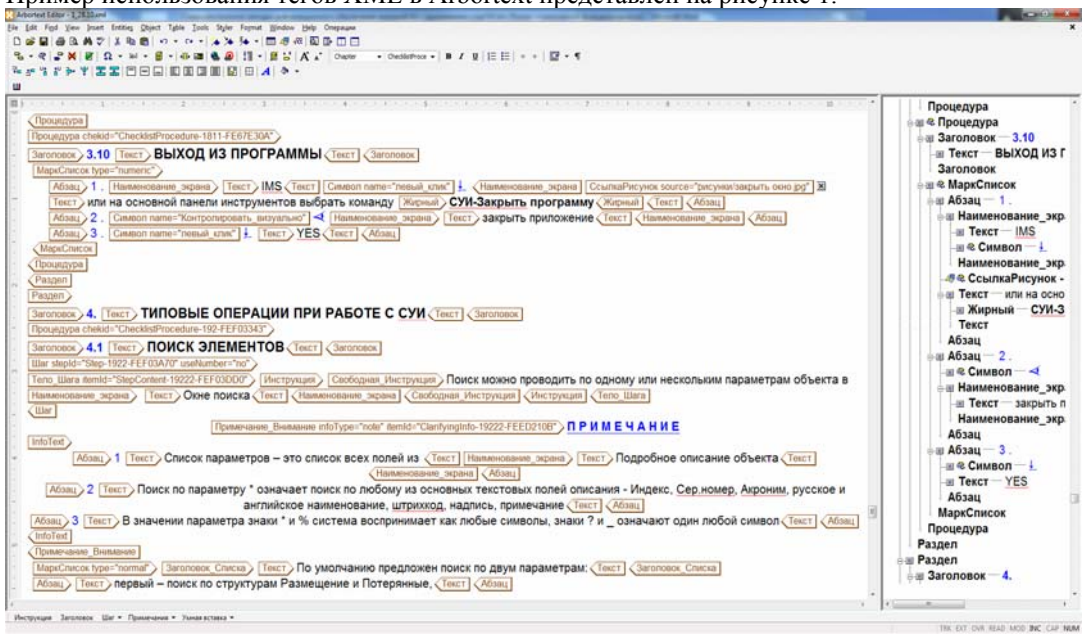


Рисунок 1 - Пример использования тегов XML в Arbortext.

В системе МИС важным вопросом является обмен информацией между различными приложениями. Благодаря XML есть возможность определять собственные команды, позволяющие наиболее эффективно определять данные, содержащиеся в документе. Создается единый стандарт на структуру документов в соответствии со стандартом оформления бортовой документации ODF, в которой строятся необходимые связи между элементами, с помощью команд, которые удовлетворяют требованиям разработки БД. Разрабатывается разметка, необходимая для выполнения операций просмотра, поиска. Arbortext производит проверку иерархических соотношений внутри документа, осуществляет контроль корректности данных, хранящихся в документах.

Несмотря на большое количество преимуществ, Arbortext обладает и рядом недостатков:

- невозможность внесения изменений в ядро редактора и отсутствие возможности изменения ядра редактора;
- невозможность реализовать в полной мере принцип полного соответствия экранного изображения с напечатанным изображением на принтере (WYSIWYG), данный факт затрудняет работу неподготовленных пользователей;
- разработка стилей для Arbortext сложна и трудоёмка, в случае развития схемы может возникнуть ситуация, когда стили необходимо будет переделывать заново.

Визуальный редактор полётных процедур.

Перечисленные недостатки, а также необходимость оперативной корректировки БД в ЦУП при сопровождении полетов, привели к необходимости создания визуального редактора полётных процедур (ВРПП), который является альтернативой Arbortext.

БД, разработанная с использованием визуального редактора полётных процедур, структурно не отличается от БД, разработанной с использованием Arbortext.

Основной задачей ВРПП является вёрстка текстового содержимого ЭБД, а также объединение его с мультимедийным содержимым: фрагментами видео, изображениями, аудиозаписями.

ВРПП предназначен для решения следующих задач:

- набор и вёрстка текстового содержимого электронной бортовой документации;
- сохранение процедур в формате XML;
- объединение процедур в книги БД;
- использование мультимедийных данных.

Рабочая область программы делится на три зоны (рис. 2): дерево документа, зона редактирования и зона визуального отображения документа. Дерево документа отображает схематично логическую структуру элементов, составляющих документ.

В рабочей области отображается графическое представление документа с возможностью редактирования по принципу WYSIWYG. Для редактирования элементов используется всплывающая панель инструментов (рис. 3).

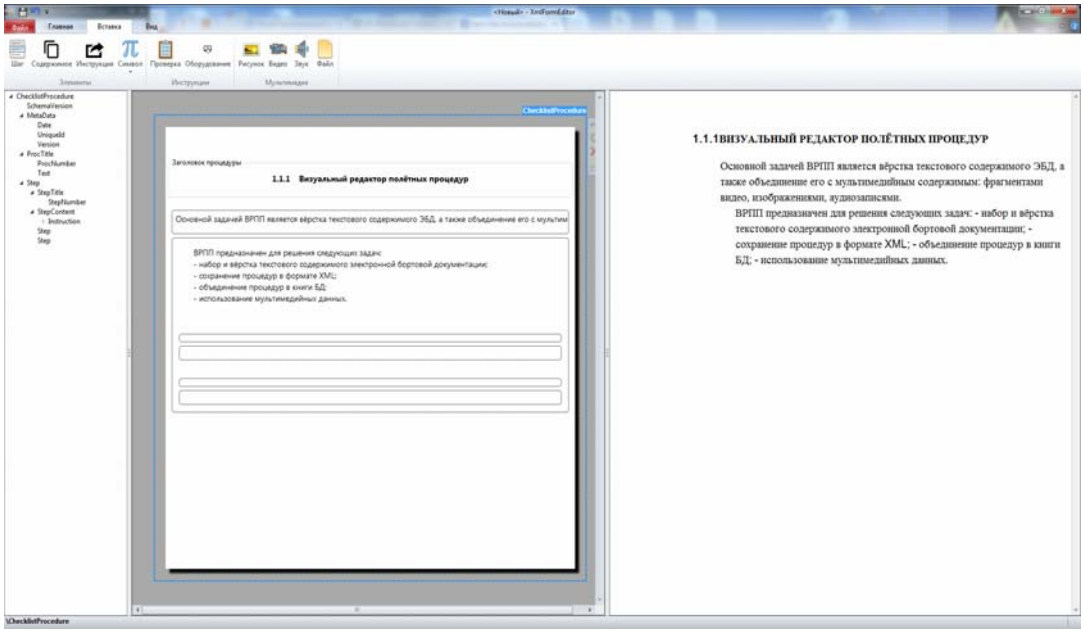


Рисунок 2 – Вид программы с открытым документом

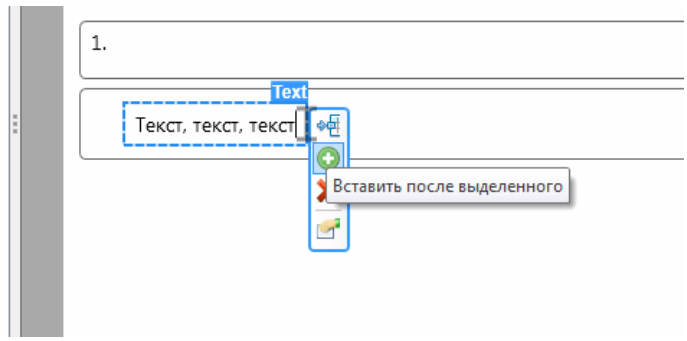


Рисунок 3 – Панель инструментов редактирования

Благодаря внедрению ВРПП и Arbortext БД может быть представлена как сборка из файловых сущностей или сборка из наборов ссылок, что дает возможность с одним документом работать нескольким космонавтам одновременно. В редакторах созданы стили публикации в формат pdf, вся БД будет публиковаться в одном стиле и с одинаковым форматированием, разработчики не смогут выйти за рамки заданного шаблона, что упростит восприятие БД.

Модуль интерфейса пользователя

Средством взаимосвязи экипажа с многофункциональной информационной системой является модуль интерфейса пользователя (МИП). Комплекс предназначен также для информационной поддержки экипажа при наземном изучении бортовых работ и порядка их выполнения в орбитальных условиях.

Наполнение информационного обеспечения МИП осуществляется с помощью дополнительного программного обеспечения СИО МИС, которое создает структурированную библиотеку данных, включающую в себя как XML-файлы бортовой документации, так и справочную и мультимедиа информацию привязанную к соответствующим бортовым процедурам.

Привязка справочной и мультимедиа информации к XML-файлам, а также обеспечение взаимосвязи между различными бортовыми процедурами, а также подготовка работы некоторых дополнительных функций МИП осуществляется изначально в редакторе путем создания необходимой XML-структуры.

В результате программными средствами МИП обеспечивается возможность быстрого доступа к содержимому хранилищ мультимедиа и файловым структурам БД, возможность заданного перехода между различными бортовыми процедурами, срабатывание заранее заданных таймеров, пользовательский ввод информацией и некоторые другие функции.

Учитывая возможность использования на борту РС МКС планшетных компьютеров на разных операционных платформах, в настоящее время проводится разработка и реализация МИП на базе разных типов планшетных компьютеров (рис. 4 и рис. 5). Разрабатываются две версии планшетной реализации терминала МИП – на платформе WINDOWS и на платформе iOS для планшета iPAD.

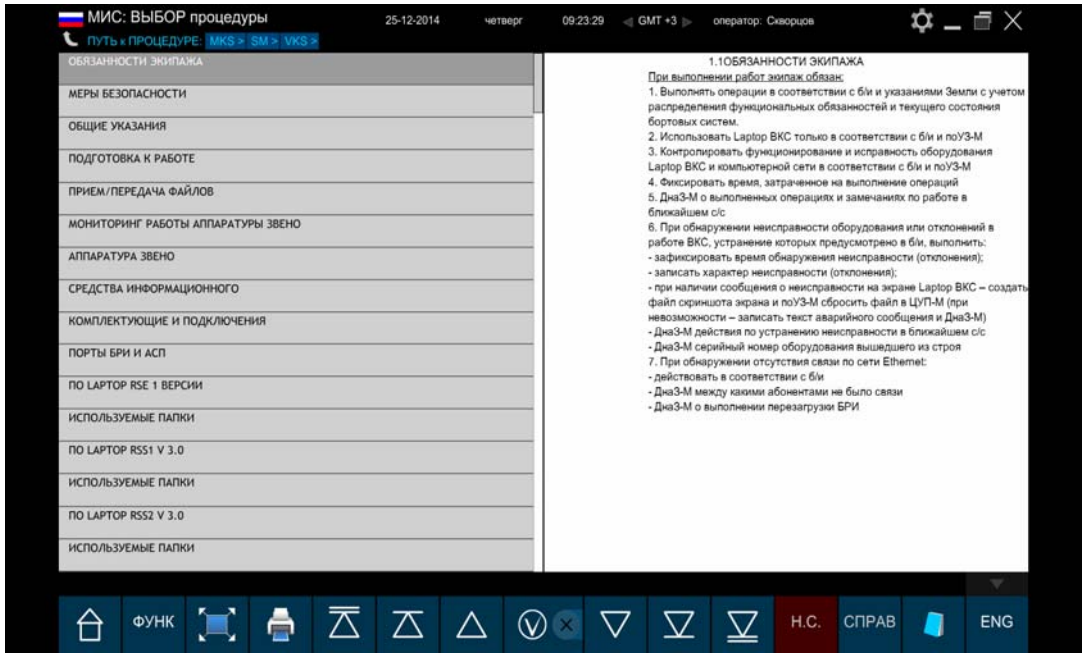


Рисунок 4 – Экранные формы приложения, разработанные под Windows

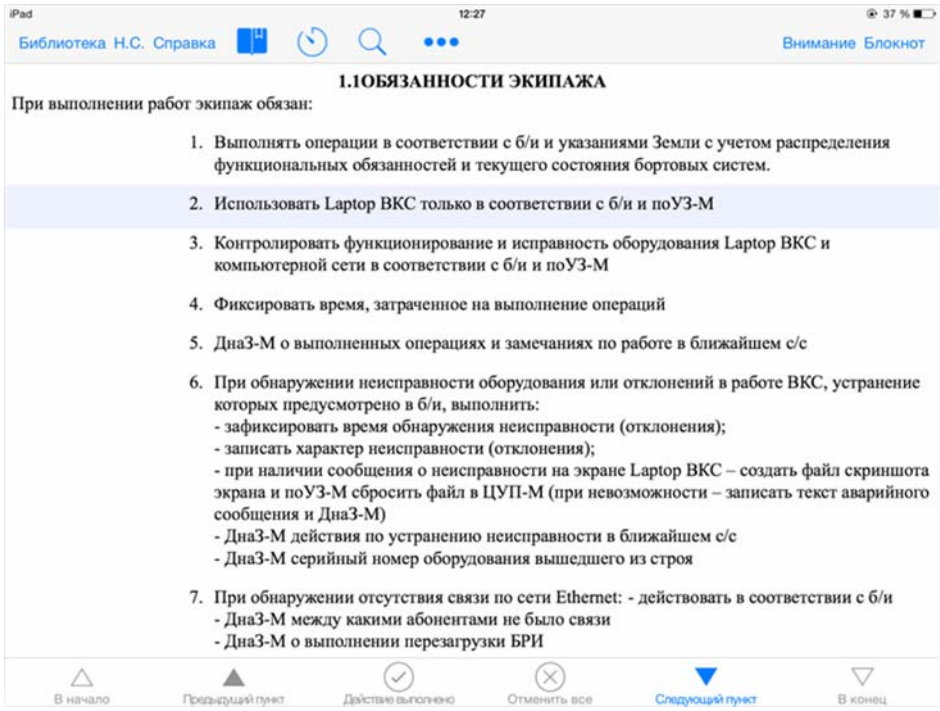


Рисунок 5 – Экранные формы приложения, разработанные под IOs

Версия под WINDOWS протестирована с сервером на базе бортового лэптопа, показала высокую производительность, высокую степень совместимости с существующей бортовой и наземной конфигурациями программного и информационного обеспечения. Единственной проблемой внедрения этого варианта остается повышенное энергопотребление планшетных компьютеров с ОС WINDOWS (в силу насыщенной функциональности процессора), однако в последнее время появились версии планшетов под WINDOWS, время работы которых от аккумулятора приближается к времени работы iPAD.

Вторым вариантом является проработка возможности создания терминальной среды на планшетах iPAD. На клиентской стороне устанавливается приложение для отображения и управления контентом.

Существующие на борту РС МКС сетевые средства пока не позволяют реализовать поставленные задачи в полной мере, поэтому при разработке МИП зарезервирован вариант автономного использования планшетных компьютеров, не связанных беспроводной сетью. В таком варианте обновления возможно выполнять только с задействованием экипажа.

Благодаря внедрению МИП экипаж РС МКС получает следующие плюсы:

- оперативное получение актуальной информации;
- мультимедийное представление информации в БД;
- возможность представления БД в виде аудифайлов;
- внедрение единого полетного сценария процедуры;
- отказ от использования гиперссылок.

Выводы

Использование современных IT - технологий в информационном обеспечении экипажей КА дает значительную экономию времени при работе с бортовой документацией, позволяет существенно повысить удобство, оперативность, надежность доступа экипажа к материалам. Существенно расширяются функциональные возможности бортовой информационной среды, связанные с мультимедийным представлением справочной информации в МИП.

Список литературы

[1] Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами: учеб. пособие: в 2 ч.; [под общ. ред. Л.Н. Лысенко]. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.

[2] Философт [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.philosoft.ru/arbor.zhtml

[3] Pro-technologies [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.pro-technologies.ru/product/Arbortext.

[4] C++ и Pascal в Kylix 3. Разработка интернет приложений и СУБД. Андрей Боровский. Санкт-Петербург 2003. "БХВ-Петербург".

[5] Душенко А.Г. Котов А.Г., Арестов Д.С., Горбачев Е.Б. Многофункциональная информационная система поддержки действий экипажа //международный журнал «Программные продукты и системы»,2013 № 3 С.54-61.

КОНТРОЛЬ РАБОТЫ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. СРЕДСТВА ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ

М.М. Ведерникова, Ю.А. Скурский, А.И. Спирин

ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П.Королёва»

141070, Московская область, г. Королев, ул. Ленина, 4а, Россия

post@rsce.ru

тел.:+7(495) 513-72-48

Ключевые слова: *международная космическая станция (МКС), оперативная оценка состояния, телеметрическая информация (ТМИ), формат отображения, мнемосхема, реальное время.*

Abstract

One of the key elements of the Mission Control of the International Space Station Russian Segment is a real-time assessment of the state of the spacecrafts and modules on board systems that are part of the ISS. Maintaining control reliability ISS at that level by increasing the volume of incoming TMI in real time can be achieved by improving the methodological solutions, software and hardware used in the Mission Control Center to assess the status of on board systems.

Введение

Среди рассматриваемых объектов управления различают инженерные и интеллектуальные объекты. К инженерным объектам относят объекты, процессам функционирования которых присущи количественные и качественные оценки, включая наблюдение, фиксацию и измерение различных физических параметров. К интеллектуальным объектам относят людей и разнообразные отношения, характерные процессу их деятельности (в том числе и реализации отношений соподчинения), в единстве с участниками этой деятельности.

В классическом понимании, сложная система – это материальное образование, в состав которого могут входить инженерные или интеллектуальные объекты, взаимодействующие со средой, и жизнедеятельность которого в этой локально организованной среде обуславливается его целесообразным поведением или процессами его приспособления (адаптации) к (в) ней. Однако, в применении к такому объекту управлению, как пилотируемый российский сегмент международной космической станции (РС МКС) необходимо уточнить, что мы имеем дело со сложным объектом управления состоящим, как из инженерного объекта управления (непосредственно сам российский сегмент, модули и бортовые системы входящие в его состав) и интеллектуальным объектом управления (экипаж) [1].

В состав РС МКС в настоящее время входят 5 модулей:

- функционально-грузовой блок «Заря» (работает на орбите с 1998 года);
- служебный модуль «Звезда» (на орбите с 2000 года);
- стыковочный отсек «Пирс» (на орбите с 2001 года),
- малый исследовательский модуль «Поиск» (на орбите с 2009 года);
- малый исследовательский модуль «Рассвет» (на орбите с 2010 года)

Также в составе РС МКС работает до 4-х периодически заменяемых транспортных кораблей – пилотируемых «Союз» и грузовых - «Прогресс». В ближайшие годы планируется увеличить число модулей в составе РС МКС, что существенным образом усложнит управление РС МКС. На борту МКС постоянно находится экипаж из 6 человек.

1 Общие сведения об организации процесса управления полётом

Опыт эксплуатации космических аппаратов свидетельствует о том, что эффективное управление их полетом наилучшим образом обеспечивается системой управления, которую образуют, взаимодействуя между собой, бортовой и наземный комплекс управления.

При этом наземный комплекс управления (НКУ), основным элементом которого является центр управления полетом, выполняет головную роль в процессе управления полётом и обеспечивает, как передачу необходимой директивной информации на объект управления, так и обработку полного объёма телеметрических данных о состоянии объекта управления.

Бортовой комплекс управления (БКУ) обеспечивает непрерывность функционирования бортовых систем модулей и включает в себя «интеллектуальную» часть в виде бортовой вычислительной системы и командно–информационную часть в виде бортового радиотехнического комплекса.

Взаимосвязи НКУ и БКУ МКС, как объекта управления, в общем виде приведены на рисунке 1.

Рисунок 1 - Общая схема взаимосвязей НКУ и БКУ МКС как объекта управления.

Основные компоненты процесса управления полетом любого космического аппарата реализуются решением ряда задач. Базовыми из них являются [2]:

1. Планирование полета с разработкой операционных планов различного уровня (номинальный план полета, общий план сопровождения, план полёта, детальный план полёта, сеансы связи).

2. Реализация планов полета передачей в бортовой контур управления управляющих воздействий. Управляющие воздействия могут быть в виде массивов цифровой информации, позволяющих использовать специальные программные инструменты (бортовой план полёта, суточный план полёта, расписание сеансов связи и др.) или в виде прямых команд директивного контура.

3. Оперативный контроль параметров и оценка состояния объекта управления с обнаружением и идентификацией нештатных ситуаций.

4. Выработка и принятие решений по изменению и дальнейшему выполнению плана полёта с учётом результатов оперативной оценки состояния объекта управления.

5. Диагностика отказов с формированием заключений о мероприятиях, которые нужно реализовать для ликвидации их последствий.

В ходе космических полетов в системе управления реализуется ряд процессов, решающих задачу формирования информации, необходимой для управления. Одним из таких процессов является оценка состояния бортовых систем (БС).

Функциональность бортовых систем космических аппаратов (КА), может быть определена в результате анализа их состояния. Анализ состояния пилотируемых орбитальных станций (ПОС) включает комплекс мероприятий, направленных на надежное и эффективное управление полетом как составных элементов, так и ПОС в целом. Основными задачами анализа состояния ПОС являются:

- оценка безопасности пребывания экипажа на борту ПОС, включая способность бортовых систем обеспечивать экипажу заданные параметры среды обитания;
- оперативная оценка соответствия совокупностей состояний контролируемых параметров бортовых систем заданным режимам работы;
- своевременное распознавание отказов в бортовых системах, нештатных ситуаций на борту ПОС с целью оказания необходимой поддержки экипажу по устранению их последствий;
- выявление причин отклонений в работе БС, отказов и нештатных ситуаций;
- выработка мероприятий по парированию отказов и нештатных ситуаций.

Основой для возможности выполнение вышеперечисленных работ являются:

- инструктивно-методическая, организационная документация по оценке состояния бортовых систем;
- исходные данные на обработку и форму представления телеметрической информации (ТМИ) персоналу главной оперативной группы управления (ГОГУ);
- применение специализированных программно-технических комплексов моделирования режимов работы бортовых систем, баз данных;
- обобщение полетных данных в виде отчетов, аналитических материалов по результатам испытаний, летной эксплуатации бортовых систем модулей ПОС и др.

В случае нерасчетных значений контролируемых параметров, для подготовки решения о дальнейших действиях проводится диагностика (выявление причин) обнаруженного отклонения. Диагностика проводится путем:

- логического анализа процесса изменения параметров состояния КА в период возникновения отклонения от нормы;
- воспроизведением поведения параметра на моделирующих средствах путем изменения внешних условий или состояния смежных параметров;
- выявления изменений в состоянии других параметров, произошедших в момент перехода исследуемого параметра в нерасчетное состояние;
- сопоставления изменения состояния смежных с исследуемым параметров КА на единой временной оси с целью выявления их корреляции.

Как правило, вышеописанная диагностика требует времени, в первую очередь на сбор и обобщение данных и реализуется в послесеансном режиме. Наиболее сложные случаи требуют проведения тестовых включений, замены составных элементов бортовых систем и повторных тестов. Такой комплекс работ выходит за рамки оперативной оценки и представляет собой полноценный анализ сложившейся ситуации, который заканчивается реализацией мероприятий по устранению отказа и восстановлению работоспособности соответствующей бортовой системы.

Для некоторых наиболее ответственных режимов (стыковка, выход в открытый космос) оперативная оценка состояния БС проводится с дополнительным (кроме телеметрии) использованием телевизионной информации. Телевизионная информация позволяет персоналу управления получить информацию для визуальной оценки взаимного перемещения КА в пространстве, текущей ориентации КА, местоположению и состоянию экипажа во время выходов в открытый космос. Зачастую в телевизионное изображение помимо визуальных объектов

включаются форматы телеметрической информации, отображающие состояние наиболее критичных контролируемых параметров, данные по которым используются для оценки состояния бортовых систем в дополнение к ТМИ (или взамен, если с КА не поступает ТМИ или он находится вне зоны приема ТМИ).

Важным дополнением к телеметрической и телевизионной информации служат сообщения экипажа, которые используются персоналом управления для оценки состояния бортовых систем в реальном времени и служат для получения информации:

- о состоянии тех или иных параметров бортовых систем путем считывания с бортовых пультов управления и дисплеев управляющих компьютеров;
- о результатах визуальных наблюдений и прямых инструментальных замеров с использованием оптических приборов;
- о выданных экипажем управляющих воздействиях и отклике на них бортовых систем;
- о состоянии жилых объемов станции и находящегося в них оборудовании;
- о выполнении монтажных, ремонтных работ внутри или на наружней поверхности ПОС, которые по очевидным причинам невозможно проконтролировать с Земли;
- о состоянии здоровья космонавтов по собственным ощущениям (субъективную) и полученную с использованием медицинской аппаратуры (объективную).

Анализ состояния ПОС начинается с оперативной оценки состояния бортовых систем модулей и кораблей входящих в состав ПОС. Ключевая отличительная особенность оперативной оценки заключается в том, что она выполняется персоналом ГОГУ в реальном времени и ее суть состоит в сравнении совокупностей фактических значений телеметрических параметров с ожидаемыми, соответствующими заданным режимам работы БС и описанными в инструктивно-методической документации. При отклонении состояния контролируемых параметров от нормы персонал ГОГУ должен идентифицировать неисправность и принять меры к ее парированию с целью восстановления работоспособности системы или, если такое невозможно, блокированию развития нештатной ситуации.

Оперативная оценка функционирования бортовых систем КА проводится в подавляющем большинстве случаев на основании данных телеметрической информации. Первый уровень контроля телеметрической информации от БС реализуется средствами бортового комплекса управления (БКУ), где с использованием программно-технических средств БКУ осуществляется автоматическая оценка состояния бортовых систем и инициируются управляющие воздействия для парирования выявленных отказов с формированием так называемых аварийных сообщений, для персонала ГОГУ в ЦУП и экипажа.

Необходимо отметить, что:

- средства ПО БКУ имеют широкие возможности, но не покрывают все потребности по оценке состояния бортовых систем и бортовой аппаратуры и оборудования;
- ПО БКУ не оценивает тенденций в изменении состояния БС относительно эталонного состояния,
- в случае необходимости внесения изменений в алгоритмы контроля и оценки состояния бортовых систем средствами ПО БКУ требуется смена бортовой версии ПО БКУ.

В связи с этим в НКУ реализуются второй и третий уровень информационной поддержки позволяющий устранить перечисленные выше недостатки. Ниже рассматривается более подробно средства информационной поддержки в составе БКУ и в составе НКУ.

2 Средства информационной поддержки оперативной оценки состояния бортовых систем в составе БКУ

ПО БКУ является составной частью систем управления комплекса НКУ-ПОС-экипаж и в этом качестве обеспечивает передачу контрольно-диагностической телеметрической инфор-

мации о поведении бортовых систем (в том числе и первичной телеметрической информации самих систем - аппаратной ТМИ) в НКУ и экипажу на всех этапах эксплуатации. [3, стр.17]

В ПО БКУ реализован основной объем задач, связанных с адаптацией к расчетным нештатным ситуациям (НШС). НКУ и экипаж в обязательном порядке должны извещаться об отказах и сбоях в оборудовании и ПО БКУ и информироваться через телеметрию о действиях БКУ по адаптации к возникшей НШС. В случае, когда ПО и автоматика систем справилась с НШС, экипаж или НКУ не должны предпринимать каких-либо действий.

В случае, когда возникла расчетная НШС, автоматическая адаптация к которой не была предусмотрена, ПО БКУ формирует сообщение аварийно-предупредительной сигнализации для экипажа, НКУ, чтобы экипаж или персонал НКУ смогли предпринять действия по адаптации к НШС в соответствии с ситуацией.

Контрольно-диагностическая телеметрическая информация условно делится на аппаратную и программную ТМИ.

БКУ получает аппаратную ТМИ БС непосредственно от телеметрических датчиков в составе бортовых систем и целевого оборудования. [3, стр.30]

По типу выходов телеметрических датчиков аппаратная ТМИ делится на аналоговую (с датчиков, имеющих аналоговые выходы вольтовой шкалы или аналоговые выходы в виде термосопротивлений) и дискретную (с датчиков, имеющих бинарные выходы в «сухого контакта» или «электронного ключа»).

Программная ТМИ формируется ПО БКУ:

- по результатам чтения из телеметрический системы аппаратной ТМИ, а также после ее первичной обработки,
- по результатам работы программных компонентов контроля и управления БС.

В силу известных ограничений по пропускной способности тракта передачи данных программная ТМИ условно делится на типы в зависимости от состава данных, этапа программы полета и передаются из БКУ в НКУ с различной периодичностью. По очередности выдачи программная ТМИ подразделяется на:

- циклические данные, передаваемые постоянно с одной и той же заданной периодичностью, включают в основном данные о текущем состоянии бортовых систем (статусные данные);
- внеочередные данные – событийная и аварийная информация, квитанции на выдачу управляющих воздействий;
- очередные данные с однократной, постоянной, редкой частотой выдачи в зависимости от заранее назначенного приоритета.

Статусная информация формируется ПО БКУ в реальном времени в результате обработки и обобщения отдельных параметров состояния бортовых систем с учетом заданных режимов функционирования и процессов управления и отражает текущее состояние бортовых систем. Периодичность обновления статусной информации зависит от степени критичности и ожидаемой динамики изменения контролируемых параметров и может составлять от 1 до 60 с.

Статусная информация подразделяется на 5 классов. Первые четыре класса составляют аварийно-предупредительные статусы, используемые для аварийного оповещения экипажа (пульт сигнализации систем, бортовой ЛАПТОР) и НКУ.

Первый класс ("Авария", EMERGENCY) - составляют статусы наивысшего приоритета, связанные с появлением на борту ситуаций угрожающих безопасности пребывания экипажа на борту ПОС (пожар. разгерметизация. состав атмосферы)

Второй класс ("Предупреждение", WARNING) - составляют статусы высокого приоритета, связанные с появлением на борту ситуаций значительно ухудшающих жизненно важные показатели (появление дыма, изменение давления, авария системы выработки кислорода)

Третий класс ("Предостережение". CAUTION) - составляют статусы, связанные с отказом бортовых систем.

Четвертый класс ("Уведомление", ADVISORY)- составляют статусы, связанные с потерей резервирования в бортовых системах.

Пятый класс составляют аналоговые и дискретные статусы, используемые для информационного обеспечения экипажа и персонала НКУ.

Статусные данные поступают в ЦУП-М практически непрерывно или через российские, или через американские средства.

Именно статусные данные являются первым уровнем информационной поддержки персонала ГОГУ, формируемой в БКУ. На этом уровне решаются следующие задачи:

- диагностика технического состояния бортовой аппаратуры при штатной эксплуатации с однозначной идентификацией исправного и неисправного состояния системы и составных частей;
- переключения на имеющий резерв по командам от БВС в результате логической обработки контролируемых параметров БС.

3 Средства информационной поддержки в составе НКУ (ЦУП-М)

Вся передающаяся на НКУ и поступающая в центр управления полётом (ЦУП) телеметрическая информация подлежит автоматизированной обработке в реальном времени. Для этих целей в ЦУП используются высокопроизводительные вычислительные комплексы. Укрупненный состав технических и программных средств, а также предоставляемые для анализа ТМИ возможности программно-технического комплекса автоматизированной обработки ТМИ ЦУП приведены на рисунке 1.

Достоверная и оперативная оценка состояния бортовых систем в реальном времени может выполняться только на основе информации, поступающей с минимальной задержкой в ЦУП с борта КА и далее, после ее автоматизированной обработки, на средства отображения ТМИ. Средства информационной поддержки ЦУП решают следующие задачи:

- дешифровка ТМИ, поступающей от модулей ПОС,
- автоматизированная обработка ТМИ;
- отображение результатов автоматизированной обработки ТМИ на дисплеях в виде, понятном и удобном для восприятия операторам ЦУП.

Информация может представляться персоналу управления в различных форматах:

- типовых алфавитно-цифровых кадрах отображения ТМИ, с набором данных по индексам ТМ–параметров, их значениях и временах формирования. При этом в составе кадров широко используются «обобщённые параметры», представляющие собой логическую «сборку» из нескольких первичных параметров, что позволяет оператору существенно сократить время контроля;
- иерархических форматах ТМИ, позволяющих в рамках одного информационного поля проводить оценку состояния бортовых систем по наиболее критичным телеметрическим параметрам. Мнемосхемы можно также использовать для контроля совокупности нескольких систем при выполнении комплексных режимов;
- мнемосхемах с отображением конфигурации работы бортовых систем и элементами автоматизированного допускового контроля;
- электронных журналах специалистов, позволяющие исключить «рутинные» процедуры по подготовке отчётов о техническом состоянии контролируемых систем.

Рисунок 1- Укрупненный состав и возможности программно-технического комплекса автоматизированной обработки ТМИ.

Перечисленные средства широко используются в настоящее время и являются средствами информационной поддержки второго уровня в составе НКУ. Ниже приводятся более подробные сведения о них.

В течении длительного времени основным способом предоставления ТМИ в ЦУП являлось алфавитно-цифровые кадры отображения ТМИ. Форматы ТМИ предназначены для контроля по иерархическому принципу бортовых систем модулей РС МКС. Преимуществами алфавитно-цифровых кадров являются:

- возможность разместить большой объём информации на одном кадре,
- цветовая окраска также помогает быстрой оперативной оценке состояния бортовых систем и появления отказов,
- большая информативность позволяет делать детальный анализ функционирования бортовых систем на специализированных кадрах .

Основные преимущества иерархической структуры кадров:

- простота навигации;
- наглядность информации по системам и модулям;
- возможность при необходимости получить полную диагностическую информацию по конкретной системе или по ее элементу.

Таким образом использование алфавитно-цифровых кадров, представленных в иерархической структуре позволяет предоставить всю информацию от ПО БКУ о состоянии ПОС в удобном для восприятия и анализа виде.

Пример одного из таких типовых форматов приведен на рисунке 2.

В то же время представление персоналу ГОГУ информации в виде алфавитно-цифровой кадр отображения имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что специалистам по оперативному контролю приходится в течение сеанса контроля приходится оценивать состояние бортовых систем по значительному (несколько десятков) количеству форматов отображения ТМИ.

Поэтому в настоящее время широко используется такой вид предоставления информации персоналу управления, когда форматы обработанной ТМИ отображаются в виде мнемосхем. Наглядно отображая структуру системы, мнемосхема облегчает оператору запоминание схем объектов, взаимосвязь между параметрами, назначение приборов и органов управления. В процессе управления мнемосхема является для оператора важнейшим источником информации о текущем состоянии системы, характере и структуре протекающих в ней процессов, в том числе связанных с нарушением технологических режимов, авариями. Это позволяет оператору комплексно отслеживать процессы, протекающие в бортовой системе и быстрее давать оценку ее состоянию, что крайне важно в условиях ограниченной продолжительности сеансов связи, особенно при возникновении нештатных ситуаций.

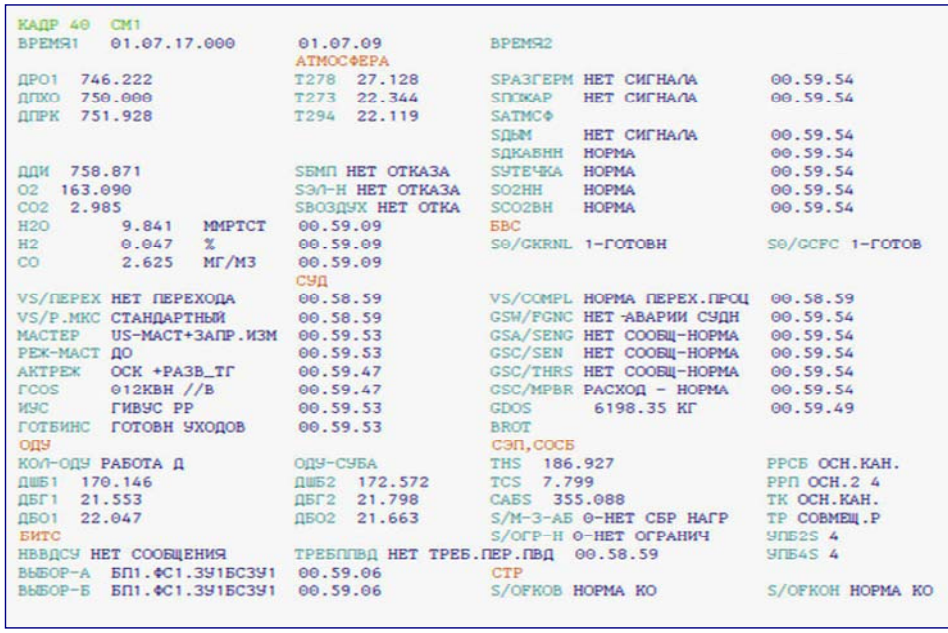


Рисунок 2 - Пример типового формата отображения ТМИ

К недостатку мнемосхем можно отнести то, что они не дают диагностической информации о причинах изменения конфигурации.

Пример одной таких мнемосхем приведен на рисунке 3.

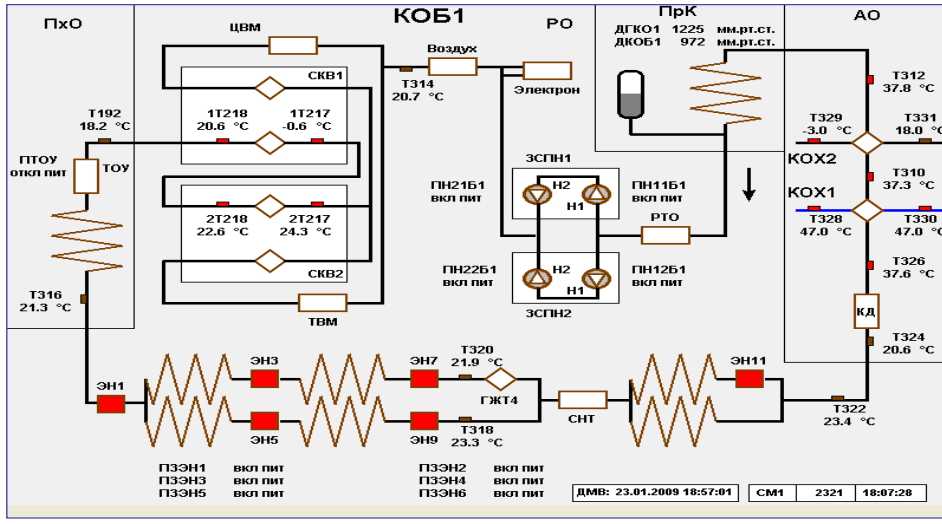


Рисунок 3 - Мнемосхема первого контура обогрева системы обеспечения теплового режима служебного модуля «Звезда»

Оценка состояния ряда бортовых систем модулей и кораблей РС МКС в ряде случаев требует составления прогноза состояния их параметров во времени. Для таких целей создаются математические модели, которые используются персоналом управления для сравнительного анализа состояния контролируемых параметров с данными моделирования. Пример реализации математической модели энергобаланса системы электропитания служебного модуля МКС приведен на рисунке 4.

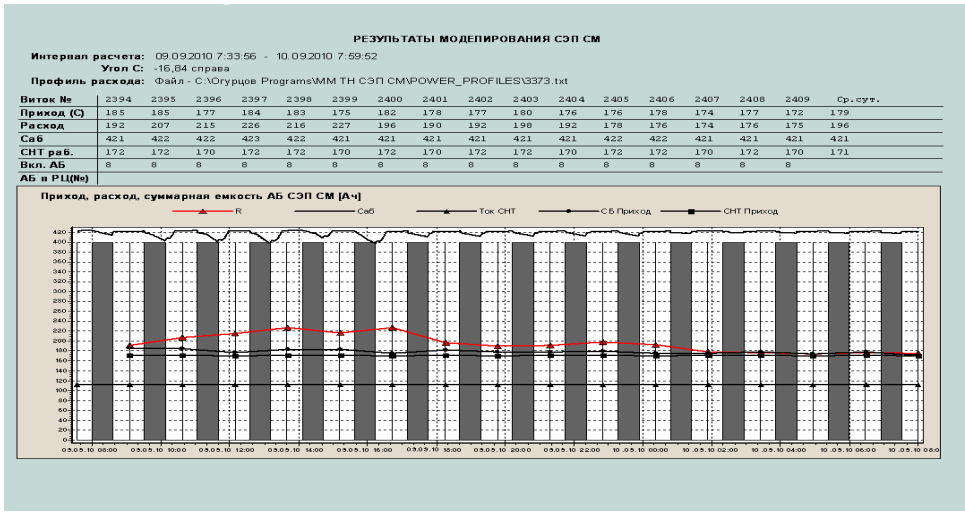


Рисунок 4 - Моделирование энергобаланса системы электропитания служебного модуля «Звезда»

Также повышает эффективность работы оператора управления в реальном времени использование электронных журналов. Они позволяют исключить «рутинные» процедуры по подготовке отчётов о техническом состоянии контролируемых систем и обеспечивают послесеансную фиксации в едином файле поступившей с борта ПОС телеметрической информации по соответствующей бортовой системе. Накопленные данные формируют, тем самым, локальную базу данных по соответствующей бортовой системе.

Однако, по мере наращивания Российского сегмента международной космической станции, планируемого в ближайшие годы, количество телеметрируемых параметров бортовых систем будет неуклонно расти. На рисунке 5 показана диаграмма нарастания передаваемых в НКУ телеметрических параметров ПОС от «Салюта-6» до РС МКС. В связи с этим используемых в настоящее время средств информационной поддержки может оказаться недостаточным.

Для решения задач анализа, не реализованных в ПО БКУ в настоящее время, создаётся специальное математическое обеспечение (СМО) информационной поддержки оператора третьего уровня, которое позволяет обеспечить интерактивный режим взаимодействия оператора с программными средствами обработки ТМИ по отдельным задачам в реальном времени. Создание такого СМО позволяет, не затрагивая сертифицированные средства обработки ЦУП, оперативно настраивать алгоритмы, контролирующие по ТМИ текущее состояние бортовых в сравнении с заранее заданным (эталонным) их состоянием.

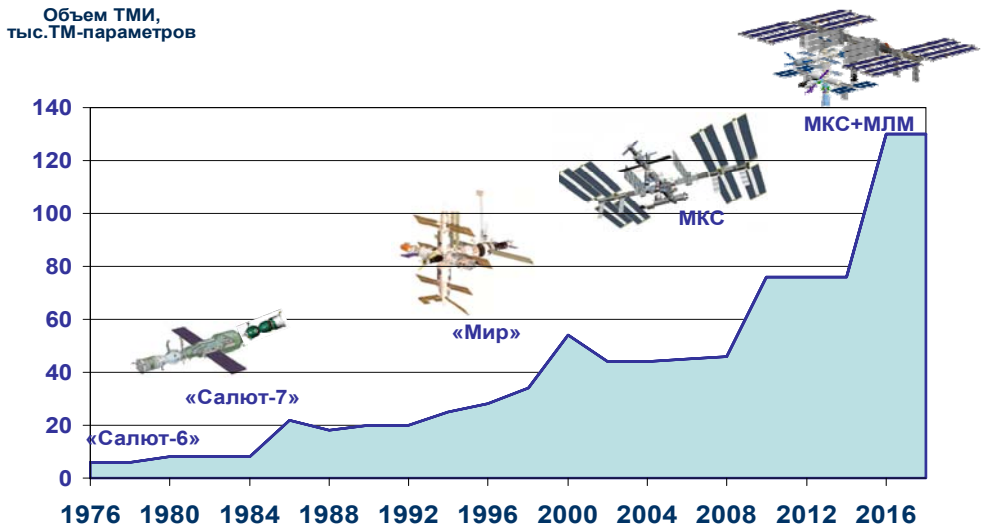


Рисунок 5 - Рост количества контролируемых телеметрических параметров по мере развития пилотируемых орбитальных станций

Взаимодействие стандартных средств обработки ТМИ и специальных средств автоматизированного анализа на рабочих местах персонала управления схематично показано на рисунке 6.

Рисунок 6 – Взаимодействие средств автоматизированной обработки и автоматизированного анализа ТМИ в контуре оперативного управления

Наличие подобных программно-технических средств автоматизированного контроля ТМИ позволит освободить оператора от выполнения операций по контролю наиболее трудоёмких «рутинных» составляющих и в конечном итоге минимизировать численный состав персонала управления, обеспечивающего оценку технического состояния бортовых систем ПОС в режиме реального времени.

Заключение

По мнению авторов, наиболее оптимальным решением задачи информационной поддержки персонала управления является разработка перечисленных средств и их разумное сочетание в зависимости от индивидуальных свойств контролируемых бортовых систем и задач, решаемых в процессе их эксплуатации.

Список литературы

[1] Раков В.И. Системный анализ (начальные понятия). Изд-во «Академия Естествознания», М., 2012.
[2] Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами. Изд-во МГТУ им Н.Э.Баумана, М., 2009.
[3] Микрин Е.А.. Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения. Изд-во МГТУ им Н.Э.Баумана М., 2003

Biography

Margarita M. Vedernikova, Deputy of department head of the S.P.Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”

Yuri A. Skursky, Deputy Head of Research and Development Center of the S.P.Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”

Aleksandr I. Spirin, department head of the S.P.Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ПРИ ПАРИРОВАНИИ АНОМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ В ХОДЕ ПОЛЕТА ПИЛОТИРУЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А.В. Донсков

ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева
141070, Московская область, Королев, ул. Ленина 4а,Россия
aleksej_ne@mail.ru
тел: 8 (499) 5160978

Ключевые слова: *аномальная ситуация, оперативное управление полетом, принятие решения, теория нечетких множеств, лингвистическая переменная, пилотируемый космический корабль*

Abstract
The primary purpose of management of flight this providing of safety of crew and implementation of the program of flight. But during flight there can be different situations conducing to the negative consequences. For their removal it is necessary to understand current status of the pilot-controlled space vehicle. In the article possibility of application of theory of fuzzy sets is described for the analysis of the changed current status of the pilot-controlled space vehicle and preparation of decision on the return of it in the normal status.

Введение

Расширение решаемых задач пилотируемой космонавтикой ведет к модернизации существующих пилотируемых космических кораблей и созданию новых. Таким образом, происходит усовершенствование бортовых систем ПКА (усложнение алгоритмов работы бортовых систем, увеличение контролируемых параметров и т.д.) и, соответственно, процесс их контроля и управления на всех этапах полета (старт, автономный полет, полет в связке, посадка) становится трудоёмким.

При этом в настоящее время информационные возможности по обработке телеметрической информации по ряду причин пока остаются такими же, какими были при контроле полета простых КА. Это не позволяет оперативно реагировать на изменение текущего состояния ПКА под действием внешних факторов (агрессивная внешняя среда, физические воздействия и т.д.), которые могут вести к негативным последствиям, как для жизни экипажа, так и самого ПКА.

В таких ситуациях лицо, принимающее решение (ЛПР), ограничено как во времени, так и в информации об изменениях, а, следовательно, неопределенность понимания текущей ситуации зачастую вызывает приближенное решение по парированию, основанное лишь на интуиции или личном опыте.

Обозначенная проблема остается актуальной на всех уровнях структуры управления: от специалиста дежурной смены до руководителя полетом. Неверные управленческие решения приводят к значительной угрозе безопасности, как экипажа, так и ПКА, делая невозможным реализацию запланированной программы полета.

В статье предлагается применение нечетких множеств для оценки последствий аномальных ситуации в условиях неполноты информации и последующего принятия решения по их парированию.

Управление полетом пилотируемого космического аппарата

Под управлением полетом ПКА понимается процесс управления параметрами текущего состояния бортовых систем ПКА (последовательное изменение одних и поддержание в определенных пределах других), направленное на достижение цели полета [1]. Основной задачей оперативного управления полетом является обеспечение безопасности экипажа и ПКА в целом.

В настоящее время процесс управления полетом можно представить в общем виде. В ходе сеанса связи борта ПКА и наземной станции группа управления полетом оценивает состояние ПКА. По результатам оценки состояния делается вывод о текущем состоянии: штатное или нештатное. Если состояние штатное, то происходит дальнейшая реализация плана полета ПКА. Если состояние нештатное – происходит формирование рекомендаций по возвращению в штатное состояние, либо перевод в такое состояние, которое отвечает требованиям безопасности управления полетом.

Причиной возникновения нештатного состояния являются аномальные ситуации (АС), которые представляют собой совокупность обстоятельств, возникших под воздействием внешних факторов и негативно влияющих на безопасность экипажа и ПКА, а также на выполнение программы полета [2].

Признаком возникновения АС является выход какого-либо параметра состояния ПКА за пределы нормы (заранее установленного значения).

В настоящее время АС классифицируются в зависимости от степени тяжести последствий (катастрофические, критические и некритические), к которым они могут привести, если не будут вовремя ликвидированы.

Для анализа аномальных ситуации и подготовки решений по их парированию используются следующие источники информации:

- телеметрическая информация (ТМИ);
- данные о расчетных аномальных ситуациях КА согласно проектной документации;
- сообщения экипажа, собранные специалистами в журналах по анализу действий экипажа;
- электронные версии эксплуатационно-технической документации: бортовая документация, процедуры, инструкции, методики и т.д.

Особое значение для описания, контроля и анализа текущего состояния ПКА имеет ТМИ. В настоящее время используется автоматизированная бортовая и наземная аппаратура с для получения, передачи и обработки измерительной информации. Устройства автоматического преобразования, кодирования и обработки ТМИ обеспечивают высокую точность и оперативность получения данных телеизмерений при числе параметров, измеряемых на одном объекте, доходящим до нескольких десятков тысяч [3,4,5].

ТМИ, поступающая с борта ПКА, может быть разделена на следующие основные группы:

1) Информация о состоянии и функционировании бортовых систем/узлов/агрегатов КА;
2) Информация о параметрах внутренней и окружающей среды КА;
3) Информация о медико-биологических параметрах человека (экипажа).

В зависимости от целей телеметрическая информация обеспечивает:

1) Получение информации о соответствии характеристик КА техническим требованиям;
2) Контроль функционирования бортовых систем и состояния экипажа КА, а также параметров среды, в которых они работают;
3) Выявление неисправностей и отклонения контролируемых параметров от нормы, а также необходимую информацию для их устранения.

Схема управления полетом ПКА представлена на рисунке 1.

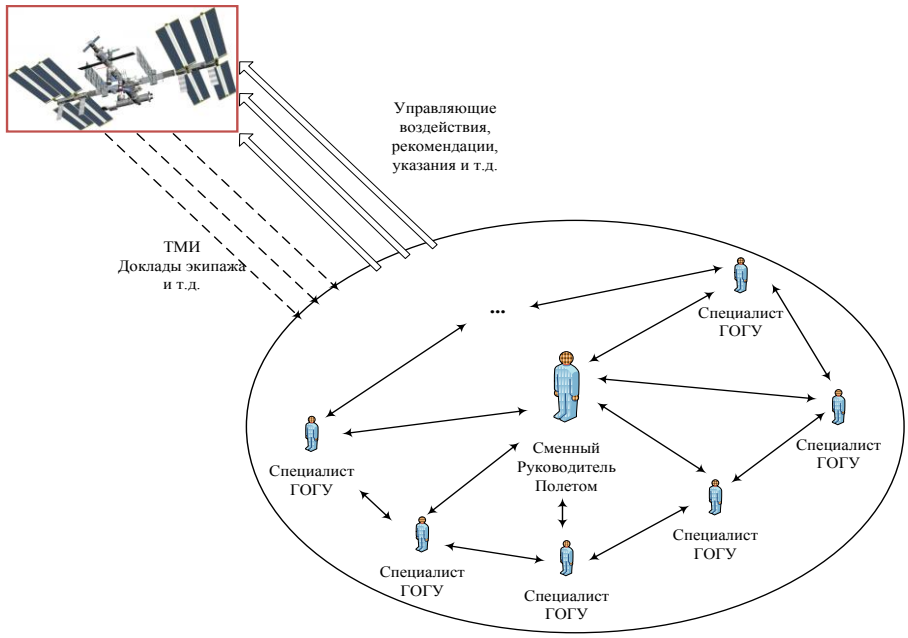


Рисунок 1. Схема управления полетом ПКА

Если зафиксировано нештатное состояние ПКА, то специалисты оперативной смены действую по алгоритму парирования аномальной ситуации в соответствии с временной циклограммой. Данный алгоритм представлен на рисунке 2.

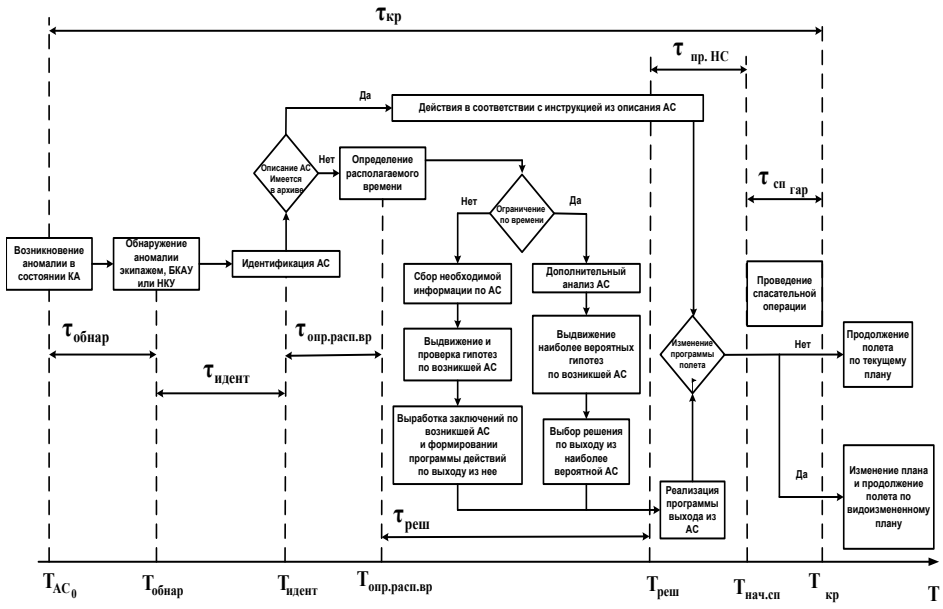


Рисунок 2 – Алгоритм функционирования системы управления при возникновении АС в соответствии с временной циклограммой

Соответственно, на рисунке 2 представлены следующие обозначения:

Тобнар – момент времени обнаружения аномалии, Тидент – момент завершения идентификации АС, Треш. – момент принятия решения и начала действий по останову развития АС, Топр.расп.вр. – момент завершения определения располагаемого времени, Тнач.сп.оп. – предельно поздний момент начала спасательной операции, Ткр – расчетный или прогнозируемый момент наступления критической фазы АС, τкр – продолжительность достижения критической фазы развития данной АС, отсчитываемая от момента её возникновения; τобнар – длительность обнаружения аномалии, от начала наблюдения соответствующего параметра до установления факта его выхода за пределы нормы, τидент – длительность процедуры идентификации данной АС, τреш – длительность подготовки и принятия решения о парировании АС (включает в себя τпод. (длительность подготовки решения) и τприн (длительность принятия подготовленного решения)), топр.расп.вр. – длительность определения располагаемого времени на остановку АС, трасп. – располагаемое время на остановку развития АС от момента завершения идентификации данной АС до момента наступления критической фазы, τост.АС – время на останов развития и нормализацию данной АС, τсп.оп.гар– гарантированная длительность операции по спасению экипажа и/или по переводу ПКА в режим выживания, если ликвидация АС не может быть осуществлена до наступления критической фазы [2].

Несмотря на отлаженность данного алгоритма (рисунок 2) за время его применения, есть ряд факторов, которые обуславливают возникновение следующих недостатков:

- сложность процесса парирования АС;
- ограниченность принятия решения во времени (скоротечность изменения текущего состояния ПКА);
- затрудненность прогноза развития текущего состояния ПКА;
- постоянное усложнение ПКА, соответственно и возникающих АС при их эксплуатации.

Выявленные недостатки влияют на эффективность и оперативность реагирования на АС в ходе полета КА. Устранение их с помощью подхода к устранению неопределенности в описании текущего состояния КА, которое возникает из-за недостатка поступающей информации, в частности ТМИ. Поэтому для строгого применения вероятностных моделей и трудностей оперирования случайными величинами, а также в связи с тем, что с интервальными величинами можно работать в рамках теории нечетких множеств (ТНМ), последняя приобретает здесь важное значение. На практике всегда имеется возможность наряду с точечной оценкой параметра (наиболее допустимым его значением) указать минимальное и максимальное значение (интервал), которое может принимать нечеткая величина. Кроме того, можно построить функцию, характеризующую допустимость каждого значения внутри заданного интервала на основе статистического материала, который содержится в базах знаний. ТНМ дает возможность проводить вычисления не с одним точечным значением, а с характеристической функцией и получать в результате вычислений нечеткую величину, для которой по максимуму значения функции может быть получена точечная (четкая) оценка.

Теория нечетких множеств

Теория нечетких (размытых) множеств предназначена для устранений сложности представления неточных понятия, анализа и моделирования систем, в которых главным участником является человек.

В основном при работе с неточно известными величинами используют теорию вероятности. Но случайность той или иной величины параметра связана с неопределенностью, касающейся принадлежности к обычному множеству его значений. Это различие между нечеткостью и случайностью показывает различие между методами теории нечетких

множеств и теории вероятности. Теория нечеткие множеств во многих отношениях проще вследствие того, что понятию вероятностной меры в теории вероятностей соответствует более простое понятие функции принадлежности. Таким образом, с неопределенностью в процессе принятия решения удобней оперировать с помощью методов теории нечетких множеств без привлечения к этому методов теории вероятностей [6].

Подход к анализу сложных системы, которыми являются системы ПКА и не поддаются точному математическому анализу, на основе теории нечетких множеств является альтернативой общепринятым количественным методами и дает приближенный, но в то же время эффективный способ описания их поведения.

Теоретические же основания данного подхода вполне точны и строги в математическом смысле и не являются сами по себе источником неопределенности. В каждом конкретном случае степень точности решения может быть согласована с требованиями задачи и точностью имеющихся данных. Подобная гибкость составляет одну из важных черт рассматриваемого метода.

Во время управления полетом ПКА специалисты чаще оперируют с терминами и описывают состояние систем ПКА переменными, значениями которых могут быть слова или предложения естественного или формального языка. Использование словесных описаний типа тех, которыми оперирует человек во время управления полетом ПКА, делает возможным анализ систем настолько сложных, что они недоступны обычному математическому анализу. Такие переменные называются лингвистическими.

Значениями лингвистической переменной являются нечеткие множества, символами которых являются слова и предложения в естественном или формальном языке, служащие, как правило, некоторой элементарной характеристикой явления [7].

Лингвистическая переменная является переменной высокого порядка и её значениями являются нечеткие переменные. Лингвистические переменные предназначены в основном для анализа сложных или плохо определенных явлений. Использование словесных описаний типа тех, которыми оперирует человек, делает возможным анализ систем настолько сложных, что они недоступны обычному математическому анализу.

Например, нечеткая переменная «давление» может принимать следующие значения: высокое, невысокое, довольно высокое, очень высокое, высокое, но не очень, вполне высокое, более или менее высокое. Эти значения представляют собой предложения, образованные понятием «высокое», отрицанием не, союзами и, но, а также словами типа очень, довольно, вполне, более или менее.

Таким образом, можно выделить три основные отличительные черты:

- использование "лингвистических" переменных вместо числовых переменных;
- простые отношения между переменными описываются с помощью нечетких высказываний;
- нечеткие алгоритмы описывают сложные отношения между переменными.

Более точно структура лингвистической переменной описывается набором (N, T,X,G,M), в котором N - название этой переменной; T - терм- множество N, т.е. совокупность ее лингвистических значений; X - универсальное множество с базовой переменной x; G-- синтаксическое правило, которое может быть задано в форме бесконтекстной грамматики, порождающей термы множества T; M - семантическое правило, которое каждому лингвистическому значению t ставит в соответствие его смысл, причем M(t) обозначает нечеткое подмножество множества X [8].

Язык можно рассматривать как соответствие между множеством терминов T и областью рассуждения X. Это соответствие характеризуется нечетким называющим отношением N из T в X, которое связывает с каждым термином t в T и каждым элементом x в X степень $\mu(t,x)$ применимости t к x.

Для фиксированного t функция принадлежности μ(t,x) определяет нечеткое подмножество M(t) из X, которое является смыслом или значением Таким образом, значение термина t есть нечеткое подмножество M(t) из X, для которого t служит символом.

Термин может быть элементарным, например t = высокое, или составным, когда он является сочетанием элементарных терминов, например, t = очень высокое.

Более сложные понятия могут характеризоваться составной лингвистической переменной. Например, понятие «система» может рассматриваться как название составной лингвистической переменной, компонентами которой являются лингвистические переменные «ресурс», « узел», «рабочее тело» и т.п., что является основными характеристиками состояния ПКА.

Для лингвистической переменной «ресурс» соответствующая базовая переменная является по своей природе числовой переменной. С другой стороны, для лингвистической переменной «узел» мы не имеем четко определенной базовой переменной. В этом случае функцию принадлежности определяют не на множестве математически точно определенных объектов, а на множестве обозначенных некими символами впечатлений. Следует отметить, что благодаря использованию принципа обобщения большая часть существующего математического аппарата, применяющегося для анализа систем, может быть адаптирована к нечетким и лингвистическим переменным с числовой базовой переменной.

Таким образом, для принятия решения на основании нечетких множеств можно предложить следующую математическую модель:

$$<D, S, K, \alpha>,$$

где D = {d1, d2, …, dn} – множество взаимоисключающих решений,

S = {s1, s2, …, sm} – множество состояний объекта управления,

K = {kij} – оценочный функционал, позволяющий качественно оценить эффективность процесса управления для каждой пары K<di ,sj> ϵ DxS и описывается лингвистической переменной α , которая представлена следующем виде:

$$\alpha = <N, X, T>,$$

где N – наименование лингвистической переменной,

X = {x1, x2, …, xk} – универсальное множество, на котором определены термы лингвистической переменной,

T = {t1, t2, …, ts} – терм-множество, элементами которого являются нечеткие переменные с функцией принадлежности μ ti(x) , где i= 1..s, x ϵ X.

Примеры применения предложенного подхода

Выброс токсичного вещества во внутренний объем ПКА

Рассмотрим пример применения предложенной математической модели на основании теории нечетких множеств для анализа оценки текущей ситуации на борту МКС, которая возникает во время утечки теплоносителя из системы обеспечения терморегулирования (СОТР).

Одними из главных функций СОТР являются:

- обеспечения комфортных параметров атмосферы обитаемых отсеков МКС;
- обеспечения температурных условий, необходимых для функционирования элементов конструкции, бортовых систем и оборудования, расположенных как вне, так и внутри герметичных отсеков.

На борту МКС находится две системы СОТР – на российском сегменте (РС) и американском сегменте (АС). На рисунках 3 и 4 представлены схемы СОТР РС и АС.

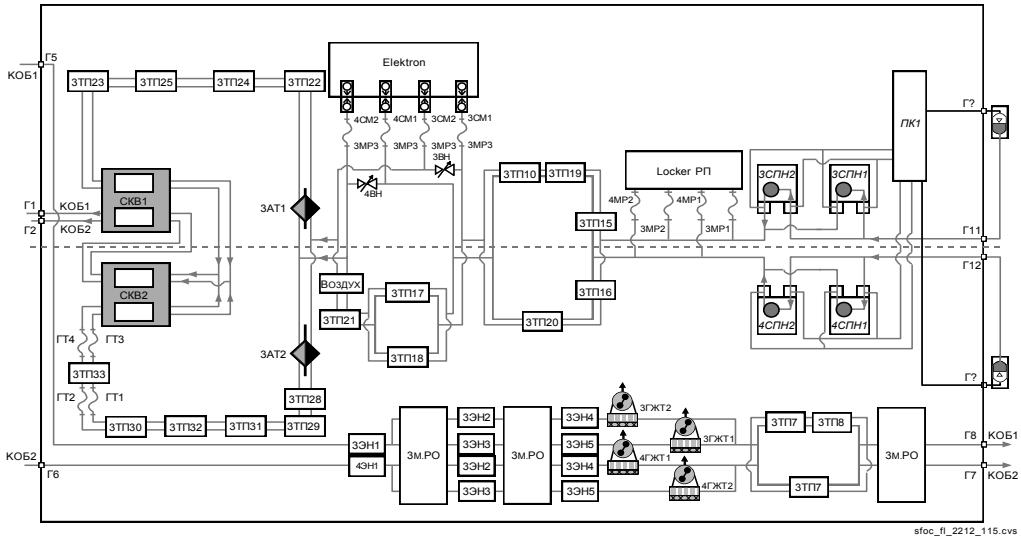


Рисунок 3. СОТР РС МКС

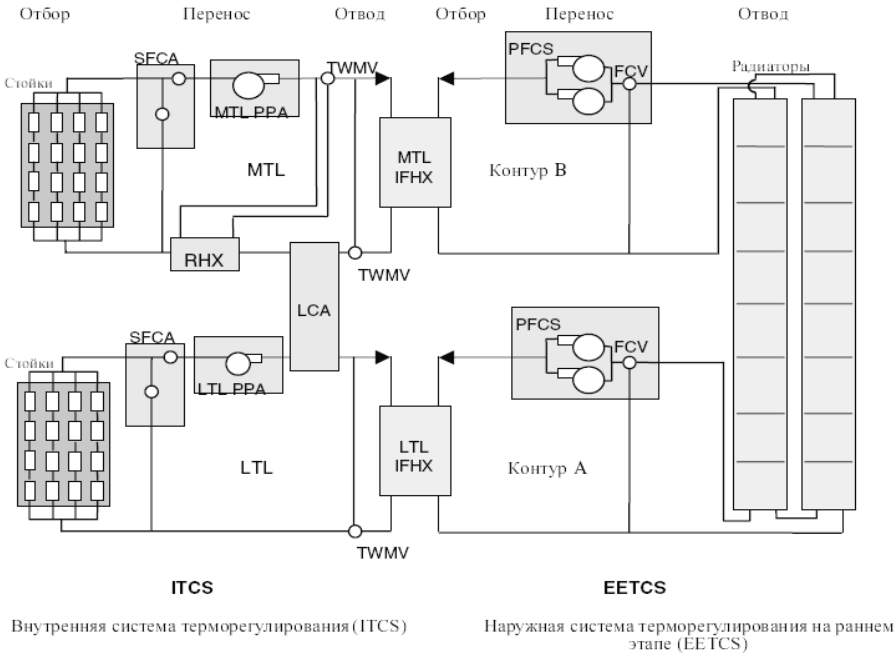


Рисунок 4. СОТР АС МКС

Каждая из систем имеют внутренний и внешний контур. Во внутреннем контуре применяются нетоксичные и безопасные вещества (триол и вода) для экипажа, в отличие от внешнего, где применяются ПМС-1,5р и аммиак. Основное отличие СОТР на РС и АС заключается в том, что на РС внешние контура СОТРа не заходят во внутренний объем

станции, а на АС – заходят. Таким образом, существует вероятность попадания аммиака из внешнего контура во внутренний объем станции на стыке контуров из клапанов. При возникновении утечки сложно сразу оценить объем вытекшего вещества и оценить его распространение по внутреннему объему станции. Поэтому рассмотрим данный пример, кроме такого, такие ситуации уже возникали на борту МКС, только были ложными, так как были вызваны некорректной работой датчиков и программного обеспечения.

Размер масштабов зоны загрязнения состоит из двух частей:

1. Определяются эквивалентные количества токсичных веществ.

2. Определяются радиусы зон загрязнения утекшим аммиаком. Полная зона загрязнения, обусловленная влиянием отравляющих токсичных веществ, определяется стандартной формулой:

$$R = R'+0,5R'' ,$$

где R - полная зона загрязнения, R' - наибольший радиус загрязнения, R'' - наименьший радиус загрязнения.

В процессе описания влияющих факторов в качестве лингвистических переменных предлагается общепринятая пятибалльная шкала, которая используется для оценки последствий (потерь) при возникновении аварии на опасном объекте. Взаимосвязь между предложенной шкалой и определением влияющих факторов, в качестве лингвистических переменных предложено оценить, как функциональную зависимость: $Y_i = f(x_1, x_2, ..., x_j)$, где Y_i - возможные последствия аварий; $X_1 - X_j$ соответствующий набор факторов, влияющих на возникновение аварии.

Основным показателем, который характеризует последствие аварийной ситуации, является радиус зоны загрязнения. Это расстояние, на которое распространяется опасная для жизни концентрация токсичного вещества на протяжении какого-либо промежутка времени.

Введем следующие обозначения: X_1 - скорость перемещения воздушных масс, X_2 - объем отравляющих токсичных веществ, выброшенных в атмосферу, X_3 - температура окружающей среды, Y - радиус зоны загрязнения. Таким образом, решение задачи прогнозирования последствий аварии внутри КА состоит в том, чтобы возможному соединению факторов $X_1 - X_3$ поставить в соответствие определенное значение Y: $\widetilde{Y}_i = f(\widetilde{X}_i)$, где $\widetilde{Y}_i$ - радиус зоны загрязнения, которое выражено в виде лингвистической переменной; $\widetilde{X}_i$, - влияющие факторы, выраженные в виде лингвистических переменных.

Базовые события, которые отвечают лингвистическим переменным, описывающим влияющие факторы $\widetilde{X}_1 - \widetilde{X}_3$, были определены квалифицированными экспертами (согласно технической документации). Нижние и верхние значения базовых событий, соответствующие значениям лингвистических переменных $\widetilde{X}_1 - \widetilde{X}_3$ и $\widetilde{Y}$, оцениваются по пятибалльной шкале: низкий (маленький), ниже среднего, средний, выше среднего, высокий (большой). Каждое значение лингвистической переменной представляет собой нечеткое множество, заданное с помощью соответствующей функции принадлежности. Для введенных лингвистических переменных $\widetilde{X}_1 - \widetilde{X}_3$ и $\widetilde{Y}$ определены следующие числовые диапазоны значений, с соответствующими лингвистическими оценками, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Определение влияющих факторов в виде лингвистических переменных.

Лингвистическая переменная	Лингвистическая шкала	Числовой диапазон
X_1 - скорость перемещения воздушных масс	Низкая	0÷0.05м
	Ниже средней	0.05÷0.1м
	Средняя	0.15÷3м
	Выше средней	0,3÷0,5м
	Высокая	> 0,5м
X_2 - объем выброса	Малый	0÷5 мм
	Ниже среднего	5÷10 мм
	Средний	10÷30 мм
	Выше среднего	30÷50 мм
	Большой	> 50 мм
X_3 - температура окружающей среды	Низкая	<18 гр
	Ниже средней	18÷21 гр
	Средняя	21÷23 гр
	Выше средней	23÷25 гр
	Высокая	> 25 гр
Y - радиус зоны загрязнения	Малый	0÷0.6м
	Ниже среднего	0.6÷1.5м
	Средний	1.5÷3м
	Выше среднего	3÷5м
	Большой	> 5м

Во избежание сложностей при вычислении радиуса зон загрязнения предлагается все возможные ситуации, которые могут состояться при прогнозе, сводить к типичной ситуации. Под типичной ситуацией в данном случае понимается значение радиуса зоны загрязнения. Эта зона попадает в тот или иной диапазон при разных значениях факторов, которые влияют на возникновение опасного для жизни экипажа события.

Функциональная зависимость между нечетким значением радиуса зоны загрязнения и влияющими факторами, определяется следующим уравнением: $\widetilde{Y}_i = f(\widetilde{Q}_{E1}, \widetilde{Q}_{E2}, \widetilde{X}_1, \widetilde{X}_2, \widetilde{X}_3)$, где $\widetilde{Q}_{E1}, \widetilde{Q}_{E2}$ - количества отравляющих токсичных веществ, выраженные в виде лингвистических переменных, $\widetilde{X}_1 - \widetilde{X}_3$ - влияющие факторы.

Прогнозирование осуществляется при помощи разработанных правил нечеткого логического вывода вида IF X=A THEN Y=B [10]. Непосредственно, разработка правил условного логического вывода охватила известный тип следующего логического предложения: P3= IF X, is Ai and X2 is A2 and.... X,, is An THEN Y is B.

При анализе возможных радиусов зон загрязнения необходимо учитывать нечеткие исходные данные и поэтому рассматривает состояние, которое возникает в случае максимального радиуса зоны загрязнения.

Следующим шагом является разработка нечетких логических правил для проведения прогноза последствий аварийной ситуации при нечетких исходных данных.

Получено пять групп правил, любая из которых отвечает какому-либо значению параметра. Например, первая группа правил описывает возможное логико-лингвистическое соединение влияющих факторов $\widetilde{Y}$, которые приводят к значению - «низкое» («маленькое»), $\widetilde{Y}$ соответственно вторая группа - «ниже среднего», третья группа - «среднее $\widetilde{Y}$ », четвертая группа - «выше среднего $\widetilde{Y}$ », пятая группа — «высокое » («большое»):

I. ЕСЛИ X1=Н И X2=В И X3=* ИЛИ X^В И X2=В И X3=* ТО У=Н

II. ЕСЛИ X1=(Н ИЛИ НС) И X2=(ВС ИЛИ В) И (X3=*) ТО У=НС

III . ЕСЛИ X, -(НС ИЛИ С ИЛИ Н ИЛИ НС ИЛИ С) И X2=(Н ИЛИ ВС ИЛИ ВС ИЛИ ВС ИЛИ В) И X3=(ВС ИЛИ С ИЛИ ВС ИЛИ * ИЛИ *)

ТО У=С

IV. ЕСЛИ X1=(С ИЛИ ВС ИЛИ Н ИЛИ НС ИЛИ НС ИЛИ С ИЛИ ВС) И X2=(НС ИЛИ ВС ИЛИ НС ИЛИ ВС ИЛИ НС ИЛИ ВС ИЛИ В) И X3=(* ИЛИ НС ИЛИ * ИЛИ * ИЛИ Н ИЛИ * ИЛИ ВС)

ТО У=ВС

V. ЕСЛИ X1=(С ИЛИ С ИЛИ ВС ИЛИ В ИЛИ НС ИЛИ С ИЛИ В ИЛИ НС ИЛИ С) И X2=(Н ИЛИ С ИЛИ ВС ИЛИ НС ИЛИ С ИЛИ * ИЛИ * ИЛИ Н ИЛИ ВР) И X3=(* ИЛИ * ИЛИ НС ИЛИ * ИЛИ * ИЛИ * ИЛИ * ИЛИ С ИЛИ*)

ТО У=В

Символ «*» означает, что определенная переменная может принимать любое значение. В таблице 2 приведены значения радиусов зон загрязнения согласно логическим выводам.

Таблица 2 – Значение радиуса зоны загрязнения при токсичности.

Объем выброса	Скорость перемещения воздушных масс	Температура	Радиус зоны загрязнения	
			Лингвистическая оценка	Числовой диапазон
Н	В	*	Н	0÷0.6м
Н	ВС	*	НС	0.6÷1.5м
Н	В	*	НС	
НС	ВС	*	НС	
НС	ВС	*	С	1.5÷3м
НС	НС	Н	ВС	3÷5м
С	ВС	*	ВС	
ВС	В	ВС	ВС	
НС	Н	С	В	> 5м
С	ВС	*	В	

Согласно документации по действиям в аварийных ситуациях (аварийная книга Emergency) выделяется 5 уровней загрязнения:

Уровень 4 (Красный) – наиболее опасный выброс (не поддается очистке);

Уровень 3 (Оранжевый) – опасный выброс (поддается очистке);

Уровень 2 (Желтый) – опасный выброс;

Уровень 1 (Синий) – наименее опасный выброс.

Таким образом, не имея четких значений параметров описывающих текущее состояние ПКА, получена приблизительная картина происходящего. Исходя из нее, у лица, принимающего решение, есть понимание того, какие предпринимать дальнейшие действия по парированию текущей аномальной ситуации согласно технической документации.

Возникновение пожара во внутреннем объеме ПКА

При возникновении пожара во внутреннем объеме ПКА появляется задымленность, происходит образование различных продуктов горения, повышение уровня CO, а так же уменьшение общего давления воздуха.

Применяя модель, которая была рассмотрена ранее и по аналогии рассматривая функцию принадлежности, составим таблицу влияющих факторов в виде лингвистических переменных с соответствующими лингвистическими оценками (таблица 3).

Таблица 3 – Определение влияющих факторов в виде лингвистических переменных.

Лингвистическая переменная	Лингвистическая шкала	Числовой диапазон
X_1 - скорость перемещения воздушных масс	Низкая Ниже средней Средняя Выше средней Высокая	0÷0.05м 0.05÷0.1м 0.15÷3м 0,3÷0,5м > 0,5м
X_2 - объем выброса продуктов горения (ΣCO, HCI, HCN)	Малый Ниже среднего Средний Выше среднего Большой	0÷50 pmm 50÷100 pmm 100÷150 pmm 150÷200 pmm > 200 pmm
X_3 - полное давление ПКА	Низкое Ниже среднего Среднее Выше среднего Высокое	< 724 мм рт ст 724÷740 мм рт ст 740÷750 мм рт ст 750÷770 мм рт ст > 770 мм рт ст
Y - радиус зоны задымления	Малый Ниже среднего Средний Выше среднего Большой	0÷0.6м 0.6÷1.0м 1.0÷1.5м 1.5÷2м > 2м

В соответствии с нечеткими логическими правилами для проведения прогноза последствий аварийной ситуации при нечетких исходных данных получаем следующие результаты, которые представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Значение радиуса зоны задымления при пожаре.

Объем выброса	Скорость перемещения воздушных масс	Полное давление	Радиус зоны задымления	
			Лингвистическая оценка	Числовой диапазон
Н	Н	В	Н	0÷0.6м
Н	С	В	НС	0.6÷1.6м
Н	В	С	НС	
НС	ВС	С	НС	
НС	ВС	С	С	1.5÷3м
С	НС	С	ВС	3÷5м
С	ВС	НС	ВС	
ВС	В	НС	ВС	
В	Н	Н	В	> 5м
В	ВС	Н	В	

Полученные результат приблизительно соответствует документации по действиям в аварийных ситуациях.

Выводы

В работе представлен один из новых подходов к анализу возникших аномальных ситуаций на борту ПКА, на примере МКС, в ходе его полета с помощью теории нечетких множеств. Их применение позволяет оперативно выполнить оценку текущей ситуации и оценить возможные риски. Оперирование не с одним точечным значением, а с характеристической функцией, по значению максимума которой может быть получена точечная (четкая) оценка, тем самым устраняются неопределенности в понимании происходящего. Таким образом, ускоряется подготовка исходных данных для принятия решений за счет уменьшения количества возможных значений вероятностных состояний ПКА. Оперирование лингвистическими понятиями, свойственными мышлению человека, ведет упрощению процедуры принятия решения ЛПР, а также пониманием текущей ситуации на всех уровнях структуры управления полета. В результате повышается эффективность действия группы управления полетом по парированию аварийных ситуаций на борту ПКА.

В статье приведены примеры применения теории нечетких множеств для анализа аномальной ситуации (токсичность и пожар) на борту МКС для выбора рационального решения по её парированию.

Список литературы

[1] Кравец В.Г., Любинский В.Е. Основы управления космическими полётами, М.: Машиностроение, 1983. 256с.

[2] Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полётами, Т.1,2, М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009. 426с.

[3] Современная телеметрия в теории и на практике /А.В.Назаров, Г.И.Козырев, И.В.Шитов и др:– СПб.; Наука и техника, 2007.- 672с.

[4] Милицин А.В., Самсонов В.К., Ходак В.А. Отображение информации в центре управления космическими полетами - М.: Радио и связь, 1982.-190с.

[5] Гасов В.М., Коротаев А.И., Сенькин С.И. Отображение информации. – М.: Высшая школа, 1990.- 111с.

[6] Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств: Пер. с франц. — М.: Радио и связь, 1982. — 432 с.

[7] Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений М.: Мир. - 1976.- 167 с.

[8] Борисов А.Н., Крумбер, Алексеев А.В. Модели принятия решений на основе лингвистической переменной - Рига: Зинатие,-1982.

[9] Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука, 1981. 208 с.

[10] Теория выбора и принятия решений: Учеб. пособие. М.: Наука, 1982. 328 с.

БАЗОВЫЙ ЦУП РОСКОСМОСА КАК ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЙ ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

М.М. Матюшин[1], Д.А. Зеленов[1], Н.Л. Соколов[1], Е.В. Бакланов[1]
[1] ФГУП ЦНИИмаш
141071, Московская обл., Королев, ул. Пионерская, 4, Россия
zelenov@mcc.rsa.ru
тел: +7 (495) 513-51-98
факс: +7 (495) 513-58-04

Ключевые слова: *Базовый ЦУП, Роскосмос, облачные вычисления, управление полетом, космический аппарат, информационно-вычислительный комплекс.*

Abstract
The article describes development trends of technology and implementation means for control processes of complex space systems characterized by gradual complication both of objects under control and information flows in the control loop. The urgent problems which can limit the further possibility of control efficiency increase are analyzed.

Введение

Главной целью развития Базового Центра управления полетами является обеспечение выполнения целевых задач Федеральной космической программы 2025 года (ФКП 2025) в части управления модернизированными пилотируемыми комплексами и космическими аппаратами народного и социально-экономического назначения (КА НСЭН) (до 55 КА одновременно), в том числе КА дальнего космоса и КА, запускаемых с космодрома «Восточный», для чего необходимо усовершенствовать подходы к организации процессов управления, увеличить вычислительные мощности и модернизировать инженерную инфраструктуру.

Согласно проекту ФКП на период 2016 – 2025 годы запланировано до 200 запусков космических объектов, требующих непосредственного круглосуточного управления и контроля.

Учитывая продление срока эксплуатации Международной космической станции (МКС) до 2024 года, предполагается осуществить в рамках пилотируемой программы более 60 пусков. Среди объектов управления будут модернизированные изделия: научно-энергетическая платформа, узловой модуль «Причал», многофункциональный лабораторный модуль «Наука» и др.). Кроме того, с 2021 года планируются регулярные запуски пилотируемого корабля нового поколения сначала в автоматическом режиме, а затем в пилотируемом. В 2025 году планируется облет Луны в пилотируемом варианте.

Ставятся задачи обеспечения парных запусков ракеты космического назначения «Ангара-А5В», начиная с 2015 года с интервалом не более 1 суток, стыковки пилотируемого корабля нового поколения с межорбитальным буксиром МОБ-КВТК и осуществление (после пилотируемого облета Луны) пилотируемого полета на Луну [1].

Вместе с этим, более 130 объектов управления планируются по программам дистанционного зондирования Земли, фундаментальных космических исследований, гидрометеорологическому обеспечению, ретрансляции и связи, системам спасания и др. Активно происходит импортозамещение и внедрение новых подходов при обеспечении контроля, управления и целевого применения КА. Развивается наземный автоматизированный комплекс управления КА НСЭН и измерений путем сегментирования по целевому назначению и территориального распределения наземных средств управления. Вместе с этим активно развиваются и внедряются в практику зарубежными партнерами (NASA, ESA, JAXA и др.) современные IT-решения,

трансформирующие структуру и организацию процессов контроля и управления КА, направленные на минимизацию расходов и сокращение сроков подготовки к управлению конкретным КА.

Учитывая планы по значительному расширению орбитальной группировки Роскосмоса, целесообразно продолжать движение к смене существующей парадигмы (от создания средств управления для каждого КА к созданию базовых инфраструктурных элементов управления). В настоящее время в процессе управления КА существует ряд факторов, не позволяющих гибко выделять и конфигурировать аппаратно-программные средства (АПС) управления конкретным КА, среди них:

- разнородность применяемых АПС управления КА;
- неоптимальное расходование ресурсов на создание и поддержание средств для решения однотипных задач управления КА, подготовку персонала;
- слабое заимствование базового программно-математического обеспечения при создании комплексов управления перспективными КА;
- сложность оперативной закупки вышедших из строя технических средств и для восполнения ЗИП;
- использование устаревших информационных технологий и технических решений;
- увеличение сроков создания АПС управления;
- увеличение эксплуатационных расходов и др.

Решением данного вопроса могла бы стать унификация АПС управления. С целью унификации АПС управления, повышения надёжности их функционирования, снижения стоимости создания и эксплуатации, а также в соответствии с утвержденной 19.02.2013 руководителем Роскосмоса «Концепцией развития наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения и измерений на период до 2025 года» ЦУП ФГУП ЦНИИмаш определен Базовым Центром Роскосмоса для управления пилотируемыми космическими комплексами и КА НСЭН всех типов на этапах летных испытаний и штатной эксплуатации.

Предлагаемая статья раскрывает концептуальные подходы ЦУП ФГУП ЦНИИмаш с целью минимизации влияния отрицательных факторов через построение модели облачных ресурсов, позволяющих решать проблемы сложных систем в задаче управления КА и использования принципов проектирования облаков при построении архитектуры Базового ЦУП Роскосмоса.

1 Облачные вычисления как инструмент создания средств управления сложными системами космического назначения

В последнее время, многие крупные организации, в том числе и космические агентства, погрузились в облачные вычисления, осуществляя научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы с целью исследования где и как их существующие системы могут получить пользу от «облака». Эти инициативы являются скорее технологией управления, чем необходимостью в управлении. Во многих случаях, ранние облачные инициативы фокусируются на двух типах деятельности:

- создание частной инфраструктуры как сервиса (IaaS) облака для предоставления виртуализированных вычислительных ресурсов;
- миграция существующих приложений в качестве частных или публичных IaaS облаков.

В обоих случаях акцент делается на предоставлении услуг модели IaaS и принятия парадигмы облачных вычислений, которые могут рассматриваться как в чистом виде развертывания, так и могут быть применены поверх существующих приложений и не должны влиять на прикладной уровень [7,8].

Переход к облачным вычислениям в Базовом ЦУП не отличается от приведенного выше. Модель работы с «облаком» для разных групп пользователей, применяемая в ЦУП представлена на рисунке 1.

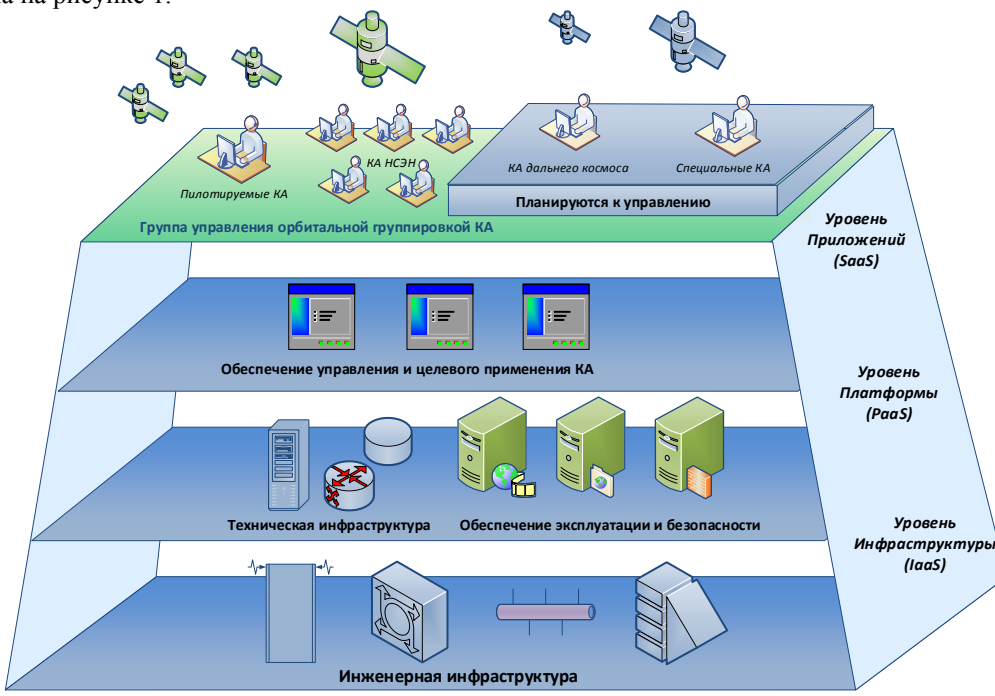


Рисунок 1 – Модель работы с «облаком» для разных групп пользователей, применяемая в ЦУП

Анализ функционирования Базового ЦУП Роскосмоса [5] и исследования технических требований, а затем и принятия концепции развития технологии процесса управления, привели к развертыванию первого IaaS облака, которое дает возможность Базовому ЦУП предоставлять потребителю системы обработки, хранения, сетей и других фундаментальных вычислительных ресурсов для развертывания и запуска произвольного программного обеспечения, которое может включать в себя операционные системы и приложения. Потребитель при этом не управляет базовой инфраструктурой облака, но имеет контроль над операционными системами, системами хранения, развернутыми приложениями и, возможно, ограниченный контроль выбора сетевых компонентов.

В качестве общей концепции проектирования архитектуры, Базовый ЦУП Росокосмоса обладает еще и перспективными для космического сообщества облачными моделями предоставления услуг управления всеми типами КА, это: программное обеспечение как услуга (SaaS) и платформа как услуга (PaaS).

Уровень приложений (SaaS) предоставляет потребителю в использование приложений провайдера, работающих в облачной инфраструктуре. Приложения доступны из различных клиентских устройств или через интерфейсы тонких клиентов, такие как веб-браузер (например, веб-почта) или интерфейсы программ. Потребитель при этом не управляет базовой инфраструктурой облака, в том числе сетями, серверами, операционными системами, системами хранения и даже индивидуальными настройками приложений за исключением некоторых пользовательских настроек конфигурации приложения.

Уровень платформы (PaaS) предоставляет потребителю для развертывания в облачной инфраструктуре потребительских приложений, реализованных с помощью языков программирования, библиотек, служб и средств. Потребитель при этом не управляет базовой инфра-

структурой облака, в том числе сетями, серверами, операционными системами и системами хранения данных, но имеет контроль над развернутыми приложениями и, возможно, некоторыми параметрами конфигурации среды хостинга [3].

Основными характеристиками облачных вычислений, предоставляемых Базовым ЦУП Роскосмоса, являются:

- доступность – предоставляемые вычислительные ресурсы доступны по сети через стандартные механизмы для различных платформ, тонких и толстых клиентов (мобильных телефонов, планшетов, ноутбуков, рабочих станций и т.п.);
- низкая стоимость – использование облака на правах аренды позволяет пользователям снизить расходы на закупку дорогостоящего оборудования;
- измеряемость – облачные системы автоматически управляют и оптимизируют ресурсы с помощью средств измерения, реализованных на уровне абстракции применительно для разного рода сервисов (например, управление внешней памятью, обработкой, полосой пропускания или активными пользовательскими сессиями). Использованные ресурсы можно отслеживать и контролировать, что обеспечивает прозрачность как для поставщика, так и для потребителя, использующего сервис;
- мгновенная эластичность – ресурсы могут быть эластично выделены и освобождены, в некоторых случаях автоматически, для быстрого масштабирования соразмерно со спросом. Для потребителя возможности предоставления ресурсов видятся как неограниченные, то есть они могут быть присвоены в любом количестве и в любое время;
- возможность самообслуживания – получение доступа к предоставляемым вычислительным ресурсам в одностороннем порядке по мере потребности, автоматически, без необходимости взаимодействия с сотрудниками каждого поставщика услуг.
- сосредоточенность ресурсов – вычислительные ресурсы Базового ЦУП объединяются в пулы для обслуживания многих потребителей по многоарендной модели. Пулы включают в себя различные физические и виртуальные ресурсы (системы хранения, вычислительные мощности, память, пропускная способность сети), которые могут быть динамически назначены и переназначены в соответствии с потребительскими запросами.

2 Применение облачных технологий при управлении КА

Применение облачных технологий позволили заложить основу, позволяющую продолжать движение к смене существующей парадигмы от создания средств управления для каждого КА к созданию базовых инфраструктурных высокотехнологичных элементов управления. Уже создана первая очередь дата-центра Базового ЦУП, позволяющая интегрировать специальное программное оборудование управления, обеспечивать сетевой доступ к общему пулу конфигурируемых вычислительных ресурсов, которые могут быть оперативно предоставлены и освобождены с минимальными эксплуатационными и временными затратами. Модернизирован ряд основных технологических комплексов ЦУП Российским сегментом МКС, а также определенная часть инженерной инфраструктуры. Проведена реконструкция ряда помещений ЦУП. Архитектура Базового ЦУП Роскосмоса представлена на рисунке 2.

Базовый ЦУП Роскосмоса включает в свой состав следующие компоненты:

- Комплекс базовых средств телеметрического обеспечения (ТМО);
- Комплекс базовых средств баллистико-навигационного обеспечения (БНО);
- Комплекс базовых средств командно-программного обеспечения (КПО);
- Комплекс базовых средств информационной инфраструктуры ЦУП;
- Комплекс базовых средств моделирования и информационного обеспечения полета (МИОП);
- Комплекс индивидуальных базовых средств отображения (ИСО);
- Комплекс коллективных базовых средств отображения (КСО);

- Комплекс базовых средств связи ЦУП (КСС);
- Комплекс базовых средств системы единого времени (СЕВ).

Комплекс базовых средств ТМО обеспечивает автоматизированное выполнение основных технологических операций (сервисов), включая: прием, обработку, анализ, хранение, документирование и отображение полных потоков телеметрической информации для различных бортовых телеметрических систем КА, включая предоставление потребителям результатов обработки ТМИ.

Комплекс базовых средств БНО обеспечивает автоматизированное выполнение основных технологических операций, включая: оперативное формирование и выдачу потребителям в ОГУ типовой баллистической информации; оперативный расчёт и отображение сопроводительной баллистической информации о полёте пилотируемых кораблей и орбитальных станций в помещениях поддержки; автоматизированную выдачу результатов баллистических расчётов потребителям; контроль активного участка выведения КА на орбиту ИСЗ по данным наземных средств слежения и бортовой аппаратуры спутниковой навигации в масштабе реального времени.

Комплекс базовых средств КПО обеспечивает для всех типов КА автоматизированное выполнение основных технологических операций, включая: планирование программ полета КА; расчет управляющих воздействий; планирование программ сеансов связи с КА; передачу командно-программной информации на борт КА через средства наземного и спутникового комплексов управления КА; прием, обработку, документирование, отображение и распределение потребителям квитанционной и контрольно-диагностической информации от КА и средств наземного и спутникового комплексов управления.

Комплекс базовых средств информационной инфраструктуры ЦУП обеспечивает взаимодействие технологических комплексов ЦУП и комплексов дата-центра ЦУП, а также инфраструктурное обеспечение для автоматизированного управления полетом КА и операций с полезными нагрузками из ЦУП. Кроме того, он обеспечивает информационную безопасность базовых средств ЦУП Роскосмоса, а также информационные обмены со сторонними организациями.

Комплекс индивидуальных базовых средств отображения обеспечивает автоматизированное выполнение основных технологических операций, включая: отображение оперативной информации – результатов обработки телеметрической, командно-программной и баллистической информации на терминалах ИСО в главном зале управления (ГЗУ) ЦУП и помещениях поддержки; отображение служебной информации - графической по результатам моделирования и справочной информации, формируемой службами ЦУП на терминалах ИСО в ГЗУ ЦУП и помещениях поддержки.

Комплекс базовых средств связи ЦУП обеспечивает автоматизированное взаимодействие элементов, участвующих в управлении КА из ЦУП с использованием телефонных, синхронных и асинхронных широкополосных каналов связи.

Комплекс коллективных базовых средств отображения обеспечивает автоматизированное выполнение основных технологических операций, включая: сбор, обработку и формирование информационных материалов, визуализацию процессов полетных операций; отображения хода полета КА в режиме реального времени; отображение видеографической информации, полученной с использованием средств имитационного моделирования и компьютерной графики; проведение демонстрационно-презентационных и учебно-тренировочных мероприятий.

Комплекс базовых средств сбора, обработки, хранения, распределения информации целевого назначения и обеспечения управления операциями с полезными нагрузками (Центр ПН).

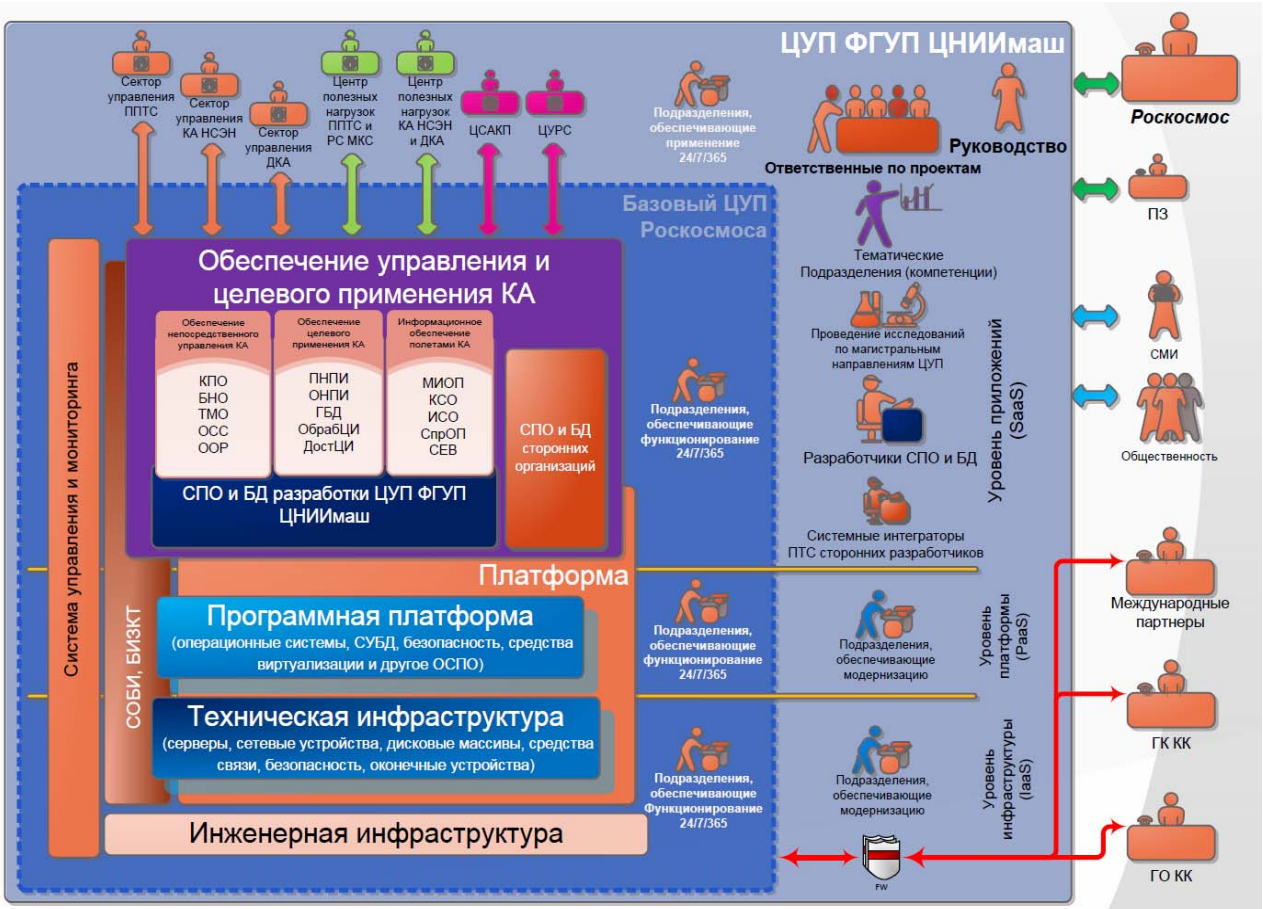


Рисунок 2 — Схема Базового ЦУП Роскосмоса

Комплекс базовых средств МИОП обеспечивает моделирование и визуализацию процессов полётных операций в режимах реального и моделируемого времени на базовых средствах КСО и ИСО, формирование изображения вида космических аппаратов в полёте и состояния бортовых систем на основе баллистических и телеметрических данных для детализированною представления динамических операций с КА.

Комплекс базовых средств СЕВ обеспечивает автоматизированное выполнение основных технологических операций, включая: формирование и хранение собственной шкалы времени, синхронизированной с Госэталоном времени и частоты, для обеспечения работы в единой временной шкале ПТС и специалистов оперативных групп; синхронизацию средств вычислительной техники (СВТ) комплексов ЦУП; отображение отсчетов времени на табло коллективного и индивидуального пользования в ГЗУ ЦУП и помещениях поддержки.

Комплекс базовых средств сбора, обработки, хранения, распределения информации целевого назначения и обеспечения управления операциями с полезными нагрузками (Центр ПН) обеспечивает: наземную подготовку, поддержку и выполнение программ научно-прикладных исследований и космических экспериментов на всех типах существующих и перспективных пилотируемых космических комплексов и автоматических КА для фундаментальных космических исследований, в т.ч. КА для полетов к Луне, Марсу, планетам и телам Солнечной системы.

Комплексное использование вышеуказанных базовых средств Центра управления полетами позволит обеспечить:

- универсальное применение аппаратно-программных средств управления КА;
- консолидацию вычислительных ресурсов при управлении сложными системами космического назначения;
- оптимальное расходования ресурсов на создание и поддержание средств для решения однотипных задач управления КА, подготовку персонала;
- заимствование базового ПМО при создании комплексов управления перспективными КА;
- технологичность управления сложными системами космического назначения;
- уменьшение сроков создания аппаратно-программных средств управления;
- снижение эксплуатационных расходов и др.

3 Особенности миграции космических данных и полетной информации Базового ЦУП Роскосмоса

Одним из востребованных элементов Базового ЦУП является система хранения данных (СХД). Концепция облачных вычислений оказывает сильное влияние на современные СХД, что привело к появлению нового класса систем хранения — высокомасштабируемые облачные СХД, которые в отличие от традиционных, используют в своем составе не фиксированное количество устройств хранения, а арендуют устройства по мере необходимости, или же высвобождают ряд устройств, когда необходимость в них отпадает. Для эффективного использования ресурсов СХД необходимо регулярно производить процедуру масштабирования, т.е. изменения количества устройств хранения, входящих в систему.

Масштабирование выполняется программной платформой (PaaS) оно связано с переконфигурацией хранилища, т.е. с перемещением огромного количества элементов данных (блоков данных) между устройствами хранения. На рисунках 3 — 5 приводятся данные по загруженности выходных интерфейсов Базового ЦУП при обмене с Главной оперативной группой управления (ГОГУ), с мультисервисной системой связи и передачи данных (МССПД) и с НАСА.

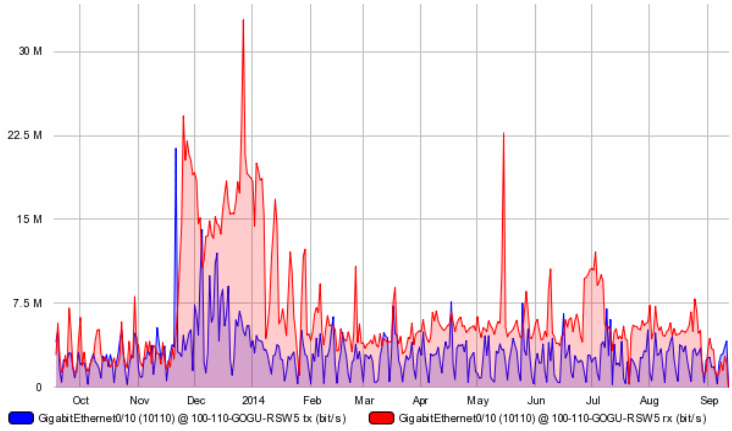


Рисунок 3 — Интенсивность обменов информацией ЦУП с ГОГУ в период с 2014 по 2015г.

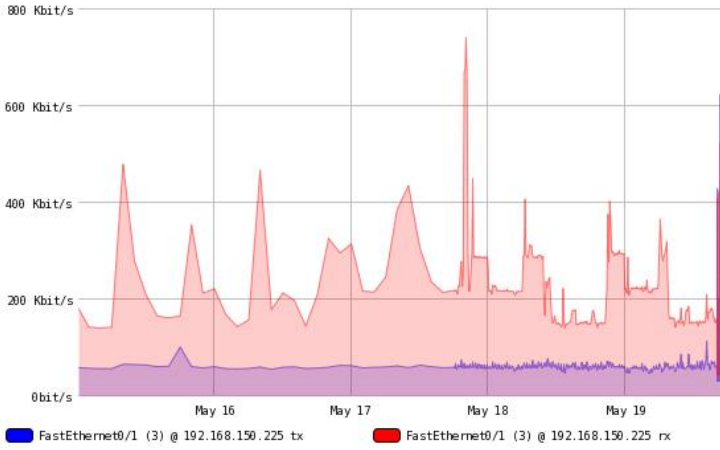


Рисунок 4 — Интенсивность обменов ЦУП с МССПД в период с 16.05.15 по 19.05.15

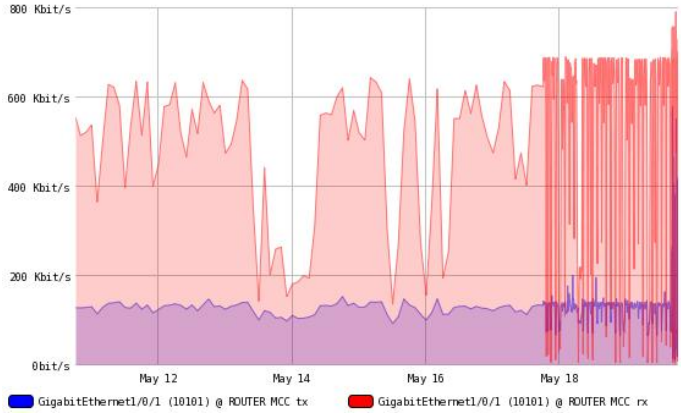


Рисунок 5 — Интенсивность обменов информацией с НАСА в период с 12.05.15 по 15.05.15

Масштабирование и переконфигурация неразрывно связаны с алгоритмами миграции данных, которые строят план миграции (перемещения элементов данных) на основе текущего и целевого распределения элементов данных по устройствам хранения [4]. Выполнение миграции данных не должно приводить к снижению качества обслуживания клиентов системы хранения, для чего в алгоритмах необходимо учитывать пропускную способность сети и максимальный объем данных, который можно передавать в один момент времени с одного устройства хранения на другое.

Существующие алгоритмы миграции космических данных и полетной информации не учитывают особенности единовременного оперативного управления комплексами сложных систем космического назначения. Разработка специализированных алгоритмов миграции данных для управления ресурсами КА и наземных комплексов управления, способных сократить время масштабирования и увеличить скорость миграции данных, позволит повысить эффективность использования ресурсов и понизить затраты на эксплуатацию средств управления КА.

Заключение

Применение облачных технологий плодотворно влияет на формирование единой политики по созданию высокотехнологичных средств управления КА, что способствует обеспечению консолидации вычислительных ресурсов и средств хранения данных, оптимизации эксплуатационных расходов, а также возможности разработки универсальных программно-технических средств, которые будут использованы при управлении практически любым последующим КА. Это обеспечит повышенный уровень надежности и оперативности разработки и эксплуатации аппаратно-программных средств управления полетом сложных систем космического назначения.

Центр управления полётами создавался и продолжает развиваться как оперативное, высокотехнологичное, многофункциональное звено обширной системы наземного комплекса управления космическими аппаратами различного назначения. Его вычислительные мощности, развитое программно-техническое обеспечение, сетевая и инженерная инфраструктура смогут обеспечить выполнение любых задач в рамках действующей Федеральной космической программы.

Список литературы

[1] Ю.Н. Коптев. Стратегия развития космической деятельности России до 2030 года и на дальнейшую перспективу (Проект).

[2] Соловьев В.А., Любинский В.Е., Матюшин М.М. Проблемы управления полетами пилотируемых космических комплексов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2013. №3. С. 39-52.

[3] Mell, P., and Grance T. “The NIST Definition of Cloud Computing”, Recommendations of the National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 800-145, 2011, USA.

[4] Петров Д.Л., Красюк В.И. Консолидация распределенных хранилищ данных: модели и алгоритмы. Санкт-Петербургский Электротехнический Университет «ЛЭТИ».

[5] Мильковский А.Г., Матюшин М.М., Белявский А.С., Соколов Н.Л., Зеленов Д.А. Российский центр управления полетами - важнейший элемент при освоении космического пространства мировым сообществом.

[6] Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е.; под общ. ред. Л.Н. Лысенко. Управление космическими полетами: учеб. пособие: в 2 ч. / М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.

[7] Dr. Mehran Sarkarati, Mariella Spada, Dr. Mario Merri, Vicente Navarro, Jiri Marak: Mission Operations as a Service Cloud Computing for Space Missions beyond Infrastructure-as-a-Service. European Space Agency, ESA/ESOC, Robert Bosch Strasse 5, 64293 Darmstadt, Germany.

[8] Juan Arrieta, Juan Senenty: Cloud Computing Techniques for Space Mission Design. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, California 91109 USA.

ПОДХОД К АДАПТИВНОМУ ПЛАНИРОВАНИЮ ПОЛЕТНЫХ ОПЕРАЦИЙ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В.И. Станиловская[1], А.М. Беляев[1], О.И. Лахин[2], А.И.Носкова[2], Д.Н. Иванова[2]

[1]РКК «Энергия» им. С.П. Королёва
141070, Московская обл., Королёв, ул. Ленина, 4А, Россия
vera.stanilovskaya@sfoc.ru
тел: +7 (498) 602-95-58

[2]ООО «НПК «Разумные решения»
443013, Самара, Московское шоссе, 17, офис 1201, Россия
info@kg.ru
тел: + 7 (846) 279-37-78

Ключевые слова: *российский сегмент международной космической станции; полетные операции; мультиагентные технологии; адаптивное планирование; реальное время; онтология.*

Abstract
An approach to adaptive planning of flight operations for the Russian segment of the International Space Station is described. This approach is to be implemented using a multi-agent system for interactive refining of flight operations plans based on an interactive method for increasing satisfaction of flight operations agents which gives the possibility to evolutionarily create plans that meet the main criteria, conditions and limitations. The paper demonstrates a pattern of flight operations which will let operators fill in the ontology with information and adjust existing flight operations, taking into account the features of the current situation.

Введение

Качество планирования полетных операций (ПО) российского сегмента международной космической станции (РС МКС) во многом зависит от соблюдения совокупности правил и ограничений. Часть из них формализована в различных документах, содержащих правила и ограничения планирования ПО, другая же часть существует в виде личного опыта и знаний специалистов, участвующих в планировании ПО. Предлагаемое решение призвано дополнить автоматизированную систему планирования РС МКС функциональностью, которая обеспечит автоматизацию контроля качества планирования, повысит эффективность работы специалистов группы планирования и существенно снизит риски, обусловленные «человеческим фактором» [1].

1 Цели и задачи

В настоящее время для решения задач планирования ПО используется автоматизированная система планирования РС МКС (АСП), которая позволяет охватить различные этапы планирования на исполнительном уровне – от номинального плана полета до детального плана полета [2]. Предлагается разработать решение в виде дополняющей АСП мультиагентной системы интерактивной доводки планов полетных операций (МАС ППО), использующей в качестве источников входных данных:

- номинальный план полета (НПП), общий план сопровождения (ОПС), план полета (ПП);
- базу данных ПО;

- компетенции экипажа;
- заявки специалистов и кураторов;
- документы, описывающие правила и ограничения планирования ПО;
- планы, сгенерированные американскими партнерами.

Результатами работы МАС ППО должны являться:

- автоматическая генерация вариантов планов, адаптированных под указанные условия, предпочтения и ограничения;
- расчет и сравнение показателей качества планирования ПО для выбранных вариантов плана, проверка соответствия критериям, правилам, предпочтениям и ограничениям.

2 Предлагаемый подход

Используемый при разработке подход основан на применении мультиагентных технологий и онтологий.

Онтология - это средство формализации знаний о предметной области, в форме удобной как для компьютерной обработки, так и для понимания человеком.

На данный момент использование онтологий в качестве баз знаний является наиболее предпочтительным по нескольким причинам [3]:

1) С помощью онтологий пользователь может описать любую разнородную, сколь угодно сложную предметную область, обладая небольшим онтологическим базисом.
2) С точки зрения разработки интеллектуальных систем, использование онтологий позволяет формализовать специфические предметные знания в виде, допускающем компьютерную обработку, и отделить знания от программного кода системы.
3) Возможность для пользователей онтологии добавлять и изменять объекты, атрибуты и классы по мере уточнения целей и задач, расширять и дополнять онтологию по мере необходимости делает этот метод оптимальным в практическом применении.

Мультиагентная система - это система, образованная сообществом агентов, способных вырабатывать общее глобальное решение проблемы, когда каждый агент имеет свои локальные критерии, предпочтения и ограничения.

Агент - это автономный программный объект, имеющий собственные цели, способный реагировать на события, строить планы и принимать решения, коммуницировать с себе подобными (и не только).

Преимущества, использования мультиагентных технологий:

- децентрализованность - нет общего «командного центра», являющегося узким местом, решение задачи находится в процессе коммуникации множества автономных агентов, обладающих собственными целями;
- распределенность - за счет автономности множество агентов, решающих одну задачу, может функционировать на разных компьютерах, агенты могут иметь разную природу (быть написанными на разных языках программирования), главное – чтобы они обладали общим протоколом взаимодействия;
- параллельное выполнение операций - за счет децентрализованности процесс переговоров агентов представляет собой не строго упорядоченную очередь операций, а параллельный процесс обмена сообщениями между различными агентами, каждый из которых рассматривает свою часть задачи одновременно с остальными.

Данные преимущества делают мультиагентные системы надежными и масштабируемыми [4].

Рассмотрим, как эти подходы применяются для адаптивного планирования ПО.

Предлагается построить базу знаний планирования ПО на основе предметной онтологии, выявляя и формализуя основные понятия и отношения, влияющие на процесс и результаты планирования ПО. На основе онтологии планирования ПО необходимо реализовать систему

контроля показателей качества планирования и оптимизации планов ПО по заданным критериям.

3 Шаблон описания ПО

Для описания ПО и заполнения базы знаний планирования ПО предлагается использовать шаблон описания ПО. Часть атрибутов этого шаблона будет автоматически заполняться, используя информацию, полученную из базы данных ПО АСП, которая была создана для хранения эталонных описаний полетных операций. В эталонном описании содержится основная информация, которую использует специалист группы планирования при размещении операции в плане (краткое и полное имя, описание на русском и английском языках, тип операции, модуль МКС и рабочее место, на котором выполняется операция, длительность и периодичность выполнения операции). В БД хранятся также сведения о документации с описанием соответствующих ПО, о необходимости выполнения операции в зоне видимости наземных измерительных пунктов (НИП), о требуемых ресурсах, о работах, несовместимых с данной операцией, о временных связях и других условиях планирования [5].

В базе данных ПО АСП определены следующие атрибуты:

- **Наименование ПО.** Краткое и полное наименование ПО.
- **Группа принадлежности.** Самый верхний уровень иерархии позиционирования ПО.
- **Фиксированная длительность ПО.**
- **Исполнители.** Количество исполнителей (членов экипажа) и интервал времени реализации ПО для каждого из них.
- **Необходимые каналы НИП.** Необходимый канал связи с наземным измерительным пунктом.
- **Ресурсы.** Необходимые для выполнения ПО ресурсы, оборудование, S-BD и KU-BD.
- **Временные связи.** Учет следующих видов связей относительно границ связанных ПО: начало – начало; конец – начало; начало-конец; конец-конец. Возможные интервалы между ПО: точный, минимальный, максимальный.
- **Периодичность.** ПО может выполняться как единовременно, так и повторяться периодически. Для описания интервала времени, через который операция должна повторяться, следует указать единицу периодичности (сутки, неделя, месяц и т.д.) и ее значение. Например, ПО «Технологические срабатывания клапанов АВК СОА системы «Воздух» (ЗИП)» проводятся каждые 3 месяца.
- **Место проведения ПО.** Модуль и панель выполнения ПО.
- **Приоритет ПО.** В процессе формирования плана опытный оператор (специалист-планировщик) использует различные приоритеты операций. Приоритеты могут быть фиксированными и переменными (зависимыми от текущих условий формирования плана). Фиксированные приоритеты, как правило, учитываются на первой стадии планирования, когда определяется общая структура плана. Фиксированные приоритеты устанавливаются до начала планирования и поэтому могут быть рассмотрены как внешние исходные данные. На формирование переменных приоритетов влияют текущие условия реализации операций [6].

К существующим атрибутам следует добавить следующие атрибуты, необходимые для планирования ПО:

- **Переменная длительность ПО.** Длительность может сокращаться или увеличиваться при необходимости. Предлагается также ввести критерий «Критичность изменения длительности», который будет регулировать вид функции удовлетворенности.
- **Категория срочности.** Перед началом планирования оператор распределяет операции из набора по трем категориям: должна быть запланирована, не обязательна, отменяема.
- **Компетентность исполнителя.** Предлагается четыре категории: специалист, пользователь, оператор, не имеет допуска.

- **Время начала ПО.** У операции следует указывать время начала выполнения, которое может быть строго определенным, привязанным к дню или к периоду времени.
- **Время окончания ПО.** У операции следует указывать время окончания выполнения, которое также может быть строго определенным, привязанным к дню или к периоду времени.
- **Ресурсы.** Необходимо добавить возможность учитывать требование выполнения ПО в световой или теневой зоне.

Для удобства пользователей описание некоторых атрибутов ПО предлагается вводить в графическом виде с помощью кусочно-линейных функций.

Атрибуты ПО можно будет при необходимости корректировать и добавлять новые для того, чтобы учесть уникальность той или иной ситуации.

4 Онтология ПО

С использованием шаблона ПО, разрабатывается онтология ПО (рисунок 1), которая будет содержать знания о ПО, правилах и ограничениях, накладываемых на ПО.

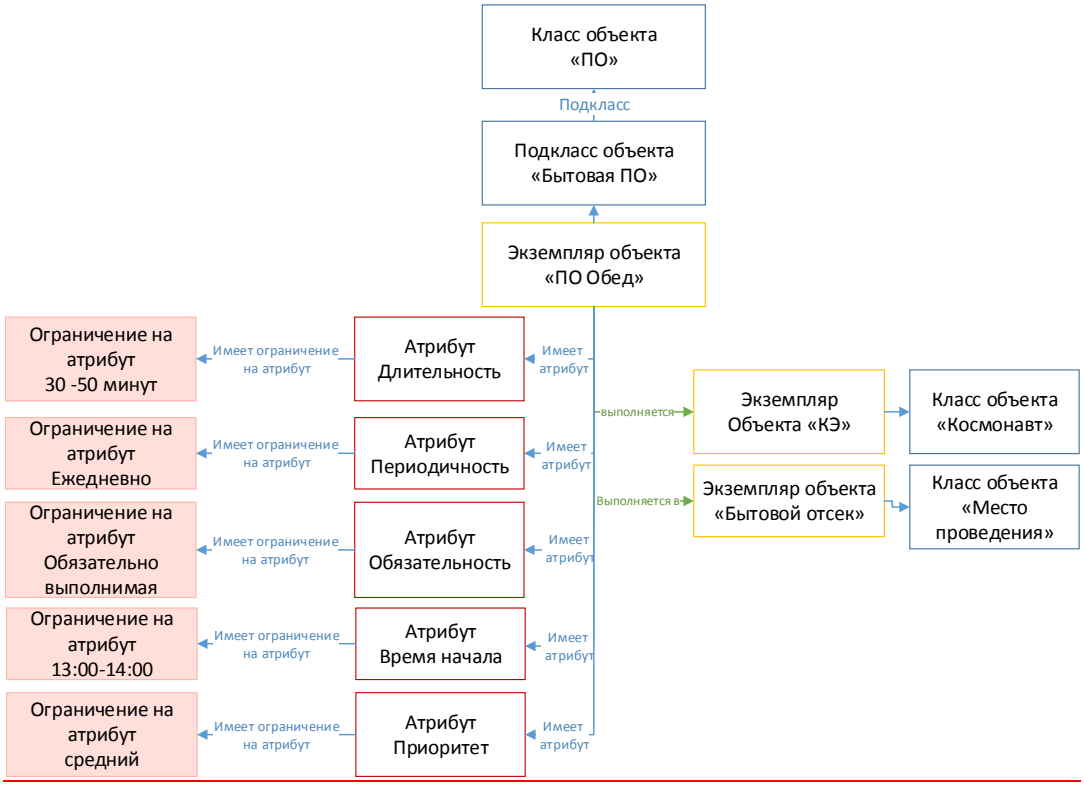


Рисунок 1 - Фрагмент онтологии ПО

В развитие идеи универсального базиса, для представления знаний о ПО предлагается использовать мета-онтологию Аристотеля, включающую следующие концептуальные понятия [3]:

- «объекты» - сущности, характеризуемые свойствами;
- «свойства» - отражают способность объектов вступать во взаимодействия;
- «процессы» - цепочки действий по изменению состояний объектов;

- «отношения» - позволяют связывать между собой объекты и конструировать сложные объекты из простых;
- «атрибуты» - характеризуют состояния концептов.

Предлагаемая нами мета-онтология Аристотеля позволяет описать концептуальную модель ПО, на основе которой будут строиться планы ПО.

В качестве примера (рисунок 1) приведем описание ПО «Обед». ПО относится к бытовым ПО. Исполнителем операции является командир экипажа, выполняется она в бытовом отсеке и имеет ряд атрибутов со своими ограничениями: выполняться ПО должна обязательно, ежедневно, длиться может от 30 до 50 минут. Время начала может варьироваться с 13:00 до 14:00.

5 Функции удовлетворенности

Для того, чтобы осуществлять гибкое планирование и гибкое перепланирование по событиям, в онтологии предлагается описывать некоторые атрибуты, задавая на них ограничения в виде функции удовлетворенности. Например, рассмотрим функцию удовлетворенности для атрибута «Длительность».

Каждая ПО имеет свою длительность. Для некоторых операций длительность строго зафиксирована, а для некоторых может меняться. Предлагается ввести функцию удовлетворенности времени отклонения (t_O) от заданной длительности ПО.

1) Если длительность ПО является фиксированной, то функция удовлетворенности имеет максимально значение при определенной фиксированной длительности $U(t_O) = 1$, в остальных случаях она равна 0. Для упрощения, из-за разного рода округлений имеет смысл задавать функцию в прямоугольном виде с минимальным временным интервалом (рисунок 2).

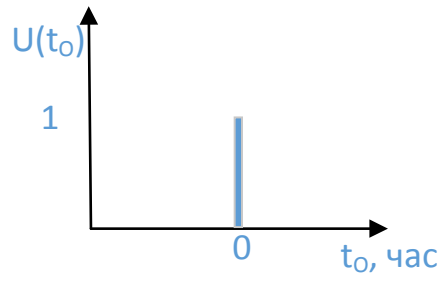


Рисунок 2 - Функция удовлетворенности при фиксированной длительности ПО

2) Если длительность ПО может изменяться, сокращаться на t_1 или увеличиваться на t_2, то функция удовлетворенности в диапазоне 0-t_1 или 0-t_2 будет равна 1, вне его равна 0. Это возможно, когда изменение длительности ПО в рамках диапазона не критично (рисунок 3).

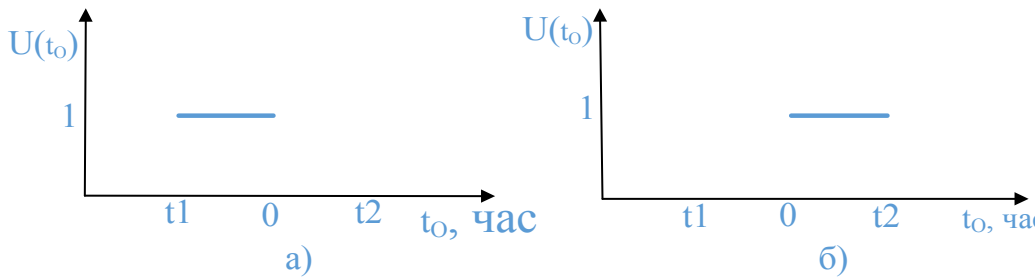


Рисунок 2 - Функция удовлетворенности максимальная и не меняется в заданном диапазоне. а) Длительность ПО можно уменьшить. б) Длительность ПО можно увеличить

3) Если длительность ПО может изменяться, но при этом при ее увеличении или сокращении удовлетворенность уменьшается линейно от 1 до 0, то функции удовлетворенности будут иметь вид, представленный на рисунке 4. Идеальным считается случай, когда длительность не меняется, т.е. при длительности t_O функция удовлетворенности $U(t_O) = 1$. При увеличении длительности ПО на t_1 или уменьшении на t_2, функция удовлетворенности будет падать до 0 (рисунок 4).

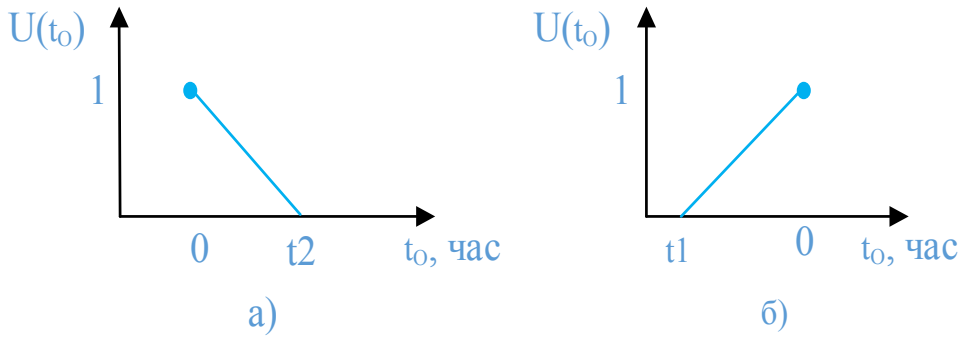


Рисунок 3 – Функция удовлетворенности уменьшается в заданном диапазоне. а) При увеличении длительности ПО. б) При уменьшении длительности ПО

4) Возможны случаи, когда при описании функции удовлетворенности длительности ПО комбинируются ситуации, описанные выше, пример таких функций удовлетворенности представлен на рисунках 5-6.

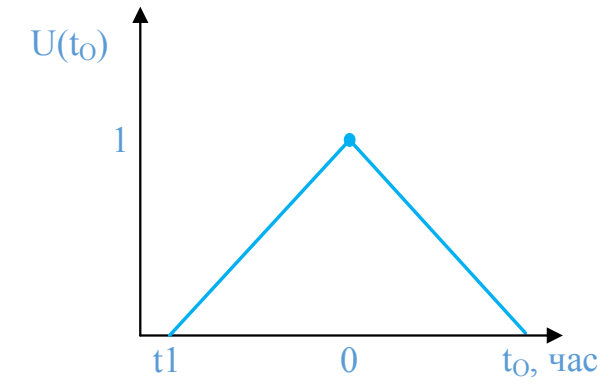


Рисунок 4 - Функция удовлетворенности: нежелательно, но возможно как сокращение, так и увеличение длительности ПО.

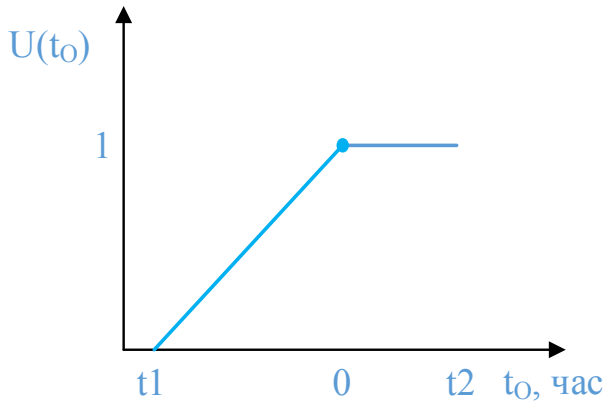


Рисунок 5 - Функция удовлетворенности: не желательно, но возможно сокращение длительности ПО. Увеличить длительность ПО можно без потерь до t2.

Представленные функции удовлетворенности для каждой ПО будут настраиваться в сцене по заложенным в онтологию принципам и правилам (рисунок 7).

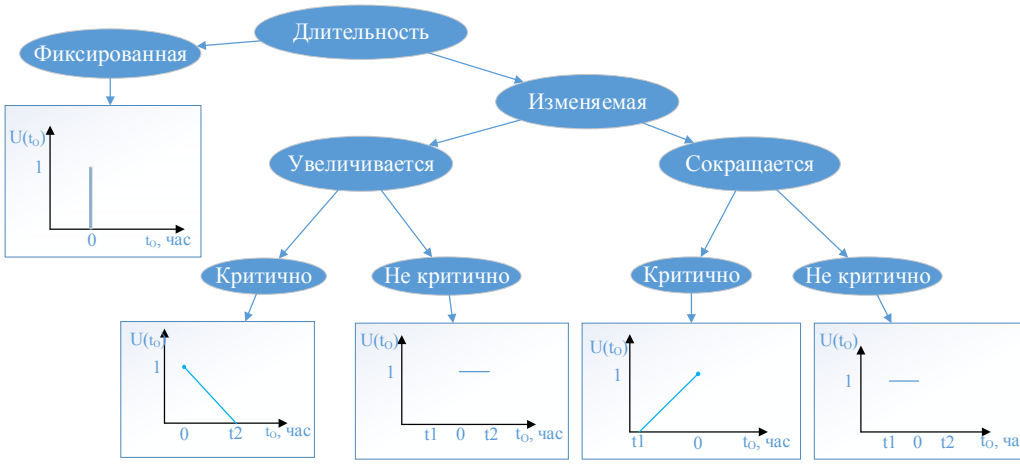


Рисунок 7 – Онтологии описания правил длительности

Подобные функции удовлетворенности будут разработаны и для других атрибутов.

Для каждой ПО будет определяться общая функция удовлетворенности путем сложения функций удовлетворенности по разным критериям с различными весовыми коэффициентами, которые настраиваются в зависимости от текущих приоритетов, зависящих от различных полетных ситуаций. В случае, если общая функция удовлетворенности меньше допустимого значения, ПО будет подсвечена. Таким образом на плане будут отмечены ПО, у которых не выполняются ограничения и условия.

Общая удовлетворенность всего плана ПО будет находиться как сумма удовлетворенностей всех ПО.

6 Пример работы системы интерактивной доводки планов ПО

В качестве примера рассматривается расписание для трех членов экипажа в период с 12 до 17 часов, полученное из АСП. Данное расписание загружается в МАС ППО и анализируется на основе заданных правил и ограничений. Пусть за день до актуализации плана были обновлены баллистические данные и смещена зона видимости. Данная информация также была загружена в МАС ППО.

Система стремиться улучшить план и ищет возможности его оптимизировать, она помогает также адаптировать план под новые обстоятельства, неучтенные ранее. Агенты различных показателей и критериев (безопасность, комфорт космонавтов, экономика, требования экспериментов и т.д.) расцвечивают полученное расписание, показывая свои неудовлетворенности и отклонения от идеальных значений (рекомендуемых или среднестатистических) с помощью подсветки различными цветами (рисунок 8):

- синий – необходимо перепланировать;
- желтый – перепланирование не рекомендуется;
- красный – перепланировать нельзя.

Система выявила следующие возможности для улучшения плана:

1) В связи с изменением баллистических данных необходимо скорректировать ПО «Сеанс связи с ЦУП», так как она запланирована на время, когда орбитальный комплекс находится вне зоны видимости.
2) Агент «Требования к экспериментам» выяснил, что БИ-1 больше подходит для выполнения «RR-Выполнение эксперимента» чем БИ-2, так как его квалификация выше (учитываются квалификации, описанные в онтологии, производится их сравнение).

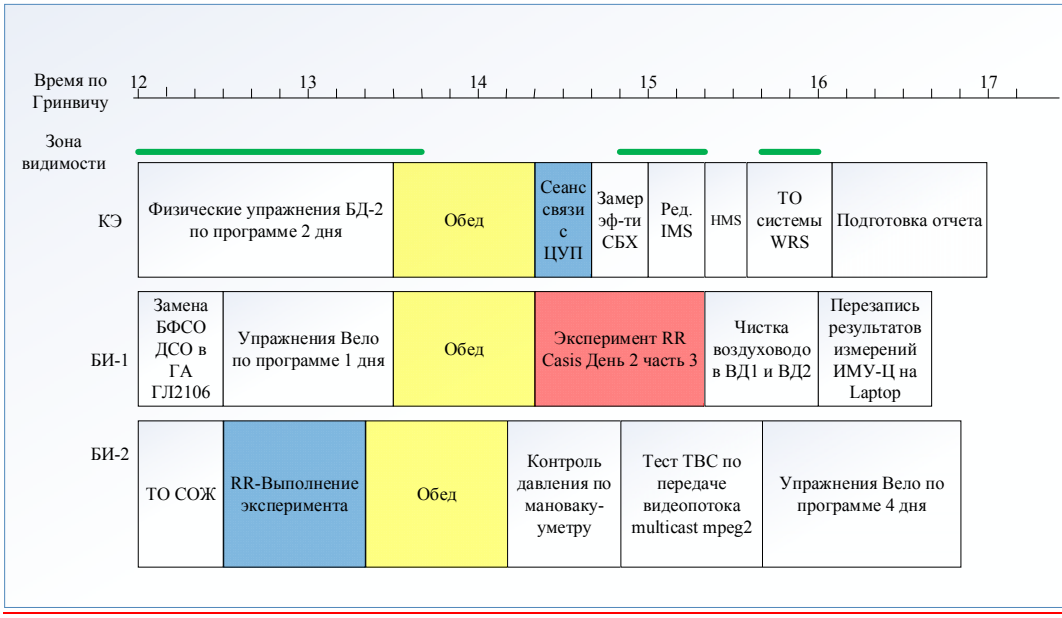


Рисунок 8 - Фрагмент первоначального плана ПО

Перепланирование система выполняет следующим образом.

Первоначально на свои места расставляются ПО с фиксированным временем начала. В нашем примере это «Эксперимент RR Casis День 2 часть 3».

Затем размещаются ПО, которые имеют предпочтительное время начала, но при необходимости могут быть сдвинуты на некоторое время, при этом функция удовлетворенности по критерию «Время начала» будет уменьшена. В нашем случае такой ПО является «Обед».

Далее будет корректироваться время ПО, для которых возможно улучшение их положения. ПО «Сеанс связи с ЦУП» определит свое местоположение в плане, таким образом, чтобы попасть в зону видимости.

Агент «Проверка требований эксперимента» для ПО «RR-Выполнение эксперимента» осуществил проверку квалификации исполнителя и выяснил, что с ней лучше справится БИ-1.

Так как ПО «RR-Выполнение эксперимента» имеет более высокий приоритет, она вытеснила ПО «Чистка воздуховодов ВД1 и ВД2». В свою очередь, эта ПО начинает искать себе исполнителя. У БИ-2 появилось свободное время, и его квалификация позволяет выполнить ПО «Чистка воздуховодов ВД1 и ВД2». Далее будут расставляться оставшиеся ПО. Таким образом, сформировался новый план (рисунок 9).

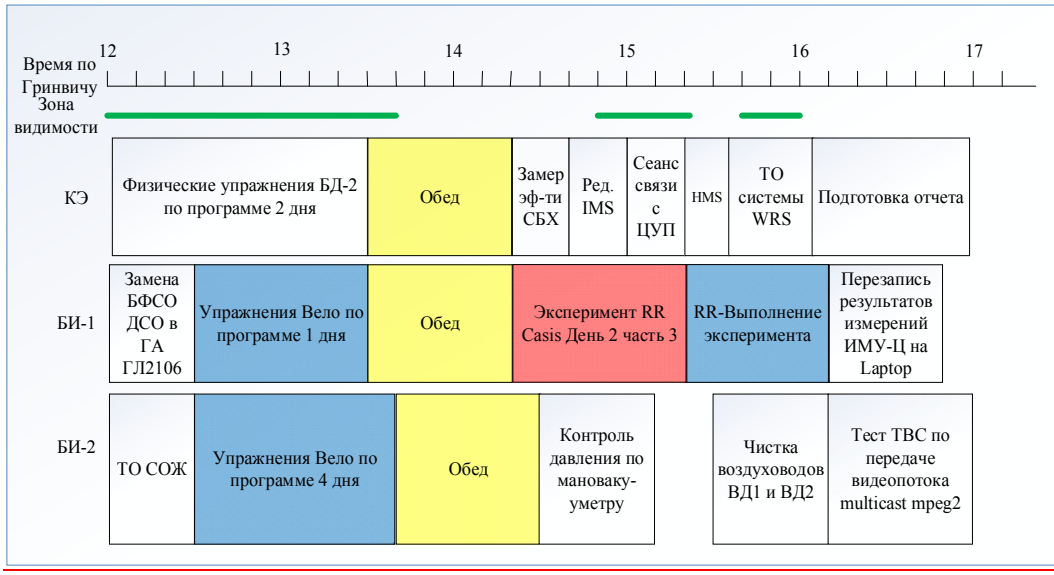


Рисунок 9 – Фрагмент промежуточного плана ПО

Однако в нем было выявлена ошибка: две операции, использующие одно и то же оборудование – тренажер «Вело», оказались запланированными на одно и то же время. Система вновь осуществляет перепланирование и в ходе переговоров сдвигает операцию «Упражнение Вело по программе 4 дня» так, чтобы она была запланирована не раньше, чем через 1,5 часа после «ПО Обед» и тренажер «Вело» был свободен в это время.

Далее будут расставляться оставшиеся ПО. После того как план сформируется, он опять проверяется на наличие возможностей улучшения. План будет переформировываться до тех пор, пока ни одна из ПО не сможет улучшить своего положения.

После этого будут добавлены ПО из TaskList, в случае если появится окно подходящего размера. В нашем случае ПО «Экон-М. Наблюдение и фотосъемка» была добавлена из TaskList в расписание БИ-2.

Выполнив перепланирование, система выведет новый план, в котором будут разрешены все конфликты (рисунок 10).

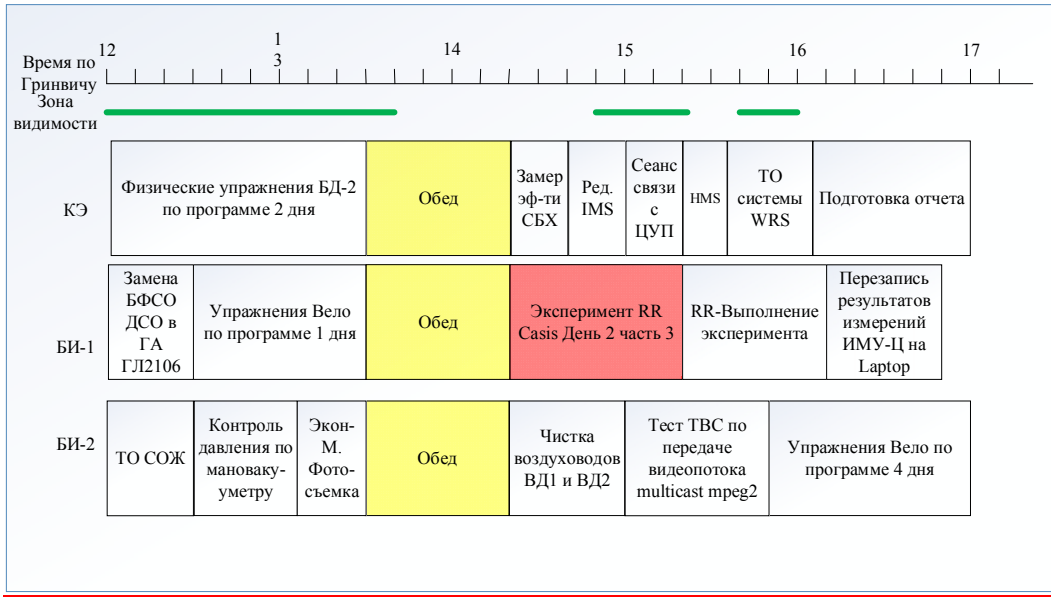


Рисунок 10 - Фрагмент скорректированного плана ПО

Заключение

В работе рассмотрен подход к адаптивному планированию ПО РС МКС. Данный подход позволяет обеспечить следующие важные преимущества:

- позволяет осуществлять перепланирование в реальном времени в случае непредвиденных обстоятельств;
- обеспечивает высокую гибкость планирования;
- уменьшает зависимость процедур планирования от человеческого фактора.
- создает платформу для дальнейшего наращивания сложности планирования за счет введения новых агентов ПО;
- позволяет упростить работу специалистов группы планирования;
- автоматизирует контроль качества планирования.

Онтология ПО позволит наиболее полно описать предметную область. Созданная онтология ПО может быть в дальнейшем расширена и использована в других системах.

В дальнейшем, для разработки полнофункциональной мультиагентной системы интерактивной доводки планов полетных операций необходимо будет создать расширенную версию онтологии ПО, для описания которой потребуются значительные первоначальные временные затраты. Разработанная расширенная версия онтологии ПО обеспечит учет максимально возможного числа факторов для поддержки необходимого суб-оптимального планирования с возможностью дальнейшего расширения и изменения онтологии ПО при адаптации к постоянно меняющимся условиям.

Список литературы

[1] Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полётами. Ч.1-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 476 с.

[2] Станиловская В.И. Концепция планирования на МКС// Труды XXXIV чтений К.Э.Циолковского.- Казань, 2001. - С. 124-127

[3] Скобелев П.О. Ситуационное управление и мультиагентные технологии: Коллективный поиск согласованных решений в диалоге // Онтология проектирования. 2013. №2(8). – С. 26-48.

[4] Иващенко А. В., Карсаев О. В., Скобелев П. О., Царев А. В., Юсупов Р. М. Мультиагентные технологии для разработки сетецентрических систем управления // VI Всероссийская научно-практическая конференция "Перспективные системы и задачи управления", 4 - 6 апреля 2011 г., Таганрог. – Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №3 (116). – С. 11-23.

[5] Колокольцева О.М., Беляев А.М., Козлечков А.Г., Будникова Т.С., Станиловская В.И., Потоцкий С.И. Автоматизированная система планирования полета российского сегмента международной космической станции // Программные продукты и системы. 2013. №3. – С.48-54.

[6] Станиловская В.И. Оценка приоритетов полетных операций при разработке планов полетов орбитальных комплексов // Материалы XXXIX чтений К.Э. Циолковского, - Калуга, 2004. - С.68

Management Processes in the Society (in Social, Economical and Political systems)

Процессы управления в обществе (в социальных, экономических и политических системах)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА СТРАТЕГИЮ ПОВЕДЕНИЯ ВУЗА НА РЫНКЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСЛУГ

А.Ю. Акутина, Г.И. Горемыкина, И.Н. Мастяева

Московский государственный университет экономики, статистики и информатики (МЭСИ)
119501, Москва, ул. Нежинская, 7, Россия
g_iv.05@mail.ru
тел: +7 (495) 411-66-33, +7 (495) 442-77-55, +7 (800) 555-51-59

Ключевые слова: *факторы внешней среды, стратегия ВУЗа, нечёткая технология, экспертная нечёткая база знаний*

Abstract

The authors propose a mathematical model of evaluation of external factors impact on the strategic position of the University on the educational services market. The model determines the primary factors of influence on the University's activity. The process of developing the system is implemented in *MatLab* using the package *Fuzzy Logic Toolbox* and interactive module *fuzzy*.

Введение

В современных условиях развития экономики высшее учебное заведение является полноправным участником рынка, предоставляя свои образовательные услуги и научные разработки. Являясь полноценным субъектом рыночной экономики, ВУЗ получает возможность самостоятельно определять направления своего развития, цели и методы его достижения. Формирование многоукладной образовательной системы и становление рынка образовательных услуг оказали существенное воздействие на условия деятельности ВУЗа. Внешняя среда стала качественно иной: повышается степень ее неопределённости, появляются новые факторы риска. Все большие требования предъявляются к качеству образовательных услуг со стороны потребителей. Вследствие этого, устойчивость ВУЗа как сложной социально-экономической системы постоянно находится в состоянии нестабильности. Однако нестабильность и неустойчивость системы отнюдь не всегда являются её отрицательными качествами, подлежащими элиминации. Это объясняется тем, что любая экономическая система избегает равновесия. Чтобы продолжать успешно функционировать, она должна эволюционировать – «находиться далеко от равновесия» [4]. Оценка влияния факторов внешней среды поможет определить величину воздействия внешнего окружения на функционирование ВУЗа, а также выделить факторы, которые в наибольшей степени оказывают отрицательное влияние на выбранную ВУЗом стратегию поведения на рынке образовательных услуг.

В сложившихся условиях возникающие изменения внешней среды непредсказуемы, носят недетерминированный характер и практически не поддаются контролю и управлению. В связи с этим построение модели системы оценки риска осуществлено авторами на основе нечёткой технологии. Применена схема нечёткого логического вывода по Мамдани по экспертной нечёткой базе знаний.

Процесс разработки системы реализован в инструментальной среде *MatLab* с использованием пакета *Fuzzy Logic Toolbox* и интерактивного модуля *fuzzy*.

Моделирование системы оценки влияния факторов внешней среды

Для моделирования оценки влияния внешней среды была разработана система факторов, включающая демографическую, политико-правовую и экономическую ситуации.

Одной из самых остро стоящих и обсуждаемых проблем в социальной сфере на протяжении многих лет является неблагоприятная демографическая ситуация. В 2010 г. остановился процесс сокращения численности населения. По данным Федеральной службы государственной статистики, в 2012 г. численность населения Российской Федерации впервые начала увеличиваться [6]. Стоит отметить, что прирост населения обеспечивается в основном за счет миграции, а не рождаемости. Однако для деятельности ВУЗа это не является положительным фактором. Для стабильного развития ВУЗ должен обеспечить высокий набор абитуриентов, что невозможно без увеличения рождаемости. По данным Росстата, в России наблюдается демографическая яма. Специалисты прогнозируют улучшение ситуация к 2017 г., однако до 2020 г. демографическая ситуация будет оставаться в стране неудовлетворительной. Для обеспечения естественного воспроизводства населения количество детей, рожденных на одну женщину, должно составлять 2,24. В 2013 г. в РФ суммарный коэффициент рождаемости составил 1,7. Неблагоприятная демографическая ситуация отрицательно воздействует на систему высшего образования в целом и на стратегическое поведение ВУЗа в частности.

Проведённый анализ позволил определить лингвистическую переменную X_1 = «*Демографическая ситуация*». Для неё были указаны: диапазон значений от 0 до 5 (единица измерения – действительное число, определяемое как количество детей, рожденных на одну женщину); шкала качественных термов: «неблагоприятная», «скорее благоприятная», «благоприятная» и значениями параметров соответственно: (0; 0; 1,7), (1,4; 2,2; 3), (2,24; 5; 5) (рис.1).

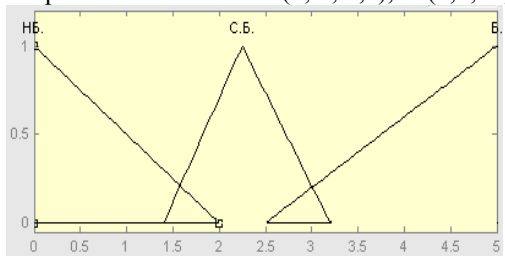


Рисунок 1 – Графическое представление лингвистической переменной «Демографическая ситуация»

Политико-правовая ситуация в сфере образования, безусловно, является ключевым фактором, определяющим вектор деятельности ВУЗов. Кроме того, законодательно закрепленные установки являются императивными нормами, которые достаточно сложно спрогнозировать и на которые невозможно повлиять. Всё более актуальна деятельность Министерства образования и науки РФ по объединению и укрупнению ВУЗов с целью создания конкурентоспособных университетов мирового уровня. Для присоединенных ВУЗов это означает завершение их функционирования, для тех, к кому они были присоединены – расширение системы, необходимость применения новых рычагов её управления.

В данной работе авторы, руководствуясь Перечнем поручений Президента РФ по вопросам повышения качества высшего образования от 22.05.2014 г., ограничились рассмотрением регулирования предельных объёмов осуществления государственными и муниципальными образовательными организациями образовательной деятельности по основным образовательным программам высшего образования за счёт средств физических и (или) юридических лиц, не предусмотренной установленным им государственным или муниципальным заданием. Данное поручение ограничивает набор внебюджетных студентов в ВУЗе. К лету 2015 г. соотношение бюджетных и внебюджетных студентов должно составить 1/1, к 2016 г. – 1/0,5 (на данный момент указанное соотношение не лимитировано).

Введём лингвистическую переменную X_2 = «*Законодательные изменения*», указав диапазон значений от 0 до 4 (единица измерения – действительное число, определяемое как отношение количества внебюджетных студентов к количеству бюджетных); шкалу качественных термов: «крайне неблагоприятные», «неблагоприятные», «благоприятные» и значения параметров соответственно: (0; 0; 1,2), (0,4; 1,3; 2,2), (1,7; 4; 4) (рис.2).

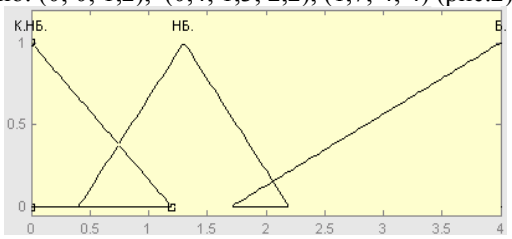


Рисунок 2 – Графическое представление лингвистической переменной «Законодательные изменения»

Существует большое количество экономических факторов, которые могут воздействовать на деятельность ВУЗа. К основным показателям, характеризующим уровень экономического развития страны, относят: темп роста ВВП, размер номинального ВВП, размер ВВП по паритету покупательной способности, темпы роста объёма промышленного производства, уровень инфляции, уровень безработицы, объем экспорта/импорта, государственный долг.

Оценка экономической составляющей позволяет выявить благоприятные возможности для стратегического развития ВУЗа, а также необходимость корректировки направления деятельности в зависимости от происходящих негативных изменений. Спад в экономике страны – это угроза недополучения дохода ВУЗом, как и любым предприятием на рынке. В связи с этим оценка влияния экономических факторов приобретают огромную значимость.

Мониторинг и анализ социально-экономического развития Российской Федерации и отдельных секторов экономики является основной задачей Министерства экономического развития России. Он включает в себя оценку текущей экономической ситуации, характеристику изменения факторов и тенденций развития, макроэкономический анализ структурной, энергетической, агропродовольственной, инвестиционной, инновационной, денежно-кредитной, бюджетной, тарифной, социальной и других аспектов государственной социально-экономической политики, а также результаты краткосрочного прогноза макроэкономики до конца текущего года [5]. Совокупность указанных факторов составляет экономических фон, напрямую влияющий на деятельность рыночных субъектов.

Оценка экономической ситуации в стране производится на основе многих показателей, это некий интегральный показатель. Он включает в себя уровень инфляции и динамику цен, динамику денежно- кредитных показателей, рынок труда и денежные доходы населения, тенденции реального сектора экономики, исполнение федерального бюджета и государственный долг, состояние финансового и банковского сектора, региональное развитие и внешнеторговую деятельность. По количественным параметрам указанных показателей экспертами может быть дана общая оценка экономической ситуации. Разработанная авторами модель позволяет спроектировать влияние волатильности экономических показателей на выбор стратегии поведения ВУЗа.

Лингвистическая переменная X_3 = «*Экономическая ситуация*» с терм-множеством {«крайне неблагоприятная», «неблагоприятная», «благоприятная»}, измеряемая по шкале [0;1], представлена в графическом виде на рис. 3.

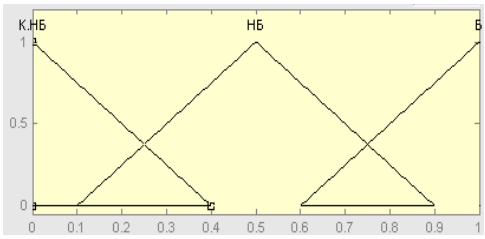


Рисунок 3 – Графическое представление лингвистической переменной «Экономическая ситуация»

Определяем выходную переменную. Лингвистическая переменная X = «*Влияние факторов внешней среды*» с терм-множеством {«неблагоприятное», «скорее благоприятное», «благоприятное»}, измеряемая по шкале [0;1], представлена в графическом виде на рис. 4.

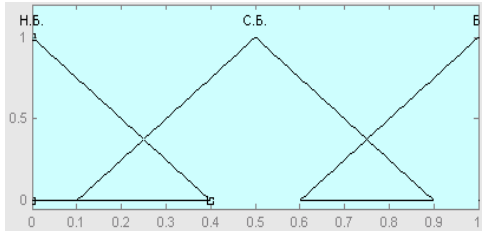


Рисунок 4 – Графическое представление лингвистической переменной «Влияние факторов внешней среды»

Модель количественной оценки влияния факторов внешней среды риска *R* представляет собою функцию следующего вида

$$\|X\| : X_1 \times X_2 \times X_3 \to [0;1],$$

где $X_1 \times X_2 \times X_3 = \{(x_1, x_2, x_3) | x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, x_3 \in X_3\}$; (x_1, x_2, x_3) – вектор факторов.

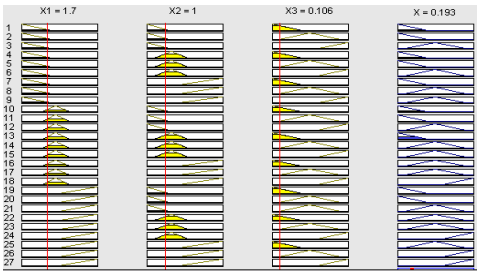
В качестве нечёткой базы знаний, являющихся носителем экспертной информации об оценке влияния факторов внешней среды, были сформулированы 27 логических правил, которые выражаются в виде пар посылок и заключений типа «ЕСЛИ …, ТО…». Элементы антецедентов нечётких правил связаны логической операцией И. Для иллюстрации укажем только несколько, оформив их в виде табл.1.

Таблица 1 – Несколько правил из нечёткой база знаний для моделирования системы оценки влияния факторов внешней среды

Антецеденты			Консеквент
Демографическая ситуация	*Законодательные изменения*	*Экономическая ситуация*	*Влияние факторов внешней среды*
Неблагоприятная	Крайне неблагоприятные	Неблагоприятная	Неблагоприятное
Скорее благоприятная	Неблагоприятные	Благоприятная	Скорее благоприятное
Благоприятная	Благоприятные	Благоприятная	Благоприятное

Компьютерная реализация модели

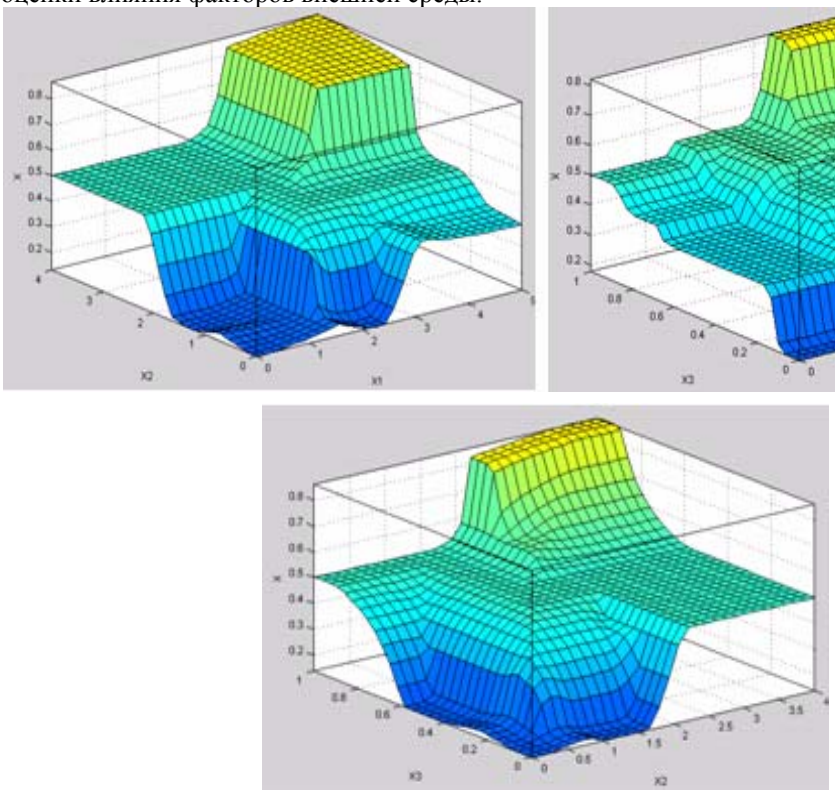
Компьютерная реализация модели была проведена в инструментальной среде *MatLab* с использованием пакета *Fuzzy Logic Toolbox* и интерактивного модуля *fuzzy*.



На рис.5 приведено окно средства просмотра правил вывода оценки влияния факторов внешней среды. Средство просмотра правил вывода используется в целях диагностики. Оно позволяет отобразить процесс нечёткого вывода и получить результат. Как видно из рис. 5, при входном векторе (1,7; 1; 0,106) результат составляет 0,193, что характеризует влияние факторов внешней среды как «неблагоприятное».

Рисунок 5 – Окно средства просмотра

Средство просмотра поверхности вывода генерирует и выводит карту поверхности решений. Это позволяет представить весь спектр сценариев. На рис. 6 приведены трёхмерные поверхности «входы-выход», соответствующие синтезированной нечётко-логической системе оценки влияния факторов внешней среды.



X – влияние факторов внешней среды;
X1 – демографическая ситуация;
X2 – законодательные изменения;
X3 – экономическая ситуация.

Рисунок 6 – Отображение зависимости выхода системы от входов

На рисунке 7 приведены кривые отклика блока формирования выходной переменной.

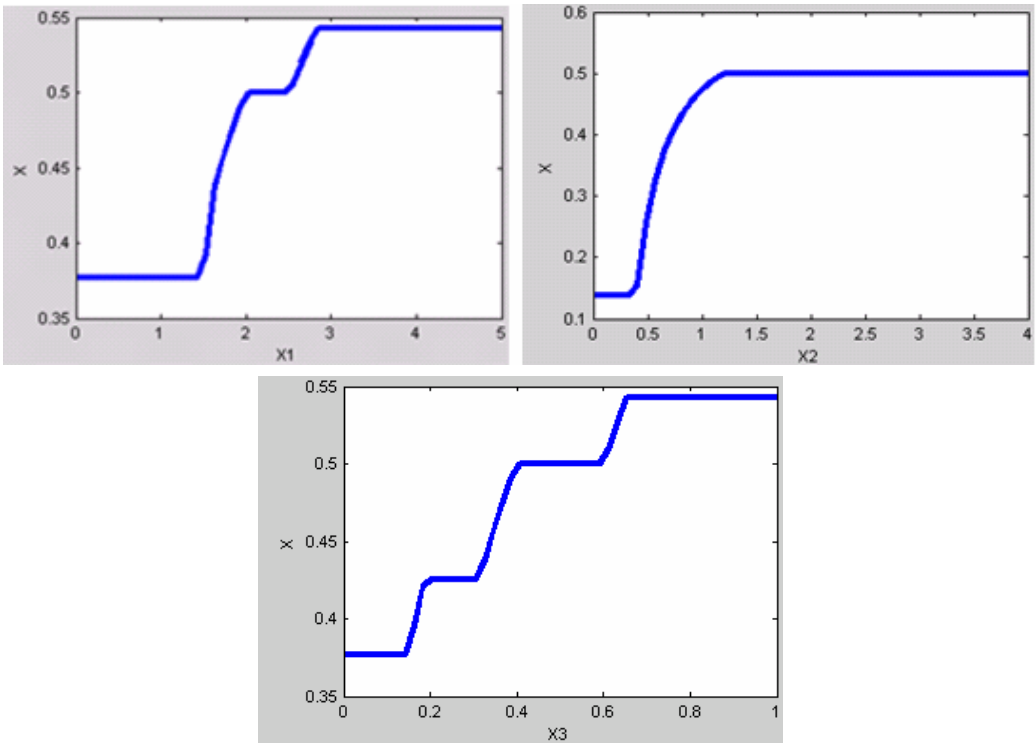


Рисунок 7 – Кривые отклика FIS-блока формирования переменной *X*

Заключение

Построенная система может быть использована в качестве универсального средства для определения оценки влияния факторов внешней среды на стратегию поведения ВУЗа на рынке образовательных услуг. С её помощью возможно прогнозирование величины внешнего воздействия на выбранную стратегию, что позволяет руководству ВУЗа принимать решения с определённым временно-пространственным опережением.

Список литературы

[1] Акутина А.Ю, Горемыкина Г.И., Мастяева. И.Н. Формирование стратегии поведения ВУЗа на рынке образовательных услуг // РИСК. 2015. №1.
[2] Горемыкина Г.И., Дмитриевская Н.А., Мастяева. И.Н. Экономико-математическое моделирование систем управления на основе нечёткой технологии. М.: МЭСИ. 2014. –139с.
[3] Пегат А. Нечёткое моделирование и управление / М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. –798с.
[4] Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: новый диалог человека с природой. М.: Прогресс, 1986. – 432с.
[5] http://economy.gov.ru/minec/main- сайт Министерства экономического развития Российской Федерации
[6] http://www.gks.ru/- сайт Федеральной службы государственной статистики.

ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ

А.В. Амеличкин[1], С.П. Ковалёв[2]

[1]ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН»
127055, г. Москва, Вадковский переулок, д. 3а, Россия
amelichkinalex@gmail.com
тел: +7 (499) 973-30-66

[2]Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, Россия
kovalyov@nm.ru
тел: +7 (495) 334-92-20

Ключевые слова: *модельно-ориентированная разработка, интеллектуальная энергетическая сеть, моделирование организационно-технических ситуаций, ArchiMate, UML*

Abstract
The technology of automating complex organizational-technical situations by means of rapid pass-through from situation models to software is presented. The technology is based on intensive use of model-based engineering (MDE) tools. Situation models are written in the ArchiMate language, automatically converted to architecture models in UML, and then into executable descriptions in SQL, WSDL, BPEL, HTML. The technology is intended for Smart Grid software development.

Введение

Развитие интеллектуальных энергетических сетей Smart Grid приводит к изменению роли и функций потребителя электроэнергии, в том числе в коммунальном секторе и в сфере обслуживания [1]. Современный потребитель стремится активно участвовать в процессах снабжения своего энергохозяйства: покупать электроэнергию в оптимальном объеме и по оптимальной стоимости, устанавливать и эксплуатировать собственные локальные источники электроэнергии, применять новейшие методы и средства энергосбережения, взаимодействовать с сетевыми и сбытовыми организациями в режиме онлайн. Возрастает сложность и интеллектуальность процессов управления в энергетике, центр принятия многих решений смещается от поставщика к потребителю. Чтобы обеспечить корректность решений и оперативность их принятия, необходимо предоставить потребителю доступ к интеллектуальной автоматизированной системе, выполняющей все технически сложные операции (расчеты объемов и стоимости потребленной электроэнергии, прогнозирование, многокритериальную оптимизацию, документооборот). Здесь традиционные технологии создания автоматизированных систем, предполагающие длительную проработку требований и последующую ручную программную реализацию, оказываются неэффективными ввиду высокой динамики развития интеллектуальной энергетики. Актуальность работы состоит в необходимости привлекать новые технологии быстрой эволюционной разработки систем, в частности на базе модельно-ориентированного подхода.

Модельно-ориентированный подход (Model-driven engineering, MDE) [2] объединяет в непрерывный высокоавтоматизированный процесс различные стадии разработки информационной системы: формирование требований, разработка архитектуры системы, программирование, тестирование. Также этот подход способствует координации работ различных групп раз-

работчиков, тем самым помогает выявлять ошибки на ранних стадиях разработки системы, уменьшать время исправления ошибок, тем самым сокращая общее время разработки продукта.

Целью работы является разработка модельно-ориентированной технологии сквозного высокоавтоматизированного прохода от типовых организационно-технических ситуаций до разнородных компонентов программного обеспечения (сервисов, баз данных, веб-страниц). На первом этапе строятся модели, которые должны быть понятны потребителям, не имеющим никаких специальных знаний ни в энергетике, ни в информационных технологиях. На следующем этапе эти модели преобразуются путем насыщения системной информацией, на основании которой возможно построение программной архитектуры. На завершающем этапе по моделям архитектуры генерируются машинно-читаемые описания программных составляющих, которые передаются на исполнение в сервисно-ориентированную системную среду. В результате создается веб-портал, на котором потребитель может контролировать затраты на электроэнергию, вести информационную модель своего энергохозяйства, решать оптимизационные задачи энергопотребления, взаимодействовать с энергоснабжающими организациями. Чтобы воплотить в жизнь этот метод, требуется найти или разработать конвертеры между инструментами, используемыми для моделирования и проектирования информационной системы.

1 Модельно-ориентированный подход

Модельно-ориентированный подход рассматривается как основной способ повышения скорости и качества создания сложных программных систем, поскольку он предлагает наиболее развитые по сравнению с другими подходами средства автоматизации процедур разработки программного обеспечения. Во главу угла подхода ставится создание и сопровождение модели архитектуры, а не исходного текста программы. Архитектура рассматривается как связующее звено между предметной областью задачи и средствами ее автоматизированного решения, ответственное за корректное отображение предметной семантической структуры на программно-техническую среду. При реализации такого отображения естественным образом применяется метапрограммирование, поскольку многие фрагменты программного обеспечения однозначно определяются моделью архитектуры и могут быть сгенерированы по ней автоматически.

Большинство технологий MDE базируется на языке объектно-ориентированного моделирования UML (Unified Modeling Language) [3] и его модификациях. В обоснование его выбора обычно приводится тот факт, что он стал де-факто безальтернативным стандартом для описания архитектуры программного обеспечения. Эта несомненное достоинство одновременно является и его главным ограничением: полноценная технология автоматизации должна обеспечивать не только формирование и анализ архитектуры, но и предварительный сбор исходных требований, и создание исполняемых программных компонентов. С одной стороны, для записи требований язык UML очень неудобен [4]: он требует искусственно приводить все разнообразие явлений предметной области к взаимодействию автономных объектов, разделять разные аспекты предметной области по разным диаграммам с существенно отличающимися нотациями, знать концепции и принципы программирования. С другой стороны, UML-модели не могут непосредственно исполняться в компьютере, поскольку они слишком слабо формализованы. В предлагаемой технологии для моделирования требований используется язык ArchiMate [4], а в качестве исполняемых используются языки реализации сервисно-ориентированной архитектуры (Service-Oriented Architecture) [5]. UML занимает достойное промежуточное положение, как показано на рисунке 1.

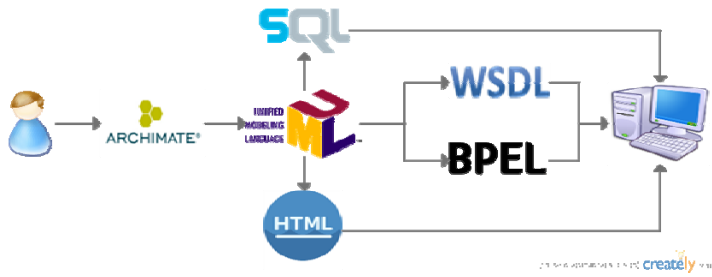


Рисунок 1 – Схема технологии

Краткий обзор языков и инструментов, включенных в состав технологии, представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Языки и инструменты

Язык	Вид модели	Инструмент
ArchiMate	Модель организационно-технической ситуации	Archi
UML	Архитектура системы	Enterprise Architect
SQL	Описание базы данных	Oracle
WSDL	Описание веб-сервисов	IBM WebSphere
BPEL	Описание бизнес-процессов	IBM WebSphere
HTML	Экранные формы	Nginx

Предполагается, что программная реализация алгоритмов, составляющих элементарные шаги автоматизации, уже существует либо создается отдельно в специализированных средах, таких как Matlab. Такая ситуация имеет место для многих предметных областей: накоплен большой массив разнообразных средств автоматизации частных задач, и основные затраты труда по созданию систем состоят в их интеграции в гармонично функционирующие комплексы.

2 Моделирование организационно-технических ситуаций

Объектом автоматизации в предлагаемой технологии является организационно-техническая ситуация – совокупность процессов, согласованно выполняемых множеством разнородных участников с применением аппаратного и программного обеспечения в целях достижения своих интересов. Поэтому в роли требований к автоматизируемой системе выступают модели организационно-технических ситуаций. Модель ситуации должна быть цельной – изображать на общем презентационном поле и участников, и их функции, и единицы информационного обмена, и средства автоматизации, и всевозможные отношения. Чтобы участники могли проверить состоятельность модели ситуации, модель должна быть понятна без специальных знаний в предметной области либо в информационных технологиях. Авторам настоящей работы известен только один язык моделирования, удовлетворяющий всем этим требованиям – язык ArchiMate. Именно он и был выбран в качестве входного языка. В качестве инструмента для составления ArchiMate-моделей был выбран редактор Archi с открытым исходным кодом, имеющий эргономичный дизайн и русскоязычный интерфейс [6].

Моделирование организационно-технических ситуаций показало себя адекватным подходом к сбору требований к программным системам интеллектуальной электроэнергетики. Первой ситуацией, на которой был апробирован подход, стал контроль учета электроэнергии для бытового потребителя. Эта ситуация предполагает применение существующих средств «интеллектуальных измерений» (Smart Metering), которые лежат в основе Smart Grid и являются востребованными в современных российских условиях. В этой ситуации действуют два участ-

ника: диспетчер энергосбытовой компании и потребитель электроэнергии. Чтобы инициировать ситуацию, потребитель вводит в систему данные о себе и информацию о приборах учета электроэнергии, которые он использует. Система передает данные нового потребителя диспетчеру, который проверяет корректность данных и регистрирует потребителя в системе. Для потребителя создается личный кабинет на портале системы, в котором он может проверить показания прибора учета электроэнергии в любой момент, построить диаграмму расхода электроэнергии за любой промежуток времени, а также подать диспетчеру жалобу на необоснованное начисление. В свою очередь, диспетчер отвечает на жалобы потребителей и контролирует корректность работы электроэнергетической инфраструктуры.

Фрагмент модели этой ситуации, нарисованный в редакторе Archi, показан на рисунке 2.

Рисунок 2 – Модель организационно-технической ситуации

3 Формирование архитектуры системы

Модель организационно-технической ситуации, сформированная в редакторе ArchiMate, выгружается в машино-читаемом формате и подается на вход генератору диаграмм UML. Генерируются основные диаграммы, из которых можно в дальнейшем получить исполняемые описания: диаграмма классов, диаграмма последовательностей, диаграмма размещения. Бизнес-актеры ArchiMate преобразуются в классы, бизнес-функции в методы, отношения в связи между классами. Для тонкой настройки поведения генератора элементы ArchiMate-модели снабжаются разнообразными аннотациями. Фрагмент диаграммы классов UML, порожденной ситуацией из раздела 2, приведен на рисунке 3.

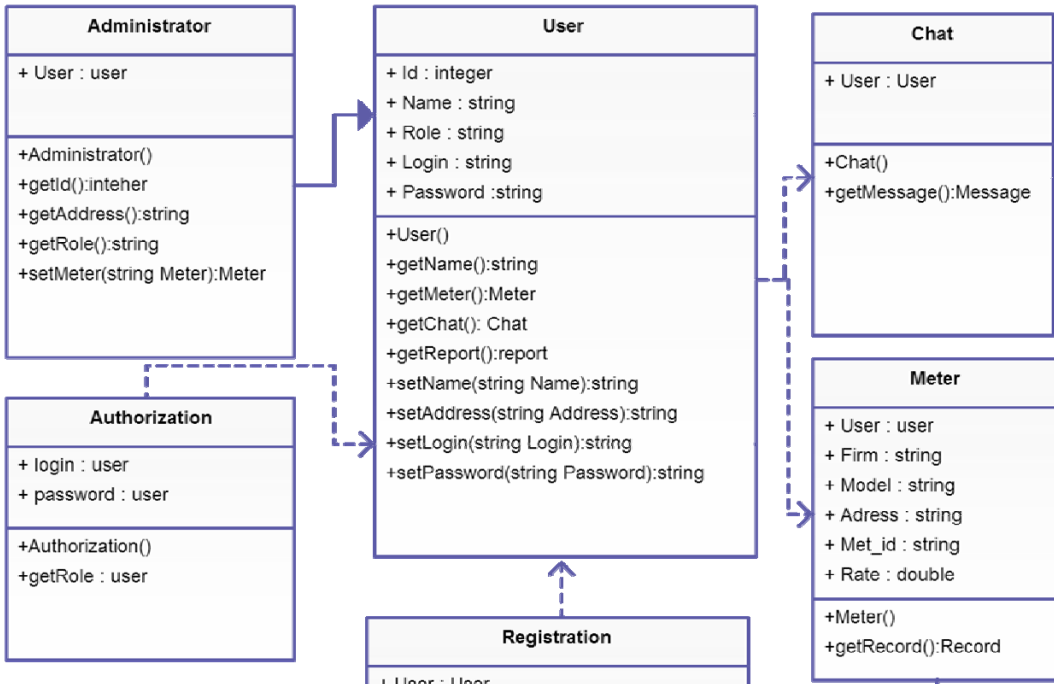


Рисунок 3 – Архитектура системы (фрагмент диаграммы классов)

4 Генерация исполняемых описаний

Когда модели архитектуры готовы, по ним генерируются машинно-читаемые описания программных составляющих, предназначенные для исполнения в соответствующих средах. Здесь можно применять готовые генераторы, как коммерческие (такие как мультиязычное CASE-средство Enterprise Architect, использованное нами), так и с открытым исходным кодом (такие как инструменты, созданные в рамках проекта Eclipse Modeling Project). Генераторы производят связующие компоненты, управляющие совместной работой приложений, интегрируемых в систему, в целях поддержки автоматизируемой организационно-технической ситуации.

Рассмотрим генерацию описаний каждого вида, указанного в таблице 1 выше.

4.1 Описание базы данных

Для организации хранения информации применяется реляционная СУБД Oracle, поэтому структура хранения данных записывается на языке SQL (Structured Query Language). Предложения языка SQL DDL (Data Definition Language), описывающие структуру таблиц и ссылочных связей, генерируются по диаграмме классов UML: классы, представляющие информационные единицы, преобразуются в таблицы, атрибуты преобразуются в колонки, отношения преобразуются во внешние ссылки. При необходимости в таблицы добавляются целочисленные первичные ключи, значения которых генерируются автоматически при вставлении записей.

4.2 Описание веб-сервисов

Программные единицы, автоматизирующие отдельные элементы организационно-технических ситуаций, представлены в системе веб-сервисами. Веб-сервисы исполняются в

среде IBM WebSphere. Для машино-читаемого описания интерфейсов веб-сервисов применяется язык WSDL (Web Services Description Language), основанный на XML. WSDL-описания сервисов генерируются по диаграмме классов UML: классы, представляющие элементы ситуаций, преобразуются в сервисы, а их методы преобразуются в методы вызова сервисов.

4.3 Описание бизнес-процессов

Процессы, составляющие автоматизируемые организационно-технические ситуации, выполняются в той же среде IBM WebSphere, в которую загружаются сервисы. Среда принимает на вход модели процессов, записанные на языке BPEL (Business Process Execution Language), основанном на XML. На языке BPEL процесс представляется набором актов передачи данных между сервисами, автоматизирующими отдельные шаги. Данные, передаваемые между сервисами, сохраняются в процессных переменных. Возможно как последовательная, так и параллельная организация процессов. Поддерживается асинхронная активизация шагов процессов по внешним событиям. Каждый BPEL-процесс со своим входом и выходом «снаружи» выглядит как сервис, поэтому возможна иерархическая организация сложных процессов. BPEL-описание процессов естественным образом генерируется по диаграммам классов и последовательности UML.

Графическое изображение фрагмента описания процессов, составляющих ситуацию из раздела 2, приведено на рисунке 4. Для наглядности здесь использована нотация BPMN (Business Process Management Notation), которая автоматически получается из BPEL. Верхний блок описывает действия потребителя, центральный блок представляет обмен информации между участниками ситуации, а нижний блок описывает действия диспетчера.

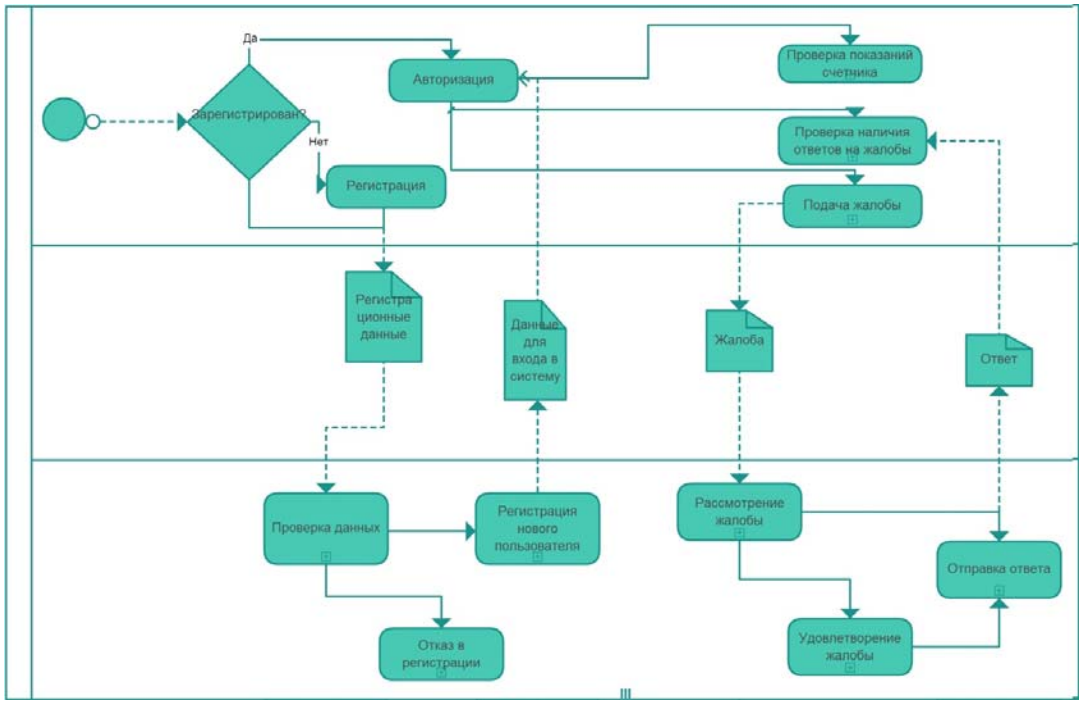


Рисунок 4 – Описание бизнес-процессов

4.4 Экранные формы

Взаимодействие системы с человеком происходит через стандартный веб-браузер, загружающий экранные формы на языке HTML (HyperText Markup Language). Формы ввода-вывода информации, возникающей по ходу развития организационно-технической ситуации, генерируются по диаграмме классов UML. Классы, представляющие человеко-машинное взаимодействие, преобразуются в формы HTML, а их атрибуты преобразуются в интерфейсные элементы форм. В целях обеспечения эргономики при генерации форм в них вставляются обращения к скриптам на языке Javascript, обеспечивающим визуальное оформление и анимацию.

Заключение

Модельно-ориентированный подход позволяет организовать быстрый сквозной высокоавтоматизированный проход от организационно-технических ситуаций до компонентов сервисно-ориентированного программного обеспечения. При этом для формирования требований, которые инициируют проход, не требуются специальные знания в информационных технологиях.

В настоящее время генераторы моделей находятся в стадии отладки. В дальнейшем предполагается апробировать их на широком наборе организационно-технических ситуаций, связанных с управлением энергопотреблением. Планируется подключить разнообразные программные средства интеллектуальной энергетики, в том числе разрабатываемые в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, в форме специализированных веб-сервисов.

В перспективе возможен переход к автоматизации других предметных областей, где деятельность состоит из сложных организационно-технических ситуаций с участием разнородных групп исполнителей. Примером такой области является землеустройство.

Список литературы

[1] Кобец Б., Волкова И. Smart Grid // Энергорынок. 2010. №3(75). С. 66–72.
[2] Schmidt D.C. Model-driven engineering // IEEE Computer. 2006. Vol. 39(2). P. 25–32.
[3] Леоненков А. Самоучитель UML. СПб.: БХВ-Петербург, 2002.
[4] Lankhorst M. et al. Enterprise Architecture at Work – Modelling, Communication and Analysis. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
[5] Rosen M., Lublinsky B., Smith K.T., Balcer M.J. Applied SOA: Service-Oriented Architecture and Design Strategies. N. Y.: Wiley and Sons, 2008.
[6] Левенчук А.И. Системноинженерное мышление. М.: TechInvestLab, 2015.

ЭВЕРГЕТИЧЕСКИЕ СТРАТЕГИИ И УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ СООБЩЕСТВ

М.Р. Арпентьева
Калужский государственный университет имени К.Э. Циолковского
248003, Калуга, ул. Разина, 26, Россия
mariam_rav@mail.ru
тел: +7 (8482) 578038

Ключевые слова: *эвергетика, управление, эвергетические стратегии, социальное развитие, идеология, социальная аномия, социальное служение, социальный каннибализм.*

Abstract
The article is devoted to the analysis of the three evergetics strateges in sciences searches and management of the community development. Develop regulations about based on postnonclassical scientific rationality evergetics from V.A. Vittikh, discuss evergetics strategies, it's differences in managing theory and practice.

Введение

Усложнение сообществ и процессов их развития, умножение разнообразия проблем управления этими сообществами и их развитие актуализируют необходимость разработки подходов, интегрирующих практическое многообразие этих проблем и разрабатывающих единые, теоретические модели и мета-модели, позволяющие не только оптимизировать способы управления, но и ответить на вопрос о том, что такое управление и какое именно управление необходимо для развития сообществ как примеров сложных, развивающихся систем. Одним из таких подходов является эвергетика В.А. Виттиха, являющаяся примером трансдисциплинарного и трансдискурсивного подхода к осмыслению сути и технологий управления, позволяющая выделить его стратегии, более или менее гармонично реализующие ценности и цели управления как компонента развития сообществ. Эти стратегии: эвергетические, псевдоэвергетические и антиэвергетические, различны и обладают разными возможностями в управлении развитием сообществ. Выделение и описание этих стратегий позволяет, развивая заложенные в базовом понятии, «эвергетика», представления об управлении, по-новому взглянуть на сущность, компоненты и процессы управления, дает возможность оптимизации как самого управления, а также - обучения управлению социальным развитием. Развитие теории эвергетики В.А. Виттиха как метатеоретического подхода к осмыслению управления сложными системами, направленного на осмысление сущности управления социумом и его развитием, внедрение этого подхода в практику управления сложными системами разных типов, по нашему мнению, может дать существенный толчок к развитию социальных отношений, реформированию систем управления ими, включая более или менее радикальное переосмысление представлений практиков и теоретиков об управлении и его роли в развитии сложных систем.

1 Общие понятия и подходы к изучению управления развитием сообществ

Феномен управления - один из трансдициплинарных и трансдискусивных объектов современных исследований, которое в контексте трансдисциплинарного и трансдискурсивного подхода, обрело свое новое название: эвергетика. Эвергетика возникла и развивается как попытка развернутой многоуровневой рефлексии сути управления, его ценностно-целевых основ, взаимосвязи теории и практики управления, из развития в исторической и диахронической перспективах. Рефлексия как основание трансдискурсивности и трансдисциплинарности

позволяет, особенно в изучении сложных феноменов, включая феномен управления – человеком, организацией, сообществом, - интегрировать имеющиеся модели и практики управления, сопоставляя их как феноменологически сходные стратегии управления или стратегии изучения управления [1; 2]. Концепция эвергетики развивается в работах В.А. Виттиха и его школы на пересечении теоретического осмысления процессов управления сложными системами и практического опыта внедрения принципов эвергетики в деятельность самых разных «примеров» этих сложных систем [2]. По его мнению, современное управление, теория управления сложными системами, обращено к осмыслению роли социальных коммуникаций в формировании, функционировании и развитии (инноватике) организаций и сообществ. Разделение функций управления, жесткая иерархия, вертикальность и моносубъектность коммуникаций традиционных организационных структур в современном, инновационно, интерсубъектном творчески ориентированном бизнесе и менеджменте, все больше заменяются социальным партнерством, консенсусом, горизонтальными коммуникациями, эвергетикой. Стратегия «изолированного руководства», изолированного и стоящего над людьми и организацией менеджера и стратегия соавторства – это, по сути, дискурсивный и трансдискурсивный методы осмысления происходящего в организации и сообществе. Трансдискурсивным является подход и/или управление, субъект которого находится в центре дискурса, обозначая круг проблем, которыми живет данный дискурс [1]. Осмысление теоретических и практических традиций, дисциплин, внутри которых, в свою очередь, могут или не могут разместиться другие, современные исследования и технологии управления, превращает обычное исследование в метааналитическое, рефлексивное или трансдискурсивное. Трансдискусивность неразрывно связанна с функциями рефлексии, управления и прогнозирования («форсайта»). Необходимость трансдискурсивного подхода в осмыслении феноменов управления - результат умножения его концепций и моделей, приводящая к необходимости построения нового, метааналитического уровня осмысления феноменов управления, их интеграции в единое поле. Основой такого поля может стать эвергетика, ее трансдискурсивный и трансдисциплинарный потенциал. В теории управления сложными системами В.А. Виттиха, сравниваются информационно-модернистская, рационалистическая модель общества и управления им и феноменологическая модель управления как эвергетики, ставится основной вопрос современного управления: дело не в том - как, а в том – для чего, ради чего – управлять [3], не в том, как повысить эффективность управления человеческими ресурсами и общественным развитием, а в том, каковы цели управления как такового. Эта попытка осмыслить глубинную суть управления, в отличие от традиционных попыток исследования его феноменов, выгодно отличает эвергетику в ряду классических и даже современных управленческих теорий и моделей, позволяя ответить на вопрос: чем отличается плохое управление от хорошего или, точнее, в каких случаях можно говорить об управлении, а в каких – о его попытках, имитации. Субъект, осознающий себя «внутри» проблемной ситуации и выполняющий в рамках ситуации и жизнедеятельности в целом те или иные функции, продуцирует смысл ситуации, в том числе с учетом «смыслообразующей» деятельности иных субъектов, находящихся в этой ситуации и коммуницирующих с ним по поводу нее. Участники ситуации придают смыслы и ценностный статус фрагментам (объектам и процессам) ситуации. Они сознают проблемность ситуации, обсуждают ее друг с другом, в поиске форм управления ситуацией вступая в диалог, выстраивая в процессе переговоров приоритетные направления и определяя цели, критерии эффективности успешности.

Феноменологический подход к исследованию процессов управления организациями обращает внимание на связи собственно «целевой рациональности» с «рациональностями» и «иррациональностями» ценностно-смысловыми. Поэтому мы полагаем необходимым выделить в управлении государством, организацией, человеком эвергетические стратегии – способы управления, опирающиеся на социальные идеологии как системы ценностно-смысловых представлении субъектов о социальном мире и его компонентах. Параллельно, можно выделить разные дискурсивные стратегии изучения управления как 1) манипулирования «хозяи-

ном» своими «рабами» - превращения субъектов производства в «объекты», 2) руководства «человеческими ресурсами», чей «человеческий капитал» составляют, прежде всего, профессиональные и связанные с ним ресурсы, а социальный капитал – «облегчает, «фасилитирует» производственные процессы, 3) полилогического сотворчества, социального партнерства, взаимопомощи и взаимообучения, в процессе которого реализуется и развивается, накапливается и воспроизводится человеческий и социальный капитал: общество.

2 Основные проблемы исследования управление развитием сообществ и эвергетические стратегии

Как отмечал Р.Л. Акофф [4] классическое представление об однородности, гомогенности общества как функционирующего по определенным правилам, не учитывающие «наложения» и взаимодействия вертикальных и горизонтальных коммуникаций, особенностей их ценностно-целевого и смыслового содержания в организациях разных типов и уровней развития (например, традиционных и инновационных, ориентированных на воспроизводство, репродукцию и на творчество и сотворчество), как относительно простого феномена, используемое в классическом, традиционном менеджменте, представляет людей обезличенными: «человек вообще» или «плоский человек» (*a* man) допускает возможность взглянуть на него «со стороны», в том числе - со стороны общества или государства, со стороны менеджера как «хозяина положения», который редуцирует социальные связи, организационные мосты и даже семейные «узы» к предписанным им (субъектом) устойчивым правилам, опирающимся на соответствующие идеологии (например, иерархическим, отчужденным, ролевым отношениям между «начальниками» и «подчинёнными»).

Таблица 1 - Компоненты социального развития

Социальный капитал	Человеческий капитал	Социальное развитие	Особенности управления
Социальные связи	Становление партнером	Развитие общества и ценностно-смыслового аспекта отношений	Управление по целям и ценностям, эвергетика
Организационные мосты	Становление профессионалом	Развитие организаций и технологического аспекта отношений	Коммуникативные технологии управления
Семейные узы	Становление личностью	Развитие человека и содержательного аспекта отношений	Инновации и творчество субъектов

С точки зрения гомогенной модели общества человек — «винтик», «раб», функция коллективного производства. Само общество и организация состоят в отношениях «потребления», обратные связи между ними сведены к функционально необходимому минимуму. Иначе – в феноменологических, эвергетических моделях социальной сложности, общества как системы, основанной на принципах многостороннего и многоуровневого социального партнерства. В этой системе социальные связи, организационные мосты и семейный узы людей – компоненты социального капитала, который может отличаться по своему качеству, но в целом служат развитию людей, организаций, общества (Таблица 1). Общество как сложная, гетерогенная развивающаяся система, каждый человек - с его субъективными представлениями о мире (*the* man) – осмысляет себя в диалоге с другими, само общество - «калейдоскоп ситуаций». Интерсубъективность сознания и жизнедеятельности побуждает людей коммуницировать, совместно искать выход из сложившейся ситуации, создавая «интеграционную платформу» знаний, умений, идеологий, используемых для принятия управленческих и эвергетических решений. Лоурархия как социальное партнерство, социальное служение, взаимопомощь, дает возможность сохранять гибкость и выживаемость обществу и организации [4]. Т.о., организация перестает игнорировать общество, но, напротив включает его в свою жизнедеятельность как партнера:

начиная с типичного для классической модели этапа «потребления» до технологий «краудфорсайта», участия разработке и производстве потребляемого обществом организационного «продукта». Т.о., гомогенная модель общества изначально служит превращению людей в «однородную массу», это - псевдоэвергетическая стратегия классического рационализма, часто маскирующаяся «многообразием» постмодерна. Истинно гетерогенное представление об обществе, обращенное на конкретных индивидов и групп, являющихся одновременно и субъектами, и объектами управления, учитывает их ценностно-смысловые ориентиры и в процессах принятия решений об урегулировании и развитии проблемной ситуации (Таблица 2).

Таблица 2 - Модели общества и эвергетические стратегии

Модели	**Классическая, рационалистическая модель (развития) общества**	**Неклассическая модель (развития) общества**	**Постнеклассическая модель (развития) общества**
Общество	Рациональность, гомогенность, универсальность, однотипность, простота, отношения хозяев и рабов, «человеческий материал», «рабочая сила»	Иррациональность, внешняя гетерогенность, хаотичность, разнотипность, сложность, отчужденность, человеческие «ресурсы», «человеческий фактор»	Гармоничность, гетерогенность, мультистратегичность, сложность, социальное партнерство, социальный и человеческий капитал
Тип управления	Антиуправление, псевдоценностии псевдотехнологии управления, достижение собственных целей за счет организации (общества)	Рамочное или делегирующее управление «по ситуации», псевдоуправление, отказ от управления, технологии, замещающие управление	Партисипативное, «управление по целям» ценностно-целевое, сотрудничество и взаимопомощь в развитии как ведущая технология управления
Стратегии эвергетики	Социальный каннибализм и взаимное потребление, репрессии и принудительная редистрибуция	Социальная аномия и отчуждение, имитации отношений и дикий рынок	Социальное служение и взаимопомощь, дарообмен и милосердие
Тип коммуникации	Фатическая коммуникация, игнорирование мира как «среды» существования субъекта управления (потребления), вертикальные обезличенные коммуникации	Монолог субъекта управления, вертикальные коммуникации субъектны, горизонтальные коммуникации обезличены и пресекаются	Полилог, многоуровневая и многоаспектная коммуникация субъектов с собой и миром, вертикальные и горизонтальные коммуникации субъектны

Постнеклассическая рациональность учитывает «соотнесённость получаемых знаний об объекте не только с особенностью средств и операций деятельности, но и с ценностно–целевыми структурами», отражается в эвергетике, ее теории интерсубъективного управления, управления « человеком культуры» «человека культуры», их сотворчества культуры и, в том числе, идеологии общества. Этим она отличается от вынужденного работать на общество «экономического человека» в классической рациональной теории управления. Эвергетика как наука об организации процессов управления в развивающемся обществе. Каждый человек и каждая группа этого общества заинтересованы в преумножении культурного наследия, включая увеличение доли управленческих решений, направленных на благо с помощью благих действий: опирающихся на идеологию социального служения, взаимопомощи и партнерства.

К.Поланьи, ставивший целью «поиск «третьего пути», создание теоретической основы идеального общественного устройства, где человек является главной ценностью», исходил из того, что люди коммуницируют на основе принципов: дарообмена (то есть взаимности, реципрокности), централизованного перераспределения (отчужденной редистрибуции) и рынка (аномичного обмена). Рыночные отношения предполагают более или менее взаимную кальку-

ляцию выгод и издержек, обмен дарами осуществляется свободно, без гарантий и требований возмещения затрат. Однако, рыночная система разрушает в первую очередь именно признаки культуры, ведя к дестабилизации способствуя нестабильности общества и более или менее явно выраженному централизованному перераспределению бюрократией и криптократией.

В мире «ситуативных» знаний, «дигитальной нравственности» и «технического родства», выстроившего в «плюрализме» социальной аномии, общество потребления или социального каннибализма, личность с рождения усваивает идеологию обмана и подавления, в моделях «сайентифицированной» и «мифологизированной» «массовой культуры» стран, забывших о необходимости уважительного отношения к сакральным и нравственным ценностям, субъект и сообщество приучается к фамильярно-потребительскому отношению к себе и миру. Поэтому, вопреки исследованиям в парадигме социального и человеческого капитала, отражающим интерсубъектность управления, его эвергетичность, показывающих, что наиболее прибыльным является вложение в развитие людей и общества, а не в их уничтожение, мальтузианская модель «ножниц» продолжает настаивать на важности глобализации, мондиализации и дистрибуции ресурсов и прав, включая право на жизнь. В эпоху «постмодерна» сражение идеологий вырастает в сражение людей и сообществ, которые, «оттолкнувшись» от идей социального равенства, человечности, совершенства, гуманности, приходят к идеям социального использования, потребления и - поднятому из глубин иррациональных страхов смерти, бессмысленности и бессилия, – неофашизму, называемому теми, кто полагает себя управляющими «квалифицированным потреблением», и теми, кто с таким управлением «несогласен» - «социальным каннибализмом» [6].

По мере все продолжающегося на фоне десакрализации и отказа от развития распада (коллапса) государств и цивилизаций как сложных систем, формируются «внутренний пролетариат», создающий «всеобщую церковь» как идеологию, обслуживающую «всеобщее государство», а также «внешний пролетариат», создающий «стаю варварских военизированных банд». Автономные субъекты, отказывающиеся играть в «управление», «потребление» и «защищенность», как правило, включенные в число подлежащих более или менее активному уничтожению «больных, преступников и оппонентов», в период наиболее активного социального распада трансцендентируют в поисках новых решений, приводят к рождению новой идеологии или «церкви», вокруг которого может организоваться последующая цивилизация [7; 8]. В последнее время на такую идеологию претендует идеология социального служения и социального партнерства, которая обеспечивает, кроме прочего, социально-политическую мобильность и лояльность общества и правящей «элиты» и которая в полной мере отражена в концепции В.А. Виттиха и его понимании управления как эвергетики. Целью рационалистических, прагматических моделей в классических исследованиях и исследованиях модерна, как явно демонстрируют работы «мальтузианцев», является достижение такого уровня руководства (разработка таких его технологий), которые позволяли бы достигать 100% успешности и результативности управления. Эти технологии – манипуляции - обществом и его членами – направленные на формирование единообразных, предсказуемых, лишенных попыток осмысления реакций людей-рабов, предполагают, по сути, уничтожение противников рабства и противником уничтожения противников рабства – геноцида. Они ориентированы на уничтожение противников разрушения прочных нравственных ценностей (духовно-нравственное разложение, отчуждение и дезориентацию населения), основанных на них социальных связей, организационных мостов и семейных уз, создание препятствий, доверия и взаимопомощи, в том числе - средствами пропаганды примитивизма, вседозволенности и «квалифицированного» потребления, создание препятствий развитию человека как личности, профессионала и партнера [9]. Социальный каннибализм включает также отказ от технологического прогресса и инноваций или их ограничение, связанное с контролем процессов развития и предотвращением «несанкционированных» управляющим форм реагирования: совершая выбор между рабом и роботом, своим комфортом и выживанием и выживанием и развитием других людей, общества, представители власти однозначно выбирают свой комфорт и успех, в том числе - ценой свободы, успеха и самой жизни рабов. Нарастающее замалчивание (the spiral of silence) репрессивно-карательной сути общества «всеобщего потребления» и торжество «культуры симулякров» - следующая стадия коллапса, стадия «точки невозврата»: интерсубективность сворачивается, управление полностью теряет нравственный эвергетический потенциал, ему на смену приходят псевдоэвергетические стратегии - аномии и рынка, и антиэвергетические стратегии - кан-

нибализма и редистрибуии. Спираль молчания также может быть преодолена только высокообразованными или более-менее состоятельными людьми, а также менее состоятельными, но также «бесцеремонными», то есть трансцедентирующими индивидами, не боящимися изоляции, неуспеха и неопределенности, которые могут и способны настаивать на истинных ценностях, реальности и необходимости развития, вне зависимости от доминирующего общественного мнения, десакрализующего отношения и оплощающего человека, которые готовы и стремятся к восстановлению социальной коммуникации как ценностно-смыслового обмена в контексте социально и личностно значимой деятельности, реализующей интенции общественного развития в кризисных и повседневных ситуациях [8].

Заключение

Таким образом, одно из наиболее важных измерений исследований развития управления в рамках общества, организации и жизни человека связано с выбором между:

1) социальным служением, альтруизмом, помощью другим людям, служению обществу в целях его совершенствования и гармонизации, эвергетической стратегией социального участия и партнерства, взаимопомощи и благодарения в лоурархическом, глубинно демократическом сообществе, развивающемся по принципа интерсубъектного, инновационного управления и со-управления, полилога;
2) социальной аномией и равнодушным «присутствием» в обществе как реальности, не требующей и не нуждающейся в развитии и преобразовании, анархическом и псевдодемократическом сообществе рынка и бюрократии, псведоэвергетической стратегией, сворачивающих диалогичность, интерсубъектность управления к нормам подчинения и исполнения, купли и продажи власти и привилегий;
3) социальным каннибализмом, связанным с потребительской ориентацией в отношении общества и его членов, нацеленностью на получение бесконечных персональных выгод, «голодные игры» с соперниками и подавление слабых, антиэвергетической статегией мондиалистической редистрибуции, криптократическом стилю «управления» «хозяев» «рабами»- неорабовладельческом обществе, не нуждающемся в коммуникации как таковой: управляемые не представляют собой живых людей, они – рабы, лишенные самого права - говорить. Совершая этот выбор, человек и общество, организация в большей или меньшей степени осознают, что последствия данного выбора окажутся решающими для их жизни.

Деформации идеологий и обслуживающих их научных «дискурсов» управления и социального развития в современном мире приводят, таким образом, к разной мере манипулятивно ограниченному выбору: 1) идеология социального служения и концепции эвергетики – рассматривают процессы управления, описывают подлинно эвергетические его стратегии; 2) псевдоэвергетические стратегии и модели управления связаны с социальной аномией и «рыночными» моделями управления, разрушением ценностей и деидеологизацией управления, его «технологизацией» - сведению теории управления к поиску технологий; 3) антиэвергетическая и, по сути, антиуправленческая стратегия – социальный каннибализм, отражает традиционные модели управления, типа «хозяин» - «раб», опираясь на античеловеческую и атиобщественную идеологию потребления, в которой развитие общества - лишь артефакт или «побочны» результат управления. Подводя итог, подчеркнем, что концепция эвергетики В.А. Виттиха, при внешней очевидности вопроса о ценностях и целях управления, обладает огромным потенциалом, связанным с ревизией традиционных и современных моделей управления, самого понятия управление. Вводя в научное исследование представление о тесной связи ценностей и целей управления с его сущностными характеристиками, В.А. Виттих формулирует новый поворот в в осмыслении управления как такового. Этот поворот, интегрирующее концепции и модели, парадигмы изучения управления в единую, трансдициплинарную и трансдискурсивную модель, - значим и теоретически, и практически: не имеет смысла говорить о механизмах управления, об эффективности и продуктивности управления, его тем более – управления развитием, - там, где не определена сама суть управления, не отрефлексированы его образующие - процессы и компоненты. В эвергетике как «постнеклассической науке о процессах управления в обществе», которая исходит из «суперпозиции» субъекта и объекта управления, «неоднородности» сообществ и акторов, выступающих и как исследователи, и как субъекты,

участвующие в принятии решений. Исследующий управление, при этом, согласно В.А. Виттиху, также является актором, «утрачивая привилегированную позицию абсолютного наблюдателя и выступая лишь как участник социальной жизни наравне с другими» [10]. Субъект и творит, и познает мир: актор находится «внутри» объекта (общества) и коммуницирует с другими акторами в общей для них проблемной жизненной ситуации [11; 12]. В стремлении найти выход, решение проблемы акторы вырабатывают соглашения как интерсубъективные знания, систематизируют их для принятия коллегиального решения. В традиционной модели «вынесение человека «за скобки» не позволяет использовать его индивидуальные возможности в процессах управления», они просто игнорируются . При этом «человеческий» или «субъективный» фактор отражает «помехи» и «трудности» управления. Поиск смысла ситуации ее участниками – всего лишь артефакт, а не центральный аспект управления. Однако, понимание смысла раскрывает и путь изменений, управления.

Список литературы

[1] Арпентьева М.Р. Взаимопонимание как феномен межличностных отношений. – Калуга: КГУ им. К.Э. Циолковского, 2015. - 620с.

[2] Рефлексивный подход: от методологии к практике / Под ред. В.Е. Лепского – М. «Когито-Центр», 2009. — 447с.

[3] Виттих В.А. Проблемы эвергетики. - Проблемы управления, № 4, 2014, с.69 – 71.

[4] Акофф Л.Р. За пределами социализма и капитализма // Проблемы управления в социальных системах. Т.1, в. 1. – М.: Наука, 2009. С.112 – 140.

[5] Розинская Н.А., Латов Ю.В. Введение // «Великая трансформация» Карла Поланьи / Под ред. Р.М. Нуреева. – М.: ВШЭ, 2007. - С.11 – 21.

[6] Мазурова Л. Потребитель нынче в дефиците? // Литературная газета. – 2008. – №32, 8 августа.

[7] Де Токвиль А. Демократия в Америке. — М.: Прогресс, 1992. - 554с.

[8] Noelle-Neumann E. The theory of public opinion // Communication Yearbook / J. A. Anderson (Ed.) – Newb. Park: Sage, 1991. – V. 14. P. 256-287.

[9] Даллес А. ЦРУ против КГБ. М.: Центр-полиграф, 2000. – 420с.

[10] Виттих В.А. Ситуационное управление с позиций постнеклассической науки // Онтология проектирования, №2 (4), 2012. – С. 7-15.

[11] Vittikh V.A. Heterogeneous Actor and Everyday Life as Key Concepts of Evergetics. Group Decision and Negotiation // Режим доступа: http://link.springer.com/article/http://link.springer.com/article/10.1007/s10726-014-9423-5/fulltext.html. Published online: 29 November 2014. Дата обращения 10.05.2015.

[12] Vittikh V.A. Introduction in the theory of intersubjective management. Group Decision and Negotiation, V. 24, issue 1, January 2015, p. 67-95 // Springer, Netherlands, 2014. Режим доступа: http:// link.springer.com/article/10. 1007/s10726-014-9380-z/fulltext. html. Дата обращения 10.05.2015

ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ В ОБЩЕСТВЕ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ ДОМИНАНТЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Н.М. Боргест

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)
443086, Самара, Московское шоссе, 34, Россия
borgest@yandex.ru
тел: +7 (846) 267-46-47

Ключевые слова: *онтологические доминатны, приращение, эволюция, эвергетика, мультиагентные технологии, онтология проектирования*

Abstract
This article attempts to explain the processes taking place in society, deeds and actions of its members from the standpoint of their intrinsic properties evolution of dominance. General formula of capital is treated as a special case of strategic development and expansion of living matter. The problem of implementing universal "boon" from Plato to modern concepts, focused on the use of information technology, is discussed.

«…Хочу быть владычицей морскою,
Чтобы жить мне в Окияне-море,
Чтоб служила мне рыбка золотая
И была б у меня на посылках».
А.С. Пушкин. Сказка о рыбаке и рыбке

«Я не доверяю всем систематикам и сторонюсь их.
Воля к системе есть недостаток честности».
Ф. Ницше. Сумерки идолов

Введение

Исследования процессов управления в обществе продолжаются и не поспевают за всё возрастающей сложностью [1, 2]. Новая волна благостных теорий, в том числе и благодаря усилиям профессора В.А. Виттиха [3, 4], возвращает нас к истокам древнегреческих воззрений Платона, различных философских теорий и утопий общественного развития [5-8]. При этом бурное развитие информационных технологий предлагает спектр управленческих решений, способствующих решению локальных задач [1, 4, 9-11].

Что же является или может являться онтологическими доминантами в процессе развития общества и теми попытками его управления, которые осуществляют стоящие у руля властной, управленческой вертикали? Как можно использовать эти выявленные сущности в качестве управляющих воздействий? Каковы стратегические цели в управлении и моделируемом развитии и как формализовать локальные критерии, оценивающие управляющий эффект? Эти и другие вопросы волнуют автора, и он пытается найти ответы на некоторые из них, выявить аналогии, способствующие поиску решений, или, напротив, углубить проблему, расширить спектр нерешённых задач, выявить противоречия для созидательной дискуссии.

Представленная работа носит постановочный, проблемный характер и нацелена на развёртывание научной дискуссии, предложенной В.А. Виттихом в своих продолжающихся публикациях об *эвергетике* [12].

Гениальные строки русского поэта, приведённые в эпиграфе, помогли автору кратко сформулировать то, что после А.С. Пушкина вознёс в главный жизненный тезис Ф. Ницше, говоря о «воли к власти» [13] и «стремлении к новой собственности» [14] и отвергавший при этом важный для науки принцип системности. В этом Ф. Ницше был не одинок. Прутковское «нельзя объять необъятное» солидаризуется с ним. Но вопреки этому мы устремляем «ум, алчущий познаний», в бездну будущего разума [15], желая отыскать «философский камень». И конференция ПУМСС нам в помощь!

1 Главный инстинкт

В психологии принято ранжировать человеческие потребности, чаще всего представляя их в виде пирамиды. Нижняя ступень – физиологические потребности, верхняя – духовные. Абрахам Маслоу делил потребности по последовательности их удовлетворения, когда потребности высшего уровня возникают после удовлетворения потребностей уровнем ниже. Известная иерархия человеческих потребностей по А. Маслоу включает [16]: физиологию, безопасность, любовь, уважение, познание, эстетику, самоактуализацию. Причем вторую половину в общем случае называют потребностью в самовыражении или в личностном росте. Фактически данная иерархия потребностей «расставляет» все известные биологические особи по ступеням их развития, от низших форм до высшей субстанции, тем самым указывая вектор их развития.

Потребность всегда выступает как движитель развития. «Природа не любит пустоты», поэтому она заложила или «вшила» в модель биологических существ потребность - внутреннее состояние психологического или функционального ощущения недостаточности чего-либо, которое проявляется в зависимости от ситуационных факторов [17].

Анализируя сущность мирового процесса в своей философии бессознательного Э. Гартман, солидаризируясь с Шеллингом в том, что «воля сама в себе есть потенция», писал: «…хотение есть акт, в основании которого лежит потенция, и что эту потенцию, это могущее-хотеть, о котором мы не знаем ничего, кроме того, что оно может хотеть, мы называем волею – это, по крайней мере, можно счесть общепризнанным» [8].

По своему трактуя Ф. Ницше, его логические цепочки от пессимизма, нигилизма, отсутствия смысла и цели к доминанте власти [13], можно предложить упрощенную схему реализации потребностей как развитие вида, расширение, захват, подчинение, подавление, стремление к обладанию новыми ресурсами. Т.е. главный инстинкт или потребность выражается в стремлении к *приращению*, к расширению сферы своего влияния в любом доступном направлении. Причём в «зачёт» осознано и не осознано идёт всё. И формальное (карьера, награды, деньги), и неформальное (социальная и личностная оценки) превосходство, как в деле (бизнесе, науке, искусстве, спорте…), так и в социуме (семье, школе, обществе). Реализация доминирования происходит с учётом возможностей среды, в естественной борьбе за выживание как в случае естественного отбора для живых существ, так и в случае «искусственного» отбора свойств и параметров создаваемых артефактов, принятия решений при управлении в обществе и создаваемых социотехнических систем.

В этом контексте можно рассматривать пирамиду А. Маслоу как вектор развития и реализации потребностей как для живых существ (конкретного человека, организуемых им сообществ), так и для планируемых свойств и параметров артефактов. Когда удовлетворяются потребности низшего уровня, человек не фокусируется на них и не ставит целью своей деятельности удовлетворение физиологических потребностей (они технологически решены). Можно говорить не только о сходстве принципов естественного отбора для биологического интеллек-

та и метода проб и ошибок для искусственного интеллекта [18], но и о сходстве в иерархии целей, реализуемой как в управлении, так и при проектировании.

Разрабатываемые модели интеллектуальных агентов - агентов, имеющих «внутренние» цели и установки и взаимодействующих с изменяющейся средой, а также мультиагентное планирование - стремятся адекватно отражать процессы, происходящие в живой природе, перенося реализацию этих технологий на проектирование сложных систем и их функционирование [4]. Ключевым моментом в мультиагентных решениях, по мнению автора, является наличие онтологической доминанты *приращения*.

2 Футуродизайн

Наглядным и близким по содержанию примером предметной области, где рассматриваются *онтологические доминанты,* является футуродизайн, [19-21]. Футуродизайн (от англ. future design — дизайн будущего) — проектная методология, превентивно разрабатывающая концепции дизайна, адекватные смыслам будущего. В рамках футуродизайна проектирование решений является превентивным, то есть оно предназначено не для немедленного внедрения, а намечает перспективные идеи и направления в дизайне, призванные дать образы решений для продуктов, технологий и в целом среды обитания, ожидаемых в будущем.

Футуродизайн, ориентированный на общечеловеческие ценности, может активно содействовать социальному прогнозированию. Прогнозирование в социальной сфере находится во взаимосвязи с планированием, программированием, проектированием и управлением. В отличие от технического прогнозирования футуродизайн даёт образное представление о желаемой вещи (системе, предметной среде), предлагая не способ технического решения проблем, а идею, как задачу, которую наука и техника призваны реализовать в перспективе [20].

Представленные на сайте Виртуальной лаборатории [21] онтологические доминанты футуродизайна вряд ли являются таковыми в силу их банальной избыточности. Скорее всего это лишь перечень тем, факторов и понятий, которые исследуются в футуродизайне (аутопоэзис, толерантность, сетевая топология, стратегия…). Рассматривая свойства стратегии, футуродизайн рекомендует исходить из посыла: «Будущее как причина настоящего» и требует открывать аксиологические (ценностные) перспективы, гарантируя *приращение* новых смыслов.

Примером такого приращения новых смыслов может служить и «стремление общества ко всему новому и невиданному. Смешение технологий и искусственное подстёгивание потребительских прихотей породило модернизацию и устаревание. Есть три типа устаревания: технологическое (открывает новый или более элегантный способ делать вещи), материальное (вещь изнашивается) и искусственное (вещь заранее обречена на преждевременную смерть)» [22].

Фундаментальным вопросом футуродизайна являются социокультурные последствия технологических преобразований. Соответствующие императивы задают необходимость поиска оптимальных социотехнических проектов в зоне семантического прорыва, качественного *приращения* смыслов именно в точке пересечения «традиция – новация» Тем самым реализуется функция проектирования как формы познания, акцент в котором придается поиску динамической устойчивости семантически замкнутой социокультурной системы [21].

3 Флюксий исчисление или формализация приращений

Метод флюксий или флюксий исчисление, предложенное И. Ньютоном[1] при определении скорости движения, позволил не только формализовать решение задачи, определить основные понятия производной (флюксия) и неопределённого интеграла как первообразной (флюента), но заложить основы дифференциального и интегрального исчисления. Как верно подметил Ф. Энгельс: «Лишь дифференциальное исчисление даёт естествознанию возможность изобра-

[1] http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/ Дифференциальное

жать математически не только состояния, но и процессы: движение» [23]. Именно на важнейших понятиях математического анализа «приращение функции» и «приращение аргумента» базируются не только разделы математики, но и решаются многие прикладные задачи.

Математическая абстракция позволяет широко трактовать суть переменных и функций, рассматривая их как некий результат производимых действий или происходящих изменений с оценкой этого произведенного результата. Кажущиеся тривиальными на сегодняшней день формулировки приращений выглядят так.

Допустим, x – некоторая произвольная точка (или измеряемое состояние системы), которая лежит в какой-либо окрестности точки x0 (исходное состояние системы). Приращением аргумента в точке x0 называется разность x-x0 и обозначается Δx, т.е. Δx=x-x0. Откуда следует: x = x0+Δx, т.е. начальное значение независимой переменной x0, получило *приращение* Δx.

Если мы изменяем аргумент, то и значение функции тоже будет изменяться: f(x) – f(x0) = f(x0 + Δx) – f(x0). *Приращением* функции f в точке x0, соответствующим приращению Δx называется разность f(x0 + Δx) – f(x0) и обозначается Δf. Таким образом: Δf= f(x0 +Δx) – f(x0).

Именно эти на первый взгляд простые записи позволили классикам диалектики увидеть глубокие содержательные обобщения в окружающем бытии, дать в руки исследователей инструмент онтологического анализа.

4 Фокус-покус Маркса или онтология мультиагентных технологий

Всеобщая формула капитала К. Маркса, известная как Д — Т — Д', гласит: «Купить, чтобы продать дороже представляет на первый взгляд форму, свойственную лишь купеческому капиталу. Но и промышленный капитал есть деньги, которые превращаются в товар и потом путём продажи товара обратно превращаются в большее количество денег… В капитале, приносящем проценты, обращение Д — Т — Д' представлено в сокращённом виде, в своём, так сказать, лапидарном стиле, как Д — Д', как деньги, которые равны большему количеству денег, как стоимость, которая больше самой себя» [5]. Заслуга К.Маркса как онтолога в том, что в броуновском движении товарно-денежных оборотов он смог увидеть, выделить и описать сущности и отношения, ставшие классической схемой в мультиагентных технологиях.

Фокус-покус гениального К. Маркса раскрывается буквально одним абзацем, где классик материалистической философии демонстрирует суть того, что впоследствии назовут сетью потребностей и возможностей в открытых системах [4]. В главе «Противоречия всеобщей формулы» знаменитого «Капитала» он писал: «Как капиталист, я покупаю товар у **A** и продаю его затем **B**; как простой товаровладелец, я продаю товар **B** и потом снова покупаю товар у **A**. Для деловых друзей **A** и **B** этого различия не существует. Они выступают лишь в качестве продавца и покупателя товаров… Для меня купля у **A** и продажа **B** образуют один последовательный ряд. Но связь между этими двумя актами существует только для меня. **A** нет никакого дела до моей сделки с **B**, **B** — никакого дела до моей сделки с **A**… В самом деле: мой первый акт, купля, есть продажа с точки зрения **A**, мой второй акт, продажа, есть купля с точки зрения **B**. Не удовольствовавшись этим, **A** и **B** заявят, кроме того, что весь этот порядок следования есть совершенно излишний *фокус-покус*[2]. **A** мог бы прямо продать свой товар **B**, **B** прямо купить у **A**. Вместе с тем вся сделка превращается в односторонний акт обычного товарного обращения — продажу с точки зрения **A**, куплю с точки зрения **B**. Таким образом, перевернув порядок следования актов, мы не вышли из сферы простого товарного обращения: нам приходится поэтому посмотреть, допускает ли природа самой этой сферы возрастание входящих в неё стоимостей, а, следовательно, образование прибавочной стоимости» [5].

[2] Здесь хотелось бы прервать повествование Маркса цитатой из более поздних работ российских учёных «Каждый холон обладает потребностями и возможностями... Каждый холон ищет подходящие возможности других холонов для удовлетворения своих потребностей... Для совершения таких обменных операций в системе вводится общий эквивалент (например, деньги)» [4].

Заслуга К. Маркса для современных информационных технологий состоит также и в онтологическом анализе рабочей силы, важной сущности в производстве любой продукции и услуги. Здесь в главе 3 «Купля и продажа рабочей силы» философ преуспел в подробном обосновании и объяснении будущих моделей агентов рабочей силы. Трудно удержаться и не привести весь его текст без купюр, из которого ясно виден материалистический строго формальный подход к построению модели агентов рабочей силы. Для разработчиков мультиагентных приложений, моделирующих социотехнические системы и базирующихся на онтологиях предметных областей, это наглядный пример скрупулезного онтологического анализа. Но приведём лишь наиболее значимые на взгляд автора положения К. Маркса.

«Под рабочей силой, или способностью к труду, мы понимаем совокупность физических и духовных способностей, которыми обладает организм, живая личность человека, и которые пускаются им в ход всякий раз, когда он производит какие-либо потребительные стоимости… Для поддержания своей жизни живой индивидуум нуждается в известной сумме жизненных средств. Таким образом, рабочее время, необходимое для производства рабочей силы, сводится к рабочему времени, необходимому для производства этих жизненных средств, или стоимость рабочей силы есть стоимость жизненных средств, необходимых для поддержания жизни её владельца» [5].

Здесь видно, что способности индивида – это его физические или духовные *возможности*, а *потребности* – это жизненные средства или стоимость его труда.

Развивая «верное[3]» учение и рассматривая жизнь как процесс управления можно записать обобщенную формулу в виде: О – Д – О', где О – это то чем обладаю на начальный момент, то что имею, использую; Д – это действие, бездействие, управляющее воздействие, которое может быть произведено; О' – это то что стало в результате действия, то измененное состояние, которое содержательно приросло или убыло.

Положительное приращение $\Delta o = O' - O$, как и в случае с реализуемой прибавочной стоимостью, говорит о развитии, росте, экспансии и доминировании системы. Отрицательное значение, напротив, предвестник и свидетель сжатия «шагреневой кожи», поглощения и возможной гибели.

5 Аналоговая модель регуляторных систем

Аналогия часто используется при копировании готовых успешных решений. Созданный за миллионы лет организм высших животных вобрал в себя колоссальный экспериментально отработанный опыт сосуществования в сложной изменяющейся среде. Он состоит из множества систем и органов, способных к согласованной работе. Пока известны две так называемые регуляторные системы, с помощью которых организм приспосабливается к постоянным внутренним и внешним изменениям. Одна из них – нервная система, передающая сигналы через сеть нервов и нервных клеток; другая - эндокринная, осуществляющая химическую регуляцию с помощью гормонов, которые переносятся кровью и оказывают воздействие на отдаленные от места их выделения ткани и органы.

Термин «гормон[4]» впервые был использован в работах английских физиологов в начале XX столетия, имеет древне-греческие корни и означает «возбуждаю, побуждаю», что соответствует их функциональному назначению. Гормоны вырабатываются в специализированных клетках желёз внутренней секреции, поступают в кровь и оказывают регулирующее влияние на обмен веществ и физиологические функции. Считается, что гормоны регулируют активность всех клеток организма. Т.е. фактически гормоны предназначены для управления функ-

[3] «Учение Маркса всесильно потому, что оно **верно**» - крылатая фраза из статьи В.И. Ленина «Три источника и три составных части марксизма» в журнале РСДРП(б) «Просвещение» (1913, № 3).
[4] http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_colier/ ГОРМОНЫ

циями организма, их регуляции и координации, при этом химическая система связи взаимодействует с нервной системой.

Для исследования процессов управления важно также понятие гомеостаза как саморегуляции или способности открытой системы сохранять постоянство своего внутреннего состояния посредством скоординированных реакций, направленных на поддержание динамического равновесия. С гомеостазом связано стремление системы воспроизводить себя, восстанавливать утраченное равновесие, преодолевать сопротивление внешней среды.

Сравнивая процессы, происходящие в организме и обществе, можно говорить о возможном применении аналогии в моделях их управления. Нервная система в организме исполняет роль централизованной системы общественного управления, а эндокринная система моделирует локальное местное регулирование, в котором гормоны играют роль активных побуждающих акторов. Как видим, можно говорить, что и на уровне организма природа взяла обе известные системы управления, которые в системе общественного управления аналогичны тоталитарной и демократической. Их разумное сочетание позволяет справляться с возникающими по жизни проблемами и решать насущные задачи.

Исследование реализованного природой механизма саморегуляции в организме высших животных, наряду с моделями колоний муравьев, косяков рыб, роя птиц и других сложных биологических организаций, позволит воспроизводству выработанного эволюцией опыта в социальные организмы, использования его в управлении и регулировании.

6 Доминанты в будущем обществе

6.1 Форсайт как проектная технология

Попытки «заглянуть в будущее» тесно связаны с проблемами технологических инноваций и антропологическими измерениями функциональности и природы человека [24].

Образы будущего многоальтернативны и не могут быть предопределены. Невозможно учесть все возможные изменения сложной системы. Любая ошибка автоматически приведет к искажению данных и модели реальности. Таким образом, каждый элемент системы указывает на возможность возникновения альтернативных аттракторов её развития и необходимости выбора из них.

Будущие результаты могут зависеть от нашего выбора в настоящее время. Любые действия, как и бездействие, могут оказывать влияние на будущие события. Степень свободы выбора среди конкурирующих альтернатив определяет интервал возможностей строительства или проектирования будущего. Именно строительство, а не предсказание или прогнозирование, маркирует форсайт, определяет еще один его индикатор. Выражаясь языком онтолога строитель, конструктор или проектант будущего опознается как своего рода *агент перемен*, потенции которого диктуются диапазоном между желаемым и возможным, необходимым и допустимым, а также спектром интересов стейкхолдеров, причем нередко латентных или же неочевидных. А потому его выбор — это вызов привычным паттернам поведения, устоявшейся прагматике бытия в ситуации перманентного усложнения систем, требующий не готовых рецептов, а планомерной работы по колонизации будущего [24].

В эпоху «умных машин», ситуация радикально меняется и усложняется: машина оказывается способной заменить человека в выполнении даже сложных операций. Угрозы деперсонализации, трансформации и радикальной перестройки человека обозначили явный сдвиг антропологической проблематики к ресурсам познания будущего, обозначив критические точки, требующие незамедлительных ***инвестиций в человеческий капитал*** [24].

6.2 Угрозы прогресса

Стереотипы научно-технического прогресса *доминируют.* Всё, что ни придумается, — всё идёт на конвейер общества потребления, в том числе и потребления в военной сфере. Главная угроза «тотальной оцифровки» — возможность изменить сущность человека, превра-

тив его в биоробота. Под угрозой оказываются вечные ценности: духовность, свобода, творчество и др. Искушение технологией создания цифровой личности — это одна из наиболее радикальных этических проблем XXI века. В области разработок нанотехнологий и биотехнологий возрастают потенциальные возможности создания малыми группами исследователей оружия, при передаче которого в руки асоциальных элементов оно способно уничтожить или поработить человечество. Реагирование на эти угрозы не может быть эффективным только за счет создания механизмов контроля; человечество должно измениться и само, найти адекватные формы организации жизнедеятельности [25].

Угрозу могут представлять те, кто быстрее других сможет воспользоваться сетевыми технологиями в сфере нанобиомедицины и использовать их в своих узкокорпоративных целях. Перспективы нанобиомедицинских технологий ближайшего будущего заставляют по-новому взглянуть на методологические аспекты организации отношений в системе «пациент — врач — общество». Сегодня это одна из онтологических схем взаимодействий. Ведущей онтологией становится поддержка пациента, т.е. врач это субъект, поддерживающий активного пациента, самостоятельно строящего свою жизнь, гармонизируя её в соответствии с возможностями новых медицинских технологий [25].

В XXI веке эпоха экономически развития исчерпала свой потенциал. Безнадежно устарели несправедливые механизмы обмена между экономически сильными и слабыми субъектами. В новых более изощренных формах процветает колониальная политика. Незыблемо представление об «обществе потребления» как безальтернативной и прогрессивной модели развития. Всё отчетливее проявляются тенденции, дающие основание полагать, что экономика утратила позицию *доминирования* в конструировании будущего. Трансформация общества достигает критического порога. Общество вступает в период социального и культурного хаоса, когда одни люди придерживаются установившейся системы ценностей и неизменно пользуются испытанными методами, при этом всё большее число людей пытаются найти альтернативы [25].

6.3 Социальное многообразие и социальные гены

Многообразие разных видов социальных организмов подобно многообразию биологических видов. Живые организмы конкурируют между собой и адаптируются к природным условиям, также как различные виды общества тоже взаимодействуют с природой и друг с другом. В общей теории систем показано, что любая сложная развивающаяся система должна содержать информацию, обеспечивающую ее устойчивость. Система обменивается веществом и энергией с внешней средой и воспроизводится в соответствии с информацией, представленной в соответствующих кодах. Эти информационные коды фиксируют «опыт» предшествующего взаимодействия системы со средой и определяют способы её последующего взаимодействия. С точки зрения теории развивающихся систем нужно в социальных организмах выявить информационные структуры, которые играют роль, аналогичную роли *генов* в формировании и развитии биологических видов [26].

По мнению академика Стёпина В.С. в качестве таких структур выступают базисные ценности культуры. Они представлены категориями культуры, мировоззренческими универсалиями, на основании которых функционируют и развиваются программы человеческой деятельности. Эти универсалии выполняют в жизни общества такую же функцию, как и *гены* в живом организме. Они организуют сложнейший набор различных феноменов культуры в целостную систему и выступают в качестве базисных структур социокода, играют роль своего рода *генома социальной жизни* [26].

Смыслы мировоззренческих универсалий определяют, какие знания, верования, ценностные ориентации, целевые установки, образцы деятельности и поведения будут преимущественно регулировать поведение, общение и деятельность людей, формировать их социальную жизнь. Система мировоззренческих универсалий — это своеобразный культурно-генетический код, в соответствии с которым воспроизводятся социальные организмы. Радикальные измене-

ния социальных организмов невозможны без изменения культурно-генетического кода. Говоря о видах социальных организмов как о цивилизациях, недостаточно рассмотреть только как организована их экономическая жизнь. Саму экономическую жизнь необходимо понять с точки зрения *доминирующих* культурно-генетических кодов, базисных ценностей соответствующих цивилизаций. В техногенной цивилизации человек - деятельностное существо, которое противостоит природе, преобразует и подчиняет её своей власти. С этим пониманием человека органично связано понимание деятельности как процесса, направленного на преобразование объектов и их *подчинение человеку* [26].

Можно констатировать, что ценность преобразующей деятельности характерна только для техногенной цивилизации, но её не было в традиционных культурах, которые ориентированы не на преобразование внешней среды, а на адаптацию к ней. Традиционные культуры не ставили своей целью преобразование мира, обеспечение власти человека над природой. В техногенных культурах такое понимание *доминирует*. Оно распространяется не только на природные, но и на социальные объекты, которые становятся предметами социальных технологий. В системе *доминирующих* жизненных смыслов техногенной цивилизации особое место занимает ценность инноваций и прогресса, которые становятся самоценностью, чего нет в традиционных обществах. Успех преобразующей деятельности, приводящий к позитивным для человека результатам и социальному прогрессу, рассматривается в техногенной культуре как обусловленный знанием законов изменения объектов и увязывается с приоритетной ценностью науки. Научная рациональность в этом типе культуры выступает в системе человеческого знания *доминантой*, оказывает активное воздействие на все другие его формы [26].

В отличие от традиционалистских культур в личности техногенной цивилизации *доминирует* ценностный приоритет, в котором утверждается идеал свободной индивидуальности, *автономной личности*. Среди ценностных приоритетов техногенной культуры можно выделить также особое понимание власти. Власть здесь рассматривается не только как власть человека над человеком, но прежде всего как власть над объектами как природными, так и социальными. Объекты, представляющие собой сложные саморазвивающиеся системы, стали *доминировать* на переднем крае науки. Примерами таких систем являются биологические объекты, рассмотренные с учетом их эволюции, социальные объекты, взятые в их развитии. Саморазвивающиеся системы способны усложняться в процессе эволюции, в них возникают новые уровни организации, которые затем оказывают воздействие на ранее сложившиеся уровни систем и видоизменяют их.

7 Эвергетика, научный коммунизм или человек, включённый в процесс

Идеалистическая философия Платона во многом способствовало развитию онтологии в её современном понимании, когда экземплификация материального мира представляется в форме специфицируемой концептуализации. Идеи блага и справедливого государства Платона дали толчок многим научным теориям, нацеленным на построение и управление обществом.

Нерешённые и неразрешимые проблемы управления в обществе вновь и вновь на каждом новом витке истории толкают учёных на поиск новых теорий, способных осветить путь или подход к пути, где возможны консенсус, компромисс, толерантность, где царит мир и согласие и вселенское счастье переполняет души членов сообщества.

Активно продвигаемая професором В.А. Виттихом эвергетика как ценностно-ориентированная наука о процессах управления в обществе [3, 12] вбирает в себя лучшие черты ушедших от нас социалистических установок, ориентированных на воспитание сознательных граждан-акторов.

Отдавая должное важной теме и полностью солидаризуясь с рассматриваемыми установками, тем не менее, есть ряд серьёзных, волнующих автора вопросов, которые хотелось бы обсудить на предстоящей конференции.

В сложных системах присутствуют субъекты, где актор исполняет «узкую ролевую функцию» [2], и объекты управления. В определении эвергетики участниками являются лишь акторы, «оценивающие ситуацию в процессе многостороннего диалога» [3].

А какова роль иных участников, не акторов, и есть ли они?

Всегда ли возможен диалог, и чём он обеспечивается?

Что означает, как и в каком пространстве происходит «осмысление ситуации… сообществом» [3]?

Насколько реализуема виртуальная схема «взаимных уступок и убеждений» и куда девается реальное «неудовлетворённое меньшинство» [3] (на практике оно может быть и «большинством»)?

Каков механизм консенсуса и компромисса?

Если актор – это всегда «живой человек», а в работе [2], например, он рассматривается как «элемент системы управления в виде алгоритма, формальной инструкции, кибернетического регулирующего устройства, сигнальной системы» и лишь в сложных ситуациях – человек, то как можно выйти на дальнейшую прикладную прагматику? Заменить его «неживым» агентом?

Как реализуется тезис: «Соглашение достигается в результате аргументации, а не принуждения» [3]? Если какие-либо наметки на механизм выработки соглашений?

Какова должна быть глубина интерсубъективной системы?

Если «интерсубъективные системы ориентированы на повышение разделяемой ответственности за общий успех сообщества» [3], то каковы критерии распределения этой самой ответственности?

За счет чего повысится ответственность и чем это может быть обеспечено?

Как осуществляется «регулирование» [3], заменяющее управление?

Как осуществляется «достижение взаимопонимания» [3]?

Как «регулировать конфликты.., используя … «горизонтальное» взаимодействие» [3]?

Как «обеспечить урегулирование общей ... ситуации (групповые ценности)» [3] и как осуществляется бесконфликтность взаимной увязки с индивидуальными ценностями?

Эти и другие, по мнению автора, важные и возможно технологические вопросы требуют детальной проработки для реализации благостной парадигмы сосуществования общества.

Ведь в новом «умном» направлении в теории управления и менеджмента во главу угла ставится уже «умный сотрудник», имеющий свои цели, способный к самостоятельному принятию решений [27]. И управлять такими сотрудниками должны не менее умные руководители на основе современных инструментов управления организационным поведением, формализованных процедур принятия управленческих решений, учитывающих активное поведение сотрудников организации [27]. Есть надежда, что открытая и эффективно работающая модель организации, как и модель семьи – «ячейки общества», выведет на механизмы управления и всего общества.

Заключение

Важнейшей онтологической доминантой в процессах управления общества и социотехнических систем является, по мнению автора, потребность в *приращении*, которая может быть воспроизведена в мультиагентной парадигме современных информационных технологий. Сама же эта потребность адекватно реализуется лишь в человеко-машинной системе, где человек, включённый в неё, соотносит свои потребности с возможностями общества. А для этого нам нужен человек разумный, актор, способный на консенсус во благо общества, так как он сам часть его самого и целиком зависящий от него.

Благодарности

Работа выполнена при проведении исследований по теме «Разработка основ теории интерсубъективного управления с применением онтологических моделей ситуаций» в рамках государственного задания Институту проблем управления сложными системами РАН на 2013-2015 годы, а также при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации мероприятий Программы повышения конкурентоспособности Самарского государственного аэрокосмического университета среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013-2020 годы.

Список литературы

[1] Rzevski G. Self-organization in social systems / Онтология проектирования. №4(14), 2014. – с.8-17.
[2] Рыжов В.А. Сетецентризм — управление сложностью, 13.06.2014. Сайт С.П. Курдюмова - http://spkurdyumov.ru/networks/setecentrizm-upravlenie-slozhnostyu/ (актуально на 30.03.2015).
[3] Виттих В.А. Понятие интерсубъективности в эвергетике / Онтология проектирования. №4(14), 2014. – с.90-97.
[4] Виттих В.А., Скобелев П.О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах / Автоматика и телемеханика. № 1, 2003. - с.177–185.
[5] Маркс К.Г. Капитал. Критика политической экономии. Том 1. / Пер. с нем. Изд-во Манн, Иванов и Фербер. 2013. – 1200 с. - http://www.esperanto.mv.ru/Marksismo/Kapital1/ (актуально на 30.03.2015).
[6] Спенсер Г. Синтетическая философия / Пер. с анг. Мокиевского П.В. - Киев: Ника-центр, 1997. – 512 с.
[7] Акофф Р. Планирование будущего корпорации. Пер. с анг. – М.: Прогресс. 1985. -
[8] Гартман Э. Сущность мирового процесса, или Философия бессознательного: Мктафизтка бессознательного. Пер. с нем. – М.: КРАСАД, 2014. – 440 с.
[9] Шведин Б.Я. Онтология предприятия: экспириентологический подход. Технология построения онтологической модели предприятия. – М.: ЛЕНАНД, 2010. – 240 с.
[10] Боргест Н.М. Принципы управления вузом на основе самоорганизации // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIII Международной конференции (15-27 июня 2011 г., Самара, Россия). – Самара: Самарский НЦ РАН, 2011. - С. 391-400.
[11] Боргест Н.М. Будущее университета: онтологический подход. Часть 3: автоматизация бизнес-процессов / Онтология проектирования. №1(11), 2014. – с.24-41.
[12] Виттих В.А. Пролегомены к эвергетике / Онтология проектирования. №2(16), 2016. – в печати.
[13] Ницше Ф. Воля к власти. Опыт переоценки всех ценностей. Пер с нем. – М.: Изд-во «RELF-book», 1994. – 152 с.
[14] Ницше Ф. Веселая наука. Пер. и комм. К.А. Свасьяна. – М.: ЭКСМО-Пресс, 1999. – 576 с. (Серия «Антология мудрости»).
[15] Каку М. Будущее разума/ Митио Каку; Пер. с анг. – М.: Альпина нофикшн, 2015. – 502 с.
[16] Maslow A. H. Motivation and Personality. — New York: Harpaer & Row, 1954. Абрахам Маслоу. Мотивация и личность. Перевод А.М.Татлыбаевой. - http://nkozlov.ru/library/psychology/d3478/
[17] Боргест Н.М. Научный базис онтологии проектирования / Онтология проектирования. №1(7), 2013. – с.5-25.
[18] Рапопорт Г.Н. Искусственный и биологический интеллекты: общность структуры, эволюция и процессы познания / Г.Н. Рапопорт, А.Г. Герц. - М.: КомКнига, 2010. – 312 с.
[19] Футуродизайн-89: Первая всесоюзная конференция по проблемам проектного прогнозирования. Материалы конференций / Госком СССР по науке и технике, ВНИИТЭ. — М., 1990. 227с.
[20] Медведев В.Ю. Дизайн будущего и будущее дизайна / Ассоциация футурологов Футурология. Прогностика моделирование будущего// 21.10.2013. - http://futurologija.ru/bibl/medvedev-v-yu-dizajn-budushhego-i-budushhee-dizajna/ (актуально на 30.03.2015).
[21] Виртуальная лаборатория. Футуродизайн. – http://ru.vlab.wikia.com/wiki/Футуродизайн/ http://ru.vlab.wikia.com/wiki/Принципы_футуродизайна (актуально на 30.03.2015).
[22] Папанек В. Дизайн для реального мира / Пер. с англ. — М.: Издатель Д.Аронов, 2004. — 416 с.
[23] Энгельс Ф. Диалектика природы / Маркс К. и Энгельс Ф., Соч., 2 изд., т. 20, с. 587. - http://libelli.ru/marxism/me_ss2.htm.

[24] Гребенщикова Е.Г. Технологии форсайта: от предсказаний — к конструированию будущего / Глобальное будущее 2045. Конвергентные технологии (НБИКС) и трансгуманистическая эволюция. Под ред. проф. Д.И. Дубровского. (М.: ООО «Издательство МБА», 2013. — 272 с.) - с.49-58. http://www.2045.ru/pdf/globalfuture2045.pdf
[25] Лепский В.Е. Проблема сборки субъектов развития в контексте эволюции технологических укладов. / Глобальное будущее 2045. Конвергентные технологии (НБИКС) и трансгуманистическая эволюция. Под ред. проф. Д.И. Дубровского. (М.: ООО «Издательство МБА», 2013. — 272 с.) – с.67-81. - http://www.2045.ru/pdf/globalfuture2045.pdf
[26] Стёпин В.С. Перелом в цивилизационном развитии. Точки роста новых ценностей / Глобальное будущее 2045. Конвергентные технологии (НБИКС) и трансгуманистическая эволюция. Под ред. проф. Д.И. Дубровского. (М.: ООО «Издательство МБА», 2013. — 272 с.) - с.10-25. http://www.2045.ru/pdf/globalfuture2045.pdf
[27] Механизмы управления: Управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль: Учебное пособие / Под ред. Д.А. Новикова. Изд. 2-е. – М.: ЛЕНАНД, 2013. – 216 с.

Biography

Nikolay Mikhailovich Borgest (b.1954) graduated from the Kuibyshev Aviation Institute named after academician S.P. Korolev (Kuibyshev-city) in 1978, PhD (1985). He is a Professor at Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev (National Research University), Director of «New Engineering» publishing house, Senior Research worker at IPUSS RAS. He is a member of the International Association for Ontology and its Applications, co-author of more 150 scientific articles and abstracts in the field of CAD and AI.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В КОНТЕКСТЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ОБОРОННЫХ, ТЕХНОГЕННЫХ, И СОЦИАЛЬНЫХ УГРОЗ

С.Ф. Боев[1,2], Д.Д. Ступин[1,2], А.А. Кочкаров[1,2,3], П.О.Скобелев[4]

[1]ОАО «РТИ»
127083, Москва, ул. 8-го Марта, д. 10, стр. 1, Россия
kantselariya@oaorti.ru
тел: +7 (495) 788-09-48, факс: +7 (495) 614-22-62
[2]МФТИ
141700, Московская область, Долгопрудный, Институтский пер., 9, Россия
info@mipt.ru
+7 (495) 408-45-54, факс: +7 (495) 408-42-54
[3]Финнасовый университет при Правительстве РФ
125993, Москва, ГСП-3, Ленинградский проспект, 49, Россия
academy@fa.ru
тел: +7 (499) 277-24-45, факс: +7 (499) 277-24-06
[4]ОАО «РКК «Энергия»
141070, Московская область, Королёв, ул. Ленина, 4А, Россия,
post@rsce.ru
тел: +7 (495) 513-80-19, факс: +7 (495) 513-86-20

Ключевые слова: *государственная безопасность, угроза, мультиагентные технологии, информационные технологии, комплексный мониторинг*

Abstract
This article dwells on the different methods of ensuring national security based on complex monitoring using multi-agent technologies.

Введение

Текущее десятилетие, по мнению многих ученых, ознаменовано переходом мировой экономики и мировой цивилизации к новому технологическому укладу [1]. Этот переход сопровождается появлением новых вызовов и угроз, характер которых и возможные последствия требуют переосмысления форм и методов противодействия этим вызовам и угрозам.

Представления о безопасности отдельного государства и общества в целом вышли на иной качественный уровень, определяемый новыми категориями угроз. Их можно условно разделить на три типа – *оборонные, техногенные и социальные (или когнитивные)*. Каждый из этих типов имеет свои особенности и потенциальные последствия.

1) «Оборонные» вызовы и угрозы. Переход к новому технологическому укладу спровоцировал новые типы военных конфликтов и новые «мотивы» напряженности в межгосударственных отношениях. Как следствие, задачи для Вооруженных Сил и Оборонно-промышленного комплекса (ОПК) Государства переходят на новый уровень, требующий качественно иной интеллектуального и информационного обеспечения.
2) Техногенные вызовы и угрозы. Последствия возможных техногенных катастроф на современных производственных и энергетических предприятиях соизмеримы по потенциальному ущербу и ресурсным затратам на ликвидацию их последствий с крупными военными конфликтами. Особенно красноречиво свидетельствует об этом катастрофа, происшедшая в 2012 году на японской атомной электростанции «Фукусима».

3) Социальные (когнитивные) вызовы и угрозы. Современные информационные технологии позволяют, в случае необходимости, достаточно быстро сорганизовывать различные группы людей для достижения заданных целей, в том числе, посредством ненасильственных действий и мероприятий. Типичные примеры – «цветные революции» и события на киевском Майдане в 2014 году.

Угрозы всех трех типов являются взаимосвязанными, т.е. реализованная угроза из одной области достаточно быстро может перенестись и на две другие. Мировые события последних 15 лет демонстрируют различные сценарии таких переходов. Важно также отметить, что катастрофы и происшествия в любой из указанных областей могут оказаться следствием мероприятий, организованных с помощью относительно незначительных финансовых затрат. Таким образом, становятся совершенно реальными ситуации, при которых незначительные возмущения в различных областях жизнедеятельности общества могут приводить к катастрофическим последствиям. Поэтому вопросы обеспечения комплексной безопасности на «границах соприкосновения» трех областей – оборонной, техногенной, и социальной являются чрезвычайно важными.

Отсюда возникает необходимость комплексного подхода к обеспечению безопасности отдельных государств (а в перспективе – и целых регионов), необходимыми элементами которого должны стать:

1) Комплексный мониторинг обстановки в соответствующем государстве (или его критически важном для него регионе), предполагающий использование всех имеющихся в наличии информационных средств вне зависимости от их назначения (военное, гражданское, двойное и т.п.).
2) Совместная обработка информации, получаемой от различных информационных систем и средств, включая неструктурированную информацию, получаемую, как правило, в социальных образованиях различного рода, о формирование оценок ситуации в государстве, его отдельных субъектах или в регионе в целом. Существенным здесь является оценка степени опасности ситуации с точки зрения рисков возникновения угроз военного, техногенного, природного и социального характера.
3) Использование «сценарных» технологий при анализе степени опасности возникающей ситуации с использованием методов масштабного моделирования процессов различной природы (военные конфликты разного уровня, природные и техногенные катастрофы и экстремальные ситуации, социальные процессы различного уровня).

Таким образом, мы приходим к необходимости создания специальных систем (возможно, совокупностей таких систем, т.е. своего рода «суперсистем») комплексного мониторинга, которые позволяли бы отслеживать сценарии развития различных ситуаций в оборонной, техногенной, и социальной сферах. Различные аспекты создания подобных систем мониторинга освещены в работах [1-5]. Необходимо отметить, что особую значимость для создания систем такого типа приобретают мультиагентные технологии, поскольку важную роль в этих системах будут играть методы управления многочисленными пространственно-распределенными сенсорами и датчиками, работающими с разнородной, в том числе, неструктурированной информации. Для создания таких комплексных систем требуется проведение большого объема исследований и разработок в следующих научно-технических направлениях:

1) Создание новых поколений пространственно-распределенных информационных и инфокоммуникационных систем и комплексов, способных получать и анализировать большие объемы и потоки разнородной информации от различных информационных средств.
2) Создание современных программно-аппаратных систем обработки (в реальном времени) сверхбольших объемов и потоков информации, включая неструктурированную информацию, в реальном времени.
3) Создание прогнозно-модельного инструментария, обеспечивающего прогноз и моделирование возникновения и развития масштабных процессов различной природы, в первую

очередь, процессов, связанных с военными конфликтами, экстремальными и чрезвычайными ситуациями техногенного характера, а также с социальными процессами.

4) Создание специальных межвидовых Центров анализа и обработки информации и поддержки принятия решений, направленных на прогноз развития негативных процессов различной природы и предотвращение угроз экстремальных ситуаций или разработку мер по минимизации негативных последствий этих ситуаций.
5) Развитие теоретических аспектов создания и обеспечения функционирования перспективных информационно-управляющих систем, включая работу с разнородными объемами и потоками информации (в том числе, неструктурированной), развития различных аспектов «Data Science», теории катастроф и т.д.

Заключение

ОАО «РТИ» в рамках целого ряда реализуемых и перспективных проектов уже вплотную подошло к созданию некоторых подобных систем (в основном специального и двойного назначения), но уровень задач, которые необходимо решить при этом, требует консолидации интеллектуальных и научно-технических ресурсов практически всех предприятий и организаций, работающих в области создания информационных систем.

Список литературы

[1] Малинецкий Г.Г., Маненков С.К., Митин Н.А., Шишов В.В. Когнитивный вызов и информационные технологии: Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН № 46. М., 2010.
[2] Малинецкий Г.Г., Митин Н.А., Шишов В.В. и др. Экспериментальный стенд Комплексной системы научного мониторинга. Структура и функции: Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН № 47. М., 2007.
[3] Кочкаров А.А. Моделирование структурно-динамических процессов в сетецентрических системах мониторинга // Антенны. – 2013. – № 1. – С. 164-168.
[4] Боев С.Ф., Ступин Д.Д., Кочкаров А.А. Проблемы формирования, реализации, и кадрового обеспечения системных проектов в B2G-сегментах высокотехнологичных отраслей // Качество. Инновации. Образование. – 2012. – № 8(87). – С. 64-69.
[5] Кочкаров Р.А. Стратегическое планирование и прогнозирование // Вестник Финансового университета. – 2006. - № 4. – С. 89-96.

РАЦИОНАЛЬНОСТЬ КАК ОБРЕТЕНИЕ СМЫСЛА И ОТВЕТСТВЕННОСТИ В ПРОБЛЕМНЫХ СИТУАЦИЯХ

В.А. Виттих

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
vittikh@iccs.ru
тел: +7 (846) 333-27-70, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *эвергетика, процессы управления в обществе, рациональность, актор, смысл проблемной ситуации, ответственность, ценность*

Abstract

Evergetics, a subject- and value- oriented science of management processes in society, seeks for the reserves to improve the management efficiency not in the modernization of "impersonal" bureaucratic machine, but in the human being, in every person, in the use of his intellectual and volitional resources. The man is considered therein not as a "cog" in a rigid management mechanism, but as a personality (actor), endowed with consciousness, acting rationally and performing cognitive and activity-related functions together with other people in order to settle problem situations arising in the life-world, in everyday-life. The article proposes to understand rationality as a human desire to find meaning and responsibility in these situations. The article emphasizes the necessity to train the man in methods and in means of finding meanings and to educate in him a sense of responsibility for execution thereof.

Введение

Эвергетика, которая создаётся как субъектно - и ценностно – ориетированная наука о процессах управления в обществе [1, 2], базируется на принципах постнеклассической [3] и коммуникативной [4] рациональностей. «Представление о рациональности как определённом типе мироотношения не ограничивается рациональностью в познавательной деятельности, включающей научную рациональность. Она предполагает и рационализацию реальной практической деятельности, рационального действия по отношению к окружающей человека реальности … Рациональность прежде всего связана с основанным на адекватном понимании проблемной ситуации, в которой находится субъект действия, сознательным управлением собственным поведением» [5].

В широком смысле рациональность ассоциируется с разумным поведением человека. Причём, что считать «разумным» каждый человек определяет по-своему, поскольку имеет свои субъективные взгляды на мир и процессы, происходящие в нём. Поэтому в любой реальной жизненной ситуации, когда люди должны совместными усилиями найти выход из неё, им необходимо каким-то образом согласовать свои представления о рациональности. И этот выбор критериев рациональности может быть осуществлён в результате «явных или неявных конвенций и прагматических решений… Отсюда попытки определения и применения «частичных» понятий рациональности, не претендующих на философскую всеобщность, но охватывающих значительные и практически важные сферы социального бытия, познания и деятельности» [6].

В данной статье, применительно к эвергетике, даётся определение такого «частичного» понятия: рациональность рассматривается как обретение смысла и ответственности в проблемных ситуациях. А это означает, что эвергетика (равно как и её составная часть – теория

интерсубъективного управления [7]) постулирует специфическое рациональное поведение людей, оказавшихся в общей для них проблемной ситуации, а именно: осознав себя в этой ситуации, они стремятся совместно понять её смысл (это относится к рациональности познания) и берут на себя ответственность за выработку и реализацию согласованных решений, направленных на урегулирование ситуации (это уже адресуется к рационализации реальной практической деятельности). Таких людей, готовых к выполнению указанных познавательно-деятельностных функций, называют акторами [7].

1 Рациональность акторов в проблемных ситуациях

В своей повседневной жизни каждый человек сталкивается с множеством различных ситуаций, к которым он относится по-разному. На пешеходном перекрёстке, если нет каких-то осложняющих обстоятельств, человек обычно действует разумно (рационально) и просто, переходя улицу на зелёный свет светофора. Для него это «штатная» часто повторяющаяся ситуация, которая не требует никаких интеллектуальных затрат со стороны пешехода по её анализу, поскольку он действует «автоматически». Более того, во время перехода улицы человек может осознавать себя в другой ситуации – например, на работе, размышляя о способах решения той или иной производственной задачи. Однако ситуация на перекрёстке может значительно осложниться, если сломался светофор, начался сильный снегопад, случилось ДТП, свидетелем которого стал пешеход, к определению причин ДТП подключились другие прохожие, которые начали выяснять отношения между собой, отстаивая свои точки зрения на произошедшие события, и т.д. Такая ситуация уже может быть отнесена к разряду проблемных, когда неудовлетворительное состояние дел осознано, но ещё не ясно, что нужно делать для его изменения.

В проблемной ситуации человек может повести себя двояко: ретироваться или принять участие в её урегулировании, т.е. стать актором. В первом случае, следуя терминологии Ю.Хабермаса, он опирается на субъект – центрированный (эгоцентрированный) разум, а во втором – на разум коммуникативный. «Субъект – центрированный разум предполагает такую позицию, при которой все суждения субъекта о внешнем мире исходят из перспективы собственного «я» субъекта. Такая позиция может опираться на аутентичность переживаемого опыта, «истинность», соответствие «внутренней истине», традицию, авторитет, силу и т.д. Коммуникативный разум, напротив, предполагает такую позицию, при которой мы разделяем ценности и нормы как интерсубъективно значимые. Индивид может признавать любое знание, восприятие, понимание субъективно «истинным» для себя самого. Но если в той или иной ситуации или в том или ином сообществе это знание, восприятие, понимание притязает на то, чтобы стать интерсубъективно значимым, оно может быть признано таковым (то есть нормой) только при условии, что все участники данной ситуации или сообщества согласны признать это как норму и выражают своё согласие в процессе аргументативной дискуссии, имеющей целью найти взаимопонимание. Интерсубъективная перспектива, таким образом, предполагает, что ни один из субъектов взаимодействия не может единолично утверждать свои значения или вершить свою волю в ситуации, где затрагиваются интересы других участников» [8].

В эвергетике акторы полагаются коммуникативно разумными (рациональными) и неоднородными [2], т.е. имеющими различные взгляды на ситуацию и на подходы к её урегулированию. Как в этих условиях обеспечить возможность достижения взаимопонимания и консенсуса акторов? В концепции коммуникативной рациональности Ю. Хабермаса заложено убеждение в консолидирующей силе аргументированного дискурса, который и должен преодолеть разногласия акторов и достичь рационально обоснованного соглашения между ними. Однако эта концепция неоднократно подвергалась критике за необоснованный идеализм, недостаток прагматизма, невнимание к механизмам силы и власти, господствующим в обществе и т.д. Тем не менее, нельзя отрицать «конструктивности идей коммуникативной рациональности в каче-

стве необходимого ценностного ориентира современного сознания, подобно тому как несовпадение реального поведения людей с нравственными идеалами и нормами не отменяет значимости последних» [5].

Во всех случаях рациональность акторов оказывается «ситуативно окрашенной». Каково бы ни было философское мироотношение человека, в проблемной ситуации оно может трансформироваться в зависимости от сложившегося положения дел (например, рационально мыслящий и законопослушный человек, ставший свидетелем ДТП и считающий своим гражданским долгом принять участие в выяснении причин аварии «по горячим следам», может посчитать более разумным не участвовать «в разборках» по причине плохого самочувствия). Рациональность «предполагает соразмерность, адекватность, соответствие человеческих позиций реальному положению дел в этом мире, той реальной ситуации, связанной с этим положением дел, проблемной ситуации, «идеальным планом» действия в которой выступает соответствующая человеческая позиция» [5]. Иными словами, речь идёт о том, что актор действует рационально, когда он стремится к обнаружению того смысла, который кроется в сложившейся ситуации. Причём, как пишет Д.А.Леонтьев в своей вступительной статье к [9], «каждая ситуация несёт в себе свой смысл, разный для разных людей, но для каждого он является единственным и единственно истинным. Не только от личности к личности, но и от ситуации к ситуации этот смысл меняется». В приведённом выше примере свидетель ДТП решил, что для него имеет смысл не участвовать в выяснении причин аварии, но этот смысл мог бы быть иным, если бы изменилась ситуация.

2 Смысл проблемной ситуации

Поиск и реализацию человеком смысла своей жизни Виктор Франкл [9] считает врождённой мотивационной потребностью, присущую всем людям. «Стремление к смыслу представляет собой мотив sui generis, который несводим к другим потребностям и невыводим из них,» - пишет он. Причём более корректно ставить не вопрос о смысле жизни вообще, а вопрос о смысле жизни отдельного индивидуума в данной ситуации, на конкретном временном промежутке. «Ставить вопрос в общем виде – всё равно, что спрашивать у чемпиона мира по шахматам: «Скажите, маэстро, какой ход самый лучший?»». Восприятие смысла есть «осознание возможности на фоне действительности, или, проще говоря, осознание того, что можно сделать по отношению к данной ситуации». При этом он добавляет и объясняет, что «в жизни не существует ситуаций, которые были бы действительно лишены смысла» [9].

Для того чтобы определить понятие «смысл проблемной ситуации», обратимся к работе [10], в которой развиваются идеи В. Франкла. Каждая проблемная ситуация предоставляет человеку различные возможности её урегулирования, которые могут быть реализованы в зависимости от способностей и ресурсов этого человека. Та возможность, которая по своей ценности и значимости выделяется им как наилучшая в данных обстоятельствах и есть смысл проблемной ситуации, текущего момента. «Жить осмысленно – значит выбрать и реализовать наилучшую возможность из тех, что предоставляют нам обстоятельства». Однако «мы все поразному видим и используем возможности ситуации. Через призму разного опыта люди поразному замечают и оценивают одни и те же события и факты. Кроме того, мы различаемся ещё и навыками и способностями, то есть врождёнными и приобретёнными качествами, позволяющими осуществлять те или иные планы» [10]. Таким образом, смысл – функция двух переменных: возможностей определённых актуальных обстоятельств (проблемной ситуации) и способностей человека, в эти обстоятельства попавшего.

Смысл имеет только то, что имеет ценность для нас; то, что нам безразлично, - бессмысленно. «Есть смыслы, которые присущи людям определённого общества, и даже более того – смыслы, которые разделяются множеством людей на протяжении истории. Эти смыслы относятся к человеческому положению вообще, чем к уникальным ситуациям. Эти смыслы и есть

то, что понимается под ценностями. Таким образом, ценности можно определить как универсалии смысла, кристаллизующиеся в типичных ситуациях, с которыми сталкивается общество или даже всё человечество. Обладание ценностями облегчает для человека поиск смысла, так как, по крайней мере, в типичных ситуациях, он избавлен от принятия решений» [9].

Несмотря на то, что обретение смысла проблемной ситуации у каждого человека происходит по-своему, исходя из субъективного опыта, его интерсубъективное сознание учитывает и альтернативные точки зрения других индивидуумов, осознающих себя членами одной «команды», которые должны совместными усилиями найти выход из ситуации с учётом допустимых ограничений. Достижение взаимопонимания и консенсуса относительно устраивающего всех решения проблемы происходит на основе аргументированного многостороннего диалога – дискурса. Смыслопорождающая деятельность людей оказывает, таким образом, влияние на всё интерсубъективное сообщество, в результате чего образуется общее смысловое пространство.

В примере, приведённом в работе [11], проблемная ситуация состояла в том, что группе людей необходимо было перебраться на другой берег реки (при ограничении, что сделать они это должны были совместно, не разделяясь на подгруппы). При этом одни видели смысл дождаться парома (первая возможность, предоставляемая ситуацией), другие – пройти несколько километров пешком до моста и по нему перейти реку (вторая возможность), а третьи видели смысл в том, чтобы преодолеть препятствие вплавь (третья возможность, предоставляемая ситуацией). Понимая, что нужно обрести общий «интерсубъективный» смысл, члены группы вынуждены были провести дискурсивные переговоры и на основе взаимных убеждений и уступок достичь консенсуса. В частности, все могли согласиться с тем, что в сложившейся проблемной ситуации имеет смысл перейти реку через мост, поскольку кто-то не умеет плавать, а паром придёт только поздно вечером. Но это не означало, что все «за», ясно было только то, что никто «не против». Тем не менее, все участники ситуации должны были действовать рационально в своём стремлении построить такую интерсубъективную модель смысла проблемной ситуации.

3 Ответственность за исполнение смысла

В предыдущем разделе понятие «смысл» определялось как наилучшее решение из числа тех возможностей, которые предоставляются ситуацией. Причём решение это принимается человеком свободно, сознательно и добровольно. «Быть свободным означает сделать выбор, решиться и таким образом стать причиной своего поступка. Свободное действие обязательно заключает в себе ответственность – совершенно независимо от того, знает об этом человек или нет» [10].

Человек несёт ответственность за каждый выбор, сделанный свободно. Из множества возможностей он выбирает одну, именуемую смыслом, которая представляется ему наиболее ценной и значимой в данной ситуации. Поскольку это осмысленное решение предстоит реализовать, то снова возникает вопрос об ответственности, но только ответственности за исполнение смысла. Перед кем или перед чем человек несёт ответственность?

Ответ на этот вопрос даётся в работе [10]: «Перед величайшей из своих ценностей. Для одного эта ценность – он сам, его собственная совесть. Для другого – близкие, чьим мнением он дорожит. Для третьего – Бог, которому он стремится сохранить верность… Ответственность – это мой ответ на тот смысл, который входит в резонанс с моей высшей ценностью. Поэтому ответственность не имеет ничего общего с обязанностями, которые кто-то на меня возлагает. Ответственность – проявление свободы. Её нельзя подменить соблюдением предписаний, законов, руководящих указаний и инструкций по эксплуатации. Ответственность – выражение моей привязанности к человеку, идее или другой ценности... Ответственность - это работа во имя своей ценности».

Исходя из изложенного, рациональным будем считать поведение человека, который стремится к обретению смысла и ответственности за его исполнение в проблемных ситуациях. Такое представление о рациональности субъекта является чрезвычайно важным для эвергетики как науки о процессах управления в человеческом обществе. В самом деле, неоднородные акторы эвергетики не могут быть внерациональными, поскольку сознание и воля людей должны быть «ориентированы» на участие в организации процессов управления в обществе, и более конкретно, - на участие в постижении смысла проблемных ситуаций и их урегулировании. А для этого надлежащим образом должны выстраиваться процессы обучения и воспитания. Как отмечается в [9], «основная задача образования состоит не в том, чтобы довольствоваться передачей традиций и знаний, а в том, чтобы совершенствовать способность, которая даёт человеку возможность находить уникальные смыслы», при этом «воспитание больше чем когда-либо становится воспитанием ответственности».

Заключение

Эвергетика [1] и теория интерсубъективного управления [7] предлагают искать резервы повышения эффективности процессов управления в обществе не в модернизации «обезличенной» бюрократической машины, а в самих людях, в каждом человеке, в использовании его интеллектуальных и волевых ресурсов. В этом случае люди, готовые к выполнению познавательно – деятельностных функций в общественной жизни и называемые акторами, должны уметь оценивать положение дел в проблемных ситуациях и участвовать в их урегулировании, действуя рационально. Причём рациональность необходимо понимать как стремление человека к обретению смысла и ответственности в проблемных ситуациях. А для этого человека нужно обучать методам и средствам нахождения смыслов и воспитывать в нём чувство ответственности за их исполнение.

Список литературы

[1] Vittikh V.A. Evolution of Ideas on Management Processes in the Society : from Cybernetics to Evergetics. – Group Decision and Negotiation. – http://link.springer.com/article/10.1007/s10726-014-9414-6/fulltext.html. Published online : 14 September 2014.

[2] Виттих В.А. Проблемы эвергетики. – Проблемы управления, № 4, 2014, с.69-71.

[3] Степин В.С., Горохов В.Г., Розов М.А. Философия науки и техники. – М. : Гардарики, 1996. – 400 с.

[4] Habermas J. Theorie des Kommunikativen Handelns.Bd.II.Zur Kritik der funktionalistischen Vermunft. Fr.a.M., 1981.

[5] Швырев В.С. Рациональность как ценность культуры.Традиции и современность. – М.: Прогресс – Традиция, 2003. – 176 с.

[6] Новая философская энциклопедия (в четырёх томах). – М.: Мысль, 2010. – 2806 с.

[7] Vittikh V.A. Introduction to the Theory of Intersubjective Management. – Group Decision and Negotiation, volume 24,issue 1, January 2015, p.67 – 95. – http://link.springer.com/article/10.1007/s10726-014-9380-z/fulltext.html. Open Access Date : 09 March 2014.

[8] Вайзер Т. Эгоцентризм и интерсубъективность во взаимоотношениях человека и окружающей среды. – Логос, № 1 (97), 2014, с.171 – 184.

[9] Франкл В. Человек в поисках смысла : Библиотека зарубежной психологии. – М.: Книга по требованию, 2012. – 366 с.

[10] Лэнгле А. Жизнь, наполненная смыслом. Логотерапия как средство оказания помощи в жизни. – М.: Генезис,2014. – 144 с.

[11] Vittikh V.A. Heterogeneous Actor and Everyday Life as Key Concepts of Evergetics. – Group Decision and Negotiation. – http://link.springer.com/article/10.1007/s10726-014-9423-5/fulltext.html. Published online : 29 November 2014.

О ПОНЯТИЯХ «ПОЗНАНИЕ» И «ОСОЗНАНИЕ» В НАУКЕ ОБ УПРАВЛЕНИИ

В.А. Виттих

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
vittikh@iccs.ru
тел: +7 (846) 333-27-70, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *познание, осознание, классическая наука об управлении, эвергетика, когнитология, рекогнитивная наука, инновация*

Abstract

The meanings of notion "knowledge" used in classical Management Science and notion "awareness" used in Evergetics - postnonclassical science of management processes in the society are differentiated. The necessity to study the problems of recognitive science is justified. The problem connected with the relationship between science and innovation is discussed.

Написать эту короткую заметку меня побудила не потребность поднять терминологическую дискуссию, а необходимость сделать более понятными читателям базисные положения моих работ [1 – 3], разграничив более чётко значения понятий «познание» и «осознание». Познание (cognition), в соответствии с классической научной рациональностью, рассматривается как процесс приобретения и систематизации знаний об объекте некоторым познающим субъектом, отделённым от объекта, дистанцированным от него. Когнитивная наука (cognitive science) изучает познание на основе применения разнообразных теоретико-информационных моделей, в том числе для анализа и принятия решений в плохо формализуемых и неопределённых ситуациях используются модели представления знаний экспертов в виде когнитивных карт (cognitive maps). Таким образом, познание в классической науке об управлении (management science) ориентировано на приобретение, систематизацию и представление экспертных знаний и их использование при принятии управленческих решений лицами, наделёнными соответствующими полномочиями (ЛПР).

В эвергетике [1, 2] – зарождающейся науке о процессах управления в обществе – и в теории интерсубъективного управления [3] человек – актор не просто познаёт, а осознаёт сложившуюся проблемную ситуацию, в которую он погружен. Осознание (recognition или близкое ему по смыслу awareness) означает, что актор знает и понимает не только то, что происходит вокруг него, но и то, что нужно делать для изменения ситуации в желаемом для него направлении. В этом единении познания и деятельности выражается присущая человеку способность к осознанию. Когда человек «один на один» сталкивается, например, с разбушевавшейся стихией (грозой, штормом и т.п.), он именно осознаёт проблемность ситуации, поскольку одновременно с её изучением человек ищет способ решения проблемы (как остаться целым и невредимым). Поэтому осознание проблемы – первый шаг на пути перевода проблемы в задачи, требующие решения [2].

Осознание можно рассматривать как постижение смысла ситуации, проще сказать, «осознание» и «осмысление» являются синонимами : «смысл – это, по всей видимости, нечто,

что мы проецируем в окружающие нас вещи, которые сами по себе нейтральны» [4], а осознание, связанное с поиском способа решения проблемы, и ориентировано на осмысление ситуации. Любая ситуация предоставляет человеку некоторое множество возможностей её урегулирования, и «та возможность, которая по своей ценности и значимости выделяется нами как наилучшая в данных обстоятельствах, несёт в себе полноту актуального бытия, и есть смысл текущего момента» [5].

Исходя из изложенного, можно сделать вывод о том, что, наряду с когнитивной наукой, необходимо проводить исследования проблем рекогнитивной науки (recognition science), изучающей осознание на основе применения теоретико – информационных моделей. Кроме того, именно «осознание» отличает эвергетику как постнеклассическую науку об управлении от классической науки, в которой ключевую роль играет понятие «познание».

Разграничение понятий «познание» и «осознание» является важным и для более чёткого разделения представлений о науке и инновациях. Научное познание – «процесс построения систематизированного образа части реальности, ориентированный на выявление её общих свойств» [6]. Полученное научное знание требует дополнительных ресурсов и затрат для его преобразования в нововведение, пригодное для практического использования. Осознание (осмысление) человеком проблемной ситуации, в которую он «погружён», предполагает её рассмотрение как целостности, ведь «видеть смысл значит охватить целое» [5]. Здесь речь идёт не только (и не столько) о знании, «отражающем» положение дел, сколько о тех методах, средствах и действиях, с помощью которых проблемная ситуация могла бы быть урегулирована. И если такие инструменты отсутствуют, то возникает потребность в инновации, т.е. осознание проблемы означает и рождение инновационной идеи.

Список литературы

[1] Vittikh V.A. Evolution of Ideas on Management Processes in the Society : From Cybernetics to Evergetics. – Group Decision and Negotiation. – http://link.springer.com/article/10.1007/s10726-014-9414-6/fulltext.html. Published online : 14 September 2014.

[2] Виттих В.А. Проблемы эвергетики. – Проблемы управления, № 4, 2014, с.69 – 71.

[3] Vittikh Vladimir A. Introduction to the Theory of Intersubjective Management. – Group Decision and Negotiation, volume 24, issue 1, January 2015, p.67 – 95. – http://link.springer.com/article/10.1007/s10726-014-9380-z/fulltext.html. Open Access, Date : 09 March 2014.

[4] Франкл В. Человек в поисках смысла. – М.: Книга по требованию, 2012. – 366 с.

[5] Лэнгле А. Жизнь, наполненная смыслом. Логотерапия как средство оказания помощи в жизни. – М. : Генезис, 2014. – 144 с.

[6] Словарь философских терминов. – М.: ИНФРА – М, 2004. – 731 с.

ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РОЖДЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ИДЕЙ

В.А. Виттих[1], Д.В. Горбунов[2], Т.В. Моисеева[1], С.В. Смирнов[1]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления сложными системами
Российской академии наук
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
vittikh@iccs.ru
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

[2] Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)
443086, Самара, Московское шоссе, 34, Россия
GorbunovDV@economy.samregion.ru
тел: +7 (846) 332-73-86

Ключевые слова: *инновационная идея, проблемная ситуация, интерсубъективное управление, актор, самоорганизующееся сообщество, аргументированный дискурс, консенсус.*

Abstract
The problem of managing the process of birth, development and implementation of innovative ideas, executed in a range from academic analysis to the practice of innovation management in one of the developed regions of Russia is discussed. A new approach to the process of managing the emergence of innovative ideas (intersubjective management) is proposed.

Введение

Одним из ключевых вопросов развития общества является совершенствование механизмов рождения и распространения инноваций [1]. Исследованию этих вопросов сегодня уделяется большое внимание [2, 3, 4], но ясного понимания того, как и где инновации зарождаются, и как управлять этим процессом, в обществе пока нет.

Так, например, основатель консалтинговой компании Bwiti bvba Джеффри Баумгартнер (Jeffrey Baumgartner) [5], описывает подход, используемый в ряде других работ [6,7], который включает в себя три этапа и помогает грамотно организовать процесс рождения инновационных идей, а также направить его в русло, соответствующее стратегии развития компании. На первом этапе, по мнению автора, необходимо сформулировать проблемные области работы предприятия, на втором - определить круг проблем, являющихся причиной недостатков компании, определенных в рамках первого этапа. Решение таких проблем как раз должно быть целью будущих инноваций. Определив круг проблем, требующих инновационного решения, Джеффри Баумгартнер предлагает сконцентрироваться на генерации идей. Третий шаг – оценка предложенных идей экспертами, которые с помощью специальной матрицы анализируют разные идеи по критериям, соотносящимся со сформулированными ранее проблемами, а также возможностями компании. Идеи, набравшие большее количество баллов, признаются экспертами оптимальными для реализации.

Согласимся с утверждением Дж. Баумгартнера, высказанным в данной работе, что к обсуждению проблемы следует привлекать «как можно более широкий спектр действующих лиц, занятых в процессе, к которому адресована проблема». Действительно, чем шире круг действующих лиц, тем больше возможностей посмотреть на проблему со всех сторон. Эта точка зрения поддерживается японскими специалистами И. Нонакой и Х. Такеучи, авторами

известной книги «Компания – создатель знания. Зарождение и развитие инноваций в японских фирмах», которые ратуют за избыточность информации [8].

Дж. Баумгартнер также подчеркивает, что самая распространенная ошибка, которую допускает руководство предприятия – это выставление предложенных идей на голосование. Поскольку голосование направлено скорее на соперничество, чем на сотрудничество, мы думаем, что принятие решения таким способом снижает вероятность конструктивного обсуждения и выбора той инновационной идеи, реализация которой назрела в данный момент.

Однако, знакомство с подходом, предложенным Дж. Баумгартнером, сразу ставит вопрос: почему инновации зарождаются в компании? Возможно, этот процесс начинается раньше, и круг проблем очерчивает не руководитель компании, а другие заинтересованные лица, потенциальные потребители, не нашедшие средств удовлетворения некоторой своей потребности? Следует констатировать, что процесс зарождения инновационной идеи в литературе практически не освещен, хотя вопросы, связанные с экономическими аспектами разработки инновационного продукта, в некоторых работах исследуются очень тщательно [9].

Соглашаясь с важностью и необходимостью решения проблемы управления зарождением инноваций, в данной статье излагаются новые по сравнению с [5] принципы управления процессом рождения инновационной идеи, основанный на использовании теории интерсубъективного управления [10].

1. Осознание проблемной ситуации

Стартовой позицией, с которой начинается зарождение инновационной идеи, является проблемная ситуация, в которой оказался человек, когда осознается неудовлетворительное положение дел, но еще не ясно, что нужно делать для его изменения [11]. Люди осознают наличие проблемной ситуации. Следует обратить особое внимание на то, что здесь речь идет не о познании ситуации некоторым внешним субъектом, а об ее осознании, которое отличается тем, что осознают ее люди, оказавшиеся «внутри» этой проблемной ситуации (неоднородные акторы, выполняющие познавательно-деятельностные функции), а не находящиеся вне ее [12].

Подчеркивая различия между предлагаемым в данной статье подходом к управлению зарождением инновационных идей и описываемым в литературе [13], отметим коренное отличие осознания ситуации актором от познания ее лицами, принимающими решение (ЛПР). Как отмечается в статье [14], познание (cognition), в соответствии с классической научной рациональностью, рассматривается как процесс приобретения и систематизации знаний об объекте некоторым познающим субъектом, дистанцированным от объекта, и, следовательно, оно ориентировано на приобретение, систематизацию и представление экспертных внешних знаний и их использование при принятии управленческих решений лицами, наделёнными соответствующими полномочиями, и являются прерогативой ЛПР. Актор же не просто познаёт, а осознаёт сложившуюся проблемную ситуацию, в которую он погружен. Осознание ситуации актором означает, что он знает и понимает не только то, что происходит вокруг, но и то, что нужно что-то делать для изменения ситуации в желаемом для него направлении. Осознавая проблемность ситуации, одновременно с её изучением человек ищет способ решения проблемы, чтобы найти выход из сложившегося положения. Поэтому осознание проблемы – первый шаг на пути перевода проблемы в задачи, требующие решения [15].

2. Осмысление ситуации

После того как все акторы осознали себя причастными к ситуации и образовали интерсубъективное сообщество, происходит осмысление проблемной ситуации, на которое ориентировано осознание, связанное с поиском способа решения проблемы. Инновационная идея зачастую отождествляется с научной идеей, однако, разница между ними заключается в

том, что научная идея есть результат познания, а инновационная – осознания, которое можно рассматривать как постижение смысла ситуации. Другими словами, «осознание» и «осмысление» являются синонимами. «Смысл – это, по всей видимости, нечто, что мы проецируем в окружающие нас вещи, которые сами по себе нейтральны» [17], а осознание, связанное с поиском способа решения проблемы, ориентировано на осмысление ситуации.

Первое, что должны сделать акторы, столкнувшись с неопределённостью жизненной ситуации, - это понять смысл этой ситуации, который может трактоваться по-разному. С прагматической точки зрения (с позиции человека – актора, являющегося субъектом деятельности) смысл становится ценностью и характеристикой полезности объекта для человека, и обретается он применительно к конкретной ситуации, которая оценивается как неопределённая из-за наличия множества конкурирующих возможностей. Именно поиск смысла, как врожденная мотивационная тенденция (по В. Франклу [16]), является основным двигателем поведения и развития личности. Восприятие смысла есть «осознание возможности на фоне действительности, или, проще говоря, осознание того, что можно сделать по отношению к данной ситуации» [16].

Поскольку «смысл – это всегда реалистичный, сообразный обстоятельствам путь… Смысл в экзистенциальном понимании – функция от двух переменных: всякий раз меняются и условия, - т.е. возможности совершенно определённых актуальных обстоятельств, - и свойства, способности, таланты человека в эти обстоятельства попавшего… Смысл имеет то, что значимо для нас…» [17], то, очевидно, что каждый актор будет вкладывать свой смысл в любую проблемную ситуацию. Понимая, что один человек не в состоянии конституировать всё многообразие смыслов ситуации, акторы воспринимают от других то, чего не достаёт в их собственном опыте. Оказавшись связанными общей проблемной ситуацией, автономные неоднородные акторы, отличающиеся субъективными особенностями, интеллектуальными возможностями и представлениями о ценностях, осознают её по-разному, признавая при этом необходимость согласованных действий по управлению ситуацией. Не дожидаясь ничьих команд, акторы (становясь «социальными теоретиками» [18]), действуют, самоорганизуясь и образуя интерсубъективные сообщества для урегулирования проблемной ситуации совместными усилиями. Смыслопорождающая деятельность людей оказывает влияние на всё интерсубъективное сообщество, в котором человек существует, в результате чего образуется общее смысловое пространство. А акторы в поиске инновационной идеи вырабатывают совместно интерсубъективные знания относительно сложившейся ситуации, на основе которых сами, без внешних организующих воздействий, принимают решения о том, какие задачи нужно решать для её урегулирования.

3. Инновационная идея

Совместное осмысление проблемной ситуации разными акторами приводит к рождению инновационной идеи. Инновационная идея – это результат осмысления акторами проблемной ситуации, который формулирует представление о некотором нововведении, с помощью которого ее можно было бы урегулировать и которое создаст дополнительную ценность для акторов.

Можно сказать, что инновационная идея – это, в широком смысле, явление культуры, что означает, что она может появиться не обязательно в экономической сфере, но и в социальной или политической. Как утверждает [19], феномен инновации «давно и активно использовался в экономической области, но в последнее время разрушил традиционные границы экономической теории, обрел общесоциальный характер и … тесно связан с развитием других сфер общественной жизни, общественными отношениями, традициями, культурой, творчеством». Если обратиться к истории вопроса, то, как отмечается в [20], вплоть до начала XX в. «инновации охватывали наиболее ценностно нейтральные сферы, оказывающиеся на

периферии идейно-политического и социокультурного контроля, а понятие технологий связывалось исключительно с производственной деятельностью, что дало основание аналитикам (Д. Белл, А. Турен) говорить о буржуазном обществе прошлого века как о дуалистической культуре, являющейся новационной в производственной сфере и традиционной во внепроизводственной». Этот дуализм преодолевается в нашу эпоху, когда инновации, проникая во все сферы жизнедеятельности, становятся возможны не только в производственной сфере, но и в социальной, политической, организационно-управленческой.

Учитывая эволюцию статуса носителей инновационной деятельности, от «пограничных личностей и групп, представителей иноплеменных диаспор, занимающихся торговлей и менеджментом, … отличающихся отстраненным отношением к местным нормам и традициям» в 15—18 вв., до практиков инновации, которые становятся не только господствующей социокультурной установкой, но и особой профессией, в 20 в., отметим, что сегодня «инновационная деятельность, связанная с рациональной организацией по субъект-объектному принципу, должна корректироваться принципом самоорганизации» [20], а, следовательно, опираясь на теорию интерсубъективного управления, являться прерогативой неоднородных акторов.

4. Интерсубъективное управление зарождением инновационных идей

Поскольку появление инновационной идеи является результатом совместного поиска выхода из проблемной ситуации акторами, которые осознают ее как предмет их общей заботы, и понимают необходимость совместного принятия решения по её урегулированию, для управления этим процессом предлагается использовать интерсубъективный подход [10]. Главные действующие лица теории интерсубъективного управления – акторы, которые в отличие от менеджеров, являются участниками ненасильственных способов управления, базирующихся не на принуждении, а на достижении взаимопонимания и консенсуса с другими акторами.

Неудовлетворенные существующим положением неоднородные акторы, изначально никак не связанные друг с другом в пространстве, могут ощущать в себя в схожих проблемных ситуациях. Однако, каждый автономный актор будет по-своему «озабочен» [по М. Хайдеггеру] ситуацией, находясь в центре «предметного мира», в который входит всё то, чего касается эта озабоченность. У каждого актора формируется собственное описание предметного мира, т.е. субъективная (персональная) онтология, понимаемая как «описание и организация того, что есть множество вещей, которые существуют и которая определяет, как эти вещи взаимосвязаны» [20], и, как результат, собственное понимание смысла ситуации.

В одной проблемной ситуации обычно оказывается множество акторов, которые образуют интерсубъективное самоорганизующееся сообщество (под самоорганизацией понимается спонтанное, незапланированное возникновение порядка из случайных (хаотических) локальных взаимодействий без внешних организующих воздействий [22]). Несмотря на то, что акторы вкладывают свой собственный смысл в проблемную ситуацию, она может осознаваться ими как предмет их общей заботы, связанной с необходимостью совместного принятия решения по её урегулированию. Недостаток ресурсов (временных, финансовых, материальных) заставляет человека искать единомышленников для того, чтобы выработать согласованное решение по управлению ситуацией с учётом общих интересов. Следует особо подчеркнуть, что в отличие от «системы» с ее фиксированными, жесткими связями между элементами в таком сообществе неоднородных акторов отношения между ними более «размыты». Члены сообщества не обременены знанием, кто начальник или подчиненный, они связаны только общей целью, которую желают достичь в поисках выхода из проблемной ситуации, в отличие от участников организационных структур, описанных в [4, 13], и представляющих собой систему с четкими связями «начальник – подчиненный».

Несмотря на разные взгляды на проблемную ситуацию, члены сообщества понимают, что выход может быть найден только сообща, а значит, необходимо договариваться друг с другом. Неоднородные акторы приобретают, накапливают и применяют в процессе принятия коллегиального решения об урегулировании проблемной ситуации субъективные, интерсубъективные и объективные знания [23].

Пытаясь найти решение, коммуникативно рациональные акторы обсуждают ситуацию. В ходе многостороннего диалога неоднородных акторов производится разработка онтологической модели ситуации, представляющей собой согласованное описание ситуации в форме понятий и отношений [24]. Поскольку каждый актор не только персонален, т.е. обладает индивидуальностью, но при этом еще и социален, средством, позволяющим найти решение, которое устроило бы всех членов сообщества, является дискурс. Аргументированный дискурс, лежащий в основе взаимодействия акторов представляет собой, по определению Ю. Хабермаса, «особый идеальный вид коммуникации … имеющий целью критическое обсуждение и обоснование взглядов и действий участников коммуникации», своеобразный критерий определения истинности или ложности достигнутого соглашения [25]. В узком смысле дискурс обозначает, по определению Э. Бенвениста, «язык, который мы интерпретируем, исходя из конкретного контекста употребления, связывая его с говорящим, и, соответственно, с возможностью определить по личным местоимениям, наречиям места, времени и образа действия все его специфические составляющие» [26]. Поскольку термин «дискурс» используется для обозначения обсуждения определенных проблем, предлагается применить логику дискурса при интерсубъективном управлении зарождением инновационной идеи.

Взаимодействуя, акторы совершают такие коммуникативные действия, которые ориентированы на достижение взаимопонимания действующих индивидов и разрешения противоречия между частным (мое) и общим (наше). Люди, живущие в социуме и оказавшиеся в критической проблемной ситуации, должны научиться договариваться для того, чтобы достигать согласия.

Таким образом, в отличие от менеджера, для которого главным инструментом управления является «вертикальное» принуждение, воздействие, актор использует «горизонтальное» взаимодействие для достижения согласия, опираясь на солидарность акторов.Для того чтобы достичь договорённости, члены организованного сообщества должны провести сложные многосторонние переговоры, используя взаимные убеждения, и найти консенсус. Как отмечал Г. Хакен в работе «Самоорганизующееся общество», «то, что мы будем делать в будущем, будет определяться не столько высоким уровнем развития техники, сколько социологическими конструктами, в особенности нахождением консенсуса в социальном плане [27]. Консенсус, найденный в результате обсуждения проблемы всеми неоднородными акторами, приводит к рождению инновационной идеи, когда все сообщество решает, что нужно делать для урегулирования проблемной ситуации.

5 Формализованная информационная технология для представления смысла проблемной ситуации в процессах коллективного принятия решений

Сказанное выше обозначает специальную потребность в технологической платформе для реализации положений формирующейся теории интерсубъективного управления в системах, главной особенностью которых является коммуникация людей – акторов проблемной ситуации, требующей урегулирования, - нацеленная на достижение их взаимопонимания.

Уже отмечено, что в качестве смысловых моделей целесообразно использовать онтологические модели ситуаций [24], т.е. формальные онтологии [28, 29]. Очевидно, что эти модели являются некими производными когнитивной структуры восприятия проблемной

ситуации каждым отдельным ее актором, следовательно, начальной задачей становится формальное представление этой структуры.

Решение этой задачи связано с констатацией того, что фундаментальную роль в постижении актором смысла проблемной ситуации играют две когнитивные способности человеческого сознания: различение в подобных ситуациях отдельных (дискретных) объектов и обнаружение связей между этими объектами. Связи определяют отношения объектов в проблемной ситуации: унарные интерпретируются как агрегируемые объектами свойства, а большей арности описывают виды ассоциаций объектов (при смысловом моделировании любых ассоциаций достаточно ограничиться бинарными отношениям).

Субъективность восприятия актором проблемной ситуации проявляется не только в видении своеобразного объектного состава проблемной ситуации. Еще более важный аспект субъективизма состоит в том, что каждый актор «примеривается» к проблемной ситуации исходя из собственной системы ценностей и целей, элементарной моделью которых может служить множество показателей и критериев. Это множество – своеобразная призма, сквозь которую актор «видит» ситуацию, взаимодействуя тем или иным способом с обнаруживаемыми там объектами (подвергая эти объекты определенным проверочным процедурам, измеряя их), и, следовательно, именно это множество надлежит интерпретировать как множество свойств объектов проблемной ситуации, которые (и только они) принимаются актором во внимание. Таким образом, простейшим формальным представлением когнитивной структуры восприятия актора проблемной ситуации оказывается известная объектно-признаковая модель, фиксируемая таблицей «объекты-свойства» [30].

С целью идентификации смысла проблемной ситуации для актора (в виде формальной онтологии) целесообразно применить метод онтологического анализа данных - таблицы «объекты-свойства» [31], основой которого служит анализ формальных понятий [32].

В онтологическом анализе данных формат представления объектно-признаковой модели усложняется для представления реалий исходной информации о проблемной ситуации. Так, для учета итеративного взаимодействия актора с проблемной ситуацией фиксируются результаты многократной независимой оценки свойства у объектов; отражается использование актором совместно нескольких различных оценочных процедур для выяснения одной и той же характеристики ситуации; акцентируется различное доверие актора к различным источникам сведений и др.

Неполнота и противоречивость имеющихся данных – типичные условия, в которых актору приходится выстраивать смысловую картину проблемной ситуации. Моделирование этих условий при применении онтологического анализа связано, прежде всего, с выбором адекватного способа оценивания истинности базовых семантических суждений о проблемной ситуации - «объект *x* обладает свойством *y*», - извлекаемых в ходе анализа из объектно-признаковой модели. Для моделирования «человеческого подхода» к подобным оценкам онтологический анализ опирается на понятийный и аналитический аппарат многозначных логик [33].

Таким образом, используя очерченный подход, соответствующие методы и средства каждый актор в состоянии формализовать в онтологической модели свое, основанное на собственной системе ценностей, понимание проблемной ситуации.

Сам по себе этот результат весьма значим для актора, позволяя «разобраться в себе», увидеть границы своего восприятия реальности, опубликовать свою позицию на общепринятом языке и, при необходимости, априори (до начала сотрудничества с другими акторами проблемной ситуации) скорректировать ее с учетом особенностей рассматриваемой ситуации.

Наконец, для взаимопонимания и взаимодействия акторов проблемной ситуации в процессе коллективного принятия решений субъективные смысловые модели нужно уметь формально объединять. Онтологический инжиниринг предлагает соответствующие методы и

средства [34, 35], что позволяет в итоге построить коммуникативную смысловую модель, интегрирующей взгляды на проблемную ситуацию всех ее акторов [36].

6 Управление процессом рождения и развития инноваций в регионе (на примере Самарской области)

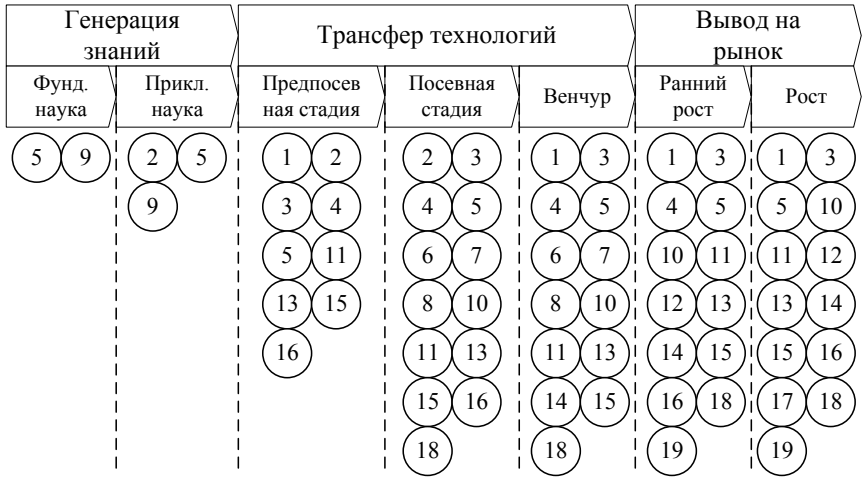
Изложенный интерсубъективный подход предлагается положить в основу управления процессом зарождения инновационных идей в Самарской области. С этой целью в регионе должна быть создана «интеграционная платформа», представляющая собой совокупность организационных механизмов и специальным образом разработанных информационных систем и технологий, которая позволяла бы неоднородным акторам, осознавшим наличие проблемной ситуации, найти друг друга, образовать интерсубъективное сообщество и вступить в дискурсивные переговоры, базирующиеся на аргументации, а не на принуждении. В результате таких переговоров, предполагающих достижение взаимопонимания и консенсуса, акторы могут найти готовое решение проблемы, не требующее никаких инноваций. Однако в современном открытом и динамичном мире, в котором все возрастающую роль играют человеческие ценности, удовлетворение подчас противоречивых интересов людей, умение находить компромиссы в условиях изменяющегося окружения, неоднородные акторы могут совместно генерировать инновационные идеи.

Важно иметь в виду при этом, что все они могут работать в самых различных организациях, но их объединяет стремление найти устраивающую всех инновационную идею (конвенциональную истину, по А. Пуанкаре), реализация которой обеспечила бы возможность урегулирования проблемной ситуации. В итоге, образовывается интерсубъективное сообщество неоднородных акторов, объединенных некоторой инновационной идеей для разрешения проблемной ситуации.

Следующим шагом развития инновационной идеи является ее реализация. Следует отметить, что правительство Самарской области оказывает поддержку развития инноваций в регионе. За период 2005-2013 годы инновационная система Самарской области прошла значительный путь развития. Реализованы системные действия по формированию эффективной инновационной инфраструктуры, создавшей платформу для завершенного инновационного цикла; сформирована нормативно-правовая и организационная база, которая охватывает использование практически всех форм государственного управления зарождением инноваций, предусмотренных законодательством.

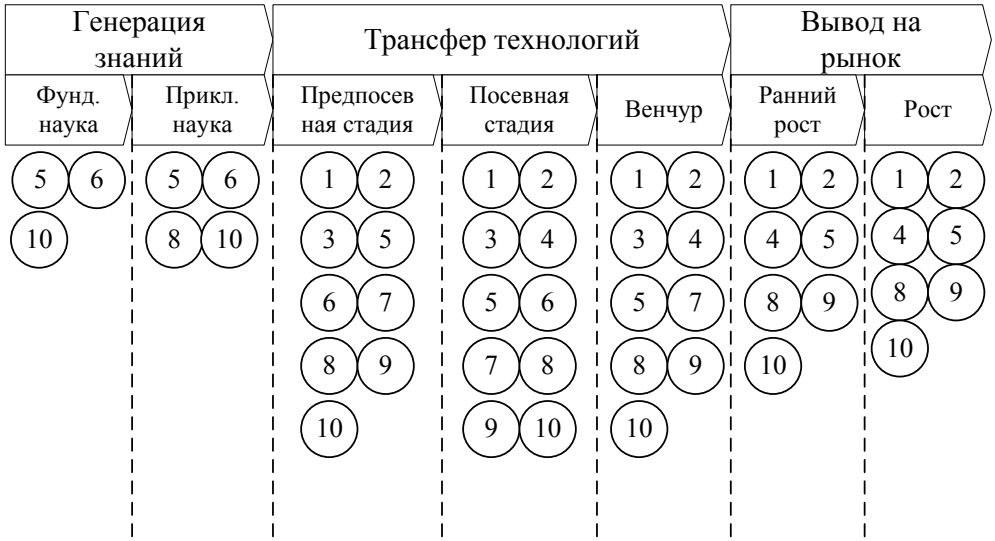
Анализ реализованной региональной инновационной системы выявил направления (меры) государственного регулирования зарождения инноваций, ориентированные как на университеты (науку и образование), так и на бизнес. Причем направления государственного управления можно классифицировать на финансовые, организационные, правовые, информационные, кадровые, инфраструктурные и др. В ходе проведенного исследования направления государственного воздействия, сфокусированные на возникновение инноваций, реализуемые в регионе в настоящее время, сгруппированы в две крупные категории – финансовые меры и организационные меры. Анализ показывает, что процессом управления охвачены все без исключения этапы и стадии инновационного процесса – от его инициирования до стадии масштабирования производства инновационного продукта (см. Рисунок 1 и Рисунок 2).

Вышеуказанные направления государственного регулирования процесса зарождения инноваций в Самарской области реализуются на основе постоянно совершенствующейся нормативной правовой базы, которая начала формироваться еще в 2005 году в отсутствие соответствующего федерального законодательства. Закон Самарской области «О государственной поддержке инновационной деятельности на территории Самарской области» был принят в 2005 году [37].



«Уникальные» меры поддержки в Самарской области:
1 - предоставление средств областного бюджета на строительство и реконструкцию объектов инфраструктуры;
2 - поддержка в форме субсидий научных исследований и разработок в целях содействия созданию университетами и другими организациями технологий, наукоемкой продукции и их коммерциализации.
«Универсальные» меры поддержки:
3 – субсидирование процентных ставок по кредитам коммерческих банков для субъектов инновационной деятельности;
4 - долевое участие в уставном капитале лиц, осуществляющих инновационную деятельность;
5 - предоставление средств бюджета на развитие инновационной инфраструктуры;
6 - приобретение оборудования за счет средств областного бюджета в собственность региона для предоставления субъектам инновационной деятельности на льготных условиях;
7 - льготное налогообложение субъектов инновационной деятельности на период реализации инновационного проекта и осуществления инновационной деятельности;
8 - установление льготных ставок арендной платы за пользование объектами собственности, принадлежащими региону, на которых осуществляется инновационная деятельность;
9 - поддержка научных исследований и разработок в форме региональных премий и грантов;
10 - возмещение части затрат на реализацию инновационных проектов, выполнение НИОКТР;
11 - субсидии на подготовку, переподготовку и повышение квалификации кадров для инновационной деятельности в порядке, установленном законодательством региона;
12 - возмещение части затрат на регистрацию патентов, лицензий, торговых марок и иной интеллектуальной собственности;
13 - возмещение части затрат, связанных с участием в выставках, конкурсах по инновационной деятельности, изобретательству и рационализаторству;
14 - компенсация части лизинговых платежей субъектам инновационной деятельности.
«Перспективные» меры поддержки:
15 - представление инвестиционного налогового кредита;
16 - предоставление субсидий на организацию мероприятий межрегионального и международного сотрудничества субъектов инновационной деятельности;
17 - размещение в установленном порядке государственного заказа на закупку инновационной продукции для государственных нужд региона;
18 - предоставление государственных гарантий субъектам инновационной деятельности;
19 - финансирование патентования изобретений, полезных моделей, промышленных образцов, созданных за счет средств бюджета региона.

Рисунок 1 – Направления регионального финансового управления зарождением и развитием инноваций



«Уникальные» меры поддержки в Самарской области:
1 - создание инфраструктуры и механизмов поддержки инновационной деятельности в рамках направлений инновационной политики;
2 - организация конкурсного отбора проектов развития инновационной инфраструктуры.
«Универсальные» меры поддержки:
3 – организация конкурсного отбора инновационных проектов, а также научно-исследовательских работ в целях поддержки прохождения ими стадии опытно-конструкторских работ и формирования инновационных проектов;
4 - содействие субъектам инновационной деятельности в привлечении внебюджетных средств;
5 - информационное обеспечение инновационной деятельности;
6 - содействие развитию кадрового потенциала инновационной деятельности, профессионального образования и дополнительного профессионального образования кадров в инновационной сфере, включая специалистов в области инновационного менеджмента, на основе и с использованием российской учебно-образовательной инфраструктуры, а также с привлечением других стран, имеющих опыт в подготовке соответствующих кадров;
7 - содействие продвижению инновационных разработок, поддержка участия и представления инновационных проектов региона на выставках, ярмарках, конференциях и иных информационно-рекламных мероприятиях;
8 - содействие развитию международного сотрудничества и внешнеэкономической деятельности в инновационной сфере.
«Перспективные» меры поддержки:
9 - учет, хранение и актуализация информации о субъектах и объектах инновационной деятельности (в т.ч. ведение реестров субъектов и объектов инновационной деятельности);
10 - проведение исследований и анализа состояния и развития инновационной деятельности в регионе.

Рисунок 2 – Направления региональной организационной поддержки

В 2014 году в данный закон внесены поправки, главным образом, связанные с расширением функций управления появлением и развитием научно-технических разработок и проектов университетов, закреплением норм в связи с развёртыванием площадок технопарков для активизации инновационной деятельности и возникновения инновационных идей. Необходимо отметить, что некоторые формы управления субъектами инновационной деятельности не отражены в законе Самарской области, но применяются на практике. Вместе с тем, необходимо совершенствование законодательства, к предлагаемым дополнительным мерам управления следует отнести:

- предоставление субсидий за счет средств субъекта РФ на возмещение затрат, связанных с оказанием консультационных, информационных, бухгалтерских, юридических и иных услуг и услуг по предоставлению в аренду на льготных условиях помещений субъектам, осуществляющим научную, научно-техническую и инновационную деятельность, реализующим инновационные проекты;
- предоставление налоговых льгот управляющей компании технопарков;
- предоставление налогового вычета индивидуальным венчурным инвесторам (бизнес-ангелам) на суммы квалифицированных инвестиций и налоговых льгот для иностранных инвесторов в местные венчурные фонды.

Принятие модельного закона «Об инновационной деятельности в субъекте Российской Федерации», разработанного Ассоциацией инновационных регионов России (АИРР) по поручению Рабочей Группы при Председателе Государственной Думы РФ по законодательным инициативам в сфере инновационной политики, является необходимым условием для унификации основных нормативных правовых норм в сфере развития инновационной деятельности и использования «лучших практик» членов АИРР [38], членом которой с 2012 года является и Самарская область. В Ассоциацию входят 13 субъектов Российской Федерации при поддержке ОАО «РОСНАНО», Российской Академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации.

В целом стоит отметить высокую степень агрегации в модельном законе норм и положений закона Самарской области. Это свидетельствует о действии в инновационной политике Самарской области общепризнанных среди инновационных регионов подходов и форм государственной поддержки инновационной деятельности, нацеленных на стимулирование исследовательской и инновационной активности. Это еще одно свидетельство того, что регион является лидером в инновационной сфере среди российских регионов. Однако для дальнейшего развития этого недостаточно, области необходимы новые идеи, необходима прорывная стратегия развития инновационной деятельности.

В 2012 – 2013 годах действовала областная целевая программа развития инновационной деятельности Самарской области на 2012-2015 годы [39], [40]. В программе предусмотрен целый ряд мероприятий: активизация генерации инновационных идей и разработок, поддержка инновационных проектов, трансфера технологий, освоения новых видов продукции, развитие научно-технологической базы территориально-производственных кластеров Самарской области, поддержка национального исследовательского университета, развитие межрегионального и международного сотрудничества в инновационной сфере.

С 2014 года государственное управление зарождением инноваций осуществляется в рамках подпрограммы «Развитие инновационной деятельности в Самарской области» на 2014-2015 годы государственной программы Самарской области «Создание благоприятных условий для инвестиционной и инновационной деятельности в Самарской области» на 2014-2018 годы [41].

Предполагается, что реализация программы по государственному регулированию в инновационной сфере позволит обеспечить:

- генерацию инновационных идей;
- создание эффективной системы поддержки и трансфера инновационных проектов;

- рост числа перспективных инновационных проектов, успешных старт-апов, разработанных и внедренных технологий;
- создание системы коммуникаций как единого механизма взаимодействия участников инновационной деятельности Самарской области;
- повышение компетенций, усиление кадрового обеспечения системы коммерциализации инноваций посредством формирования команд инновационных менеджеров;
- реализация кластерных инициатив, проектов инновационных кластеров.

Кроме того, стратегией социально-экономического развития Самарской области на период до 2020 года инновационно-внедренческая деятельность определена в качестве одного из приоритетных направлений устойчивого развития области; в настоящее время ведется работа по формированию стратегии социально-экономического развития Самарской области на период до 2030 года [42]. Однако, несмотря на наличие у многих российских регионов стратегий социально-экономического развития на средне- и долгосрочную перспективу, определяющих вектор развития, в том числе на базе стимулирования научно-исследовательской деятельности и внедрения инноваций, профильный стратегический документ в сфере инновационного развития действует только в Республике Татарстан – Стратегия развития научной и инновационной деятельности до 2015 года [43]. Самарской области необходимо также разработать стратегию развития инновационной деятельности – более специализированную, чем существующая общая стратегия социально-экономического развития региона. Особое внимание необходимо уделить начальной стадии инновационного процесса, которая заключается в генерации инноваций фундаментальной и прикладной наукой.

Заключение

Авторы надеются, что сделанный очерк проблематики управления процессом рождения, развития и реализации инновационных идей, выполненный в диапазоне от академического анализа до практики управления инновациями в одном из развитых регионов России, вызовет плодотворную дискуссию и определит новые горизонты и подходы в жизненно важной для страны сфере управления.

Благодарности

Работа выполнена при проведении исследований по теме «Разработка основ теории интерсубъективного управления с применением онтологических моделей ситуаций» в рамках государственного задания Институту проблем управления сложными системами РАН на 2013-2015 годы, а также при государственной поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации мероприятий Программы повышения конкурентоспособности Самарского государственного аэрокосмического университета среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013-2020 годы.

Список литературы

[1] Балацкий, Е.В. Модели рождения и распространения инноваций [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://kapital-rus.ru/articles/article/219057. Дата обращения: 13.02.2015 г

[2] Хван В., Хоровитт Г. Тропический лес. Секрет создания следующей Силиконовой долины. – Томск: Изд-во Томск. Гос. Ун-та систем апр. И радиоэлектроники, 2012. – 332 с.

[3] Садриев, А.Р. Управление идеями в системе инновационного менеджмента / Теория и практика общественного развития - 2012, № 11

[4] Селиванов С.Г., Гузаиров М.Б., Кутин А.А. Инноватика: учебник для вузов. – 3-е изд., доп. – М.: Машиностроение, 2013. – 640 с.

[5] Jeffrey Baumgartner. How to align innovation with your corporate strategy инноваций [Электронный ресурс] / Режим доступа : http://www.innovationmanagement.se/imtool-articles/how-to-align-innovation-with-your-corporate-strategy/. Дата обращения: 08.03.2015 г
[6] Г. Руденко. Инновации: формулы успеха. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://info.e-c-m.ru/magazine/84/eau_84_289.htm. Дата обращения: 08.03.2015 г
[7] Maxim Kotsemir, Dirk Meissner. Conceptualizing the Innovation Process – Trends and Outlook/ [Электронный ресурс] / Режим доступа : http://www.hse.ru/data/2013/04/27/1296974745/10STI2013.pdf. Дата обращения: 08.03.2015 г
[8] Нонака Икуджиро, Такеучи Хиротака. Компания - создатель знания. Зарождение и развитие инноваций в японских фирмах. М.: ЗАО "Олимп-Бизнес", 2011. - 384 с.
[9] Горбунов Д.В. Биржа инновационных проектов. – Самара: ПроектСтрой Групп, 2014. – 159 с.
[10] Vittikh Vladimir A. Introduction to the Theory of Intersubjective Management. – Group Decision and Negotiation, volume 24, issue 1, January 2015, p.67 – 95
[11] Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология. – М.: СИНТЕГ, 2007.
[12] Vittikh Vladimir A. Heterogeneous Actor and Everyday Life as Key Concepts of Evergetics. Group Decision and Negotiation.- http://link.springer.com/article/http://link.springer.com/article/10.1007/s10726-014-9423-5/fulltext.html. Published online: 29 November 2014.
[13] Голубков, Е.П. Инновационный менеджмент: Учебное пособие / Е.П. Голубков. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2013. - 184 с.
[14] Виттих В.А. О понятиях «познание» и «осознание» в науке об управлении. – См. настоящий сборник.
[15] Виттих В.А. Проблемы эвергетики. – Проблемы управления, № 4, 2014, с.69 – 71..
[16] Франкл В. Человек в поисках смысла. – М.: Книга по требованию, 2012. – 366 с.
[17] Лэнгле А. Жизнь, наполненная смыслом. Логотерапия как средство оказания помощи в жизни. – М. : Генезис, 2014. – 144 с.
[18] Климов И.А. Социологическая концепция Энтони Гидденса. – http://www.nir.ru/sj/sj/sj1-2-00klim.html
[19] Стовба А.В Проблема трактовки понятия «инновация». - [Электронный ресурс] / Режим доступа : http://grani2.kznscience.ru/participants/sekciya1/StovbaAV/ Дата обращения: 08.03.2015 г
[20] Новая философская энциклопедия: В 4 тт. М.: Мысль. Под редакцией В. С. Стёпина. 2001
[21] G.H. Merrill. The Babylon Project: Towards an Extensible Text-Mining Platform. – IEEE IT Pro, March-April 2003, IEEE Computer Society, 2003.
[22] G. Küppers. Self-organization – The Emergence of Order. From local interactions to global structures. – http://www.uni-bielefeld.de/iwt/sein/paper no 2, pdf, July 1999.
[23] Виттих В.А. Интерсубъективные системы как объекты постнеклассической науки. – Мехатроника, автоматизация, управление. - №1, 2012, С. 53-55
[24] Виттих В.А.. Онтологические модели ситуаций в процессах принятия коллегиальных решений. – Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XI Международной конференции. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2009, с. 405-410.
[25] Хабермас Ю.. Моральное сознание и коммуникативные действия. – СПб.: Наука, 2006.
[26] Словарь философских терминов. Научная редакция профессора В.Г. Кузнецова. М., ИНФРА-М, 2007, с. 140
[27] Haken H. Erfolgsgeheimnisse der Natur. Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken. (rororo Sachbuch). Reinbek bei Hamburg, 1995.
[28] Гаврилова Т.А., Муромцев Д.И. Интеллектуальные технологии в менеджменте: инструменты и системы. – СПб.: Изд-во «Высшая школа менеджмента»; Изд. дом СПбГУ, 2008. 488 с.
[29] Смирнов С.В. Онтологии как смысловые модели // Онтология проектирования. 2013. №2. С. 12-19.
[30] Барсегян, А.А. Анализ данных и процессов / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, И.И. Холод, М.Д. Тесс, С.И. Елизаров. - 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 512 с.
[31] Смирнов С.В. Онтологический анализ предметных областей моделирования // Известия Самарского научного центра РАН. 2001. Т.3. №1. С. 62-70.
[32] Ganter, B, Wille R. Formal Concept Analysis. Mathematical foundations. - Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. 290 p.
[33] Аршинский, Л.В. Векторные логики: основания, концепции, модели. - Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2007. 228 с.

[34] Виноградов И.Д., Смирнов С.В. Алгоритм объединения концептуальных схем на основе реконструкции их формального контекста // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды III международной конф. (4-9 сентября, 2001 г., Самара, Россия) – Самара: СамНЦ РАН, 2001. С. 213-220.
[35] Stumme G., Maedche A. FCA Merge: Bottom-Up Merging of ontologies // Proc. 17th Int. Conf. on Artificial Intelligence - IJCAI'01 (Seattle, WA, USA, August 4-10, 2001). P. 225-230.
[36] Смирнов С.В. Формальный поход к представлению смысла проблемной ситуации в процессах коллективного принятия решений // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (16-19 июня 2014 г., Москва, Россия). – М.: ИПУ РАН, 2014. - С. 6261-6270.
[37] Закон Самарской области от 09.11.2005 г. №198-ГД «О государственной поддержке инновационной деятельности на территории Самарской области» [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://innovation.gov.ru/node/3558.
[38] Исследования и материалы АИРР: Отчет о состоянии законодательства в сфере инновационной деятельности в регионах АИРР // Рабочая группа при Председателе Государственной Думы Федерального Собрания РФ С.Е. Нарышкине по законодательным инициативам в сфере инновационной политики [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.i-regions.org/materials/regional-research/10792.
[39] Постановление Правительства Самарской области от 27.10.2011 г. №700 «О признании утратившими силу отдельных постановлений Правительства Самарской области и утверждении областной целевой программы развития инновационной деятельности в Самарской области на 2012-2015 годы» [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://innovation.gov.ru/node/3558.
[40] Постановление Правительства Самарской области от 14.12.2012 г. №759 «О признании утратившим силу постановления Правительства Самарской области от 09.11.2012 г. №641 «О внесении изменений в постановление Правительства Самарской области от 27.10.2011 г. №700 «О признании утратившими силу отдельных постановлений Правительства Самарской области и утверждении областной целевой программы развития инновационной деятельности в Самарской области на 2012-2015 годы» и внесении изменений в постановление Правительства Самарской области от 27.10.2011 г. №700 «О признании утратившими силу отдельных постановлений Правительства Самарской области и утверждении областной целевой программы развития инновационной деятельности в Самарской области на 2012-2015 годы» [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://innovation.gov.ru/node/3558.
[41] Постановление Правительства Самарской области от 14.11.2013 г. №622 «Об утверждении государственной программы Самарской области «Создание благоприятных условий для инвестиционной и инновационной деятельности в Самарской области» на 2014-2018 годы» [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.samregion.ru/documents/government_resolution/06.08.2013/skip/46/57568.
[42] Постановление Правительства Самарской области от 09.10.2006 г. №129 «О Стратегии социально-экономического развития Самарской области на период до 2020 года» [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.i-regions.org/regions/samara/innovation-legislation.
[43] Указ Президента Республики Татарстан от 17.06.2008 г. №УП-293 «Об утверждении Стратегии развития научной и инновационной деятельности в Республике Татарстан до 2015 года» [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://innovation.gov.ru/node/3557.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ БИЗНЕС-ПРОЕКТОВ САМОЗАНЯТОСТИ БЕЗРАБОТНЫХ ГРАЖДАН НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИИ НЕЧЕТКИХ КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ

Л.Ю. Грудцына, И.Ю. Мышкина

Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета
423812, Набережные Челны, пр.Сююмбике, 10А, Республика Татарстан, Россия
kafedrasai.nchikfu@yandex.ru
тел: +7 (8552) 58-96-47

Ключевые слова: *аналитическая иерархия, экспертные оценки, нечеткие множества*

Abstract

Technique of estimation for business projects of self-employment on the basis of the hierarchical structure of optimality criteria. It is based on the method of analytic hierarchy process and fuzzy set theory, the feasibility of which is due to the possibility of formalization and joint consideration of diverse qualitative and quantitative subjective expert judgments.

Введение

Одним из направлений государственной политики по снижению напряженности на рынке труда является содействие самозанятости безработных граждан. Под самозанятостью понимается организация собственного дела с оформлением государственной регистрации в качестве индивидуального предпринимателя или юридического лица. Самозанятость и малое предпринимательство считаются наиболее динамичной составляющей экономики, гибко реагирующей на нужды и потребности людей, влияющей на качество жизни населения. Государственная поддержка осуществляется на базе центров занятости населения (ЦЗН) в виде консультативной помощи по вопросам организации и ведения собственного дела, а также компенсационной выплаты (субсидии) на организацию собственного дела.

Оценить целесообразность (потенциал) будущей предпринимательской деятельности достаточно сложно в виду невозможности применения точных математических методов, а также неоднозначности и множества факторов, влияющих на эту оценку. Поэтому задача разработки критериев и методов оценки бизнес-проектов остается актуальной.

Постановка задачи

В данной статье рассматривается методика оценки бизнес-проектов самозанятости для принятия решения об оказании финансовой помощи на их реализацию. Предложенная методика позволяет сформировать обобщенную оценку по различным показателям, как самого бизнес-плана, так и его исполнителя, а также учесть мнения нескольких экспертов.

Методика исследования

Исследование проводилось на базе ГКУ «Центр занятости населения города Набережные Челны». Принятие решения о целесообразности данного вида предпринимательской деятельности осуществляет экспертный совет на основании следующих материалов: бизнес-план, личное представление (презентация) бизнес-плана соискателем, анкетные данные соискателя, результаты проведенного тестирования на выявление способностей к предпринимательской деятельности [1]. Немаловажно также учесть, сможет ли будущий получатель субсидии вы-

полнять условия договора в установленном порядке. Многокритериальность и качественное различие показателей могут стать препятствием для получения объективной оценки, следовательно, и принятия того или иного решения относительно данного соискателя. Возникает необходимость в построении модели принятия решения, выделении значимых критериев оценки и подборе математических методов обработки исходных данных.

Для формирования информационной модели были предприняты следующие шаги: изучены нормативные и регламентирующие документы ЦЗН по организации содействия самозанятости; рассмотрены анкетные и тестирующие методики, применяющиеся для сбора личной информации о соискателе; опрошены члены Экспертного совета (эксперты). В ходе беседы с экспертами была составлена информационная иерархия критериев (рисунок 1.), часть которых взята из существующих регламентов.

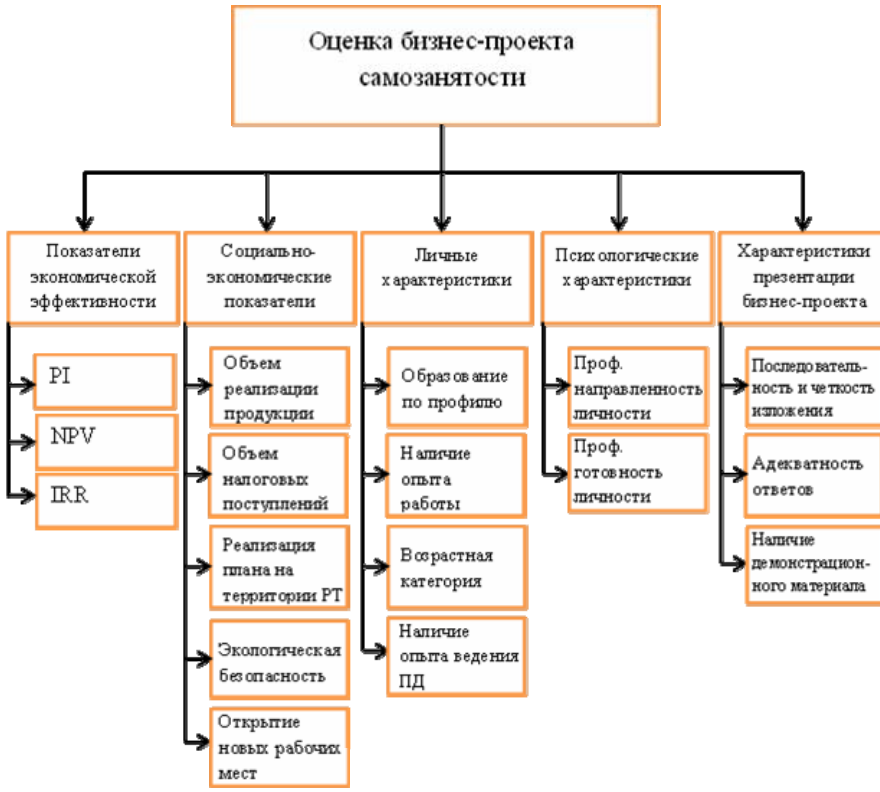


Рисунок 1 – Информационная иерархия критериев

В процессе формирования заключения о целесообразности бизнес-проекта были выделены следующие этапы, отраженные в функциональной модели (рисунок 2).

Этап 1. Определено 17 значимых характеристик бизнес-проекта (критериев), которые объединяются в пять групп, составляющих трехуровневую иерархическую структуру (рисунок.1). Предполагается, что каждый элемент структуры характеризуется значимостью (весом). Такая модель представляет собой декомпозицию итоговой оценки проекта самозанятости.

Этап 2. Чтобы оценить вес входящих в информационную иерархию критериев, предлагается использовать метод аналитической иерархии (МАИ) Саати [2]. Каждый эксперт составляет матрицы парных сравнений альтернатив соответствующих уровней иерархии. Ранжирование альтернатив (построение вектора приоритетов) осуществляется на основании главных

собственных векторов, получаемых в результате обработки матриц. Элементы векторов приоритетов по группе экспертов можно определить как среднее геометрическое.

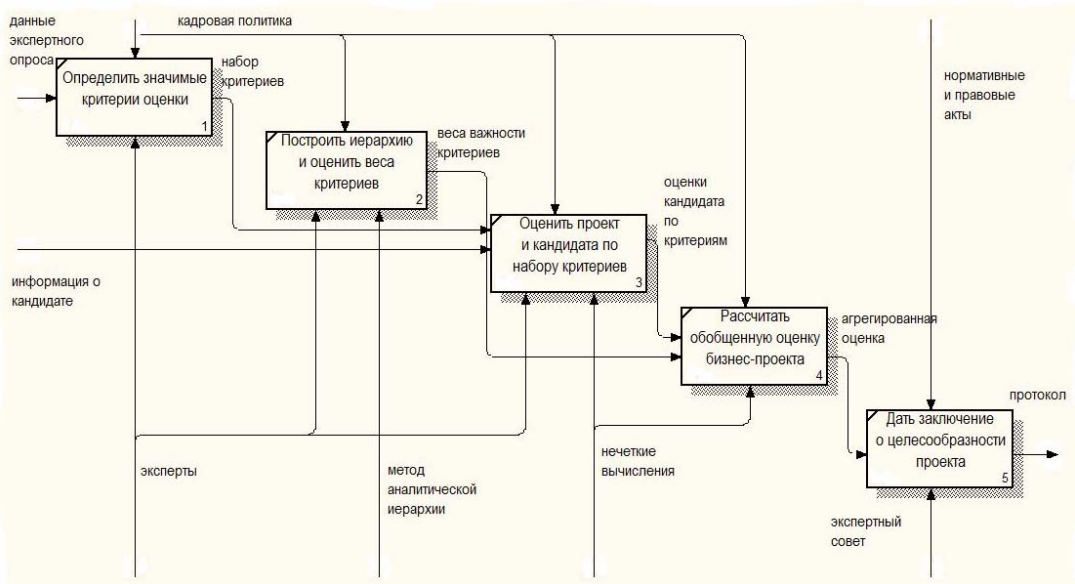


Рисунок 2 – Функциональная модель оценки бизнес-проекта самозанятости

Этап 3. Оценку проекта/соискателя по выделенным критериям предлагается провести с применением аппарата теории нечетких множеств. Каждый критерий рассматривается как лингвистическая переменная с тремя термами «низкий», «средний», «высокий», определяемыми своими функциями принадлежности. С помощью указанных функций фаззифицируется четкая оценка проекта/соискателя, выставленная экспертом по нижнему уровню критериев.

Этап 4. Этап получения обобщенной оценки (этап дефаззификации). Расчет обобщенной оценки *Xs* кандидата номер *s* предлагается проводить по формуле:

$$(1)\quad Xs = \frac{\sum_{k=1}^{3}\left[p_k \cdot \sum_{i=1}^{5}\left(w_i \cdot \sum_{j=1}^{f(i)} w_{ij} \cdot \lambda_{ij}^{k}(x_{ij}^{s}) \right) \right]}{\sum_{k=1}^{3}\sum_{i=1}^{5}\left(w_i \cdot \sum_{j=1}^{f(i)} w_{ij} \cdot \lambda_{ij}^{k}(x_{ij}^{s}) \right)},$$

где $k = \overline{1,3}$ – число значений входных лингвистических переменных, $i = \overline{1,5}$ – число компонент первого уровня иерархии, $j = \overline{1, f(i)}$ – число компонент второго уровня иерархии: $f(1)=3$, $f(2)=5$, $f(3)=4$, $f(4)=2$, $f(5)=3$; p_k – центр тяжести фигуры, образуемой k-й функцией принадлежности входных переменных; w_i – компоненты вектора приоритетов второго уровня иерархии; w_{ij} – компоненты векторов приоритетов третьего уровня иерархии; x_{ij}^{s} – четкая экспертная оценка характеристики ij соискателя номер s; $\lambda_{ij}^{k}(x_{ij}^{s})$ – значение функции принадлежности k-й лингвистической переменной при оценке характеристики ij.

Замечание. В тех случаях, когда оценка некоторой характеристики проекта/соискателя может быть получена без привлечения экспертного мнения, а именно, при помощи тестирующих методик (группа критериев «Психологические характеристики») или путем расчетов

(группа критериев «Показатели экономической эффективности»), значение ее x_{ij}^s нормируется, вычисляется $\lambda_{ij}^k(x_{ij}^s)$ и включается в формулу обобщенной оценки (1).

Приведенный выше метод расчета обобщенной оценки, базирующийся на нечеткой математике, может быть отнесен к методам свертки на иерархии критериев. Формула (1) является модификацией формулы, описанной в [3].

В качестве преимущества применения данной формулы в сравнении с классическим МАИ Саати можно отметить следующие моменты. В МАИ для вычисления результирующего вектора приоритетов (относительно вершины иерархии) строятся матрицы парных сравнений альтернатив относительно каждого критерия. В условиях сформулированной задачи альтернативами являются соискатели; экспертный совет на заседании рассматривает проекты порядка 20-40 соискателей, следовательно, составление матриц парных сравнений соискателей по каждому из критериев представляется весьма затруднительным. Предложенная формула (1) предполагает, что экспертом будет дана одна оценка по каждому критерию для каждого соискателя. Введение нечеткости позволяет рассматривать оценки соискателей, данные экспертом, неоднозначно, например, в определенной степени «высокой», в определенной степени «низкой», что добавляет гибкости итоговой оценке. Изменение параметров формулы дает возможность «настраивать» обобщенную оценку как при работе одного эксперта, так и группы экспертов.

Приведенный алгоритм допускает компьютерную реализацию в виде информационно-аналитической системы поддержки принятия решений.

Методический пример

Рассмотрим пример расчета оценки бизнес-проекта некоторого соискателя одним экспертом. Пусть экспертом проведена оценка критериев, входящих в информационную иерархию (рисунок 1).

По соответствующим матрицам парных сравнений вычислены векторы приоритетов второго уровня $(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5) = (0{,}07; 0{,}51; 0{,}13; 0{,}04; 0{,}25)$ и третьего уровня иерархии $(w_{11}, w_{12}, w_{13}) = (0{,}37; 0{,}35; 0{,}28)$, $(w_{21}, w_{22}, w_{23}, w_{24}, w_{25}) = (0{,}15; 0{,}21; 0{,}24; 0{,}23; 0{,}17)$, $(w_{31}, w_{32}, w_{33}, w_{34}) = (0{,}15; 0{,}21; 0{,}24; 0{,}23)$, $(w_{41}, w_{42}) = (0{,}5; 0{,}5)$, $(w_{51}, w_{52}, w_{53}) = (0{,}2; 0{,}55; 0{,}26)$.

Оценки проекта/соискателя по выделенным критериям – четкие и нечеткие – представлены в таблице 1. В качестве функций принадлежности для фаззификации четких оценок выбраны функции треугольного вида $\mu(x) = [a, b, c]$. В таблице 1 также приведены промежуточные вычисления для получения обобщенной оценки.

Произведем свертку нечетких оценок по критериям оптимальности согласно формуле 1:

$$Xs = \frac{1/6 * 0{,}1608 + 1/2 * 0{,}205 + 5/6 * 0{,}6342}{0{,}1608 + 0{,}205 + 0{,}6342} = \mathbf{0{,}66}$$

и получим обобщенную оценку бизнес-проекта данного соискателя.

Таблица 1 – Оценки бизнес-проекта по критериям оптимальности

Индекс ij	Четкая экспертная оценка x_{ij}	Значения функции принадлежности $\lambda_{ij}^k(x_{ij})$ соответствующих термов			$\sum_{j=1}^{f(i)} w_{ij} \cdot \lambda_{ij}^1(x_{ij})$	$\sum_{j=1}^{f(i)} w_{ij} \cdot \lambda_{ij}^2(x_{ij})$	$\sum_{j=1}^{f(i)} w_{ij} \cdot \lambda_{ij}^3(x_{ij})$
		K_1 «Низкий» [0, 0, ½]	K_2 «Средний» [0, ½, 1]	K_3 «Высокий» [½, 1, 1]			
11	0,8	0	0,4	0,6	0	0,456	0,544
12	0,8	0	0,4	0,6			
13	0,7	0	0,6	0,4			

21	0,7	0	0,6	0,4	0,17	0,132	0,698
22	0,9	0	0,2	0,8			
23	1	0	0	1			
24	1	0	0	1			
25	0	1	0	0			
31	0,5	0	1	0	0,37	0,32	0,31
32	0,9	0	0,2	0,8			
33	0,8	0	0,4	0,6			
34	0	1	0	0			
41	0,78	0	0,44	0,56	0	0,38	0,62
42	0,84	0	0,32	0,68			
51	0,9	0	0,2	0,8	0,104	0,196	0,7
52	1	0	0	1			
53	0,3	0,4	0,6	0			
					$\sum_{i=1}^{5}\left(w_i \cdot \sum_{j=1}^{f(i)} w_{ij} \cdot \lambda_{ij}^{1}(x_{ij})\right)$	$\sum_{i=1}^{5}\left(w_i \cdot \sum_{j=1}^{f(i)} w_{ij} \cdot \lambda_{ij}^{2}(x_{ij})\right)$	$\sum_{i=1}^{5}\left(w_i \cdot \sum_{j=1}^{f(i)} w_{ij} \cdot \lambda_{ij}^{3}(x_{ij})\right)$
					0,1608	0,2050	0,6342

Заключение

Целью данного исследования стала разработка методики оценки бизнес-проектов самозанятости безработных граждан на основе построения иерархической структуры нечетких критериев оптимальности. Для оценки бизнес-проекта по критериям были использованы нечеткие оценки, целесообразность которых обусловлена возможностью формализации и совместного учета разнородных качественных и количественных субъективных экспертных оценок бизнес-проекта, которые необходимо обрабатывать для получения общей коллективной количественной (четкой/нечеткой) оценки.

Предлагаемый метод свертки нечетких оценок по частным критериям оптимальности на основе иерархической структуры нечетких критериев базируется на методе анализа иерархий и теории нечетких множеств, в частности, применении операций над нечеткими оценками. Построенная информационная иерархия критериев включает 17 частных критериев, объединенных в группы на трех уровнях иерархии.

Была проведена тестовая апробация данной методики, проведена оценка реальных бизнес-проектов, полученные оценки проектов согласно предлагаемой методике и «традиционные» оценки, полученные в ходе работы экспертной комиссии с соискателями, коррелируют в 92%. При этом время принятия решения по одобрению или отказу соискателю в случае применения предлагаемой методики значительно сокращается.

Список литературы

[1] Положение об Экспертном совете по оценке бизнес-планов ГКУЦ ЦНЗ г. Набережные Челны : приказ ГКУЦ ЦНЗ г. Набережные Челны от 12.09.2013г. №109/1 ОД.

[2] Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993.

[3] Асанов А.З., Мышкина И.Ю. Решение некоторых кадровых задач на предприятии на основе информационных моделей профессиональных знаний специалистов и должностей //Вестник УГАТУ: науч. журнал УГАТУ. − 2010. – Т. 14, №4(39). – С. 185–193.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРИНЯТИЕМ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Н.Г. Губанов, А.А. Кимлык

Самарский государственный технический университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
alkim@rambler.ru
тел: +7 (846) 337-13-71, +7 (846) 278-54-51

Ключевые слова: *проекты нефтегазовой отрасли, база знаний, управление принятием решения*

Abstract

This clause describes the system model of oil and gas industry projects. Knowledge base for projects in oil and gas industry is discussed. Decision making process based upon competencies and resources availability is presented.

Введение

Перспективы развития нефтегазового комплекса России, которые отражены в энергетической стратегии РФ до 2030 года [1], предполагают реализацию большого количества проектов, связанных как со строительством новых объектов добычи нефти и газа и обустройства месторождений, так и с реконструкцией существующих объектов в связи с высокой степенью их износа.

Важным участником любого проекта в нефтегазовом комплексе являются проектные организации, отвечающие за принятие основных проектных решений. При этом специфика организации проектных работ в нефтегазовой отрасли обусловлена сложностью создаваемых объектов, которые сочетают в себе элементы промышленного строительства, технологии и инфраструктуры, территориальную распределенность и пространственную протяженность объектов, высокую наукоемкость проектных решений. Все это приводит к комплексности решаемых задач и требует согласованности деятельности специалистов различного профиля из разных компаний.

Основным регионом, который обеспечивает прирост добычи нефти в стране в последнее время, являются регионы Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия). Восточно-Сибирский регион также играет одну из ключевых ролей в компенсации падающей добычи нефти на старых месторождениях традиционных нефтедобывающих регионов и обеспечении энергетической безопасности России.

В газовой промышленности РФ также происходит смена географии добычи. Так, если раньше основная добыча газа на территории ЯНАО осуществлялась на в Надым-Пур-Тазовском междуречье, то в настоящее время идет подготовка к освоению следующих месторождений: полуостров Ямал, Обская и Тазовская губа. В 2012 г. запущен крупнейший проект разработки Бованенковского месторождения на Ямале. В ближайшее время ожидается возрастание роли шельфа южных (Каспийского), арктических (Баренцевого и Карского), а также дальневосточных (Охотское) морей. По оценкам ИНГГ СО РАН, добыча нефти в Восточной Сибири и Республике Саха (Якутия) может возрасти до 85 – 95 млн тонн (в зависимости от варианта развития территории), что может составить до 17 – 18% в структуре российской неф-

тедобычи. Добыча газа в 2020 г. может составить 70 – 75 млрд м3, в 2040 г. – 140 – 155 млрд м3, что может составить до 10 – 15% в структуре российской газодобычи.

Добыча нефти в шельфовой зоне может возрасти до 28 – 32 млн тонн в 2020 г. и 30 – 40 млн тонн – в 2040 г., что составит 5 – 6% от общероссийской добычи. Российская Федерация имеет существенные возможности по наращиванию добычи и поставок газа с шельфа. Однако объем добычи газа на шельфе в существенной мере будет зависеть от конъюнктуры мировых рынков газа [2].

Сокращение запасов сырьевой базы, необходимость смещения центра добычи в более сложные и неизученные регионы, тем более в районы шельфа, потребует значительных усилий не только со стороны добывающих компаний, но и со стороны проектных организаций в связи с увеличением сложности и комплексности проектов. Потребуется развитие новых технологий нефтегазодобычи, и, как следствие, новых компетенций в разработке и освоении нефтегазовых месторождений. В этой связи особенно важным, с точки зрения проектно-изыскательских предприятий, будет являться оценка возможности реализации проектов (на основании наличия необходимых компетенций и ресурсов) на стадии заключения договорных обязательств.

1 Алгоритм принятия решения в управлении проектами нефтегазовой отрасли

Логично, что любой проект нефтегазовой отрасли должен соотноситься, в итоге, с некоторой целью - конечным результатом. Прежде всего, конечно, речь идет об экономическом результате (получении прибыли), но возможен также и внеэкономический результат – например, выстраивание долгосрочных партнерских отношений с перспективным заказчиком. Комплексная оценка проекта позволяет проводить анализ потенциальной целесообразности реализации проекта; потенциальной возможности реализации проекта; оценивать преимущества рассматриваемых проектов в сравнении с альтернативными проектами, ранжировать проекты с целью включения их в пул проектов предприятия.

При принятии управленческих решений о принятии в разработку того или иного проекта по обустройству нефтяных и газовых месторождений, как правило, руководствуются следующими принципами:

- соответствие интересам акционеров предприятия;
- соответствие потенциального проекта стратегическим целям предприятия;
- наличие соответствующих компетенций для выполнения проекта;
- наличие ресурсов для выполнения проекта;
- учет всех наиболее существенных последствий проекта, как экономических, так и внеэкономических;
- обеспечение условий сопоставимости показателей эффективности для различных проектов;
- учет влияния неопределенности и рисков, сопровождающих реализацию проекта;
- определение предпочтительности одного из ряда показателей эффективности при их совместном использовании для оценки проекта.

Рассмотрим комплексный алгоритм отбора проекта нефтегазовой отрасли; в нем оценка выполнимости проекта проводится в два этапа: на первом этапе определяют наличие необходимых компетенций для выполнения проекта, на втором этапе наличие необходимых ресурсов для выполнения проекта (рисунок 1).

Таким образом, сначала проводится оценка наличия компетенций в организации для выполнения данного проекта и затем наличие ресурсов. Одна из ключевых сложностей анализа многокритериальных задач - эффект несравнимости исходов. Несравнимость исходов является, в некотором смысле, формой неопределенности, которая связана со стремлением лица

принимающего решение «достичь противоречивых целей» и является т.н. ценностной неопределенностью [3].

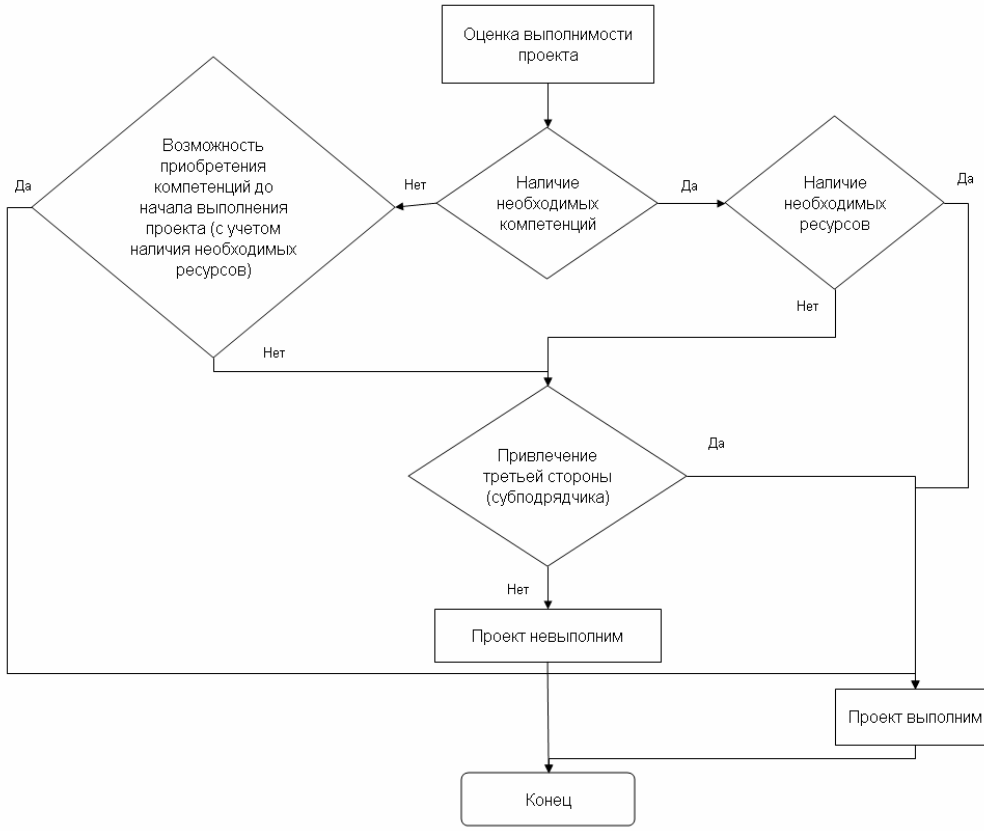


Рисунок 1 – Оценка выполнимости проекта

Математическая модель многокритериальной задачи принятия решения может быть представлена в виде множества векторных оценок, содержащее полную информацию о полезности этого исхода для лица принимающего решение.

Наиболее распространенное отношение, по которому производится сравнение векторных оценок — отношение доминирования по Парето. На его основе формируется Парето - оптимальное множество векторных оценок. Парето - оптимальных исходов, обычно, существует несколько. Дать однозначный ответ на вопрос, какой же из Парето – оптимальных исходов следует считать оптимальным, сложно, потому что два Парето – оптимальных исхода не сравнимы относительно доминирования по Парето. Тогда возможны два пути [4]:

- для заданной многокритериальной задачи принятия решения существует множество ее Парето-оптимальных исходов, а выбор конкретного оптимального исхода из множества Парето-оптимальных предоставляется принимающему решение;
- производится сужение множества Парето-оптимальных исходов с помощью некоторых формализованных процедур, что облегчает окончательный выбор исхода для лица, принимающего решение.

2 Системная модель проекта нефтегазовой отрасли

Используя общесистемный подход, представим систему оценки проекта нефтегазовой отрасли в виде структуры, состоящей из системы управления СУ, объекта управления ОУ и среды. В нашем случае, данная формализация представится в следующем виде:

(1) $S =< G, P, L >,$

где G - система управления, представленная руководством проектной организации, которое осуществляет поддержку реализации проектов в организации,

(2) $P^{oil} = \left\{ p_1^{oil}, p_2^{oil}, ..., p_n^{oil} \right\} = \bigcup_{i=1}^{n} p_i^{oil},$

где P^{oil} - множество проектов p_i^{oil} по обустройству нефтегазовых месторождений.

Система управления характеризуется совокупностью целей C и управляющих воздействий U:

(3) $G = C \cup U.$

Согласно алгоритму предыдущего пункта оценка выполнимости проекта осуществляется в два этапа. На первом этапе оценивается наличие необходимых компетенций для выполнения проекта, на втором этапе оценивается наличие ресурсов для выполнения проекта.

Управляющие воздействия осуществляются принятием решений по заданному проекту на различных этапах оценки: оценки наличия компетенций, оценки наличия ресурсов, оценки возможности привлечения субподрядной организации - $U = (U_{OK}, U_{OP}, U_{OC})$, где U_{OK} - принятие решение по наличию необходимых компетенций для выполнения проекта; U_{OP} - принятие решения по наличию необходимых ресурсов для выполнения проекта; U_{OC} - принятие решения по привлечению субподрядных организаций для выполнения всего проекта либо его части.

3 База знаний проекта нефтегазовой отрасли

Объектом управления в данном случае является проект нефтегазовой отрасли P^{oil}.

Стоит отметить, что создание математической модели достаточно затруднительно из-за существования множества неопределенных параметров, а также сложных взаимосвязей между ними.

Построим прецедентную модель на основе накопленных данных о многочисленных реализованных проектах, и сформируем тем самым базу знаний проектов нефтегазовой отрасли.

Данный подход основывается на гипотезе компактности, состоящей в том, что реализации одного и того же образа обычно отражаются в признаковом пространстве в геометрически близкие точки, образуя компактные сгустки [5]. Если положить, что информативные признаки образов близки то и целевые признаки, указывающие имя образа, тоже будут близки. Данная гипотеза равноценна предположению о наличии закономерной связи между признаками. Необходимо определёнными методами сформировать базу знаний, содержащую информацию о закономерностях развития объектов нефтегазовой отрасли.

Таким образом, рассмотрим систему как тройку $S = \langle D, P, I \rangle$, где D - база данных, содержащая декларативную часть знаний; $P = \{p_1, ..., p_m\}$ - база правил, которая содержит процедурную часть знаний; I – интерпретатор, который обеспечивает выполнение информационных процессов, происходящих в системе. Его функционирование можно описать в четыре этапа: $I = \langle V,S,R,W \rangle$, где V – этап выбора, осуществляющий выбор из P и из F подмножества активных продукций P_V и подмножества активных данных F_v соответственно, которые будут использо-

ваны в очередном цикле работы интерпретатора. *S* – этап сопоставления, определяющий множество означиваний, т.е. множество пар: правило $(p_i) \in P_v$ $\{d_i\} \subset F_{v.}$.

База данных содержит информацию о внедрённых проектах и может быть представлена фреймовой моделью:

$$D = (D_1, D_2, \ldots, D_k) = \bigcup_{i=1}^{k} D_i, \quad (4)$$

где D_i - данные i-го проекта нефтегазовой отрасли [6].

$$D_i = \left\{ \left(\left\langle D_i^n \right\rangle, H \right), \left(\left\langle D_i^u \right\rangle, F \right), \left(\left\langle D_i^э \right\rangle, E \right) \right\}, \quad (5)$$

где $D_i^j, j = 1,2,3$ - имена фрейма для различных этапов проекта нефтегазовой отрасли: обоснование инвестиций в строительство, проектная документация, рабочая документация; $\langle H \rangle$ - имя слота = ⟨параметры проекта на этапе обоснования инвестиций в строительство⟩; $\langle F \rangle$ - имя слота = ⟨параметры проекта на этапе проектной документации⟩; $\langle E \rangle$ - имя слота = ⟨параметры проекта на этапе рабочей документации⟩. Тогда база знаний формируется как фрейм

$$Z = (Z_1, Z_2, \ldots, Z_g) = \bigcup_{i=1}^{g} Z_i \ , \quad (6)$$

где Z_i - знания i-го проекта нефтегазовой отрасли.

Под знаниями здесь следует понимать нетривиальные практически полезные и доступные интерпретации сведения, необходимые для принятия решений в проектировании объектов нефтегазовой отрасли, заключающиеся в определенных закономерностях и систематических взаимосвязях между переменными, которые затем можно применить для исследования новых совокупностей данных.

Модель проекта нефтегазовой отрасли представим в виде:

$$M = (M_1, M_2, \ldots, M_v) = \bigcup_{i=1}^{v} M_i \ , \quad (7)$$

где M_i - модель *i*-го инвестиционного проекта.

Тогда реализационную структуру задачи принятия решения можно представить в виде:

$$V = (U, L, M, F^R), \quad (8)$$

где U - множество управляющих воздействий; L -множество состояний среды, характеризуемой состоянием региона; M -модель выбранного ИП; $F^R; U \times L \to M$ -функция реализации. Оценочная функция $\langle M, \varphi \rangle$ ставит в соответствие исходу M_i некоторое значение φ_i .

Основа выбора той или иной альтернативы будет заключаться в решении задачи многокритериальной оптимизации, которая, в свою очередь, может быть решена методом сравнения множеств по Парето [7].

Таким образом, после анализа модели проекта, имеется возможность принятия решения на этапе заключения договора по наличию необходимых компетенций и ресурсов.

4 Варианты практического применения

Данная модель может применяться, например, на этапе участия в конкурсе на выполнение проектов по обустройству нефтегазовых месторождений. Имея сформированную базу знаний проектов, руководство проектной организации будет иметь возможность принять решение по предлагаемому тендерному проекту с точки зрения опыта выполнения таких проектов ранее, наличие необходимых компетенций для выполнения проекта, наличие необходимых ресурсов для выполнения проекта, либо принять решение по привлечению субподрядных организаций для выполнения проекта, или же «нарастить» необходимые компетенции в собственной организации.

Заключение

Предложена системная модель проекта нефтегазовой отрасли. Рассмотрена модель базы знаний, основанная на фреймовой модели и позволяющая прогнозировать исход проекта на основе анализа базы схожих проектов, а также принимать решения по выполнимости проекта исходя из наличия необходимых компетенций, необходимых ресурсов для выполнения. Модель позволяет также принят решение о привлечении субподрядных организаций либо увеличению собственных компетенций.

Список литературы

[1] Энергетическая стратегия России на период до 2030 года (http://www.minenergo.gov.ru/activity/energostrategy/)

[2] Эдер Л.В. Основные проблемы инновационного развития нефтегазовой отрасли в области добычи нефти и газа / Л.В. Эдер, И.В. Филимонова, И.В. Проворная, В.Ю. Немов. – Специализированный журнал «Бурение и нефть» №04, апрель 2014.

[3] Ример М.И. Экономическая оценка инвестиций: Учеб. пособие / Ример М.И. и др., Касатов А.Д., Матиенко Н.Н.; Ример М.И., Касатов А.Д., Матиенко Н.Н. - 2-е изд. перераб. и доп. - Самара: СГЭА, 2003. - 452с.

[4] Рябцев В.М. Бюджетные статистические исследования. Оценка территориальной дифференциации и асимметрии индикаторов региональных бюджетов: Монография / Рябцев В.М., Котенева Т.В., Т. В. Котенева. - Самара: СГЭА, 2000. - 124с.

[5] Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний / Н.Г Загоруйко. - М.: Высшая школа, 1999.

[6] Батищев В.И., Губанов Н.Г., Пирогов В.Н. Системный анализ и модели формирования схемы финансирования региональных промышленных инвестиционных проектов // III тысячелетие – новый мир: Тр. Междунар. Форума по проблемам науки, техники и образования. Москва, 2005. Т.1. С. 155 - 157.

[7] Батищев В.И., Губанов Н.Г., Пирогов В.Н. Системная характеристика задач принятия решений городских инвестиционных проектов в строительство // Наука и инновации – 2005: Материалы международной научно-практической конференции. Днепропетровск, 2005. С. 6-9.

АНАЛИЗ МНОГОСВЯЗНЫХ ПРОЦЕССОВ ОБМЕНА ЗНАНИЯМИ В НАУЧНОЙ ШКОЛЕ

Б.Г. Ильясов, А.Г. Карамзина, Ю.Р. Фазлетдинова

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»
450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия
ilyasov@tc.ugatu.ac.ru
тел: +7 (347) 273-78-35, +7 (347) 273-82-80

Ключевые слова: *многосвязная система, научная школа, темп накопления знаний, темп движения к цели, самоорганизация, линейная и нелинейная модель*

Abstract

Analysis of multiply connected processes exchange and knowledge accumulation is carried in the article. A scientific school is considered as a system consisting of a set of interrelated and interacting elements – researchers. The scientific school can function in two modes: free interaction and business (active) mode. Models of scientific school in the linear and nonlinear forms are submitted in the article. Conclusions about the influence of factors on the condition of the system are done by based on the simulation results.

Введение

Определение закономерностей функционирования науки во времени является одной из основных проблем не только при теоретическом исследовании науки, но и при решении практических задач. Вопрос развития науки интересен достаточно большому количеству исследователей [1-5]. Особое внимание этому стало уделяться вследствие научно-технических революций во многих областях знаний.

В XX веке основными единицами научной деятельности стали научные сообщества, генерирующие новое знание на основе разделения и кооперации труда, рутинизации процессов создания, передачи и использования знаний. Одной из форм таких научных сообществ является научная школа – объединение исследователей, выполняющее функции продуцирования и распространения новых знаний и обладающее способностью к самовоспроизводству [6].

Создание большинства моделей науки и научной школы базируется на предположении неограниченного роста знаний. Но фактически оно ограничивается множеством факторов. Например, лимитирование финансирования науки соответственно сдерживает и рост научного знания [1]. Поэтому целесообразно в модели вводить различного вида ограничения, которые бы ограничивали бесконечный рост научных достижений. Таким фактором может быть, например, нелинейность, тем более что многие процессы в природе и в обществе носят нелинейный характер [2].

Анализ процессов накопления и обмена знаниями в научных школах средствами моделирования позволяет выявить и оценить качественно проявляющийся синергетический эффект. Синергетика позволит установить связь и взаимодействие между микро- и макропроцессами, происходящими в процессах накопления и обмена знаниями на различных организационных уровнях [7-9].

В статье проводится анализ многосвязных процессов обмена знаниями в рамках научной школы.

1 Анализ динамических моделей научной школы

Элементы научной школы (НШ) как многосвязной сложной системы – научные сотрудники (НС), являющиеся носителями определенного уровня и типа знаний. НШ может образовывать иерархическую (трехуровневую) организационную структуру.

В научной школе каждый из НС обладает определенным типом и уровнем знаний. НС могут образовывать отдельные группы, которые будут характеризоваться определенным типом и уровнем знаний.

Выделены темпы накопления знаний для трех групп (типов) знаний:

- N_1 – темп накопления знаний на уровне магистрантов, аспирантов, ассистентов и младших научных сотрудников (первый концепт);
- N_2 – темп накопления знаний на уровне доцентов, старших научных сотрудников и докторантов (второй концепт);
- N_3 – темп накопления знаний на уровне докторов наук, профессоров, ведущих и главных научных сотрудников (третий концепт).

Темп накопления знаний можно рассматривать как темп результативности научной деятельности НС, т.е. как скорость накопления определенного объема знаний в единицу времени.

Носители групп знаний взаимодействуют между собой и самостоятельно контролируют свою деятельность.

Работа НШ возможна в двух режимах: свободного взаимодействия и в деловом (активном) режиме. Режим свободного взаимодействия реализует процесс обмена знаниями между элементами системы различного уровня. В деловом режиме накапливаемые уровнями знания используются для достижения общей цели. Для каждого из режимов ниже рассмотрены модели в линейной и нелинейной форме.

В работе изучаются качественные тенденции процессов накопления и обмена знаниями в научной школе. В связи с этим знания принимаются безотносительными, а коэффициенты – безразмерными. При этом знания могут быть выражены в виде идеи, модели, систем, методов, алгоритмов, технологий и т.д.

1.1 Динамические модели в режиме свободного взаимодействия

Линейная модель научной школы представляется следующим образом:

(1) $\dot{N}_i = -a_{ii}N_i + a_{ij}N_j + c_iZ + N_i^0,\ i \neq j,$

где $\dot{N}_i$ – скорость изменения i-го темпа (i=1,2,3) передачи знаний;

N_i^0 – темп накопления знаний i-го типа (i-ым носителем) при его работе в автономном режиме (при отсутствии влияния других носителей знаний);

a_{ii} – коэффициент самоорганизации темпа получения знаний i-го типа;

a_{ij}, a_{ji} – коэффициенты взаимного влияния темпов накопления знаний различного типа друг на друга ($i \neq j$).

Для нелинейных моделей используются следующие формы самоорганизации носителей темпов накопления знаний:

(2) $\dot{N}_i = \alpha_i N_i - \beta_i N_i^2 + N_i^0,\ i = \overline{1,3}$

или

(3) $\dot{N}_i = \alpha_i N_i - \beta_i N_i^3 + N_i^0,\ i = \overline{1,3}$

где коэффициент α_i отражает желание (мотивацию) i-го носителя увеличить темп накопления знаний; коэффициент β_i – силу стабилизации процесса накопления, которая может быть пропорциональна либо квадрату, либо кубу величины темпа накопления знаний.

Другой вид нелинейности – это нелинейное взаимодействие между различными уровнями знаний. Оно выражается в виде нелинейных отношений двух типов знаний к третьему в виде произведения.

Таким образом, нелинейная модель НШ в режиме свободного взаимодействия предлагается, например, в виде:

$$(4)\quad \begin{cases} \dot{N}_1 = \alpha_1 N_1 - \beta_i N_1^2 + c_1 N_2 N_3 + N_1^0, \\ \dot{N}_2 = \alpha_2 N_2 - \beta_2 N_2^2 + c_2 N_1 N_3 + N_2^0, \\ \dot{N}_3 = \alpha_3 N_3 - \beta_3 N_3^2 + c_3 N_1 N_2 + N_3^0, \end{cases}$$

где коэффициент c_i отражает нелинейные отношения между темпами накопления знаний ($c_1 > c_2 > c_3$).

В результате проведенных исследований нелинейной модели (4) в режиме свободного взаимодействия было выявлено, что изменяя параметры α_i ,β_i и c_i можно получать достаточно высокие темпы накопления знаний каждого концепта.

Устойчивое состояние системы наблюдается, например, при следующем распределении значений коэффициентов: α_i=1,β_i=0,5, c_1=0,8, c_2=0,4, c_3=0,2, и значении $N_i^0 = 1$. При этом темпы накопления знаний достигают значений, превышающие значения темпов в автономном режиме минимум в 9 раз. Если изменить коэффициенты стабилизации β_i до 0,4, то система (4) становится статически неустойчивой.

Стабилизировать ее можно, используя модель самоорганизации (3). Но в этом случае темпы накопления знаний выходят на более низкий уровень накопления знаний, ненамного превышающий начальный N_i^0. Изменения коэффициентов α_i и β_i приводят к аналогичному изменению темпов N_i: уменьшение значений снижает темпы, увеличение – повышает.

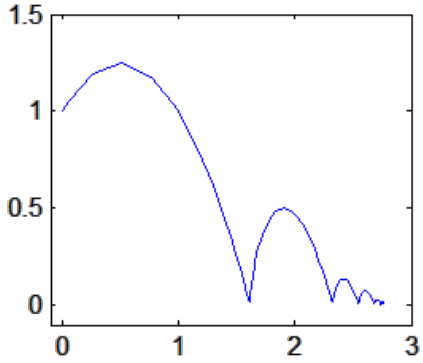
Изменение знака коэффициента нелинейных отношений приводит к возникновению перерегулирования в переходном процессе темпа и снижению уровня всех остальных. Например, возникновение значительной несогласованности темпов в процессе обмена знаниями между средним уровнем иерархии НШ и остальными (c_2=-0,4), приводит к возникновению перерегулирования в переходном процессе темпа накопления знаний N_2 и снижению его до уровня ниже начального.

На эффективность функционирования НШ достаточно сильное влияние может оказывать запаздывание. Согласно [2] запаздывания можно классифицировать по двум типам: запаздывание в нелинейных отношениях и собственное запаздывание в формировании сигнала стабилизации. Рассмотрим запаздывание первого типа, которое определяется тем, что информация между уровнями распространяется не мгновенно, а за какой-то интервал времени. Этот интервал и определяет величину запаздывания в нелинейных отношениях. Отсюда, модель НШ в режиме свободного взаимодействия можно представить в виде:

$$(5)\quad \dot{N}_i(t) = \alpha_i N_i(t) - \beta_i N_i^2(t) + c_i N_j(t-\tau_i) N_k(t-\tau_i) + N_i^0;\ i, j, k = \overline{1,3};\ i \neq j \neq k,$$

где τ_i –чистое запаздывание в нелинейных отношениях между темпами накопления знаний.

Внесение небольшого запаздывания τ_i в нелинейные отношения (модель (5)) увеличивает время переходных процессов, незначительно влияя на уровень темпов накопления знаний. Но при увеличении величины τ_i, например до 3, в системе наблюдается ступенчатость в переходном процессе (рисунок 1). Это свидетельствует о том, что в процессе обучения запаздывание в обмене знаниями не нарушает общее функционирование носителей. При этом темпы накопления знаний концептов до момента устойчивости возрастают пошагово, увеличиваясь через равные промежутки времени, определяемые величиной запаздывания.



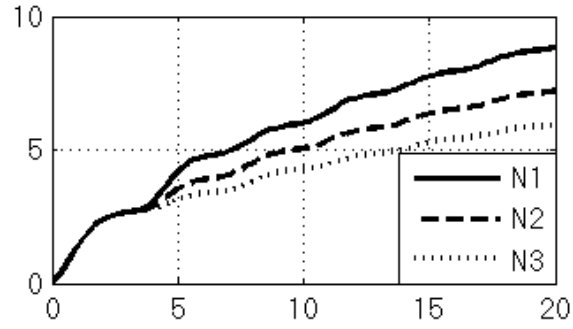


Рисунок 1 – Фазовый портрет и переходные процессы темпов движения к цели в режиме свободного взаимодействия с запаздыванием

При изменении знака нелинейных отношений c_1 характер переходных процессов приобретает вид, представленный на рисунке 2. Снижение темпов отмечается у концепта, не воспринимающего знания в процессе обмена.

Использование формы самоорганизации (3) не приводит к значительным изменениям в переходных процессах, при этом стабилизуя их и повышая запасы устойчивости системы.

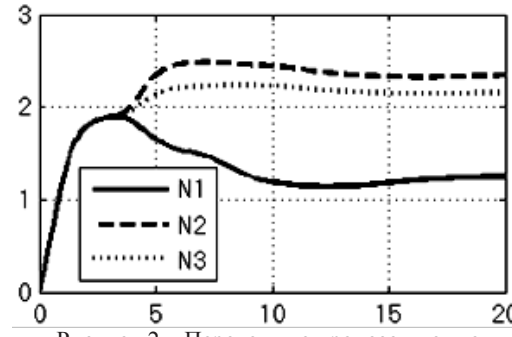


Рисунок 2 – Переходные процессы темпов накопления знаний в режиме свободного взаимодействия с запаздыванием и несогласованностью одного из концептов (c_1=-0,3)

1.2 Динамические модели в деловом (активном) режиме

Деловой (активный) режим функционирования НШ – это режим функционирования, когда для достижения общей цели используются накапливаемые носителями знания. При этом каждый носитель знаний корректирует свой темп накопления знаний в зависимости от темпа движения к цели. Тогда система дифференциальных уравнений, описывающая темпы накопления различных типов знаний и темп движения к цели за счет накопленных знаний, будет иметь следующий вид:

$$(6)\quad \begin{cases} \dot{N}_i = -a_{ii}N_i + a_{ij}N_j + c_i Z + N_i^0, \\ \dot{Z} = -a_{44}Z + \sum_{i=1}^{3} b_i N_i, \end{cases} \quad \text{при } i, j = \overline{1,3},\ i \neq j;$$

где Z, $\dot{Z}$ – темп и скорость темпа движения к цели (накопление знаний для выполнения проекта);

a_{44} – коэффициент самостабилизации выполнения проекта;

b_i – весовые коэффициенты влияния темпов накопления знаний на формирование темпа движения к цели;

c_i – коэффициенты влияния темпа движения к цели на i-ый процесс накопления знаний.

Исследование линейных моделей в обоих режимах позволило выявить системный (эмерджентный) эффект, когда на собственные темпы накопления знаний положительное влияние оказывают как темпы других групп знаний так и темп движения к цели.

В данной линейной модели вклады, вносимые в формирование темпа движения к цели различными типами знаний неравноценны: $b_1<b_2<b_3$. Цель (проект, проблема) вносит положительный вклад c_iZ в увеличение темпа накопления знаний каждым носителем. При этом влияние общей цели на темп накопления знаний на каждый уровень различно: $c_1>c_2>c_3$.

В деловом режиме функционирования нелинейной модели НШ (4) общая цель накопления знаний выражается в виде произведения темпов всех типов знаний:

$$(7)\quad \begin{cases} \dot{N}_1 = \alpha_1 N_1 - \beta_i N_1^2 + c_1 N_2 N_3 + \lambda_1 Z + N_1^0, \\ \dot{N}_2 = \alpha_2 N_2 - \beta_2 N_2^2 + c_2 N_1 N_3 + \lambda_2 Z + N_2^0, \\ \dot{N}_3 = \alpha_3 N_3 - \beta_3 N_3^2 + c_3 N_1 N_2 + \lambda_3 Z + N_3^0, \\ \dot{Z} = \alpha_4 Z - \beta_4 Z^2 + N_1 N_2 N_3, \end{cases}$$

где α_4, β_4 – коэффициенты самоорганизации;
λ_i – коэффициенты обратной связи, т.е. влияния темпа накопления знаний на процесс накопления *i*-го типа знаний.

Система устойчива и темпы накопления знаний достаточно высоки, например, при следующем распределении значений коэффициентов: α_i=1,β_i=0,6, c_1=0,8, c_2=0,4, c_3=0,2, λ_1=0,8, λ_2=0,4, λ_3=0,2.

Уменьшение значения коэффициентов нелинейных отношений c_i и λ_i негативно сказывается на темпах, увеличение их значений позволяет повысить темпы накопления знаний и темп движения к цели.

Если возникает достаточно сильная несогласованность (конфликт) в отношениях концептов, то возможно появление ситуации, в которой невозможно дальнейшее эффективное функционирование НШ. Например, при c_2=-0,3 система теряет свою устойчивость. Стабилизация возможна при условии увеличения коэффициентов β_i стабилизации процессов накопления знаний, но темпы при этом не обладают высоким уровнем.

Каждый концепт оказывается перегружен проектом и коалиционным действием коллег и положительного давления самого проекта на каждый из концептов, т.е. при одновременном уменьшении значений коэффициентов β_i до 0,3, c_2 до -0,4 и положительной λ_i. При такой интенсивности возникает автоколебательный режим (рисунок 3).

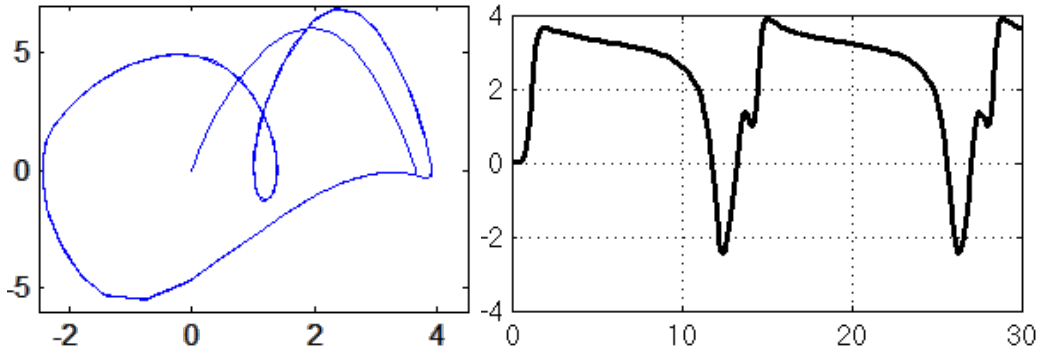


Рисунок 3 – Фазовый портрет и переходный процесс темпа движения к цели в режиме делового взаимодействия

Кубическая форма самоорганизации (3) позволяет сохранить устойчивость системы при возникновении конфликтных ситуаций между всеми концептами, но темпы, соответственно, будут достаточно низкими: при c_1=-0,8, c_2=-0,4, c_3=-0,2 темпы N_i ненамного превышают свой начальный уровень.

В режиме делового взаимодействия в модель функционирования НШ запаздывание вносится в общую цель накопления знаний:

$$(8)\quad \dot{Z}(t) = \alpha_4 Z(t) - \beta_4 Z^2 + \prod_{i=1}^{3} N_i(t-\tau_i)\,.$$

Малая величина запаздывания незначительно влияет на темпы накопления знаний и темп движения к цели. Влияние запаздывания значительно при определении времени переходных процессов, которое увеличивается по сравнению со временем переходных процессов в модели (4). В случае изменения знака коэффициента нелинейных отношений (c_3=-0,2) при α_i=1,β_i=0,8, c_1=0,8, c_2=0,4, λ_1=0,8, λ_2=0,4, λ_3=0,2 и τ_i=0,5 переходные процессы характеризуются затухающими колебаниями. Последующее уменьшение коэффициента β_i приводит к неустойчивости состояния системы.

Кубическая форма самоорганизации моделей (4) и (8) отличается бóльшими запасами устойчивости. Однако темпы накопления знаний и темп движения к цели отличаются низким уровнем.

Заключение

Исследование процессов накопления и обмена знаниями в научной школе средствами компьютерного моделирования позволяет сделать некоторые выводы:

1) в линейных моделях переходные процессы характеризуются плавностью; наблюдается эмерджентный эффект повышения темпов накопления знаний и темпа движения к цели;
2) в нелинейных моделях уменьшение коэффициентов стабилизации и самоорганизации приводит их в неустойчивое состояние. То есть можно отметить, что при плохой организации собственной деятельности носителями различных уровней знаний, процессы накопления и обмена знаниями нестабильны;
3) возникновение несогласованности между концептами негативно влияет на процессы при функционировании НШ;
4) определенные сочетания коэффициентов приводят к возникновению автоколебаний в нелинейных моделях, что не позволяет качественно накапливать знания;
5) запаздывания в распространении информации между уровнями при отсутствии конфликтов увеличивают время, необходимое для выхода на устойчивые темпы накопления знаний и движения к цели. Появление несогласованности может привести к формированию затухающих колебаний.

Список литературы

[1] Панов А.Д. Макроэволюция и наука // Науковедческие исследования, № 2013. – С. 225-256.
[2] Трубецков Д.И., Мчедлова Е.С., Красичков Л.В. Введение в теорию самоорганизации открытых систем. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2005. – 212 с.
[3] Яблонский А.И. Модели и методы исследования науки. – М.: Эдуториал УРСС, 2001. – 400 с.
[4] Karl Popper Conjectures and refutations: the growth of scientific knowledge, 2014. 608 pp.
[5] Hans S. Jensen, Lykke M. Ricard, Morten T. Vendel The evolution of scientific knowledge, 2003. 240 pp.
[6] Устюжанина Е.В., Евсюков С.Г., Петров А.Г., Казанкин Р.В., Дмитриева М.Б. Научная школа как структурная единица научной деятельности. – М.: ЦЭМИ РАН, 2011. – 73 с.
[7] Безручко Б.П. и др. Путь в синергетику. Экскурс в десяти лекциях. – М.: КомКнига, 2010. – 304 с.
[8] Малинецкий Г.Г. Математические основы синергетики. Хаос, структуры, вычислительный эксперимент. – М.: Либроком, 2015. – 310 с.
[9] Трубецков Д.И. Введение в синергетику. Хаос и структуры. – М.: Либроком, 2014. – 210 с.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СОВРЕМЕННОЙ МОДЕЛИ СПЕЦИАЛИСТА С ВЫСШИМ ОБРАЗОВАНИЕМ

М.Н. Кустова[1], В.А. Марин[2]

[1]ФБОГУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»
443020, Самара, ул. Л. Толстого, 23, Россия
custova.64@mail.ru
тел: +7 (846) 332-49-15, факс: +7 (846) 332-49-15

[2] Самарское региональное отделение Общероссийского общественного движения
«Народный фронт «За Россию»
443071, Самара, Волжский пр, 19, оф. 215, Россия
onf63@ mail.ru
тел: +7 (846) 242-01-42, факс: +7 (846) 242-01-43

Ключевые слова: *информационное общество, образование, система высшего образования*

Abstract

There are some necessary prerequisites of modern scientists, sociologists and philosophers of education in the information society in this article. They can be useful for the modern model of a specialist with a higher education.

Введение

Отличительной особенностью развития цивилизации XXI века становится процесс движения к информационному обществу, что обусловлено глобализацией инфосферы – мирового информационного пространства, стремительно преобразующегося в результате развития средств информатики и новых коммуникационных технологий [1].

Серьезные изменения в жизни современного общества в свою очередь приводят к существенным переменам в жизни людей, создают у них потребность постоянного совершенствования и непрерывного образования. В этой связи, в социальной сфере происходят динамичные реакции. С большой скоростью меняется доля различных социальных групп, меняются социальные потребности и ценности людей. Обновляются квалификационные структуры, в следствии чего появляются новые типы и виды деятельности, а старые при этом приходят в упадок и исчезают. В обществе происходит социальная поляризация, обуславливающая разные возможности для разных слоев населения в достижении ими определенного уровня и качества жизни. В первую очередь это касается возможностей молодых людей в достижении ими определенного уровня культуры и образования.

Образование должно быть направлено на то, чтобы развить в каждом индивиде все то совершенство, на которое он способен. Именно сейчас наше общество нуждается в раскрытии творческого потенциала личности, в развитии ее уникальных особенностей. Поэтому цель образования заключается в том, чтобы приблизить человека к совершенству собственной природы, помочь ему реализовать свои потенциальные возможности. Именно в этом состоит суть человекоориентированной социологической парадигмы образования [2].

В этой связи, ученые ряда научных направлений, обеспокоенные процессами получения образования в информационном обществе, дают их теоретическую трактовку с позиций педагогики, социологии, философии. Данные теоретические доводы зачастую имеют полярные взгляды, но позволяют, в целом, оценить суть происходящих перемен и предпринять попытки для разработки современной модели специалиста с высшим образованием.

1 Социально-философский феномен системы образования. Теоретический аспект

Как известно, основной задачей системы образования является создание духовно-ценностной основы личности, ориентации и фиксации ее индивидуальных качеств и интересов на развитие общества. Вся история существования человечества доказывает аксиому о социально востребованной образованной личности, имеющей возможность определения и реализации себя в широком спектре деятельности.

Информационное общество, в этом плане, расширяет познавательные рамки людей, создает глобальную возможность для динамичного процесса интеллектуального совершенствования и непрерывного самообразования. Безусловно, этот процесс требует адекватной личности, с определенными навыками и способностями, для освобождения ее творческого потенциала, раскрытия уникальности и самобытности. Поэтому вектор системы образования в новом тысячелетие должен быть ориентирован на сохранение и развитие целостной личности, на ее дальнейшую самореализацию.

Образование является активной сферой человеческой деятельности, в рамках которой происходит сопряжение и согласование интересов личности и общества. В социологии это взаимодействие стало дискуссионной проблемой. Уже не один десяток лет решается диалектичный вопрос «что первично», а именно, что же солирует в дуэте «личность и общество». Общество влияет на структуру и характер системы образования, или же развитие образования в решающей степени определяет характер и функционирование общества с его социальными институтами.

В рамках одного из подходов, система образования определена как автономная, самостоятельная часть жизни. С другой стороны, социологи отмечают, что система образования - это зеркальная поверхность общества, однако, она не имеет силы, способной вызвать социальные перемены в обществе. В этой связи Б. Саймон и Ж. Аллак, подчеркивают, что основная функция образования заключается не в преобразующей силе, а в воспроизводстве данных социальных отношений, социальных функций и статусов, в передаче культуры [3].

В настоящий период времени «образование становится все более важной предпосылкой для того, чтобы выстоять во все более усложняющемся постиндустриальном обществе. По сравнению с другими факторами карьеры человека образование приобретает тенденцию становиться все более важным фактором успеха в жизни, социального статуса, достигаемого индивидом» [3]. Таким образом мы видим, что личность как социальный субъект в системе образования не является только объектом прямого воздействия общества. В рамках современных подходов обучаемый рассматривается как активно действующий объект, предъявляющий и реализующий свои особые требования к обществу через систему образования.

В этой связи целесообразно подчеркнуть антропологическую роль образования, которую сформулировал М. Шелер в контексте понимания роли и места Человека. Последний рассматривается им как существо, в котором посредством эволюции произошла трансформация духа. Эволюционировавший дух, освободился от служения жизни и преобразовался в дух, которому служит сама жизнь человека. В данном контексте Шелер рассматривает образование как форму совокупного человеческого бытия, в которой реализованы «…все сущности-идеи и сущности-ценности вещей», обнаруживаемые в упорядоченной композиции [4].

Исследуя природу образования, М. Шелер определил его три основные цели. Первая – это образование для себя («образовательное знание»), которое обеспечивает становление и развитие личности. Вторая – образование для других («знание достижений»), направленное на реализацию различных человеческих намерений и потребностей, ведущее к преобразованию мира. Третья – образование высшей духовной основы («спасительное или святое знание») для становления мира. С точки зрения ученого, эволюция образованности – это процесс движения от знания достижений к спасительному знанию, чтобы наше личностное ядро стало сопричастным к высшему бытию.

В настоящее время во всем мире система образования находится в состоянии лихорадочной тряски и переживает «образовательный бум», воздействие которого находит отклик во всех сферах жизни общества. Поэтому феномен образования муссирует целый комплекс наук. Помимо педагогики и социологии, которые традиционно обращаются к данной проблеме, интерес к образованию проявляют и философы. В рамках философии сформировано целое научное направление – философия образования.

В качестве основы философского осмысления лежит необходимость «проработки исходных преобразований человека», т.е. рассматриваются вопросы «…складывания человеческих родовых качеств», «становления надперсональных, трансперсональных структур личности, вопрос построения экзистенции, построения архитипа» [5].

При выдвижении философских идей под образованием, как правило, понимают «сложную систему, являющуюся подсистемой индивидуальной культуры, поэтому для более полного его понимания необходимо привлекать различные модели. Образование – непрерывно протекающий процесс» [5].

По мнению большинства современных философов, в настоящий момент образование фактически вышло за рамки образовательных учреждений и стало своеобразным символом времени, результатом нового образа жизни людей в информационном обществе.

Для анализа философских аспектов проблем образования определена образовательная парадигма – совокупность научных взглядов на образовательный процесс, способов его организации, идеалов и ценностей образованности. Например, В.М. Розин, рассуждая на эту тему, делает вывод о том, что философия образования возникла как ответ на кризис образования в целом. Кризис традиционных научных форм осмысления и научного обеспечения образования, исчерпанность основной педагогической парадигмы. С точки зрения философа, основной предмет философии образования заключается в обсуждении предельных оснований образования, в поиске его смысла и места в культурном универсуме жизни, в понимании человека и идеала образования. Также В.М. Розин отмечает, что сейчас, трудно говорить о единых ценностях и эталонах образования, так как в настоящий момент формируются разные виды педагогических практик [6].

Безусловно, в рамках одной статьи очень сложно раскрыть суть по ряду направлений научных исследований, но даже такое краткое рассмотрение философского подхода к образованию, позволяет сделать вывод о том, что дополнение социологического анализа социально-философским может способствовать объяснению сущности и роли образовательного процесса, в информационном обществе, как формы воспроизводства социальности.

В ходе выяснения сущности образовательного процесса, вполне закономерным звучит вопрос – что же представляет собой термин «образование»? В зависимости от контекста на него можно ответить по-разному. Это и: социальное явление, спутник человечества на всем его историческом пути; значимая ценность (индивидуальная и социальная); функция общества и государства по отношению к своим гражданам и одновременно функция граждан по отношению к своему собственному развитию; сложная иерархическая система, включающая в себя все уровни образовательного процесса; область жизнедеятельности общества, объединяющая в себе как сферу образования, так и другие смежные отрасли – культуру, здравоохранение и т.д.; процесс усвоения знаний в целом и др.

Как видим, в современной социологической научной литературе предлагается разнообразие трактовок термина «образование». Однако, его корнем, служит слово «образ», основное назначение которого включает в себя формирование образов и представление действительности, что в конечном итоге, подразумевает формирование образа общества. Кроме того, формирование «образов» означает еще и воздействие образования на человека с целью раскрытия его сущностных характеристик.

Традиционно понятие образование имеет два значения [6]:

1) совокупность систематизированных знаний, умений и навыков, приобретаемых человеком самостоятельно, или в процессе обучения в специализированных учебных заведениях. В этом случае, образование выступает как один из показателей социального статуса индивида;
2) социальный институт, выполняющий функции подготовки и включения человека в разные сферы общественной жизнедеятельности, приобщения его к культуре данного общества.

Для того чтобы полностью раскрыть функциональный смысл образования, к указанным понятиям следует добавить, что образование выполняет роль трансляции образов и структур деятельности от поколения к поколению, накапливая образовательный «багаж».

Таким образом, при всем многообразии терминологии понятие «образование» имеет нечто общее, связанное с процессом становления и развития личности, с опытом овладения им социокультурного опыта, с запоминанием, сохранением и передачей базовых человеческих ценностей, а также с образом наставника, владеющего способами этой трансляции.

Отталкиваясь от понятийной трактовки термина «образования», рассмотрим его социальную суть в контексте системы.

Как уже упоминалось образование можно трактовать как сложную иерархическую систему, с разными формами институционализации знаний и основной путь их получения - это поэтапное обучение в учебных заведениях. Соответственно, различают начальное, основное, среднее, высшее, общее и специальное (профессиональное) образование, техническое, гуманитарное, естественно-научное. Несмотря на единый подход к образованию, в общем, учебные заведения определенных уровней подготовки имеют характерные особенности. В этой связи представляет интерес определение специфики образовательных процессов для разных этапов и видов подготовки человека к жизни и труду [7]. В соответствии с названием статьи сделаем акцент на систему высшего образования и оценим ее реакцию на внешние факторы воздействия, в виде происходящих изменений в информационном обществе.

2 Система высшего образования в информационном обществе

Известно, что в условиях стабильного экономического, политического и сформированного социокультурного окружения любая сложная система вырабатывает некие универсальные механизмы. В результате воспроизводятся те устойчивые связи и отношения, которые уже созданы и воспроизводятся системой.

Изменившиеся кардинальным образом внешние условия социального существования определяют в значительной мере лишь адаптационные способности системы. Сказанное в полной мере относится и к системе высшего образования, которая вынуждена в современном мире приспосабливаться к внешним толчкам «информационного бума», сохраняя устойчивость и инерционность с одной стороны, а с другой активно искать и формировать новые подходы к организации и управлению своей образовательной деятельностью.

Устойчивость и определенная инерционность системы высшего образования позволяют ей сохранить некоторый внутренний стержень, человеческий ресурс, способствует стабильности и целостности. В данном случае, инерционность системы образования выступает в качестве защитного механизма, являясь условием самосохранения и самореализации.

Поиск и формирование новых путей к организации образовательного процесса – это реакция системы образования на возросшую динамику общественной жизни, правда, в России она осуществляется с некотором опозданием.

Адаптация образовательной системы к новым социальным реалиям в российских условиях происходит постепенно. С начала, в вузах открывались новые специальности, прежде не предлагавшиеся на рынке образовательных услуг, появлялись платные формы обучения, затем последовала волна пермаментного реформирования. В итоге формируется новый имидж высшего образования с новым ценностным к нему отношением.

Высшее образование это сложная многоуровневая и динамичная система, ориентированная на обеспечение целостного результата - качество выпускника, которое определяется степенью соответствия целей и результатов образования. Именно цель задает формы, средства, содержание, от цели зависит ход образовательного процесса и, конечно, результат образования. Определяя цели и результаты образования человека, в последние время все больше внимания уделяется единству мотивационно-когнитивных и поведенческих компонентов в структуре личности выпускника. В этой связи, компетентностный подход к образовательному процессу в вузах, является не настолько новым, сколько четко регламентирующим его порядок.

Традиционно, цель высшей школы заключается в подготовке человека к трудовой, профессиональной деятельности и ориентирована на узкого специалиста для определенной отрасли народного хозяйства. «Узконаправленность» обучения не является недостатком высшей школы, это ее специфическая особенность, направленная на развитие в человеке профессиональной компетентности. Конкретизация знаний в одном направлении не ущемляет свободу прав личности в выборе форм и способов обучения. К тому же современная высшая школа предлагает разные способы освоения знаний. От классических форм проведения аудиторных занятий, до самообразования, путем дистанционного обучения.

Образовательный процесс в вузах происходит централизованно и включает в себя элементы дуэтного (преподаватель - студент) как обучения, так и самообучения. Следует отметить, что вузам характерен циклический процесс подготовки специалистов. Как правило, он начинается с приема абитуриентов и заканчивается трудоустройством выпускников, которые прошли соответствующий этап обучения.

В современном мире высшее образование становится одной из сфер, где активно формируются новые подходы к организации и управлению образовательной деятельностью, нацеленные на повышение эффективности, динамичности, способности к адаптации и развитию. Будучи связанными новыми обязанностями и свободами, образовательные процессы в вузах становятся все более адекватными тем, которые используются в сфере предпринимательства, однако, дело не сводится к достижению чисто финансово-коммерческого эффекта: он производен от эффекта социального, от признания обществом значимости конкретного вуза, «наймоспособности» его выпускников.

Вуз заинтересован в том, чтобы его образовательные услуги как можно полнее соответствовали требованиям рынка труда. Во-первых, рынок труда определяет основные стандарты качества образования в виде изменения спроса на тех или иных специалистов, уточнения знаний и умений, которыми должны обладать претенденты на определенные вакансии. Во-вторых, перспектива трудоустройства является важным мотивом, обуславливающим выбор образовательных продуктов потребителем.

Выпускник вуза в результате потребления предложенной вузом образовательной услуги, а также собственных усилий, влияния семьи, среды, национальной культуры и т.п. приобретает качества и характеристики, способные удовлетворить потребность организации в рабочей силе нужного уровня и квалификации. Чем сильнее проявляются в его профессионально значимых качествах и характеристиках особенности потребленной образовательной услуги, чем точнее эти особенности соответствуют требованиям предприятий-работодателей, тем больший отклик получает вуз от целевого сегмента рынка труда, который нанимает выпускников. Этот отклик проявляется в материальных и нематериальных выгодах, которые получает вуз: подъеме престижа, укреплении товарной марки, получении финансирования, роста спроса на предлагаемые образовательные услуги и т.п. В случае повторного обращения выпускника за образовательными продуктами вуза (продолжение обучения на более высоком уровне, второе высшее образование, аспирантура, программы повышения квалификации и т.п.), выпускники вновь становятся потребителями.

Особенно это актуально для технических вузов инфокоммуникационного профиля. Времена, когда полученных в ходе профессиональной подготовки знаний хватало на весь период трудовой активности, прошли. В информационном обществе инженерные знания стареют невероятно быстро, а это означает, что значительная часть знаний, которые понадобятся специалисту через несколько лет, не может быть преподана в вузе, поскольку появление технологических систем в условиях быстрого научно-технического прогресса зачастую непредсказуемо. Перед лицом такой перспективы образовательный процесс должен быть радикально иным.

Ведь информационный подход в инженерном образовании не вырабатывает умения решать инженерные задачи комплексного характера на основе синтеза знаний из различных учебных дисциплин, поскольку такой синтез может иметь место не при узкоспециальной, а только при фундаментальной подготовке.

Поэтому процесс подготовки высококвалифицированного технического специалиста должен стать ориентированным на возможность эффективного взаимодействия с техникой будущих поколений. Подобно гибким технологиям на производстве в вузовской практике должна быть выработана «гибкость» образовательного процесса. Целью обучения в вузе должно стать не формирование «завершенного специалиста», а развитие в нем способности к постоянному совершенствованию, самостоятельному приобретению знаний. Гибкие подходы к образовательному процессу требуют и гибкости в передаче материала студенту. Преподавательское мастерство должно сверкать такими гранями, как отсутствие культа императивных методов воспитания, ориентация на развитие личности, а не на развитие запоминательных способностей, стимулирование творчества и особенно творческого мышления, установка на образование, в полном смысле этого слова, тогда как традиционно на первом месте стоит обучение.

При доминировании такого подхода формируется человек умелый, человек – специалист, человек – профессионал, что вполне соответствует духу времени. Кроме того, такой человек станет социально адаптированной, самореализованной, социализированной личностью, т.е. человеком «вобравшим» в себя базовые функции системы образования.

Заключение

Век информатики и коммуникационных технологий диктует новые требования к подготовке специалистов с высшим образованием. Его глобальные масштабы перемен затронули все слои и сферы общества, что в свою очередь требует адекватной оценки и экстренного реагирования по ряду научным направлениям.

В статье рассматривается социально-философский аспект образования, применительно к системе высшего образования, с уточнением нюансов современного процесса обучения.

Показательно рассмотрение этих вопросов для выпускников технических вузов, так как именно эта социальная группа обеспечивает воспроизводство и формирование высококвалифицированных специалистов, тех в чьих руках находятся рычаги управления экономикой и от кого во многом зависит будущее России.

Список литературы

[1] Кастельс М. Информационная эпоха: экономика, общество и культура / Под ред. О.И. Шкаратана. М.: ГУ ВШЭ, 2000 г.

[2] Осиленкер Л.Б. Высшее образование в информационном обществе – новые возможности и новые риски для населения // Телекоммуникации и информатизация образования, 2005. - № 6 (31) С. 110-117.

[3] Саймон Б. Общество и образование / Б. Саймон. М.: Прогресс, 1989. - 197 с.

[4] Тюрина Ю.А. Трансформация образования в советской и постсоветской России: сравнительный анализ: автореф. дис. .д-ра соц. наук / Ю.А. Тюрина, 2010. - СПб., 27 с.

[5] Руткевич, М.Н. Социология образования и молодежи: избранное (1965 - 2000) / М.Н. Руткевич. М.: Гардарики, 2002. - 344 с.

[6] Мошкович Л.И., Новачук А В. Формирование оценки конкурентоспособности выпускника вуза // Управление общественными и экономическими системами, 2006. - №2. С. 12-17.

[7] Кустова М.Н. Специфика образовательных процессов // XII Международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», 2006. – С. 32-33.

[8] Кустова М.Н. Современные подходы к реализации образовательного процесса в вузах инфокоммуникационного профиля // XI Международная НТК конференция вузов и факультетов телекоммуникаций, 2010. – С. 25-29.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА СТИМУЛИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА КРИВОЙ ОБУЧЕНИЯ

О.В. Павлов[1]

[1]Самарский государственный аэрокосмический университет
(национальный исследовательский университет)
443086, Самара, Московское шоссе, 34, Россия
pavlov@ssau.ru
тел: +7 (846) 335-64-07, факс: +7 (846) 335-64-07

Ключевые слова: *эффект кривой обучения, динамическое программирование, оптимальные объёмы производства, динамическая система стимулирования*

Abstract
The dynamic incentive problem for learning curve effect is defined and solved. The problem reduce to the solution of two interconnected dynamic tasks for the principal and agent. The numerical algorithm formulated for solving the dynamic incentive problem. The numerical solution is found using the Bellman's optimality principle of dynamic programming

Введение

В статье рассматривается динамическая задача стимулирования работников предприятия с учётом эффекта кривой обучения. Эффект кривой обучения заключается в том, что затраты времени на выполнение многократно повторяющихся производственных операций снижаются. Впервые этот эффект был замечен американским авиационным инженером Т. Райтом [1]. При каждом удвоении кумулятивного объёма производства производительность труда работников увеличивается на 10-15 процентов. Под кумулятивным (суммарным) объёмом производства понимается количество изделий, изготовленных с начала производства продукции нарастающим итогом.

Общая динамическая задача управления производственной деятельностью предприятия декомпозируется на динамические задачи планирования и стимулирования [2]. Задача динамического планирования заключается в выборе руководством предприятия в соответствии со своей целевой функцией плановой траектории суммарного объема производства продукции. Математические формулировки и решения задач динамического планирования объемов производства приводятся в [3]-[5]. Так как производительность труда работников изменяется в зависимости от суммарного объёма проделанной работы, возникает задача: как распределить имеющийся фонд заработной платы по временным периодам, чтобы коллектив исполнителей (цех, бригада) реализовал плановую траекторию руководства.

1 Постановка динамической задачи стимулирования

Руководство предприятия (центр), обладающее правом первого хода, сообщает коллективу исполнителей (агенту) плановую траекторию суммарного объёма работ x_t, $t=1,n$ и динамическую систему материального стимулирования:

$$\sigma_t(\alpha_t, y_t) = \alpha_t y_t,\ t = 1,n, \quad (1)$$

где α_t - норматив оплаты за единицу произведенной продукции для агента, y_t – суммарный фактический объём производства, t – номер временного периода, n – число рассматриваемых периодов производственной деятельности предприятия (горизонт планирования).

Норматив заработной платы за единицу произведенной продукции для агента α_t, t=1,n является управляющей функцией центра.

Сумма материальных вознаграждений агента не может превышать ограниченный фонд заработной платы агента F:

(2) $\sum_{t=1}^{n} \alpha_t y_t \le F$.

Целевой функцией центра является минимизация суммы квадратов отклонений фактической траектории суммарного объема производства yt, t=1,n от плановой траектории xt, t=1,n:

(3) $J_p = \sum_{t=1}^{n} (x_t - y_t)^2 \to \mathbf{min}$.

где x_t –плановый суммарный объём производства в конце периода t, y_t – фактический суммарный объём производства в конце периода t.

Плановый суммарный объём производства x_t, t=1,n выбирает центр исходя из своих интересов, а фактический суммарный объём производства y_t, t=1,n выбирает агент в соответствии со своей целевой функцией.

Модель принятия решений для центра запишется в виде:

(4) $$\begin{aligned} & J_p = \sum_{t=1}^{n} (x_t - y_t)^2 \to \mathbf{min}, \\ & \sum_{t=1}^{n} \alpha_t y_t \le F. \end{aligned}$$

Динамическая задача центра заключается в том, чтобы выбрать управляющую функцию α_t, t=1,n, так чтобы сумма квадратов отклонений фактической траектории от плановой (3) была минимальной и выполнялось ограничение (2).

Агент, при известной системе стимулирования центра $\sigma_t(\alpha_t,y_t)$, t=1,n выбирает фактическую траекторию суммарного объёма производства y_t, t=1,n.

Уравнение фактической траектории суммарного объёма производства имеет следующий вид:

(5) $y_t = y_{t-1} + v_t, \; t = 1, n$,

где v_t – фактический объём производства в периоде t.

Фактический объём производства v_t в периоде t является управляющей функцией агента.

Известен начальный суммарный объём производства:

(6) $y_0 = X_0$.

В конце последнего временного периода фактический суммарный объём произведенной продукции должен быть равен заданному:

(7) $y_n = X_0 + R$.

В каждом временном периоде может быть произведено продукции не больше, чем позволяет максимальная мощность оборудования Q^{max}:

(8) $0 \le v_t \le Q^{\mathbf{max}}, \; t = 1, n$.

Целевой функцией агента является максимизация дохода:

(9) $J_a = \sum_{t=1}^{n} \frac{\{\sigma_t(\alpha_t, y_t) - C_t\}}{(1 + r_a)^t} \to \mathbf{max}$,

где C_t - трудовые затраты агента на выполнение фактического объёма работы в периоде t, r_a - ставка дисконтирования для агента.

Трудовые затраты агента в периоде t определяются как произведение трудоемкости c_t, стоимости норма-часа на предприятии s и фактического объёма производства v_t:

(10) $C_t = sc_t v_t$.

Динамика изменения трудоемкости агента от фактического суммарного объёма производства описывается степенной зависимостью [1]:

(11) $c_t = ay_t^{-\gamma}$.

где a – затраты на производство первого изделия, γ – коэффициент, характеризующий скорость обучения агента.

Кривая, построенная на основе формулы (11) называется кривой обучения. Скорость обучения характеризует темп снижения трудоёмкости агента при увеличении суммарного объёма производства.

Таким образом, чем больше суммарный объем продукции произведен агентом, тем выше его производительность труда и меньше времени он затрачивает на производство новой единицы продукции. Затраты агента в периоде t зависят от выбора объема производства во все предшествующие периоды от первого до t-1.

Подставив выражение (11) в (10), получим фактические трудовые затраты агента в периоде t:

(12) $C_t = say_t^{-\gamma} v_t$.

С учетом (12) целевая функция агента примет вид:

$$(13)\quad J_a = \sum_{t=1}^{n} \frac{\left\{\alpha_t y_t - say_t^{-\gamma} v_t\right\}}{\left(1+r_a\right)^t} \to \mathbf{max}.$$

Модель принятия решений для агента запишется в виде:

$$(14)\quad \begin{aligned} & y_t = y_{t-1} + v_t,\ t = 1,n, \\ & 0 \le v_t \le Q^{\mathbf{max}},\ t = 1,n, \\ & x_0 = X_0, \\ & x_n = X_0 + R, \\ & J_a = J_a = \sum_{t=1}^{n} \frac{\left\{\alpha_t y_t - say_t^{-\gamma} v_t\right\}}{\left(1+r_a\right)^t} \to \mathbf{max}. \end{aligned}$$

Сформулированная задача является задачей оптимального управления дискретной системой. Решением сформулированной задачи является такое оптимальное управление v_t^{opt}, t=1,n, удовлетворяющее ограничению (8), которое переводит дискретную систему (5) из начального состояния (6) в конечное состояние (7) и максимизирует суммарный доход агента (13). При этом решение оптимизационной задачи агента (14) зависит от норматива заработной платы за единицу произведенной продукции α_t, t=1,n, которые назначает центр. В свою очередь решение оптимизационной задачи для центра (4) зависит от выбора агентом фактических суммарных объемов работы y_t.

Таким образом, решение динамической задачи стимулирования сводится к решению двух взаимосвязанных оптимизационных задач для центра (4) и агента (14).

Для решения сформулированных оптимизационных задач применяется метод динамического программирования Беллмана [6],[7].

Сформулируем алгоритм решения динамической задачи стимулирования:

Задается начальные приближения норматива заработной платы за единицу произведенной продукции α_t, t=1,n с учетом ограничения (2) и плановой траектории центра x_t, t=1,n.
При известной управляющей функции α_t, t=1,n решается задача оптимального управления (14) с использованием метода динамического программирования и определяется фактическая траектория суммарного объёма производства y_t, t=1,n.

Проверяется условие $\sum_{t=1}^{n} \alpha_t y_t \le F$ с использованием определённой в пункте 2 фактической траектории суммарного объёма производства y_t, t=1,n. Если условие выполняется, то следует переход к пункту 4. Если не выполняется, то следует изменение управляющей функции α_t, t=1,n и переход к пункту 2.

Проверяется условие $\sum_{t=1}^{n} (x_t - y_t)^2 \le \varepsilon$, где ε- наперед заданная малая величина. Если условие выполняется, то задача динамического стимулирования решена. Если не выполняется, то следует изменение управляющей функции α_t, t=1,n и переход к пункту 2.

Сформулированный алгоритм решения задачи динамического стимулирования реализован в электронной таблице Excel. Проведенные расчёты доказали его работоспособность.

2 Решение динамической задачи минимизации затрат

Задача решалась на примере освоения нового изделия «Кассета» на предприятии ОАО «Салют». Для решения задачи использовались следующие данные: заданный суммарный объём производства детали «Кассета» R=240 деталей, количество временных периодов n=12, объём произведенной продукции в начальный период x_0=1 шт., максимальная производственная мощность оборудования Q^{max}=40 деталей. Стоимость нормо-часа s=90 руб. Суммарный фонд оплаты составляет 960 000 руб. С учетом применяемости детали в готовом изделии объём производства в каждый период должен быть кратен 10.

На рисунке 1 представлена плановая траектория суммарного объёма производства с точки зрения центра (руководства предприятия). Плановая траектория определяется скоростью обучения агента γ=-0,7.

Математическая модель принятия решения для агента примет вид:

$$
\begin{aligned}
& y_t = y_{t-1} + v_t,\ t = \overline{1,n}, \\
& 0 \le v_t \le Q^{\max},\ t = \overline{1,n}, \\
& x_0 = X_0, \\
& x_n = X_0 + R, \\
& J_a = \sum_{t=1}^{n} \frac{\left\{\alpha_t y_t - 3837{,}6 y_t^{-0{,}1} v_t\right\}}{(1+r_a)^t} \to \max.
\end{aligned}
\qquad (15)
$$

При постоянном нормативе оплаты за единицу произведенной продукции решением задачи (15) является фактическая траектория суммарного объема производства, соответствующая скорости обучения агента γ=-0,1. Фактическая траектория суммарного производства агента, представлена на рисунке 1. Из анализа рисунка 1 видно, что плановая и фактическая траектория не совпадают при постоянном нормативе оплаты за единицу произведенной продукции. Для того, чтобы агент выбрал плановую траекторию, заданную центром, необходимо решить задачу стимулирования, состоящую из двух оптимизационных задач: для центра (4) и для агента (15).

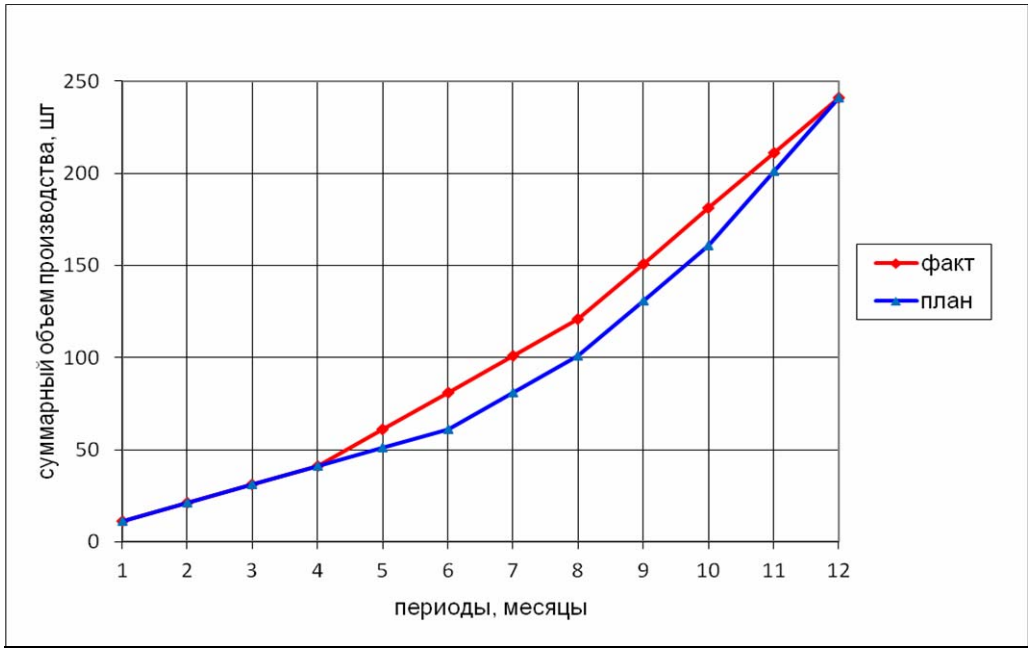


Рисунок 1 – Плановая и фактическая траектории суммарного объема производства

В результате решения задачи стимулирования, по предложенному в данной работе алгоритму определена управляющая функция центра (норматив оплаты за единицу продукции), обеспечивающая выполнение агентом плановой траектории: α_t=0,15y_t+3979,85. Управляющая функция зависит от фактического объема произведенной продукции агентом. Проведенные исследования показали, что использование центром возрастающей управляющей функции линейного вида $\alpha_t=ky_t+b$ приводит к выбору агентом более «выпуклых» фактических траекторий. Результаты исследований приведены на рисунке 2. Управляющая функция центра $\alpha_t=ky_t+b$ полностью определяется управляющим параметром k. В случае, если управляющий параметр k=0, норматив оплаты будет постоянным, и траектория суммарного объема производства агента будет соответствовать траектории со скоростью обучения γ=-0,1. При управляющем параметре k=0,05 агент будет выбирать траекторию со скоростью обучения γ=-0,3. При управляющем параметре k=0,05 траектория агента будет соответствовать траектории со скоростью обучения γ=-0,7.

Использование центром убывающей управляющей функции $\alpha_t=ky_t-b$ приводит к выбору агентом менее «выпуклых» фактических траекторий. На рисунке 2 представлена траектория агента при управляющем параметре k=-0,15.

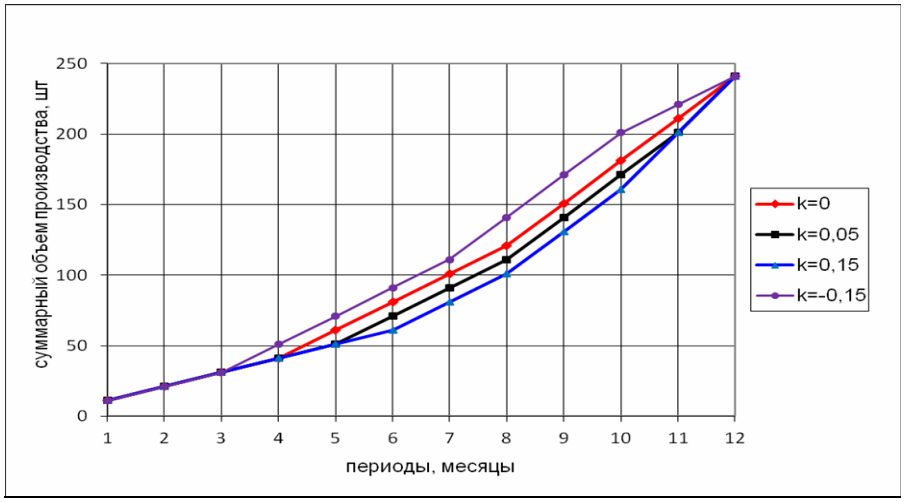


Рисунок 2 – Влияние управляющего параметра k на фактическую траекторию агента

Заключение

В данной работе сформулирована и решена динамическая задача стимулирования с учетом эффекта кривой обучения. Разработан и апробирован алгоритм решения динамической задачи стимулирования.

Проведенное в настоящей работе исследование позволило сделать следующие выводы:

1) Постоянная управляющая функция центра не влияет на выбор агентом фактической траектории суммарного объёма производства. Выбор агентом фактической траектории определяется только скоростью обучения этого агента.
2) Управляющая функция центра линейного вида $\alpha_t=ky_t+b$, зависящая от фактического объема произведенной продукции агентом, влияет на выбор агентом фактической траектории.
3) Использование центром возрастающей управляющей функции линейного вида $\alpha_t=ky_t+b$ приводит к выбору агентом более «выпуклых» фактических траекторий. Чем больше управляющий параметр k, тем более «выпукла» фактическая траектория.
4) Использование центром убывающей управляющей функции линейного вида $\alpha_t=ky_t-b$ приводит к выбору агентом менее «выпуклых» фактических траекторий. Чем больше управляющий параметр k по модулю, тем менее «выпукла» фактическая траектория.

Список литературы

[1] Wright T.P. Factors affecting the cost of airplanes // Journal of the aeronautical sciences. 1936. Vol. 3. № 4. P. 122-128.
[2] Павлов О.В. Математические модели управления динамическими системами. Теория активных систем // Труды международной научно-практической конференции. Том II. Общая редакция - В.Н. Бурков, Д.А. Новиков. М.: ИПУ РАН, 2011 г. С. 79-86.
[3] Павлов О.В. Динамические задачи планирования в управлении проектами // Сборник материалов конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах». СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. С. 1055-1058.
[4] Павлов О.В. Динамические модели планирования производства с учетом эффекта обучения // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVI международной конференции (30 июня-3 июля 2014 г., Самара, Россия). – Самара: Самарский НЦ РАН, 2014. - С. 369-375.
[5] Павлов О.В. Динамическая оптимизация производственной деятельности предприятия с учетом эффекта кривой обучения //Вестник Самарского государственного экономического университета, 2015. № 3(125). С. 88-92.
[6] Беллман Р. Динамическое программирование. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960.
[7] И.Л. Калихман, М.А. Войтенко. Динамическое программирование в примерах и задачах. – М.: Высш. школа, 1979.

ДВОЙСТВЕННОСТЬ И ЦЕЛОСТНОСТЬ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.В. Попков

АНО Международный институт Александра Богданова

620062, Екатеринбург, ул. Малышева, 105, Россия

president.ibi@mail.ru

тел: +7 (343) 383-46-86, факс: +7 (343) 383-46-86

Ключевые слова: *двойственность, напряжение, потенциал, поток, топология, целостность, цикл.*

Abstract

All known systems theory, working with complex integral objects, or otherwise, reduce them to a coherent set of parts. In the proposed approach, as such, separately from the other parts not considered part serves here as facet of the whole. A complete system is represented as a dual system is the indissoluble unity of the flows and stresses. In addition, attempt to bring in the direction to f broader range of topics – humanitarian, systematic – methodological and partly logico – philosophical.

Введение

В работе развивается подход к *целостностям*, которые радикально отличаются от привычных *систем*, представляющих собой связную совокупность частей. В целостности каждый составляющий ее элемент – это не *часть* наряду с другими частями, это также *грань* целого. Грань, которая *замыкает* целое, без которой целое не состоится, будет неполно. Как, например, не состоится организм без печени, биосфера без зеленой растительности или воздушный шарик в дыркой в боку. В общетеоретическом, философском плане такой подход находится в русле многострадальной традиции «холизма», в опасной компании Платона, Гегеля, Маркса и прочих «врагов открытого общества» по классификации Карла Поппера. К слову сказать, понятиям *открытое и замкнутое* не помешало бы строгое определение, - в топологии, например, над этими понятиями уже сотню лет размышляют лучшие умы планеты. Ядро предлагаемого метода опирается на идеи А.Пуанкаре и состоит из двух компонентов. Во-первых, – систематическое использование аппарата алгебраической топологии (цепные комплексы, двойственные гомологические и когомологические последовательности и др.). И, во-вторых, - принципиальное различение двойственных сущностей (потоки и напряжения) в их сопряженном развертывании по этажам цепного комплекса. Отсюда напрашивается следующий прием: попробовать «синтезировать» систематический метод анализа и моделирования сложных систем, исходя из этих двух компонентов, взятых по возможности в «чистом» виде.

Целостность и двойственность – вокруг этих понятий разворачивалась главная интеллектуальная интрига XX века. Впрочем, для философии она была главной во все времена. Но в XX веке двойственность перестала быть достоянием только философии – волна и корпускула, наблюдаемость и достижимость, функция и структура, рынки и институты, ресурсы и проблемы, товары и услуги, - двойственные пары рождались и рождаются одна за другой [1]. Уже в XIX веке подобного материала было накоплено много, но привычное теоретизирование вязло в антиномиях. Например, в теоретической механике к тому времени сосуществовало два равноправных и взаимоисключающих способа описания механических систем: силовой (потенциальный) и инерционный (кинетический). Первый способ описывал

движение системы, как движение к равновесию, к минимуму потенциальной энергии, как распространение напряжений, сил, преодолевающих заданную инерционность материала системы. А второй способ описывал движение системы как чисто инерционное движение по «наипрямейшей» траектории, какую только допускают связи между частями системы, искривляющие это движение (знаменитая "механика без сил" Г.Герца) [3] . Аналогичным образом дело обстояло и в других областях; например, в экономической теории тогда зародилось и до сих пор продолжается противостояние между двумя её вариантами - «рыночной» и «институциональной», и оба претендуют на исчерпывающее представление экономической реальности. Философия, разумеется, предлагала теоретикам свои рецепты исцеления, но решающее событие, на наш взгляд, произошло не в философии, а в математике. Более ста лет назад родоначальник математической топологии Анри Пуанкаре [106] придумал свой «клеточный комплекс» с исчерпывающим набором топологических инвариантов и предложил простую регулярную процедуру его двойственного обращения. Сегодня приходится признать, что общенаучный, мировоззренческий потенциал идей А.Пуанкаре, его программа до сих пор остается нереализованной [4].

1. Топология целостности А.Пуанкаре. Циклы.

Рассмотрим коротко основную идею Пуанкаре. Клеточный комплекс, введенный им, представляет собой скопление «клеток» разных размерностей: 0-мерные узлы, 1-мерные линии (ветви), 2-мерные куски поверхностей, 3-мерные объемы и т.д. Клетки низших размерностей примыкают к старшим клеткам, образуя их грани, границы: ветви ограничены узлами, поверхности – ветвями, объемы - поверхностями, и т.д. Клетки одинаковой размерности примыкают друг к другу по общим граням, образуя цепи. Совокупность (группа) всех цепей данной размерности образуют соответствующий структурный уровень комплекса. Ключевую роль в топологии играют замкнутые цепи или циклы. В особенности важны те из них, которые не обрамляют никакую старшую клетку, «не затянуты» никакой «пленкой», циклы с «дыркой» посередине. Например, в «бублике» два цикла, но лишь один из них имеет дырку посередине, - тот, который проходит вокруг дырки бублика. Наличие и число таких циклов на данном структурном уровне - важнейший топологический инвариант комплекса. Посмотрим теперь, какое это имеет отношение к действительности. Будем рассматривать окружающий мир как многомерный процесс, состоящий из локальных процессов, примыкающих друг к другу. Вот течет полноводная река, - она 3-х-мерна, но для пилота самолета она предстает в виде 2-мерной водной ленты. Гидрогеолог исследует 2-мерный рельеф дна. Поверхность и дно сходятся, образуя прибрежную линию (1-мерную). Также 1-мерны мелкие притоки, отводные каналы, трубы водоснабжения. Нульмерны точки водозабора и узлы водопроводной сети. А есть еще рыбные запасы, популяции животных и птиц в пойме реки, солевой состав воды, и т.д. Есть экономическая сторона речного хозяйства – товарные, финансовые потоки, связанные с рекой. Но вот, весь этот многомерный процесс впадает в море, разливается водной гладью и начинает активно испаряться. Отсюда стартует новый процесс – перемещения водных испарений в атмосфере, которые заканчиваются дождями в верховьях реки. Так, является цикл, а вместе с ним целостность - река.

Почему цикл – синоним целостности ?

1) Потому что цикл разрешает так называемый «парадокс целостности», поскольку он, как и всякая целостность, в отличие от просто системы, инвариантен по отношению к своим частям. У реки могут появляться новые притоки, или исчезать старые, возникать плотины и искусственные моря. Река может распасться на несколько несвязанных речек, наконец, она может высохнуть, съёжившись до ручейка в истоках, но до того момента, пока не разомкнулся фундаментальный цикл, она не потеряет своего качества реки.

2) Цикл разрешает также «парадокс развития», поскольку представляет не только саму целостность в ее полном развитии, но и «элемент» целостности, ее клеточку, зародыш, в котором целостность находится в «свернутом» виде.
3) Наконец, потому что перед нами уже не одноразовое явление, а возобновляющийся, бесконечно продолжающийся процесс, воспроизводящий условия своего существования.

Циклы, очевидно, имеют универсальное значение. У Гегеля [5] циклы - ключевая логическая конструкция. Качественная определенность вообще в гегелевской логике имеет явно циклическое происхождение, как и всякая «истинная бесконечность». Нечто налично существующее становится качеством, приобретает для-себя-бытие только во взаимодействии с другим. Можно утверждать, что набор качественных определенностей на каждом структурном уровне целостности соответствует набору циклов, циркулирующих на этом уровне. Собственно, циклы и формируют промежуточный структурный уровень целостности, позволяя некоторому частному процессу длительно функционировать в рамках данного уровня без провалов на «нижние этажи» и без постоянной апелляции к более сложным процессам. Это как раз и есть циклы, которые в математике называют негомологичными нулю. Если таких циклов на данном уровне нет, то это означает, что этот структурный уровень не состоялся, он как бы выпал из структуры здания сущего. Говоря об «этажах», следует подразумевать движение к все более сложным, комплексным, конкретным процессам, где мы не можем отвлечься от каких-то его сторон. Видимо, многомерная сфера – это вообще идеальная модель целостности. Это естественная конструкция, которая является одновременно и замкнутой, и открытой, у нее нет «края», она не нуждается в «окружающей среде», все, что нужно для ее определения она содержит в себе самой. Движение исследователя вглубь, к все более сложным процессам оказывается движением в рамках сферы, которая обогащается новыми измерениями, оставаясь при этом сферой. Конечно, имеется в виду не именно сфера в прямом смысле, а широкий класс замкнутых многомерных поверхностей (математики их называют замкнутыми многообразиями). Итак, именно замкнутые многообразия, на наш взгляд, наиболее адекватно моделируют целостность, как «в целом», так и на каждом ее структурном уровне.

2.Потоки и потенциалы

Пуанкаре не ограничился темой целостности, то есть не ограничился исследованием циклической структуры своего комплекса, но и столь же основательно, раз и навсегда разрешил на его основе проблему двойственности, многократно умножив тем самым идейный и эвристический потенциал всей своей программы. Речь идет о знаменитой теореме двойственности Пуанкаре для замкнутых многообразий. Чтобы пояснить эту теорему возьмем для примера электрическую цепь и посмотрим, как в ней распространяются токи и потенциалы (напряжения). Токи в двух смежных ветвях i_1 и i_2 балансируются в узле, - в нем будет накапливаться заряд, если сальдо притока и оттока (i_1 - i_2) больше нуля, или наоборот разряжаться, если сальдо отрицательное. Так осуществляется связь между двумя токами в ветвях. Иначе обстоит дело с потенциалами (напряжениями). Если узел обладает электрическим потенциалом e_1, то этот потенциал распространяется на все ветви, примыкающие к узлу, на звезду ветвей, как романтично выражаются математики. И если некая ветвь связывает два таких узла, то в ней возникает «напряжение», разность потенциалов (e_1-e_2). То есть ветвь несет в себе разность потенциалов, полученных от узлов. Тогда как в случае токов, наоборот, узел несет в себе разность токов, полученных от ветвей. Вообще, потоки балансируются на структурных элементах низшей размерности, на своих нижних границах, как говорят математики (смежные потоки размерности r балансируются на структурных элементах размерности r - 1). Эту особенность предлагается считать родовым признаком, по которому та или иная сущность может быть отнесена к категории поток. Для

потока характерен тот или иной вариант принципа сохранения массы, вещества, объема, количества, это внешнее движение вообще. Потенциалы, наоборот, распространяются на свои верхние границы и балансируются на них. Так распространяется напряжение, сила, давление, так предъявляется потребность, так, видимо, являет себя субъектность вообще. Теперь можно рассматривать нашу целостность - мир с двух точек зрения: как поток и как потенциал. И развертываться эти две картины – мир напряженный и мир кинетический – будут в противоположных направлениях. Потоки структурируются, координируются в направлении понижения размерности структурных уровней. От целого к частям, от конкретного к абстрактному, из глубины к поверхности. Это направление дифференциации целого. Потенциалы координируются в обратном направлении, по возрастанию размерности, через структурные элементы высших размерностей. Через напряжения мир собирается, интегрируется, сращивается, «конкретизируется». Это и понятно: дифференцированные части пытаются разлететься, связи между ними напрягаются и возвращают их к целому. Двойственной становится и циклическая структура целостности. Циклы первого рода – это замкнутая «эквипотоковая» цепь, сбалансированная в узлах, вихревой поток в недрах целостности. Потенциалы, напряжения тоже замыкаются в циклы, но, в отличие от потоков, они замыкаются через высшие структурные уровни целостности, образуя циклы второго рода («коциклы», - называют их математики) – это «обручи», в рамках которых уравновешиваются внутренние напряжения целостности. Следует понимать, и это принципиально важно, что перед нами один и тот же комплекс процессов, которые теперь предстают в двух ипостасях - как потоки и как напряжения. Эти ипостаси живут вполне самостоятельной жизнью, выстраиваясь и образуя совершенно разные структуры, будучи тесно сопряжены в рамках целого. «Обруч» стягивает разбегающиеся потоки, замыкая их в «вихрь». И, наоборот, каждый замкнутый поток замыкает круг потенциалов. Причем оказывается, что «вихрь» и «обруч», цикл и коцикл в каждой паре обитают на разных структурных уровнях целостности, а именно на уровнях «дополнительных размерностей». Доказательству этого далеко не очевидного утверждения и посвящена теорема двойственности Пуанкаре. Она утверждает, что если полная размерность замкнутого многообразия равна n, то каждому циклу размерности r соответствует коцикл размерности n - r. Физика дает множество примеров сопряжений потоков и потенциалов в дополнительных размерностях. Вихревой ток, циркулирующий в плоскости (2-мерный) создает электрическое напряжение в проводнике (1-мерном), протыкающем эту плоскость. Или, наоборот, вихревое магнитное поле вокруг проводника с током. В регуляторе Уатта круговое движение приводит к сжатию центральной пружины. Или вернемся к нашей реке – выделим в ней одномерный линейный поток, который пронизывает 2-мерные эквипотенциальные поверхности, секущие ландшафт по горизонтали, своего рода витки сжатой гравитационной пружины, толкающей поток в низину. И если поток оказался замкнутым (состоялся одномерный цикл), то это значит, что где-то возник восходящий поток, который, преодолевая гравитацию, поднимает воду наверх к потенциальному полю с обратной напряженностью. То есть перед нами двумерный коцикл. Экономические и политические реалии глобального мира еще предстоит систематизировать на этом основании. В конечном счете, познать целое, это значит получить «поэтажный» структурный план его комплекса. Если таких циклов на данном уровне нет, то это означает, что этот структурный уровень не состоялся, он как бы выпал из структуры здания.

3. Замкнутые и транзитные структуры в экономике

О кризисе неоклассической экономической теории сказано уже немало (см. например[6,7]). Эта теория в целом хорошо работала в условиях, когда шла линейная экспансия рыночных институтов в слаборазвитую периферию мировой экономики. Первые явные системные сбои пошли, когда была предпринята рыночная трансформации *развитых*

плановых хозяйств. Их с грехом пополам, в большей мере на практике, чем в теории «переварили», но, как оказалось, это было только начало. Линейная экспансия старых институтов в эпоху глобализации (*или замыкания)* мировой экономики породила уже не теоретический, а полномасштабный мировой кризис. Что же именно в экономической теории перестало срабатывать на этом этапе? На наш взгляд в ней перестала срабатывать фундаментальная конструкция, господствующее представление о природе экономической системы. Это представление можно обозначить как «input-output -парадигма», которая прочно вошла в сознание экономистов главным образом вместе с линейными балансовыми, и в особенности оптимизационными, моделями. Предприятия и отрасли фигурируют в этих моделях, как известно, в виде «черных ящиков», преобразующих входы в выходы согласно расходным коэффициентам. Эти «черные ящики» конкурируют друг с другом за доступ к ограниченным ресурсам, и главным аргументом в этой борьбе является величина добавленной стоимости, которую они могут обеспечить. Экономические субъекты минимизируют входы, максимизируют выходы, приходят к равновесным ценам, используя монопольное положение или в режиме свободной конкуренции, располагая полной информацией или действуя в условиях неопределенности, принимая решение рационально или следуя тем или иным иррациональным представлениям. Так или иначе, в результате выстраиваются цепочки предприятий и производственных программ, дающих максимальный в масштабах системы «input-output» эффект при заданных ограничениях на исходные ресурсы. Единственное, что они категорически не могли делать, это *потреблять продукцию, которую сами произвели*, даже если бы это потребление было опосредовано замкнутыми цепочками поставок. Оптимальная программа исключала такого рода циклы, - в самом деле, какой смысл имеют, например, циклические перевозки в транспортной задаче? Динамические варианты моделей этот запрет, конечно, снимают, но мы сейчас говорим не о динамике, а о структуре. Так вот, замкнутые структуры оставались вне внимания, как иррациональные, внеэкономические. Что неудивительно, поскольку они нарушали фундаментальные, основополагающие принципы товарного производства. Вместе с замкнутыми структурами из рассмотрения выпадало любое непроизводительное потребление, потребление как таковое. Например, если в аграрной стране сельское население съедает часть произведенного хлеба, то эта часть автоматически выпадала из модели. На первый взгляд, казалось бы, что ничего страшного, - *если бы так не были устроены все внутренние рынки*, поскольку они не сводятся к экспорту и импорту. Такое принципиальное требование разомкнутости, товарности экономических структур, молчаливый запрет на рассмотрение в рамках теории товарности непроизводственного потребления неизбежно создавали ряд затруднений в классической теории. Феномен *внутренних рынков* - первое такое затруднение. Поскольку они потребляют то, что производят, постольку теряет смысл поиск любых сложных структур во внутренней рыночной среде; считалось, что обособление внутренних рынков, их замыкание на себя – не более, чем атавизм, который естественным образом отомрет перед лицом экспансии мировых товаропроизводящих структур. Соответственно был рожден миф, что если снять силовые препоны и снизить транзакционные издержки, то вообще никакая экономическая структура не сможет длительно существовать, как говорится, «*против рынка».* Между тем, внутренние рынки не только не «рассасываются», но множатся, - помимо национальных рынков на планете в рамках вполне развитых экономик сегодня исправно функционируют уже несколько тысяч местных «внутренних рынков» со своими альтернативными системами расчетов (АСР) [8]. Да и российские реформы стали яркой иллюстрацией этой оборотной стороны рынка. Речь идет о так называемом «кризисе неплатежей» в 90-е годы, о кризисе, который своим упорством чуть не свалил все здание современной экономической теории. Там, в недрах постплановой внутренней экономики продолжали функционировать полузамкнутые производственные цепочки со своими альтернативными «деньгами» на базе векселей. Победа над ними обошлась российский экономике в половину ВВП. Можно было бы, конечно, по

привычке считать, что эти полузамкнутые структуры есть не более чем резервации для местных, неспособных к глобальной конкуренции производств. Однако, мощный взлет научных школ, исследующих феномены *синергетики*, заставляет сегодня по-новому взглянуть на них. Циклические структуры, «кольцевая причинность» лежат в основе большинства моделей синергетики, поскольку естественным образом порождают т.н. «режимы с обострением» [9]. Так что есть основания предположить, что речь здесь идет не о свалках мощностей, невостребованных мировой экономикой, а о перспективных эпицентрах экономической динамики, об имманентных двигателях экономики [10]. Возьмем произвольную сеть предприятий. Этот может быть глобальная, национальная, региональная экономика, территориально-производственный комплекс или градообразующее предприятие с прилегающей социальной сферой. Элементарный сетевой анализ выявит в ней некоторый набор циклов и разомкнутых потоков. Каждая разомкнутая цепь соединяет пару узлов (вообще говоря, пару наборов узлов, входных и выходных). Узел в нашем случае, это, условно говоря, «склад» определенного продукта или ресурса. Разомкнутая цепь предприятий – это «черный ящик», преобразующий один набор продуктов (ресурсов) в другой набор соответственно расходным коэффициентам - классический персонаж всех балансовых моделей. Единственным мотивом таких «транзитных» производственных структур является получение добавленной стоимости, разницы входных и выходных (узловых) цен. Скажем, АвтоВАЗ покупает автомобильный лист, резину, другие комплектующие, нанимает рабочих и производит «Лады» и машинокомплекты. Но кроме этого, градообразующее предприятие выстраивает отношения с социальной сферой, - к примеру, отряжает часть ведущих инженеров и производственной базы на нужды местного технологического университета, который готовит кадры для предприятия. Это уже пример цикла, замкнутого процесса. Что характерно для циклических процессов? С производственной точки зрения замкнутый поток означает, что во всех его звеньях сравнение затрат и результатов производства потеряло смысл, - затраты и результаты, входы и выходы просто взаимно погасились в узлах, добавленной стоимости в цикле нет, баланс нулевой (именно поэтому балансовые модели не знают циклов). Причем он будет оставаться нулевым *независимо от ценовой обстановки на рынке*. И если производство во всех звеньях цикла, тем не менее, продолжается, то движут этими потоками уже какие-то другие, не стоимостные мотивы, не узловые цены и не добавленные стоимости, а какие-то источники напряжения, *встроенные в сами производственные звенья*, а не в узлы между ними. Здесь *товарность* производства отступает на второй план, а на авансцену выходит такая подзабытая категория, как *потребность*, - взаимная потребность в деятельности друг друга. Социум будет *пытаться* функционировать независимо от рыночного спроса на рабочую силу. А природа будет *пытаться* плодоносить независимо от ценовой конъюнктуры. И если социум и агрокомплекс замкнутся друг на друга, то эта их взаимная потребность друг в друге будет вполне реальным и долгосрочным экономическим двигателем. На поверхностный взгляд, циклы в экономике отсылают к натуральному хозяйству, бартеру, кибуцам, коммунам и прочим малоперспективным вещам. Однако, на наш взгляд, здесь речь идет о чрезвычайно важной составляющей современной, и в особенности, будущей – экономики. Речь здесь идет, в частности, об *уникальной и неустранимой роли внутренних рынков в глобальной экономике.*

4. Дивергентные и конвергентные процессы в экономике.

К вышесказанному напрашивается скептическое замечание, что чисто разомкнутых процессов в экономике не может быть в принципе, что в глобальном смысле все процессы замкнуты, все произведенное будет потреблено, причем потреблено, в конечном счете, производительно. Да, такое замыкание действительно происходит, но именно - *в конечном счете.* Глобальное замыкание экономических процессов осуществляется только через

преодоление мощных и повсеместных процессов их размыкания. Пружина, работающая на размыкание замкнутых систем жизнеобеспечения, вмонтирована в самое основание современной экономики, эта пружина есть не что иное, как *товарность* экономики. Еще вчера для уха экономиста это прозвучало бы довольно дико, - как же, товарность это универсальное и исчерпывающее свойство экономики, нетоварная экономика - это что-то внеэкономическое. Но сегодня теория уже готова к расширению понятийного пространства, приходит понимание, что процесс превращение подрядчика в товаропроизводителя при всей его фундаментальности имеет исторические, пространственные и смысловые границы, он сопряжен не только с приобретениями, но и с потерями. Товаропроизводитель теряет непосредственную связь с потребителем и начинает работать на склад производимой продукции. Как удовлетворяет его продукция чьи-то потребности, - об этом товаропроизводитель судит по тому, опорожняется склад готовой продукции или нет. Схема его поведения приобретает принципиально разомкнутый вид и сводится к максимизации *добавленной стоимости* на пути от одного склада до другого, от одной позиции в товарной номенклатуре до другой. Его сверхзадача – из ограниченных ресурсов произвести максимум добавленной стоимости. Отсюда вырастают все прелести, расцветшие в эпоху индустриальной экономики – доминирование производства над потребностями, агрессивная реклама, *рынок продавца*, и прочее и прочее. Эту совокупность процессов аналогично понятию дивергенции в физике, мы назовем «*товарной дивергенцией»* в экономике. А что этому противостоит, почему, вопреки мощным дивергентным процессам, системы жизнеобеспечения планеты - не везде, не всегда и не в полной мере, - но все-таки замыкаются? И откуда в товарной номенклатуре появляются принципиально новые позиции, новые стандарты, в которых вдруг зазвучит реальная потребность? Где в экономике заводится пружина *конвергенции*? Очевидно, в тех структурах, в которых товарность элиминируется, и на первый план выходит конкретная потребность. А таковыми, на наш взгляд, являются циклические или замкнутые структуры. В них производство в значительной мере приобретает характер подряда, сервиса, «*услуги*», - и именно в этом качестве его предпочитают потребители, и именно в этом качестве местное «сервисное» производство может конкурировать с товаропроизводящими монстрами. Так воспроизводятся всевозможные «внутренние рынки» - национальные, региональные или местные. Со временем можно будет, наверное, говорить и о глобальном «внутреннем рынке», как не парадоксально это звучит. Однако для этого конвергентные процессы в экономике должны будут еще получить адекватное институциональное оснащение, не говоря уже о теоретическом осмыслении. Ибо циклические процессы и циклические структуры в экономике отличаются от транзитных не в меньшей степени, чем атмосферный циклон отличается от антициклона.

Заключение

Исследователи – экономисты, изучая экономику, ищут, что же за видимостью изменения остается без изменений. И вот эта неизменная величина, которая обнаруживается, всегда оказывается циклом (хотя на этом не всегда заостряется внимание). Так получается то, что в экономике называют законами и принципами, так объясняется все *существующее*. На уровне отдельного предприятия удается создать нетривиальную машину, у которой выход остается неизменный, невзирая на то, что входные воздействия на машину меняются. Это связано с тем, что внутрипроизводственный цикл отделен от денег (с точки зрения внутреннего наблюдателя). Но как только мы выходим на иной, более высокий уровень, то в цикл тут же встраиваются деньги, которые являются реальностью второго порядка [11]. Они функционируют совсем по другим правилам, чем материальные потоки и простая линейная формула Т – Д – Т этого различия не учитывает. Но если продуктовый цикл удается замкнуть, то появляется возможность управлять такой конструкцией, так как даже случайное

воздействие, пройдя по циклу, даст неслучайный отклик. Именно в этом состоит фундаментальная роль циклов, - в них, образно говоря, сущее можно соединить с должным. Так вот, понимание этого различия между разомкнутыми и кругообразными процессами является доминирующим для теоретиков и практиков экономики. Нет сомнения, что многие развитые страны, толкующие о рыночной свободе, используют ее для замыкания своих циклов и создания возможностей для своего процветания, оставляя другим странам роль отдельных звеньев в своих циклах [12]. Все страны, входящие в число передовых, развивают свои внутренние циклы, понимая, что эти экономические «инварианты» составляют основу любой экономики. Также отсюда следуют и другие практические неординарные выводы, касающиеся востребованному сейчас направлению инновационной экономики: 1) при выборе инновационных мероприятий не следует безоглядно увлекаться экспортными проектами, необходимо развивать проекты, рассчитанные на внутреннее потребление. Этот вывод подкреплен успехами развитых стран, - до 85 -90 % их валового продукта составляет внутреннее потребление; 2) определяющим при инновациях является не только прибыль и срок окупаемости, как это принято считать, а также то, каким образом эта инновация встраивается в циклический процесс, который сам себя поддерживает и генерирует деньги высокого качества (безинфляционные); надо искать по межпроизводственным и межотраслевым связям цепочки, которые могли бы образовать циклы, но по каким-то причинам этого не происходит, и направлять деньги туда, где можно замкнуть этот цикл; 3) с целью снижения рисков необходимо подвергать анализу, в какой гиперцикл встроена поставляемая на внешний рынок продукция и каковы перспективы его существования.

Список литературы

[1] Попков В.В. Двойственность //Философские исследования М., № 3 (32), 2001.
[2] Герц Г. Принципы механики, изложенные в новой связи. М.: Издательство Академии наук СССР, 1959.
[3] Poincaré H., Journ. Ec. Pol., vol. 1 (1895): 1–121.
[4] Popkov Valerian, Baturin Andrey «The Duality of economy: closed and transit structures », Online Journal of International Research Publications Economy & Business , Vol. 1; ISSN 1311-8978 Online Volume 1, http://www.ejournalnet.com/economy/volume-1/research_papers.htm.
[5] Hegel G. Enzyklopedie der Wisseschaft. // Akademie, Verlag. - Berlin, 1975.
[6] Полтерович В.М. Кризис экономической теории. Доклад на научном семинаре Отделения экономики и ЦЭМИ РАН "Неизвестная экономика," 1990.
[7] Стиглиц Джозеф. Глобализация: тревожные тенденции, М, Издательский дом: Национальный общественно-научный фонд, 2003.
[8] Попков В.В., Берг Д.Б., Порывкин Е.А. «Альтернативные средства расчета: история и перспективы», Вестник Уральского отделения РАН, 2008/2 (24), с.65-77.
[9] Князева Е.Н., Курдюмов С.П.. М: КомКнига, «Основания синергетики. Синергетическое мировидение», 2005 г.
[10] Ямагучи К. Смена парадигм в экономике по мере становления информационного общества / Идеи Н.Д. Кондратьева и динамика общества на рубеже третьего тысячелетия. Материалы ко II международной конференции (СПб. 15-17 марта 1995 г.). - М., 1995.
[11] Попков В.В. Экономический конструктивизм. Ускользающая реальность: что кроется за объективностью экономической науки? // М.Издательство Ленанд: 2014 г.
[12] Фролова Е.Д. Геоэкономическая интеграция ресурсов России. Автореферат на соискание ученой степени доктора экономических наук. Екатеринбург, 2009.

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СОВРЕМЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬЮ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕНСИВНЫХ ДАННЫХ

В.М. Рамзаев, В.Г. Чумак, И.Н. Хаймович

Международный институт рынка

443030, Самара, ул. Г.С. Аксакова, 21

Тел.: 89276063177, e-mail:kovalek68@mail.ru

Ключевые слова: *конкурентоспособность, управление территориями, интенсивные данные, математические модели, кластеры*

Abstract

At the present stage in the field of state and municipal management to become relevant management decisions quickly and efficiently based on integrated indicators, such indicators include the competitiveness of the territories. To develop forecasting models of competitiveness of territories should be used large amounts of streaming data in real-time. The aim of this study is to develop models and methods for managerial decision-making based on the prediction of the competitiveness. The objectives of this study are: the identification of factors of competitiveness, development of a model of competitiveness of territories with the use of expert assessments, the formation of information by experts with the use of BIG DATA technologies. The results of the study are models of managerial decision-making on the competitiveness of regions using expert estimates of c using the technology of BIG DATA. Practical outcomes include improving the quality and timeliness of decision making for management of the lands based on the model of forecasting of development of the field.

Конкурентоспособность представляет собой важнейшую характеристику развития социально-экономических систем, в т.ч. территорий. Данное направление является одним из приоритетных для НИЦ МИР. В течение ряда лет мы проводим исследования конкурентоспособности территорий: региона, городских округов, в том числе малых и моногородов, муниципальных районов, сельских поселений.

Наш подход основан на понимании конкурентоспособности как способности к соперничеству в процессе конкурентной борьбы за ограниченные ресурсы [1,2].

В основе разработанной нами методологии лежит экономико-математическая модель аддитивного типа для оценки состояния конкурентноспособности территории:

$$1)\quad \begin{cases} KS = (\xi_1 GF + \xi_2 PRF + \xi_3 EF + \xi_4 PPF + \xi_5 APF + \xi_6 SF + \\ + \xi_7 FEF + \xi_8 IfF + \xi_9 UVF + \xi_{10} IF + \xi_{11} InF + \xi_{12} DF) \\ 0 \le \xi_i \le 1,\ i = \overline{1,\ 12} \\ \sum\limits_{i=1}^{12} \xi_i = 1 \\ 0 \le GF \le 1;\ 0 \le PRF \le 3;\ -2 \le EF \le 1;\ -3 \le PPF \le 12;\ 0 \le APF \le 6;\ -3 \le SF \le 29; \\ \le 0 FEF \le 11;\ -2 \le IfF \le 13;\ 0 \le UVF \le 1;\ 0 \le IF \le 2;\ 0 \le InF \le 3;\ 0 \le DF \le 5 \end{cases}$$

где KS - конкурентоспособность; GF - географический фактор; PRF - природно-ресурсный фактор; EF - экологический фактор; PPF - фактор промышленного производства; APF - фактор агропромышленного производства; SF - социальный фактор; FEF - финансово-экономический фактор; IfF - инфраструктурный фактор; UVF - фактор уровня взаимодействия с вышестоящими органами власти; IF - инновационный фактор; InF - инвестиционный фактор; DF - духовный фактор; ξ – коэффициент значимости фактора (определяется из опроса экспертов).

В процессе исследования выделено 12 факторов конкурентоспособности, характерных для современного уровня социально-экономического развития территорий. Каждый из факторов имеет собственную значимость, определяющую его вес, вклад в итоговое значение конкурентоспособности. Веса факторов различны для территорий разных типов, что отражает дифференциацию в текущем состоянии процесса развития.

Поскольку для принятия управленческих решений важны доступность понимания и наглядность информации, нами предлагается многомерная визуализация результатов анализа и оценки состояния конкурентоспособности. Посредством выбора мерности пространства возможно проиллюстрировать уровень и вклад тех или иных факторов конкурентоспособности для целей управления [3,4].

Вместе с тем, очевидно, что устойчивое конкурентное развитие экономики не может быть бесконечным. К примеру, по одной из теорий оно ограничено энергетическими и сырьевыми ресурсами планеты, и мы уже подходим к точке максимума их использования. Существуют и другие теории, согласно которым кривая развития приближается к области насыщения [5-7].

Несмотря на это, конкуренция или соперничество все равно остается важнейшим фактором, стимулирующим развитие и качественный рост социально-экономических систем. Соответственно, применение для целей управления представленных выше моделей состояния, основанных фактически на экстенсивном прямом сложении факторов-компонент, имеет свои ограничения. В области, близкой к насыщению, такие модели характеризуются большими погрешностями или неадекватны.

С учетом вышеизложенного, мы предлагаем более точную методологию управления конкурентным развитием, в основе которой лежат корреляционные взаимосвязи факторов конкурентоспособности, что позволяет определить векторы управления по ключевым целевым параметрам. Отчасти данный подход подобен методу оценки синергетического эффекта. Однако последний достаточно сложен с точки зрения численных расчетов значений.

При проведении исследований выявлено 6 групп корреляционно связанных факторов.

С практической точки зрения факторная группировка позволяет наиболее эффективно управлять конкурентоспособностью, т.к. максимальное приращение уровня конкурентного развития может быть получено только посредством совместного регулирования факторов внутри групп.

Анализируя корреляционные взаимосвязи мы установили, что единственным фактором, коррелирующим со всеми прочими, является инвестиционный. Поэтому целевая функция управления на основе приращения конкурентоспособности дополнена моделью управляющего воздействия, в качестве которого определен ограниченный инвестиционный ресурс:

$$2)\quad \begin{cases} \Delta KS = 0{,}058(GF + \Delta GF(L)) \times 0{,}072(PRF + \Delta PRF(L)) \times 0{,}064(EF + \Delta EF(L)) \times \\ \times 0{,}11(PPF + \Delta PPF(L)) \times 0{,}075(APF + \Delta APF(L)) \times 0{,}115(SF + \Delta SF(L)) \times \\ \times 0{,}113(FEF + \Delta FEF(L)) \times 0{,}076(IfF + \Delta IfF(L)) \times 0{,}057(UVF + \Delta UVF(L)) \times \\ \times 0{,}101(IF + \Delta IF(L)) \times 0{,}104(InF + \Delta InF(L)) \times 0{,}055(DF + \Delta DF(L)) \to \max \\ \Delta \ldots F = \ldots F(L_m(\bar{\phi})) - (\ldots F) \\ L_m(\bar{\phi}) = \sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{M} \frac{PV_n^{\inf}}{(1+r^{\inf})^n} \cdot \frac{1}{IR} \cdot \phi_{im} \\ m = \overline{1,\ 12} \\ i = \overline{1,\ 12} \\ 0 \le GF \le 1,\ 0 \le PRF \le 3,\ -2 \le EF \le 1,\ -3 \le PPF \le 12,\ 0 \le APF \le 6,\ -3 \le SF \le 29, \\ 0 \le FEF \le 1,\ -2 \le IfF \le 13,\ 0 \le UVF \le 1,\ 0 \le IF \le 2,\ 0 \le InF \le 3,\ 0 \le DF \le 5 \end{cases}$$

где ΔF- изменение дисконтированного эффекта по каждому фактору конкурентоспособности муниципального образования.

Модели, учитывающие корреляционное взаимодействие, эффективно применять для выбора инвестиционных проектов развития территорий, включая конкурсное распределение, т.к. они ориентированы не только на учет прямых финансовых результатов, но и коррелированно-косвенных эффектов приращения конкурентоспособности и отдельных ее факторов. Например, экологического, социального и других.

Вместе с тем, развитию современной экономики свойственна нестабильность – резкое ускорение сменяется замедлением и наоборот.

К примеру, снижение ВВП европейской экономики составило 6% в 2008-2009 годах, 1,5 % в 2011 году, 0,2% в 2012 году. В 2013 году прогнозируется рост ВВП Евросоюза на 0,6%, в 2014 – на 1,2%. Дефицит бюджета еврозоны сократился с 4,2% ВВП в 2011 году до 3,7% в 2012. Ожидается дальнейшее снижение дефицита до 2,8% ВВП в 2013 году. При этом правительственный долг увеличился до 91% ВВП в 2012 году с 87% в 2011. Уровень безработицы составляет от 4 до 27% в различных странах Евросоюза.

Российская экономика, как менее стабильная, демонстрировала еще более выраженные изменения. Рост ВВП за период 2001-2008 годов составил 6,6%. В 2009-2011 годах наблюдалось падение до 0,2% и опять рост в 2012 году до 3,4%. Размер государственного долга составлял минус 9,5% ВВП в 2011 и 3% в 2012 году. Дефицит бюджета в 4% в 2010 году, сменился профицитом в 0,8% в 2011. Однако сохранить положительную динамику не удалось, и 2012 год был окончен с дефицитом 0,02%.

Причем данные процессы происходят в высоко насыщенной конкурентной среде. Поэтому очевидно, что в такой ситуации выигрывают те территории, кластеры, предприятия, которые являются высокочувствительными системами – динамичнее реагируют на изменения и повышают свое конкурентное состояние. В этих условиях традиционные статические линейные модели не могут обеспечить решение задач управления, т.к.:

- они являются ситуационными и применимы в коротких временных интервалах, что не позволяет осуществлять долгосрочное и стратегическое управление;
- они не учитывают скорости реакций на управляющее воздействие;
- современные сложные многоаспектные связи и процессы являются нелинейными.

Наиболее эффективное управление конкурентоспособностью в таких средах возможно на основании динамических моделей, которые только начинают применяться в современной экономической науке.

Таким образом, мы формулируем понятие конкурентоспособности как динамической характеристики, определяемой скоростью реакции системы на любые изменения внешней социально-экономической среды.

В силу ограниченности объема, приведу результаты динамического моделирования на примере социально-экономических систем промышленных кластеров.

В рамках предлагаемого нового подхода, выявленные факторы конкурентоспособности, с учетом их корреляционных взаимосвязей, мы структурируем в 3 доминанты: производство, трудовые ресурсы и капиталовложения. В процессе моделирования необходимо выделять кластерные образования из общей экономической системы региона, т.е. определить их границы.

Анализируя территориальные кластерные образования с позиции управляемости, выделим 2 ключевых типа:

1) Функциональный или управляемый кластер, который:

- возникает как результат целенаправленного внешнего воздействия в стратегически важных для государства отраслях и в процессе реализации стратегических планов;
- пользуется финансовой, экономической и политической поддержкой государства;
- как правило, имеет ядерную структуру.

2) Самоорганизующийся или предпринимательский кластер, который:

- не является продуктом деятельности государственных структур;
- возникает самопроизвольно, по инициативе бизнеса и на основе экономических отношений;
- не находится под управлением и не имеет институциональных партнеров, обеспечивающих его выживание;
- как правило, имеет матричную структуру.

Поскольку кластер представляет собой открытую динамическую систему, его границы являются нечеткими, что обусловило применение аппарата нечеткой логики и нечетких множеств. Таким образом определяется степень принадлежности элемента системе исходя из необходимых и достаточных условий существования кластера. Использование методов нечеткой логики позволяет находить области пересечения кластеров, которые являются зонами особой инновационной активности и могут обеспечить качественные прорывы в развитии кластерных систем.

Динамические модели конкурентоспособности функционального и предпринимательского кластеров имеют определенный вид.

Далее определяем отправные точки управления конкурентоспособностью для региональных промышленных кластеров Самарской области. Для этого целевая функция модели состояния слайда 1 дополнена комплексом разработанных нами параметров CL. Комплекс CL-параметров включает в себя:

1) Вид кластера по критерию управляемости;
2) Вид кластера по динамике развития;
3) Тип структуры кластера;
4) Предприятия-производители ключевой продукции – лидеры кластера.

В результате сформированы системные характеристики промышленных кластеров региона, на основе которых возможно оценить необходимость и степень управляющего воздействия и применить соответствующие модели управления

3) $$\frac{\partial u_i}{\partial t} = c_i u_i + \sum_{j \neq i}^{n} d_{ij} u_j - \sum_{j \neq i}^{n} b_{ij} u_i u_j + D_i \Delta u_i \, i = \overline{1, n} \ ,$$

где члены с коэффициентами *dij* описывают зависимость производства продукции в *i*–ом элементе от производства в других элементах кластера; члены с коэффициентами *bij* учитывают конкуренцию производителей.

Непосредственно динамическое моделирование территориальных социально-экономических систем позволило:

- определить стационарные состояния системы, которые являются целевыми результатами управления;
- оценить переменные состояния системы при изменении тех или иных ее параметров, т.е. отследить воздействие управления;
- оценить степень приближения текущего состояния системы к предустановленным целевым значениям, а также выбрать наиболее эффективную в данных условиях траекторию движения.

Несмотря на очевидную сложность моделей, использование прикладных программных средств на уровне пользователя дает возможность достаточно просто интерпретировать результаты и формулировать управленческие решения.

Чтобы ввести территориальную систему, к примеру, промышленный кластер, в область устойчивого развития конкурентоспособности, необходимо производить регулировку параметров кластерной системы. При этом установлено, что некоторые параметры достаточно инертны. К их числу относятся: длительность производственного цикла, темпы ротации

персонала, налоговые отчисления и другие. Иные обладают более высокой динамикой. Это экстенсивная производительность труда, численность занятых в производстве, стоимость единицы произведенной продукции и другие. Наиболее эффективными параметрами управления являются нелинейные, а именно интенсивная производительность труда, рост которой обеспечивается за счет инноваций и внедрения новых технологий, а также высвобождение персонала в результате интенсивного роста производительности.

Применение динамических моделей позволяет определить оптимальное сочетание регулируемых параметров, оценить необходимую степень воздействия, целевые результаты и скорость их достижения, что в совокупности дает преимущество в управлении конкурентоспособностью социально-экономической системы.

Для разработки модели прогнозирования конкурентоспособности территорий должны быть использованы большие объемы потоковых данных в режиме реального времени. Целью данного исследования является разработка моделей и методов принятия управленческих решений на основе прогнозирования конкурентоспособности территорий. К задачам данного исследования относятся: определение факторов конкурентоспособности, разработка модели конкурентоспособности территорий с использованием экспертных оценок, формирование информации по экспертам с применением технологии BIG DATA. К результатам исследования относятся модели принятия управленческих решений по конкурентоспособности территорий с использованием экспертных оценок с использованием технологии BIG DATA [8-10]. К практическим результатам можно отнести повышение качества и своевременности принятия решений по управлению территориями на основе модели прогнозирования развития области.

Список литературы

[1] Рамзаев В.М., Хаймович И.Н., Чумак П.В. Управление инвестиционными проектами при проведении энергомодернизаций предприятий в регионе Экономические науки - №4 (101), 2013 – С.109-113.

[2] Рамзаев В.М., Хаймович И.Н., Чумак П.В. Модели и методы управления энергоэффективностью в организациях с учетом ограниченности инвестиционных ресурсов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4; URL: http://www.science-education.ru/110-9960 (дата обращения: 26.08.2013).

[3] Рамзаев В.М., Хаймович И.Н., Чумак П.В. Методология управления энергоэффективностью предприятий (организаций) в условиях ограниченности инвестиционных ресурсов//Экономические науки, Москва, 2012-№87- С.80-84.

[4] Рамзаев В.М., Хаймович И.Н., Чумак П.В. Модели и методы сбалансированного управления предприятиями в сфере ЖКХ с учетом энергомодернизаций // Научное обозрение -2012- №2 – С.409-418.

[5] Хаймович И.Н., Кукольникова Е.А., Рамзаев В.М. Разработка модели функционирования производственных активных элементов в региональном управлении //Вестник СГЭУ,. - №12, 2014 – С.87-99.

[6] Хаймович И.Н., Рамзаев В.М. Комплексная модель управления экономическим развитием региона на основе повышения конкурентоспособности предприятий// Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6; URL: http://www.science-education.ru/120-16038 (дата обращения: 13.12.2014).

[7] V.M.Ramzaev,I.N.Khaimovich, and P.V.Chumak. Models for forecasting the competitive growth of enterprises due to energy modernization//Studies on Russian Economic Development, 2015, Vol.26.No.1,pp 49-54.

[8] K.Beyer and V.Ercegovac.Jagl: A Query Languege for JSON,2009. http://code.google.com/p/jaql/

[9] M.Billio, M.Getmansky,A.Lo,and L.Pelizzon.Econometric Measures of Systemic Risk in the Finance and Insurance Sectors. SSRN:http://ssrn.com/abstract=1648023,2010.

[10] P.Bonacich. Power and Centrality: A Family of Measures. American Journal of Sociology, 92(5):1170-1182,2007.

КОАЛИЦИИ ИНВЕСТОРОВ С НЕСОВПАДАЮЩИМИ ПРЕДПОЧТЕНИЯМИ: ПРЕИМУЩЕСТВА И ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ

В.Г. Саркисов

Самарский государственный технический университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
vigen.sarkisov@mail.ru
тел.: +7 (846) 372-36-31, тел.моб.: +7 (960) 821-05-21

Ключевые слова: *коллективные инвестиции, доверительное управление, инвестиционный фонд, портфель, индивидуальные предпочтения, многокритериальная оптимизация*

Abstract

The new approach to formation of the common investment portfolio for group of investors is offered. The approach allows considering of investors' preferences and provides higher quality of management, than at optimum individual portfolio management. An optimal common portfolio can be formed without searching of compromise between investors.

Введение

В настоящее время широко исследовано и применяется на практике формирование коалиций инвесторов с одинаковыми или близкими предпочтениями. Формирование коалиции позволяет распределить расходы на управление между всеми инвесторами. Основными организационными формами таких коалиций являются паевые инвестиционные фонды, общие фонды банковского управления, а также различные формы псевдоиндивидуального доверительного управления (инвестору предоставляется выбор из небольшого числа "индивидуальных" стратегий). Все эти подходы объединяются общим восприятием различий в предпочтениях инвесторов: различия выступают помехой для формирования оптимального коллективного инвестиционного портфеля. Такое восприятие диктует необходимость поиска компромисса между инвесторами. Отражением достигнутого компромисса является некоторый усредненный коллективный портфель, различным аспектам управления которым и уделяется основное внимание исследователей и практиков.

Отметим, что этот портфель неоптимален с точки зрения отдельных инвесторов. Традиционный способ уменьшения степени этой неоптимальности – формирование нескольких портфелей (фондов), каждый из которых объединяет группу инвесторов с наиболее близкими предпочтениями. Недостатком такого решения является повышение расходов на управление, пропорциональное увеличению количества портфелей. Таким образом, возникает неустранимое в рамках описанного подхода противоречие между точностью учета предпочтений инвесторов и ростом издержек.

Далее будет рассмотрен предложенный автором в [1] и обобщенный в [2] способ разрешения данного противоречия. Предлагается отказаться от формирования компромиссного портфеля и использовать имеющиеся различия в предпочтениях для повышения качества общего портфеля коалиции для всех инвесторов.

Первый этап формирования портфеля коалиции состоит в нахождении и простом объединении всех оптимальных индивидуальных портфелей инвесторов в единый суммарный портфель. Если этот портфель окажется недоминируемым (по Парето), то его и следует принять в качестве портфеля коалиции. В этом случае выгода инвесторов от объединения сводится к снижению издержек на управление портфелем. Если же суммарный портфель не принадлежит

эффективной границе, то его можно улучшить, выбрав любой из доминирующих его портфелей. В этом случае инвесторы получают дополнительное преимущество, выражающееся в улучшении значений критериев. Без объединения получение этого преимущества было бы невозможным, так как каждый инвестор получает лучшие значения критериев, чем мог бы получить, формируя оптимальный индивидуальный портфель.

В настоящей статье рассматривается постановка задачи оптимизации коллективного портфеля, описывается условие недоминируемости суммы индивидуальных портфелей, а также обозначаются некоторые интересные аспекты взаимодействия, возникающие при формировании коалиции инвесторов.

1 Основные определения, предположения, ограничения и постановка задачи

Структуру инвестиционного портфеля *i*-го инвестора ($i = \overline{1,I}$) будем описывать вектором $x^i = \left(x_1^i,\ldots,x_N^i\right)$, где N – количество доступных инвестору инвестиционных инструментов, а x_n – доля n-го инвестиционного инструмента

Для каждого инвестора определено множество X^i допустимых портфелей ($x^i \in X^i$), обусловленное набором доступных для него инвестиционных инструментов и ограничениями маржинального кредитования. При отсутствии маржинального кредитования ограничения имеют вид: $\sum_{n=1}^{N} x_n^i = 1$ и $x_n^i \geq 0, n = \overline{1,N}$.

В более общем случае X^i характеризуется совокупностью линейных ограничений (равенств и неравенств), описывающих выпуклый многогранник в R^N.

Проводя дальнейшее обобщение и не рассматривая конкретики ограничений, будем полагать, что все множества X^i являются выпуклыми. На практике выпуклость множества означает, что портфель, полученный объединением допустимых портфелей, также является допустимым. Для удобства будем считать, что X^i задается набором ограничений (равенств и нестрогих неравенств). Для портфеля x^j ограничения вида нестрогих неравенств, в которых выполняется равенство, называются активными, а остальные – пассивными.

Будем также полагать, что предпочтения инвесторов описываются некоторым общим набором критериев $c(x) = \left(c_1(x),\ldots,c_K(x)\right)$. При этом каждый критерий построен так, что инвестор либо желает возрастания критерия, либо вообще не рассматривает этот критерий при выборе портфеля. Иными словами, все критерии являются монотонно (не строго) возрастающими по предпочтениям всех инвесторов. Также будем полагать, что критерии описываются непрерывными и хотя бы однократно дифференцируемыми функциями.

Знание об используемых инвестором критериях позволяет определить на множестве допустимых портфелей подмножество недоминируемых по Парето портфелей (эффективную границу). До объединения каждый из инвесторов (независимо от остальных) выбирает оптимальный со своей точки зрения индивидуальный инвестиционный портфель на своей эффективной границе.

При объединении всех оптимальных индивидуальных портфелей будет получен суммарный портфель со структурой $x^{sum} = \left(x_1^{sum},\ldots,x_N^{sum}\right)$:

$$(1) \quad x^{sum} = \sum_{i=1}^{I} \alpha_i x^{*i} = \left(\sum_{i=1}^{I} \alpha_i x_1^{*i},\ldots,\sum_{i=1}^{I} \alpha_i x_N^{*i}\right),$$

где α_i – доля *i*-го инвестора в общем портфеле коалиции, а x^{*i} – оптимальный индивидуальный портфель *i*-го инвестора.

Если этот портфель не является недоминируемым, то его можно улучшить, заменив одним из доминирующих. Для нахождения множества Y^* доминирующих x^{sum} недоминируемых портфелей сформулируем соответствующую задачу оптимизации общего портфеля $y = \left(y_1,\ldots,y_N\right)$:

$$(2)\quad \begin{cases} c_k(y) \to \max\limits_{x^1,\ldots,x^I}, \ k=\overline{1,K}, \\ c_k(y) \ge c_k\left(x^{sum}\right), k=\overline{1,K}, \\ y=\sum_{i=1}^{I}\alpha_i x^i, \\ x^i \in X^i, i=\overline{1,I}. \end{cases}$$

Решением задачи (2) (в силу ее многокритериальности) является множество недоминируемых портфелей Y^*. Каждый из портфелей этого множества представлен набором векторов структур составляющих его портфелей x^i отдельных инвесторов. Таким образом, количество оптимизируемых в задаче (2) параметров равно NI. Отметим, что полученные в результате решения (2) портфели x^i в общем случае не являются оптимальными для своих владельцев.

2 Неоптимальность суммы оптимальных индивидуальных портфелей

Перед решением трудоемкой оптимизационной задачи (2) желательно удостовериться, что портфель x^{sum} не является недоминируемым, так как в случае его недоминируемости решением (2) является x^{sum}. Особенно актуальным вопрос недоминируемости является для коалиции большого числа инвесторов с широкой номенклатурой доступных инструментов.

Предлагаемый подход к проверке недоминируемости базируется на введенных ранее предположениях о монотонности всех критериев по предпочтениям инвесторов и выпуклости множеств допустимых портфелей. При этом недоминируемые портфели являются решениями задачи скалярной оптимизации (3), целевой функцией в которой является линейная свертка критериев:

$$(3)\quad \begin{cases} \sum_{k=1}^{K}\gamma_k c_k(y) \to \max\limits_{x^1,\ldots,x^I}, \ \gamma_k \ge 0, k=\overline{1,K}, \\ c_k(y) \ge c_k\left(x^{sum}\right), k=\overline{1,K}, \\ y=\sum_{i=1}^{I}\alpha_i x^i, \\ x^i \in X^i, i=\overline{1,I}. \end{cases}$$

Изменение коэффициентов γ_k позволяет найти различные недоминируемые портфели.

Для проверки недоминируемости портфеля x^{sum} подставим составляющие его оптимальные индивидуальные портфели x^{*i} в (3). Все ограничения вида нестрогих неравенств в (3) при этом гарантированно обратятся в тождества, что позволит исключить их из дальнейшего рассмотрения. Также в малой окрестности x^{sum} можно исключить пассивные ограничения, задающие множество X^i (они тоже гарантированно соблюдаются). Все оставшиеся ограничения являются ограничениями вида равенств, что позволяет использовать метод множителей Лагранжа непосредственно (без обращения к условиям Каруша-Куна-Таккера). Однако, в отличие от классического варианта применения метода множителей Лагранжа, нам известна предполагаемая точка экстремума. Неизвестными же являются множители Лагранжа и коэффициенты γ_k. Если из условий оптимальности удастся найти решение, в котором все $\gamma_k>0$, то x^{sum} является недоминируемым. Решение задачи многокритериальной оптимизации (2) в этом случае лишено смысла, так как единственным решением является x^{sum}. Объединение инвесторов в коалицию позволить лишь снизить издержки.

Если не существует ни одного решения со всеми положительными γ_k, то x^{sum} не является недоминируемым. В этом случае целесообразна замена x^{sum} на один из доминирующих его портфелей, полученных при решении (2).

3 О "справедливом" распределении дополнительной полезности

Важным вопросом при формировании коалиции является вопрос распределения дополнительного преимущества, полученного при оптимизации общего портфеля. В наиболее общем случае решение данного вопроса определяется соглашением участников. Оставляя детали соглашения на усмотрение участников, выделим некоторые соображения, определяющие основное содержание соглашения:

1) Участники, вносящие больший вклад в получение дополнительного преимущества, должны получать большее вознаграждение. При существенном различии структур портфелей коалиции и инвестора, участие такого инвестора смещает суммарный портфель дальше от эффективной границы, увеличивая потенциальную дополнительную полезность. В пользу таких инвесторов должна перераспределяться большая часть дополнительной полезности.
2) Если индивидуальный оптимальный портфель участника по структуре совпадает с оптимальным портфелем коалиции, то польза для коалиции от его участия выражается лишь в том, что он принимает на себя часть общих расходов.
3) Из возможных вариантов распределения предпочтителен тот, который максимизирует наиболее важные для инвесторов критерии. Отметим, что полезность в системе в общем случае нетрансферабельна, то есть она не всегда может быть передана от одного инвестора другому непосредственно.
4) Каждый из участников должен получить результат не хуже, чем имел бы без объединения. Это преимущество может выражаться, например, в доминировании по Парето. Более мягким вариантом является получение преимущества по некоторому индивидуальному агрегированному критерию (возникает задача идентификации предпочтений).

Указанные соображения (кроме последнего) являются лишь ориентиром и не определяют условия соглашение полностью. Нарушение последнего условия ведет к распаду коалиции, лишая инвесторов мотивации к участию. Системы, учитывающие два последних пункта, рассматриваются в [3].

Для выработки соглашения интерес представляет выработка количественного показателя, описывающего вклад конкретного инвестора в возможность получения дополнительной полезности. Этот показатель может быть построен на основе разницы между дополнительной полезностью, получаемой коалицией при участии этого инвестора и без его участия.

Можно показать, что в условиях принятых предположений не существует разбиения коалиции на группы, при котором для каждого из инвесторов будут достигнуты более высокие значения критериев, чем при объединении всех инвесторов.

Интересной является ситуация, когда присоединение инвестора приводит к уменьшению дополнительной полезности. Эта ситуация невозможна в условиях принятых ранее ограничений, но не исключена при обобщении рассматриваемой задачи (например, на случай невыпуклых множеств допустимых портфелей). При этом возникнет новая многокритериальная задача оптимального разбиения коалиции на группы. Оптимальное разбиение характеризуется максимальной дополнительной полезностью для каждого из инвесторов. Интересы отдельных инвесторов вступают в противоречие друг с другом, что вновь не позволяет найти однозначное решение, определяя лишь множество недоминируемых решений, на котором необходимо определить компромисс.

4 О возможностях манипулирования

Под манипуляцией будем понимать сообщение инвестором (или группой инвесторов) целенаправленно искаженной информации о своих предпочтениях. Естественной целью манипуляции является получение дополнительного преимущества по наиболее важным для инвестора критериям.

Этой цели можно добиться:

1) Оказывая влияние на структуру портфеля коалиции. Для этого инвестор ожжет сместить свой индивидуальный выбор портфеля от суммарного портфеля коалиции в нужную сторону. При большом количестве инвесторов влияние одного инвестора пренебрежимо мало. Существенное влияние может быть оказано группой инвесторов.
2) Оказывая влияние на распределение дополнительной полезности. Наиболее очевидной манипуляцией является образование группы инвесторов, искусственно завышающих отличие от суммарного портфеля коалиции (в противоположные стороны). Структура оптимизированного портфеля коалиции при этом не меняется, но манипуляторы могут претендовать на большую долю в дополнительной полезности, так как формально их вклад в повышение полезности возрастает. С другой стороны, смещаясь дальше от общего портфеля, инвесторы могут ухудшить собственные портфели настолько, что это ухудшение не будет скомпенсировано за счет большей доли дополнительной полезности. Реализуемость данной манипуляции определяется построенной системой распределения.

Осуществление подобных манипуляций несколькими группами инвесторов порождает антагонистическую игру.

Отдельный интерес представляет формирование системы распределения, устойчивой к подобным индивидуальным и коллективным манипуляциям. Основные подходы к построению неманипулируемых систем описаны в [4].

Заключение

Предлагаемый подход к формированию коллективных портфелей позволяет повысить эффективность управления инвестициями без существенного роста расходов. Более того, предпочтения инвесторов учитываются точно, отсутствует необходимость достижения компромисса интересов инвесторов.

Построение подобных систем управления инвестициями создает новые условия взаимодействия участников, что порождает ряд характерных для современной теории управления организационными системами задач, связанных, например, с распределением дополнительной полезности, возможностями манипуляций и построением неманипулируемых систем.

В перспективе предлагаемый подход может найти применение не только в системах доверительного управления инвестиционными портфелями, но и в более широком классе систем управления, связанных с взаимодействием агентов с несовпадающими предпочтениями.

Список литературы

[1] Саркисов В.Г. Система оптимального управления коллективными инвестициями в модели Марковица // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2013. № 4 (40). С. 45-52.
[2] Саркисов В.Г. Управление объединенными портфелями инвесторов с различными предпочтениями // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014, С. 5943-5949.
[3] Богатырев В.Д. Механизм управления взаимодействием в одноуровневой организационной системе // Автоматика и телемеханика. 2005. № 5. С. 156-174..
[4] Коргин Н.А. Неманипулируемые механизмы обмена в активных системах. Рос. акад. наук, Ин-т проблем упр. им. В. А. Трапезникова. Москва, 2003..

МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МЕДИЦИНСКОЙ СЕСТРЫ – ТРЕБОВАНИЕ ВРЕМЕНИ

Л. С. Федосеева, И. М. Назаркина, Л. Ю. Пудовинникова

ГБУЗ СО «Самарская городская клиническая поликлиника №15 Промышленного района» г.о. Самары
443111, Самара, ул. Фадеева, 56а, Россия
polik15@saminfo.ru
тел: +7 (846) 251-97-35

Ключевые слова: *медицинская сестра, эффективность, самостоятельный прием, делегирование полномочий, опыт, управление качеством, процессный подход, критерии, дифференцированный подход к оплате труда.*

Abstract

The paper presents the experience of self-employment of nurses GBUZ CO AHPCG number 15, based on the principle of delegation of the medical office. The authors describe the principle of quality management of the nursing process within a single goal setting, competition and continuing education of nurses. It presents the results of clinical, organizational, and economic efficiency in terms of increasing the availability and quality of medical care.

«Польза от имеющихся знаний в их применении»
Конфуций

Самостоятельная деятельность медицинской сестры организуется с целью повышения качества и доступности медицинской помощи населению, с учетом современных концепций развития всей системы здравоохранения, а также определение собственных приоритетных направлений на амбулаторно – поликлиническом этапе.

На протяжении многих десятилетий роль медицинской сестры, рассматривалась в нашей системе, как «помощник врача», что привело к значительному отставанию этой сферы общественного здравоохранения от уровня зарубежных стран и уровня развития современной медицинской науки. Мы убедились в этом, в 90х годах, активно принимая участие в реорганизации ПМСП по принципу врача общей практики, знакомясь с опытом работы семейного врача в нескольких международных проектах.

Реорганизационные мероприятия по внедрению института ВОП, привели к расширению спектра направлений в деятельности врачей первичного звена по реализации профилактического направления, внедрению ресурсосберегающих и развитию информационных технологий. Увеличился объем работы врача общей практики, за счет принятия им части медицинских услуг от врачей узких специальностей, повышается нагрузка и снижается время контакта с пациентом. В условиях дефицита врачебных кадров актуальным становится принцип поиска внутренних резервов оказания медицинской помощи. В сложившейся ситуации, особое внимание было уделено организации работы среднего медицинского персонала. Стало ясно, что в практической деятельности нами не востребован реальный профессиональный потенциал медицинских сестер, их знания, организационные навыки, которые они получают в период базового обучения в медицинских колледжах, и в период последипломного обучения в центре повышения квалификации. Уровень подготовки среднего медицинского персонала позволил врачу, делегировать часть полномочий медицинской сестре, оставляя за собой функции планирования, контроля, координации деятельности на участке, ответственности за достижение целевых показателей и управления качеством оказания медицинской помощи.

Формирование модели организации самостоятельной работы медицинской сестры основывается, прежде всего, на сохранении территориально-участкового принципа (ФЗ от 21 ноября 2011г. № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в РФ»). Обязательным является наличие у специалиста базовой подготовки и сертификата «Сестринское дело» или «Общая практика». Направления деятельности медицинской сестры разрабатываются на основе должностных инструкций, функциональных обязанностей, положения самостоятельной деятельности среднего медицинского персонала и стандартизации в области достижения качества сестринского процесса

Наделение медицинских сестер дополнительными полномочиями потребовало создания системы непрерывного профессионального обучения, прежде всего, организация обучения по определенным направлениям силами врачебного состава поликлиники и сотрудниками СОЦПК на дополнительных тематических циклах. Развитие сестринского дела, проходило при тесном взаимодействии с департаментом, а сегодня Министерством здравоохранения Самарской области, кафедрами СамГМУ, ИСО, и Самарской общественной организацией медицинских сестер. В работу были внедрены технологические стандарты сестринской деятельности, разработаны алгоритмы действий медицинской сестры, карты сестринского наблюдения и контрольные карты.

Отличительной особенностью работы нашей поликлиники является полная автоматизация рабочих мест, создание электронной амбулаторной карты пациента, внедрение информационного сопровождения сестринского процесса, включая электронную регистратуру.

Кабинеты самостоятельного приема медицинских сестер оснащены современными приборами экспресс - диагностики, электрокардиографами. Основу самостоятельного приема составляют мероприятия по раннему выявлению больных с минимальными клиническими проявлениями хронических социально-значимых заболеваний, таких как артериальная гипертония (АГ), бронхиальная астма (БА), сахарный диабет (СД) и другие. Медицинская сестра проводит скрининговые исследования, состоящие из анкетирования и целевых инструментальных обследований с последующим внесением всех результатов в электронную медицинскую карту. Для оптимальной оценки полученных данных по результатам скрининга нами созданы алгоритмы действия медицинских сестер при выявлении тех или иных факторов риска развития хронических заболеваний, на основании которых формируются целевые группы для дообследования. Возможности электронной амбулаторной карты построены таким образом, что позволяют сформировать «портрет» участка по имеющимся факторам риска и стандартизовать подходы к дообследованию отдельных групп пациентов. В результате, выявление больных страдающих БА увеличено с 1996г. более чем в 10 раз (со 156 в 1996г. до 1854 в 2013), СД (с 216 до 2016 в 2013г), АГ (с 1256 до 19202 в 2014г.).

Чрезвычайно ответственной частью самостоятельной работы медицинской сестры, является обучение пациентов. Кроме индивидуального обучения, медицинские сестры активно участвуют в реализации образовательных программ в обучающих школах для пациентов, страдающих хроническими заболеваниями. Ранее выявление пациентов с минимальными клиническими проявлениями заболеваний, в сочетании с системным подходом в организации оказания им помощи с использованием современных медицинских, реабилитационных и обучающих технологий, позволили достигнуть положительных результатов. Снижение числа грозных осложнений артериальной гипертонии, (с 2000года по 2013год сократилось число инфарктов миокарда с 228 до 146, а острых нарушений мозгового кровообращения с 211 до 176 случаев).

В лечебно- диагностическом направлении, организуется работа команды «врач – медицинская сестра», которая, обеспечивая взаимодействие медицинской помощи, предоставляет расширенный спектр амбулаторно-поликлинических услуг в рамках проведения стационара на дому. Медицинская сестра организует и в ряде случаев проводит диагностические мероприятия, контролирует подготовку и их исполнение, проводит разъяснительную работу с пациентом. В то время, когда врач назначает терапевтические мероприятия, медицинская сестра ведет мониторинг эффективности медикаментозной терапии, выполняет отдельно назначенные манипуляции, динамически наблюдает за больным, контролирует соблюдение рекомендаций и выполнение назначений врача. Результаты мониторинга состояния пациента, оказанные услуги и показатели скрининговых исследований

отражаются в картах сестринского наблюдения (разработанные по различным нозологиям), что позволяет в свою очередь лечащему врачу принимать решение в коррекции медикаментозного лечения и контроле всего лечебно-диагностического процесса.

Опыт самостоятельного приема медицинских сестер врачей общей практики активно используется и в организации приема врачей-специалистов. Так, медицинские сестры врачей специалистов (офтальмолога, эндокринолога, пульмонолога) не только технически оформляют рецептурные бланки на заявленные лекарственные препараты пациентам со стабильным течением заболеваний и подобранной медикаментозной терапией (под контролем врача), но и самостоятельно наблюдают за динамикой состояния здоровья диспансерных больных, оценивая эффективность подобранной терапии, что дает возможность высвободить до 15% времени приема врача и увеличить доступность данного вида медицинской помощи для других пациентов.

Развивается медицинская деятельность, сочетающая в себе преемственность в работе врачей и медицинских сестер, с выполнением профессиональных обязанностей и ответственности каждого в команде. Наделение медицинской сестры полномочиями самостоятельного принятия решения в различных ситуациях, повышение ответственности за здоровье пациентов, в сочетании с постоянным медико-экономическим контролем эффективности ее деятельности со стороны администрации становится стимулом к поиску методов рационального использования имеющихся ресурсов, в том числе финансовых. С 1996 года в поликлинике осуществляется дифференцированный подход к оплате труда медицинских работников, который имеет принцип оценки работы команды «врач и медицинская сестра».

На практике, действие медицинской сестры по оказанию помощи пациенту, рассматривается как самостоятельный сестринский процесс и принцип его совершенствования, развитие новаторства требует не только профессиональных навыков, но и организаторских способностей и возможностей ведения аналитической деятельности. Для эффективного выполнения определенного объема самостоятельной деятельности необходимо учитывать удовлетворенность сотрудников от выполняемой работы. В связи с этим, в поликлинике было проведено анкетирование среднего медицинского персонала, в котором приняло участие 42 медсестры, из них 34 (80%) осуществляют самостоятельный прием. 85% из числа тех, кто осуществляет самостоятельный прием, считают данный вид деятельности необходимым. По степени удовлетворенности организацией работы самостоятельного приема распределились следующим образом: 78% респондентов удовлетворены, 17% частично удовлетворены и 5% не удовлетворены. Так же стоит отметить, что среди медицинских сестер, которые не осуществляют самостоятельный прием, 67% считают самостоятельную деятельность необходимым.

Качество оказания медицинской помощи – это то, что сегодня определяет основное направление дальнейшего развития поликлиники. Не остаются незамеченными и наши достижения для пациентов. Доказательством тому – многочисленные благодарности пациентов в адрес врачей и медицинских сестер, а наиболее талантливые профессионалы становятся лауреатами общественной премии «Признание» (общественный совет при главном враче поликлиники).

Таким образом, организация оказания медицинской помощи средним медицинским персоналом, является одним из наиболее доступных и экономичных способов оказания широкого спектра медицинских услуг, позволяющих отказаться от необоснованного использования врачебного персонала, путем делегирования ряда полномочий наиболее подготовленным медицинским работникам среднего звена.

Расширение границ компетенции, усиление интеллектуальной нагрузки, повышение творческой инициативы создают предпосылки для раскрытия потенциальных способностей личности и повышения удовлетворенности медицинских сестер своим трудом. А доверие, оказанное медицинской сестре при самостоятельном выполнении отдельных процессов – стимулом к саморазвитию и самосовершенствованию.

СПОСОБ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ СИСТЕМНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕГИОНА

М.В. Цапенко[1], М.Ю. Лившиц[2]

[1]Институт проблем управления сложными системами РАН

443020 г. Самара, ул. Садовая, 61, Россия

E-mail: smirnov@iccs.ru

тел./факс: +7 (846) 333-27-70

[2]Самарский государственный технический университет

443010, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия

E-mail: usat@samgtu.ru

тел: +7 (846) 332-42-34

***Ключевые слова**: инновационный потенциал, региональная экосистема, метод многокритериального сравнительного оценивания эффективности Data Envelopment Analysis*

Abstract

The article deals with the constructive way to evaluate the effectiveness of the system of innovation potential of the region on the basis of multi-statistical model. The model is based on local estimates of innovative activity in the region, fixed on the basis of statistical observations. System evaluation of innovative potential obtained by using formal methods of multi-criteria assessment - method Data Envelopment Analysis - in the space of time states.

Введение

Целью исследования является модельное обоснование процедур системного ранжирования инновационных потенциалов на мезоэкономическом уровне. В рамках исследования был проведён анализ и разработаны конструктивные математические модели и методы многокритериального оценивания, агрегирования и декомпозиции локальных критериев эффективности, позволяющих осуществлять адекватную сравнительную оценку эффективности инновационных потенциалов региональной экономики. Проведена апробация предлагаемых моделей.

Объектом исследования является инновационный потенциал (далее по тексту – ИП) региональной экономики, предметом исследования – методы конструирования локальных критериев оценки системной эффективности ИП и способы их агрегирования, в настоящем исследовании представлены результаты, полученные на основе метода Data Envelopment Analysis (далее по тексту – DEA).

Особенностью исследования является совместное конструктивное применение методов статистических наблюдений и формального метода многокритериального оценивания эффективности – DEA.

По результатам исследования сформирована структура локальных критериев эффективности ИП, определены процедуры их агрегирования в глобальные показатели качества, получены ранжированные оценки сравнительной эффективности инновационного потенциала Самарской области на временном интервале с 2009 по 2013 гг.

Исследование выполнено в рамках проекта РФФИ № 14-08-01255.

1 Объект исследования

Существуют различные подходы к определению категории ИП, так одни авторы предлагают комплексный подход и трактуют его как способность экономической системы к трансформации в новое состояние с целью удовлетворения существующих или вновь возникающих потребностей, то есть как способность системы к изменению, улучшению или прогрессу [1].

Комплексное определение ИП заключается в том, что он рассматривается в общем виде как некоторая «мера готовности организации выполнять поставленные инновационные задачи. Инновационная деятельность включает в себя не только инновационный процесс преобразования научного знания в новые виды продуктов, технологий и услуг, но и маркетинговые исследования рынков сбыта товаров, конкурентной среды, а также комплекс управленческих и организационно-экономических мероприятий, которые в своей совокупности приводят к инновациям» [2].

Другим подходом к определению этой категории является ресурсный метод, в данном контексте ИП рассматривается как «…организованная совокупность взаимосвязанных условий и ресурсов (материальных, финансовых, кадровых, информационных, интеллектуальных, иных), обеспечивающих воспроизводство существующей научно-технической и технологической базы …». В этом контексте выделяют базовые группы носителе ИП: научные организации и наукоёмкие производства, социальную среду, формирующую спрос на нововведения, и сами новшества [3].

Третьим подходом к определению ИП является результативный – «способность различных отраслей народного хозяйства производить наукоёмкую продукцию, отвечающую требованиям мирового рынка» [4].

Четвертым подходом к определению ИП является его трактовка через понимание других потенциалов, например, в Современном экономическом словаре ИП определяется как научно-технический потенциал страны в виде научно-исследовательских, проектно-конструкторских, технологических организаций, экспериментальных производств, опытных полигонов, учебных заведений, персонала и технических средств этих организаций [5].

Пятую группу составляют определения, которые трактуют ИП как интегральный показатель, характеризующий степень инновационности экономики [6], например: «инновационный потенциал – это система факторов и условий, необходимых для осуществления инновационного процесса» [7].

Таким образом, наличие разнообразных трактовок понятия ИП свидетельствует о концептуальной неоднозначности в понимании сущности этой категории, что в значительной мере затрудняет разработку конструктивных подходов к количественной оценке этого явления. Тем не менее, в контексте задачи количественной оценки меры ИП региона, это понятие можно интерпретировать как степень инновационной восприимчивости и активности региональной экономической системы.

2 Предмет исследования

Существуют различные модели оценки ИП, при этом отсутствует единый, универсальный подход к оцениванию и его количественному исчислению.

Для оценки ИП широкое распространение получили факторные функциональные модели, основанные на методе прямого счёта. Так в работе [8] рассматривается пятифакторная модель оценки ИП в основу которой положены агрегатные показатели: финансовые, кадровые, материально-технические, информационные и маркетинговые. При этом свёртка этих локальных показателей реализуется на основе аддитивной композиции с заданными равными весами.

Другие подходы к решению задач оценивания ИП основываются на имитационных агент-ориентированных моделях оценки инновационной активности. Так в исследовании [9] предлагается модель, состоящая из трёх типов агентов: регионы, компании, научные работники, а системная оценка ИП характеризуется понятием «пространства инноваций».

В случаях неполной или недостаточной информации используют метод нечётких множеств, комбинированный с экспертными системами различных классов [10].

Таким образом, различные по видам, свойствам и структуре модели сочетают в себе статистические (формальные) и экспертные методы оценки.

Сами процедуры оценивания основаны на совокупности критериев, отслеживаемых органами государственной статистики. В условиях наличия множества разнородных по составу, содержанию и интерпретации критериев должны применяться способы свертывания частных, локальных критериев эффективности в обобщённый, интегральный критерий.

Процедуры свёртки могут конструироваться на основе алгоритмов, предполагающих обработку экспертных суждений, например метод анализа иерархий Томаса Саати [11], в этом случае важным является определение релевантных факторов, характеризующих объект оценивания – ИП, определение весов этих факторов и выбор экспертов.

Другими способами синтеза глобальных оценок являются формальные методы, не использующие субъективные экспертные оценки, например метод DEA, разработанный в 1978 году в США [12, 13]. В России этот подход получил название «Анализ среды функционирования» (АСФ) [14].

Подробно алгоритм метода рассмотрен в ряде работ [15 – 19], а на вариант численного решения алгоритма получено Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ [20].

В общей постановке DEA-метода полагается, что исследуемый процесс характеризуется m входными и k выходными параметрами, при этом выходные величины $Y_1, Y_2, \ldots Y_k$ выбираются таким образом, чтобы каждая из них характеризовала фактор, играющий положительную роль в суммарном показателе эффективности f исследуемого процесса:

$$(1)\quad \frac{\partial f(Y_1, Y_2, \ldots Y_k)}{\partial Y_i} > 0, i = 1, 2, \ldots k\ .$$

Такими выходными показателями могут быть самые различные величины, характеризующие разнообразные аспекты деятельности: производственно-технологические (объём и качество конечной продукции, надёжность, долговечность), управленческие (устойчивость, управляемость, наблюдаемость), экономические (прибыль, доход, рентабельность), экологические (чистота производств) и другие.

В качестве входных величин $X_1, X_2, \ldots X_m$ берутся затраты на деятельность, уменьшение которых приводит к повышению показателя суммарной эффективности:

$$(2)\quad \frac{\partial f(X_1, X_2, \ldots X_m)}{\partial X_j} < 0, j = 1, 2, \ldots m\ .$$

Основным классом входных характеристик являются различные ресурсы процесса – сырьевые, материальные, информационные, капитальные, финансовые, трудовые, энергетические и другие.

На основе содержательного выбора m входов $X_1, X_2, \ldots X_m$ и k выходов $Y_1, Y_2, \ldots Y_k$, совокупность которых с позиции исследователя даёт достаточно полную и адекватную характеристику системы, структура комплексного показателя эффективности исследуемой системы в базовом варианте метода DEA формируется следующим образом:

(3) $$f = \frac{u_1 \cdot Y_1 + u_2 \cdot Y_2 + ... + u_k \cdot Y_k}{v_1 \cdot X_1 + v_2 \cdot X_2 + ... + v_m \cdot X_m}.$$

В (3) $u_i\,(i = 1,2,...k)$ – положительные весовые коэффициенты, характеризующие относительный вклад каждого из выходных факторов Y_i в суммарный коэффициент эффективности f. Соответственно, $v_j\,(j = 1,2,...m)$ – веса входных величин X_j.

В формуле (3) веса u_i, v_j являются произвольными, неизвестными, и от них требуется лишь положительность – $u_i \geq 0, v_j \geq 0$.

В качестве гипотезы при нахождении численных показателей комплексной эффективности каждого из $n\,(n = 1,2,...N)$ оцениваемых объектов в методе DEA полагается, что величины всех показателей комплексной эффективности f конечны, и осуществляется ранжировка этих значений на числовом интервале $[0, 1]$, исходя из условия максимизации показателей эффективности (3) для каждой из систем.

В этом случае, задача отыскания для n-ой системы обобщённого показателя эффективности f_n и соответствующего ему набора весовых коэффициентов u_{in} и v_{jn} записывается следующим образом.

Найти максимум функционала:

(4) $$f_n = \max_{u_{in}, v_{jn} \in G} \frac{u_{1n} \cdot Y_{1n} + u_{2n} \cdot Y_{2n} + u_{3n} \cdot Y_{3n} + ... + u_{kn} \cdot Y_{kn}}{v_{1n} \cdot X_{1n} + v_{2n} \cdot X_{2n} + v_{3n} \cdot X_{3n} + ... + v_{mn} \cdot X_{mn}},$$

при наличии системы ограничений, определяющих область значений G весов u_{in} и v_{jn}:

(5) $$\begin{cases} \dfrac{u_{11} \cdot Y_{11} + u_{21} \cdot Y_{21} + u_{31} \cdot Y_{31} + ... + u_{k1} \cdot Y_{k1}}{v_{11} \cdot X_{11} + v_{21} \cdot X_{21} + v_{31} \cdot X_{31} + ... + v_{m1} \cdot X_{m1}} \leq 1, \\ \dfrac{u_{12} \cdot Y_{12} + u_{22} \cdot Y_{22} + u_{32} \cdot Y_{32} + ... + u_{k2} \cdot Y_{k2}}{v_{12} \cdot X_{12} + v_{22} \cdot X_{22} + v_{32} \cdot X_{32} + ... + v_{m2} \cdot X_{m2}} \leq 1, \\ ..... \\ \dfrac{u_{1n} \cdot Y_{1n} + u_{2n} \cdot Y_{2n} + u_{3n} \cdot Y_{3n} + ... + u_{kn} \cdot Y_{kn}}{v_{1n} \cdot X_{1n} + v_{2n} \cdot X_{2n} + v_{3n} \cdot X_{3n} + ... + v_{mn} \cdot X_{mn}} \leq 1, \\ u_{in} \geq 0; v_{jn} \geq 0, \end{cases}$$

$$i = \{1, 2 ... k\}; j = \{1, 2 ... m\}; n = \{1, 2 ... N\}.$$

В (5) величины $X_{jn}\,(j = 1,2,...m)$ и $Y_{in}\,(i = 1,2,...k)$ являются, соответственно, численными значениями входа X_j и выхода Y_i для n-го процесса.

Система соотношений (4, 5) для $n\,(n = 1,2,...N)$ определяет N задач математического программирования. Решение каждой n-ой задачи $(n = 1,2,...N)$ для n-ой системы даёт значение n-го показателя эффективности f_n, ранжированное на единичном интервале $[0, 1]$, и соответствующий ему набор весовых коэффициентов $\{u_{1n}, u_{2n}, ...u_{kn}\}$ и $\{v_{1n}, v_{2n}, ...v_{mn}\}$, максимизирующий функционал (4). Вообще говоря, эти веса u_{in} и v_{jn} будут различными для различных n-ых систем.

Другим способом применения этой модели является определение показателей системной эффективности на временном интервале, в этом случае анализируется динамика параметров системы и формируются постановки аналогичные (4, 5), где множество объектов *n* заменяется временными состояниями анализируемой системы. Далее в нашем исследовании мы будем использовать именно такую постановку.

3 Исходные данные

Для решения задачи многокритериального оценивания системной эффективности инновационного потенциала региона необходимо сформировать исходный состав показателей, наблюдаемых органами государственной статистики. В качестве информационной базы исследования были взяты данные Федеральной службы государственной статистики (раздел «Наука, инновации и информационное общество» [21]) в разрезе субъектов РФ.

Первичные исходные статистические данные по Самарской области в период с 2009 по 2013 гг. представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные статистические данные по Самарской области

Показатель	Индекс	2009	2010	2011	2012	2013
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
Валовой региональный продукт (далее по тексту – ВРП), млн руб.	I_1	583999,90	695651,20	834149,30	937434,50	1040713,50
Объем инновационных товаров, работ, услуг, млн руб.	I_2	90801,50	96237,46	185468,25	242591,34	238966,79
Затраты на технологические инновации организаций, млн руб.	I_3	7923,09	9445,93	17351,76	74095,09	65842,01
Инновационная активность организаций (удельный вес организаций, осуществлявших технологические, организационные, маркетинговые инновации в отчетном году, в общем числе обследованных организаций), %	I_4	12,30	12,10	9,80	6,30	5,40
Используемые передовые производственные технологии, ед.	I_5	5648,00	6189,00	6870,00	6688,00	7291,00

Содержательно параметры таблицы 1 включают:

ВРП – стоимость товаров и услуг, произведенных на территории региона для конечного использования. Производственным методом исчисляется как сумма валовой добавленной стоимости (в основных ценах) всех видов экономической деятельности, созданной на территории региона. Регион представляет собой открытую экономическую систему, поэтому четко определить границы производства и в полной мере оценить размеры добавленной стоимости, создаваемой на его территории довольно сложно.

Инновационные товары, работы, услуги – товары, работы, услуги, новые или подвергавшиеся в течение последних трех лет разной степени технологическим изменениям.

Затраты на технологические инновации – выраженные в денежной форме фактические расходы, связанные с осуществлением различных видов инновационной деятельности,

выполняемой в масштабе организации (отрасли, региона, страны). В составе затрат на технологические инновации учитываются текущие и капитальные затраты.

Инновационная активность организации – характеризует степень участия организации в осуществлении инновационной деятельности в целом или отдельных ее видов в течение определенного периода времени.

Технологические инновации – представляют собой конечный результат инновационной деятельности, получивший воплощение в виде нового либо усовершенствованного продукта или услуги, внедренных на рынке, нового либо усовершенствованного процесса или способа производства (передачи) услуг, используемых в практической деятельности. Технологическими инновациями могут быть, как те продукты, процессы, услуги и методы, которые организация разрабатывает впервые, так и те, которые перенимаются ею у других организаций.

Организационные инновации – это реализация нового метода в ведении бизнеса, организации рабочих мест или организации внешних связей. Данные инновации направлены на повышение эффективности деятельности организации путем снижения административных и трансакционных издержек, путем повышения удовлетворенности работников организацией рабочих мест (рабочего времени) и тем самым повышения производительности труда, путем получения доступа к отсутствующим на рынке активам или снижения стоимости поставок. Организация не обязательно должна быть первой внедрившей эти организационные инновации. Не имеет значения, был этот вид инноваций разработан организацией или перенят у других организаций.

Маркетинговые инновации – реализация новых или значительно улучшенных маркетинговых методов, охватывающих существенные изменения в дизайне и упаковке продуктов, использование новых методов продаж и презентации продуктов (услуг), их представления и продвижения на рынки сбыта, формирование новых ценовых стратегий. Они направлены на более полное удовлетворение потребностей потребителей продуктов, открытие новых рынков сбыта, расширение состава потребителей продуктов и услуг с целью повышения объемов продаж.

Под использованием передовой производственной технологии следует понимать ее внедрение и производственную эксплуатацию. Технология считается используемой лишь при производственной эксплуатации, результатом которой является выпуск продукции или оказание услуг.

Для количественной оценки показателей, представленных в таблице 1, использовались Формы федерального статистического наблюдения: №4-инновация «Сведения об инновационной деятельности организаций» и №1-технология «Сведения о разработке и использовании передовых производственных технологий».

Таким образом, на основе исходных данных статистики были отобраны пять базовых индикаторов инновационной активности региона, далее на их основе сконструированы производные относительные показатели – таблица 2.

Таблица 2 – Производные показатели

Показатель	Способ расчёта	2009	2010	2011	2012	2013
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
Удельный вес инновационных товаров, работ, услуг в общем объеме ВРП, %	I_2/I_1	15,55	13,83	22,23	25,88	22,96
Удельный вес затрат на технологические инновации в общем объеме ВРП, %	I_3/I_1	1,36	1,36	2,08	7,90	6,33

Показатель	Способ расчёта	2009	2010	2011	2012	2013
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
Удельный вес используемых передовых производственных технологий в общём объёме ВРП, ед./млрд руб.	I_5/I_1	9,67	8,90	8,24	7,13	7,01

Как видно из данных, представленных в таблице 2, производные показатели строятся на основе сопоставления абсолютных значений характеристик с объёмом ВРП.

Проанализируем динамику показателей. На графиках рисунка 1 представлена динамика трёх относительных параметров:

- инновационная активность – I_4, %;
- агрегированный показатель – удельный вес инновационных товаров и вес затрат на технологические инновации в общем объёме ВРП – $\left(\frac{I_2 + I_3}{I_1}\right)$, %;
- удельный вес используемых передовых технологий в общем объёме ВРП – $\left(\frac{I_5}{I_1}\right)$, ед./млрд руб.

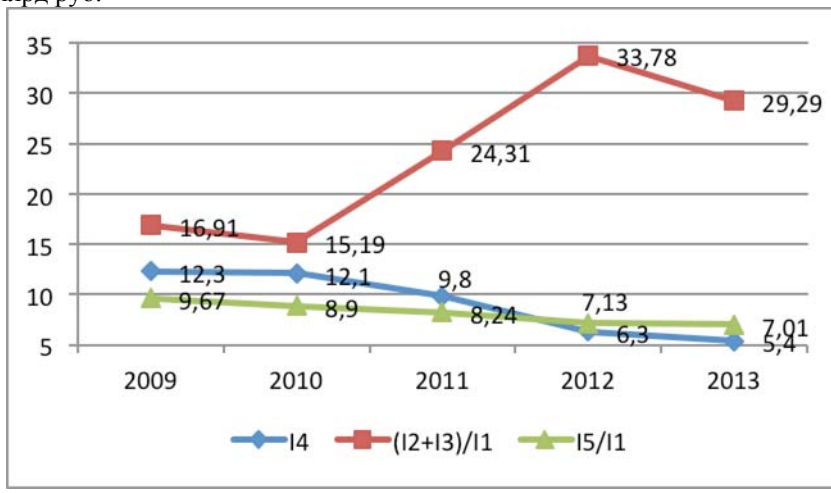


Рисунок 1 – Динамика характеристик ИП

Как видно из данных, представленных на графиках рисунка 1, на анализируемом временном интервале наблюдается падение показателей: инновационной активности на 56,1% (с 12,3% в 2009 году до 5,4% в 2013 году) и удельного веса используемых передовых технологий на 27,5% (с 9,67 ед./млрд руб. в 2009 году до 7,01 ед./млрд руб. в 2013 году).

Агрегированный показатель, интегрирующий удельные веса стоимости инновационных товаров и затрат на технологические инновации в общем объёме ВРП, растёт на интервале 2010-2012 гг. со средним темпом – около 50% в год, при этом в 2009-2010 гг. и в 2012-2013 гг. этот параметр падает на 10,2% и 13,3%, соответственно.

Из анализа динамики характеристик ИП можно сделать вывод о противоречивых тенденциях поведения параметров и, как следствие, необходимости конструирования обобщающего, интегрального показателя.

4 Результаты исследования

На основе трёх локальных характеристик сконструируем обобщающие функционалы многокритериального оценивания системной эффективности ИП.

На первом этапе возьмём два антагонистических критерия: агрегированный показатель $\left(\frac{I_2 + I_3}{I_1}\right)$ и характеристику инновационной активности I_4. Коэффициент корреляции между этими временными рядами равен (минус) 0,94 (коэффициент корреляции между рядами I_4 и $\left(\frac{I_5}{I_1}\right)$ равен (минус) 0,92).

Первый функционал обобщённой эффективности представим следующим образом:

- $$f1_n = \max_{v_{jn} \in G} v_{1n} \cdot I_4 + v_{2n} \cdot \left[\frac{I_2 + I_3}{I_1}\right].$$

Для расчёта сравнительных показателей эффективности ИП воспользуемся алгоритмом DEA-метода. Для этого сформируем функционалы вида (6) для всех пяти временных периодов $n\,(n = 1,2,...5)$ и системы линейных ограничений, аналогичные постановке (5). Для первого временного периода постановка задачи линейного программирования (ЗЛП) выглядит следующим образом:

$$f1_n = \max_{v_{jn} \in G} v_{11} \cdot 12.3 + v_{21} \cdot 16.91;$$

- $$\begin{cases} v_{11} \cdot 12.3 + v_{21} \cdot 16.91 \le 1; \\ v_{11} \cdot 12.1 + v_{21} \cdot 15.19 \le 1; \\ v_{11} \cdot 9.80 + v_{21} \cdot 24.31 \le 1; \\ v_{11} \cdot 6.30 + v_{21} \cdot 33.78 \le 1; \\ v_{11} \cdot 5.40 + v_{21} \cdot 29.29 \le 1; \\ v_{11}, v_{21} \ge 0; \\ n = 1 \text{ для } 2009 \text{ г.} \end{cases}$$

Второй функционал оценки сформируем на основе первого добавив ещё один параметр – удельный вес используемых передовых технологий:

- $$f2_n = \max_{v_{jn} \in G} v_{1n} \cdot I_4 + v_{2n} \cdot \left[\frac{I_2 + I_3}{I_1}\right] + v_{3n} \cdot \left[\frac{I_5}{I_1}\right].$$

Постановка задачи ЗЛП для второго функционала:

$$f2_n = \max_{v_{jn} \in G} v_{11} \cdot 12.3 + v_{21} \cdot 16.91 + v_{31} \cdot 9.67;$$

- $$\begin{cases} v_{11} \cdot 12.3 + v_{21} \cdot 16.91 + v_{31} \cdot 9.67 \le 1; \\ v_{11} \cdot 12.1 + v_{21} \cdot 15.19 + v_{31} \cdot 8.9 \le 1; \\ v_{11} \cdot 9.80 + v_{21} \cdot 24.31 + v_{31} \cdot 8.24 \le 1; \\ v_{11} \cdot 6.30 + v_{21} \cdot 33.78 + v_{31} \cdot 7.13 \le 1; \\ v_{11} \cdot 5.40 + v_{21} \cdot 29.29 + v_{31} \cdot 7.01 \le 1; \\ v_{11}, v_{21} \ge 0; \\ n = 1 \text{ для } 2009 \text{ г.} \end{cases}$$

Решения соответствующих задач ЗЛП (7) и (9) для каждого временного периода определяют численные значения обобщённых функционалов оценки *f1* и *f2* – рисунок 2.

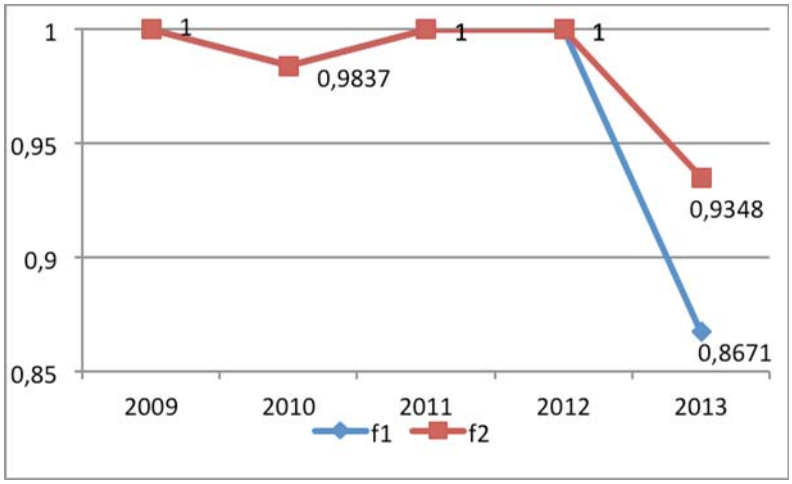


Рисунок 2 – Результаты обобщённого оценивания ИП

Как видно из графиков, представленных на рисунке 2, до 2012 года оценки по функционалам *f1* и *f2* совпадают, максимальные значения характерны для 2009, 2011 и 2012 гг. В 2010 году наблюдается незначительный спад в оценке ИП до 0,9837.

В 2013 году обобщённые характеристики отличаются, так по первому функционалу, состоящему из двух параметров, обобщённая оценка ИП составляет 0,8671, что объясняется тенденцией спада входящих в этот обобщённый показатель локальных критериев в 2013 году. При добавлении третьего параметра (функционал *f2*) минимальное значение увеличивается до 0,9348, что объясняется меньшим темпом падения добавляемого фактора.

Выводы

В рамках проведённого исследования была проведена апробация способа сравнительного многокритериального оценивания инновационного потенциала региональной экономики в основу которого положен комплекс конструктивных математических моделей, позволяющих реализовать многокритериальную оценку сравнительной эффективности на основе формального метода оценивания, а также агрегирование и декомпозицию локальных показателей качества.

Апробация моделей на актуальной статистической информации показала их работоспособность и адекватность полученных результатов, дальнейшее развитие исследования предполагает увеличение размера анализируемого временного ряда, добавление новых факторов в модели – учёт кадровой и информационной составляющих, а также проведение сравнительной оценки в пространстве объектов – регионов РФ.

Список литературы

[1] Кравченко С.И., Кладченко И.С. Исследование сущности инновационного потенциала [Текст] // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: Экономическая. Выпуск 68. – Донецк: ДонНТУ, 2003.

[2] Косолапов О.В., Гиренко-Коцуба О.А. Инновационный потенциал в оценке конкурентоспособности предприятий [Текст] // Урало-Сибирская науч.-практ. конф. (http://www.uralweb.ru).

[3] Ратнер П.Д., Хрусталёв Е.Ю. Механизмы развития инновационного потенциала экономики // Стратегическое планирование и развитие предприятий. Секция 4. / Материалы Шестнадцатого всероссийского симпозиума. Москва, 14-15 апреля 2015 г. Под ред. чл.-корр. РАН Г.Б. Клейнера. – М.: ЦЭМИ РАН, 2015. – с. 161–164.

[4] Рынок: Бизнес. Коммерция. Экономика: толковый терминологический словарь [Текст] / Внедр. Центр «Маркетинг»: Сост. В. А. Калашников: под общ. ред. А.П.Дашкова / 4-е изд., испр. и доп. - М.: Маркетинг, 1998.
[5] Райзберг Б. А., Лозовский Л. М. Стародубцева Е. Б. Современный экономический словарь [Текст]. М.: ИНФРА-М, 2001.
[6] Лисин Б.К., Фридлянов В.Н. Инновационный потенциал как фактор развития. Межгосударственное социально-экономическое исследование [Текст] // Инновации. - 2002. - № 7. - с. 25-51.
[7] Николаев А.И. Инновационное развитие и инновационная культура [Текст] // Наука и наукознание. - 2001. - № 2. - с. 54-65.
[8] Мамедов Т.Т. Оценка динамики инновационного потенциала наукоёмкой организации // Стратегическое планирование и развитие предприятий. Секция 5. / Материалы Шестнадцатого всероссийского симпозиума. Москва, 14-15 апреля 2015 г. Под ред. чл.-корр. РАН Г.Б. Клейнера. – М.: ЦЭМИ РАН, 2015. – с. 100–102.
[9] Афанасьев М.Ю., Бахтизин А.Р., Володько М.В., Лысенкова М.А. Модель оценки инновационной активности регионов РФ // Стратегическое планирование и развитие предприятий. Секция 2. / Материалы Шестнадцатого всероссийского симпозиума. Москва, 14-15 апреля 2015 г. Под ред. чл.-корр. РАН Г.Б. Клейнера. – М.: ЦЭМИ РАН, 2015. – с. 15–18.
[10] Гетманцев А.А., Сомина И.В. Теория нечётких множеств как математический аппарат для оценки инновационного потенциала предприятия // Современные проблемы науки и образования. 2013. №5. [Электронный ресурс]. [Режим доступа: http://www.science-education.ru/111-10643].
[11] Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий [Текст]. - М.: Радио и связь, 1993.
[12] Фаррел М. Измерение эффективности производства [Текст] // Журнал Королевского статистического общества, 1957, серия А, том 120, ч. III, с. 253-281.
[13] Банкер Р., Чарнс А., Купер В. Некоторые модели для оценки технической и масштабной эффективности в Data Envelopment Analysis [Текст] // Менеджмент, 1984, том 30, № 9, с. 1078-1092.
[14] Кривоножко В.Е., Пропой А.И., Сеньков Р.В., Родченков И.В., Анохин П.М. Анализ эффективности функционирования сложных систем // Автоматизация проектирования, №1, 1999. [Электронный ресурс]. [Режим доступа: http://www.osp.ru/ap/1999/01/02.htm].
[15] Дилигенский Н.В., Цапенко М.В. Методология DEA: оценка эффективности экономических объектов, анализ метода и свойств решений [Текст] // Межвузовский сборник научных трудов «Высшее образование, бизнес, предпринимательство 2001». – Самара: СамГТУ, Поволжский институт бизнеса, 2001. – с. 149–159.
[16] Дилигенский Н.В., Цапенко М.В. Математическое моделирование и обобщённое оценивание эффективности производственно-экономических систем [Текст] // РАН, СНЦ РАН, ИПУСС Труды VI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». – Самара: СНЦ РАН, 2004. – с. 96–106.
[17] Дилигенский Н.В., Цапенко М.В., Давыдов А.Н. Методология анализа, многокритериального ранжирования и нормирования показателей обобщённой эффективности научных исследований // РАН, СНЦ РАН, ИПУСС Труды XV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: СНЦ РАН 2013. – с. 112–124.
[18] Лившиц М.Ю., Цапенко М.В., Давыдов А.Н. Идентификация взаимосвязей соответствия наукоёмкой продукции приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники // РАН, СНЦ РАН, ИПУСС Труды XVI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». – Самара: СНЦ РАН, 2014. – с. 408–415.
[19] Цапенко М.В. Методы системного ранжирования инновационных проектов региональной экосистемы // Стратегическое планирование и развитие предприятий. Секция 3. / Материалы Шестнадцатого всероссийского симпозиума. Москва, 14-15 апреля 2015 г. Под ред. чл.-корр. РАН Г.Б. Клейнера. – М.: ЦЭМИ РАН, 2015. – с. 148–150.
[20] Барболин Д.А., Барболина С.А., Давыдов А.Н., Цапенко М.В. Многокритериальная DEA-оценка эффективности научных исследований // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013617531, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 19.08.2013 г.
[21] Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. [Режим доступа: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/science_and_innovations/science/#].

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕКУЩЕЙ ИНФОРМАЦИИ И ПАМЯТИ В ПРОЦЕССЕ УПРАВЛЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Л.Л. Чекалов

ООО «Транс-Мобил Спедишн»
443030, Самара, Желябова д.3-45, Россия
ltrans777@mail.ru
тел: +7 (963) 115-00-77

Ключевые слова: *память биологических систем, информация, управление*

Abstract
Biological systems use memory in the management of their own movement. External influences on the biological system induce changes in their physical condition. These changes interact with memory biological system, which leads to a transition from physical to psychic information. Psychic information is the result of the interaction of current information and memory. The transition from the physical to the Psychic information is the basis for decision-making in the management of biological systems.

Введение

Первоначальной задачей описания любого объекта или процесса является выбор понятий, позволяющих сделать достаточно адекватное описание как текущего состояния этих объектов, так и процесса их изменения. При выборе набора понятий нужно понимать, что неадекватный набор выбранных понятий и отношений между ними будет в дальнейшем сильно ограничивать возможности описания и нашего понимания объектов или процессов.

Известный астрофизик А. Эддингтон предложил аналогию: “Теория – это сеть, которую мы забрасываем в мир. Все, что мы выловим в океане природы этой сетью – это и есть предмет теории”. Остальное может остаться незамеченным. Таким образом, очень часто мы «видим» в объектах только то, что мы заранее предполагали и хотели увидеть в рамках существующей научной картины мира или гипотезы, созданной в нашей памяти.

В данной работе формируется перечень основных взаимосвязанных понятий, относящийся к философскому уровню для описания обработки информации биологическими системами. В основе этого процесса находится взаимодействие текущей информации (информации настоящего времени) и памяти (прошлой информации). И в результате этого взаимодействия осуществляется управление любой биологической системой, и даже можно сказать, что любой системой вообще.

1 Перечень понятий и их определение

Перечень понятий и их содержание для описания тех или иных явлений определяется культурным и научным опытом соответствующего исторического периода.

В рамках данной работы дается описание памяти и внимания как универсальных функций в биологических системах. Для этого используются философские понятия – ***материи, энергии, информации, движения, пространства, времени, управления, формы, многослойности, структуры, внимания, чувства*** (Рисунок 1).

Понятия ***материи, энергии, информации*** это единое явление, обозначаемое тремя знаками, также как и понятия ***пространства, движения и времени*** – тоже имеют единое значение (смысл). Рассматривать материю без энергии и информации также бессмысленно, как и рассматривать движение вне пространства и времени.

Рисунок 1 - Соотношение понятий

Пространство невозможно представить без ***движения материи***, а источником любого ***движения*** является ***энергия***. ***Движение*** вызывает взаимодействие и изменение ***форм***, и именно изменение дает чувство ***времени*** для БС.

В рамках этой статьи под термином «биологические системы» (БС) понимаются субъекты животного мира и человек.

При определенных условиях и соглашениях по терминологии - БС можно описывать как информационные системы, используя центральным понятие информации.

Под информацией, в данном случае, понимается комплекс свойств и состояний самой БС, а также любое их изменение при движении и взаимодействии с объектами или субъектами внешнего пространства или частями внутреннего пространства. Информация в своем проявлении может иметь совершенно различные свойства, отражающие соответствующие характеристики материального мира и БС.

2 Биологическая система, её внешнее и внутреннее пространство и многослойность

Как один из результатов эволюции мира принимается факт выделения ***формы*** (границы) БС в пространстве. ***Форма*** БС сформирована в процессе эволюции многослойной, как в субстанциональном смысле, так и в функциональном.

Рисунок 2 - Многослойность внешнего и внутреннего пространства БС

Названия слоям даны с некоторой степенью условности. Также нужно уточнить, что в научной традиции три верхних слоя на Рисунке 2 в данный момент чаще всего относят к ***функции*** физического слоя, а в религиозной традиции три верхних слоя обладают своей ***субстанциональностью*** со своими законами взаимодействия и реализации причинно-следственных связей. Процесс реализации движения у человека, как одного из типов БС, в физическом слое всегда проходит через слой психики и сознания. БС осуществляет переход от физической информации к психической, т.е. происходит соединение психической информации прошлого опыта (памяти) с текущей физической информацией. С точки зрения религиозных традиций слой психики и сознания также субстанционален, как и физический слой, и причины (мысли и чувства), созданные на уровне сознания и психики, будут иметь свои следствия и на этих же уровнях тоже.

Если рассматривать эти четыре слоя с традиционных научных позиций, то к физическому слою можно отнести органическую и неорганическую материю, к психическому слою те свойства, функционально отличающие органическую материю животного мира от неорганической материи, и к слою сознания можно отнести те особенные дополнительные функциональные свойства психики человека (имеющего физическое тело сходное по свойствам с животным, с таким же составом органов и их функциональным назначение, сходное ДНК), отличающие его от животного мира.

Конечно, нужно отметить, что между слоями существуют переходные состояния и не всегда можно абсолютно точно провести между ними границу. С другой стороны, мы видим, что при переходе из слоя в слой у материи возникают дополнительные функциональные возможности. Оставаясь на научных позициях, рассмотрим основные функциональные различия материи между слоями, которые можно описать с помощью категорий ***материя, энергия, информация, пространство, движение, время, управление, форма, многослойность, структура, внимание, чувство*** (Рисунок 1).

Объекты неживой материи осуществляют свое движение в пространстве-времени на основании законов физики (или реализации свойств материи и энергии в соответствии с законами физики). Форма (объект или поток) неживой материи не управляет собственным движением в пространстве-времени, но подчиняется законам физики.

В слое психической эволюции БС (животный мир) мы видим, что живая материя совершенствует управление движением собственной формы для реализации движения этой формы во внешнем пространстве вопреки действию законов физики, используя переход от физической информации о внешнем пространстве к психической информации для принятия решений и управления. Камень не может забежать на гору и не может использовать информацию о том, что на горе прыгает мышка, которую можно съесть.

3 Изменение управления БС в процессе эволюции

Можно сказать, что БС определяет направление реализации собственной энергии (управление) в соответствии с законами восприятия и обработки информации, сформированными в процессе эволюции БС.

Биологическая система на животном уровне управляет своей формой (движением материи внутреннего пространства) для осуществления движения формы во внешнем пространстве. В процессе эволюции животных от низших к высшим управление формой становится всё более сложным и совершенным. Если жука перевернуть на спину, то ему потребуется много усилий и времени, чтобы вернуться в исходное положение. Попробуйте то же самое сделать с кошкой или собакой.

Биологическая система на человеческом уровне начинает развитие своих функций, уходя от животного уровня, с обучения управлению своей формой для изменения внешнего пространства. Особую роль в этом сыграла кисть руки. Конечно, можно заметить, что высшие

животные тоже изменяют внешнее пространство – строят гнезда, копают норы, но все эти способности у них находятся в начальной стадии развития, они становятся как бы платформой, на которой начинается гораздо более сложное и глубокое развитие этой способности у человека. В настоящий момент развитие этой способности у человека достигло определенного предела – настолько серьезно изменена вся внешняя среда обитания человека, вплоть до генетического и молекулярного уровня, и в связи с этим все чаще мы слышим об экологическом кризисе, угрожающем самому существованию человека.

Можно ещё раз повторить, что в слое эволюции сознания человек, выходя из животного состояния, уже умея управлять материей своей формы (внутреннего пространства) для движения, учится управлять своей формой для активного изменения материи внешнего пространства, начиная с управления кистью руки. Но научившись управлять рукой, а также своим вниманием (или осознанностью) в процессе обучения управления рукой, и наблюдая внешний результат этого управления, человек получил *возможность* ***управления*** *своими функциями психического и сознания.* Все действия человека направленные на изменение материи внешней среды в своей сути тренировали его способность к концентрации внимания (осознанности) на одном действии или фрагменте текущей ситуации (информации) в течение длительного времени с сохранением в памяти результата этого действия (управления). Сложность удержания внимания на одном объекте длительное время каждый может проверить на себе.

БС воспринимает (ощущает своими органами чувств) текущую ситуацию или информацию (ТС), в которую включается как конфигурация самой формы БС (внутреннее пространство), так и конфигурация внешнего пространства. ТС сравнивается с прошлым опытом БС – памятью и происходит обработка информации (ОИ), принимается решение (ПР) о траектории движения формы в пространстве, начинается движение. В совокупности восприятие ТС, ОИ и ПР являются составными частями управления.

ТС можно определить как информацию о внешнем и внутреннем пространстве. Под информацией в данном случае понимается комплекс свойств и состояний самой БС, а также их постоянное изменение при движении и взаимодействии с объектами или субъектами внешнего пространства или частями внутреннего пространства. Информация в своем проявлении может иметь совершенно различные свойства, отражающие соответствующие характеристики материального мира и БС. Но в дальнейшем желательно обратить внимание не на конкретную содержательную информацию в виде сведений о различных предметных областях, а на свойства информации, инвариантные к любой предметной области.

4 Восприятие текущей информации БС

Форма БС и ее органы чувств ежесекундно подвергается бесконечному множеству физических воздействий внешнего пространства - текущая ситуация или информация настоящего времени (ТС) - от механических до электромагнитных и гравитационных.

Все воздействия порождают в БС противодействие для удержания собственного равновесия. Это сопротивление внешнему воздействию вызывает у БС вполне определенное ощущение (чувство). Т.е. любое воздействие на БС приводит к появлению чувства, которое соответствует физическому воздействию, но не является им. И это чувство, связанное с сопротивлением совершенно определенному воздействию, запоминается БС. Чувство уже относится к психическому уровню.

Память, как универсальное свойство БС, сохраняет связанные фрагменты информации физического и психического уровня.

На каждой ступени эволюции БС имеет различные возможности для восприятия текущей информации. Можно сказать, что на разной ступени эволюции БС воспринимают совершенно различно внешнее и внутреннее пространства.

БС отображает в памяти пространство в соответствии с набором своих органов чувств и их физическими возможностями. Например, восприятие пространства БС стало наиболее полным с появлением зрения. Зрительное восприятие совершенствовалось от вида к виду БС. Эти изменения происходили как в направлении расширения расстояния восприятия, так и увеличивалась детализация восприятия. Лягушка воспринимает лишь световые контуры и соответствующим образом реагирует на них [1]. Высшие млекопитающие воспринимают внешний мир на большее расстояние и гораздо более подробно, появляется восприятие цвета, движение тела планируется в большем объеме пространства.

5 Память БС

С информационной точки зрения память и есть хранилище данных (статическая информация) и алгоритмов (динамическая информация), связанная с формой БС.

С биологической точки зрения – память это также хранилище психических образов (статическая информация) связанных с физическими ощущениями различных органов чувств и структур изменений этих образов (динамическая информация). В какой форме хранится в памяти эта информация в биологической системе до сих пор непонятно, но сам факт её хранения никем не оспаривается.

Таким образом, БС сохраняют не только информационные образы, но связанные с ними чувства (ощущения, эмоции) как от очень сильных (отрицательных, положительных и достаточно нейтральных) до очень слабых и почти незаметных. Именно незаметность и слабый тон некоторых чувств создают иллюзию их отсутствия. Хотя по отношению к БС любая информация сопровождается, идентифицируется и является именно чувством. Чувство здесь является знанием и информацией.

Память в общем смысле является для БС прошлым опытом поведения (движения) системы. Память всегда связана с прошлым, но используется для принятия решений и управления в будущих ситуациях.

Память БС объединяет все четыре слоя взаимодействия формы (рисунок 1) с внешним пространством в общем фрагменте. И если на физическом уровне любое взаимодействие формы с внешним пространством может быть дискретным (квант света, тактильное раздельное возбуждение нейронов), то на психическом уровне эти дискретности переходят в непрерывные «картинки» с выделенными объектами - чувство внешнего пространства. Именно это объединение фрагментов физического взаимодействия дает определенный психический образ целостных объектов.

6 Внимание БС

Внимание возникает на границе внешнего и внутреннего пространства и во внутреннем пространстве биологических систем.

Внимание БС это ограниченный, из гораздо большего объема, объем физической информации текущей ситуации (ТС), воздействующий на внутреннее пространство и вызывающий определенное чувство или ощущение.

В результате текущая ситуация, ограниченная объемом внимания в пространстве и времени, активно переводится от физической информации (колебаний звуковых или световых волн) в психическую информацию (слова или зрительные образы) и осознается БС. Сам процесс перехода от физической информации к психической связан с физическим воздействием в пределах ТС на органы чувств БС. Это физическое воздействие не известным современной науке способом (мало зависящим от воли и управления БС) в течение 200-400 мсек [2] сравнивается со «всей» памятью БС и в результате физическая информация переводится БС в психическую, т.к. память содержит в связанном виде физическую и психическую информацию.

И этот ограниченный объем физической информации, переведенной на основе чувства БС из физической в психическую при сравнении с памятью, и является нашим текущим осознанием себя и своей личности.

Детальный механизм этого перехода от физической информации к психической мы не знаем, но этот переход постоянно осуществляется каждую секунду в нас и мы чувствуем его результат. Истинность и достоверность этого перехода отрабатывалась миллионы лет на субъектах живой материи обеспечивая им выживание.

Внимание (осознание) при этом постоянно смещается (движется) в пространстве и времени и на данный момент субъект не управляет остановкой этих смещений, хотя частично управляет направлением этих смещений.

Субъект может переключать внимание с внешнего пространства на внутреннее пространство – чувствовать собственное тело и на основании этого чувства управлять им.

Некоторые части тела хотя и ощущаются субъектом, но у него почти нет возможности и опыта управлять ими (внутренние органы – печень, почки, …). А при отсутствии опыта управления ими это управление может быть небезопасно. Ещё одна зона частичного доступа внимания – это сама память.

7 Два способа принятия решений при управлении биологической системой находящейся на уровне развития современного человека

Понятие управления движением формы БС непосредственно связано с восприятием информации о текущей ситуации (ТС) как для своей формы (внутреннее пространство), так и вокруг неё (внешнее пространство), сравнением ТС с прошлым опытом субъекта (обработка информации ОИ) и принятием решения (ПР) о движении своей формы в пространстве.

Человек имеет психофизиологические различия левого и правого полушарий мозга, что позволяет субъекту по-разному воспринимать действительность и накладывает особый отпечаток на обработку информации и принятие решений.

Функциональные особенности левого полушария: ведает логическим мышлением, знаковым восприятием действительности, аналитическим расчленением целого на элементы. Функциональные особенности правого полушария: отвечает за образное мышление, за целостное восприятие объектов; позволяет одномоментно охватывать все имеющиеся в предмете связи [3,с.29].

У субъекта возможно смещение доминанты в обработке информации между левым и правым полушарием и это приводит к различным вариантам ПР.

Любую ситуацию, связанную с принятием решения (ПР) можно представить в пространстве - времени как на рисунке 3.

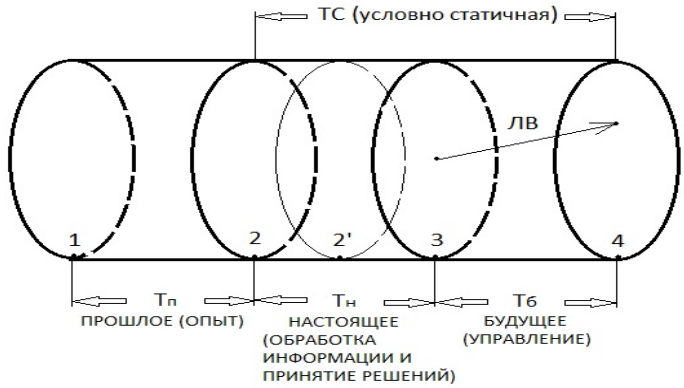


Рисунок 3 – Схема обработки информации, принятия решения и управления

Необходимые шаги принятия решения и управления:

1) прошлый опыт (1-2);
2) текущая ситуация (2);
3) сравнение ТС с опытом (обработка информации) (2-3);
4) принятие решения (3);
5) управление движением в пространстве (3-4).

Как будет выполнять эти шаги левое полушарие (дискретная обработка информации):

1) Прошлый опыт - дискретный фрагментарный алгоритмически взаимосвязанный, он ориентирован на ограниченное количество целей и поддается описанию знаковыми системами, вернее он формируется в процессе обучения через знаковые системы.
2) Текущая ситуация – дискретизируется (или фрагментируется) алгоритмически по набору параметров в соответствии с целями прошлого опыта (субъективное время между точками 2-2’ больше нуля). Точка 2’ рисунок 3 характеризует окончание предварительного этапа обработки информации - дискретизация ТС. Изначально ТС непрерывна при отсутствии субъекта.
3) Обработка информации – дискретная - когда ТС сравнивается алгоритмически с дискретным опытом (субъективное время между точками 2’-3 больше нуля).
4) Принимается решение - точка 3 . Если необходимо, подтверждение истинности ПР в сознании до начала практической реализации происходит на основе алгоритма.

Управление. Практическая проверка истинности принятого решения и попытка его совмещения с целью.

Эта схема принятия решений с некоторыми различиями реализуется в технических системах.

У правого полушария схема будет несколько иная:

1) Прошлый опыт - непрерывно-дискретный, более целостный, менее фрагментарный.

2) 3) 4) Текущая ситуация - дискретизируется, сравнивается с опытом и принимается решение на основе ощущения (чувства). Все три действия проходят для субъекта «одновременно» и подтверждение истинности ПР в сознании проводится без участия алгоритма на основе ощущения (чувства) «мгновенно» (субъективное время между точками 2-3 стремится к нулю, а физически составляет 200-400 мс [2]).

5) Управление. Практическая проверка истинности принятого решения.

Нельзя сказать, что левое и правое полушария функционируют раздельно, наоборот субъект никогда не может полностью отключить одно из полушарий, но в определенные промежутки времени при ПР доминирует то одно, то другое полушарие и, соответственно, происходит либо более дискретная обработка информации, либо более непрерывная.

Информация проявляется для субъекта в виде двух предельных состояний – дискретной и непрерывной. Дискретность и непрерывность это неоднородность качественная и/или количественная в пространстве и/или времени. По отношению к субъекту дискретность и непрерывность информации связана с его способностью различать эту неоднородность на физическом и/или психическом уровне, т.е. связана с относительными свойствами его собственной неоднородности, по отношению к пространственно-временной неоднородности воздействия. Отсюда, разная скорость показа фотокадров в одном случае, будет восприниматься как слайд-шоу, а при увеличении скорости - как кино. Если пространственно-временная скорость изменения воздействия на органы чувств информации выше скорости обработки информации субъектом (это время требуемое на осознание – как переход информации с физического уровня на психический), то принимаемая информация будет непрерывной.

Очень интересен также вопрос объективности дискретной и непрерывной обработки информации и соответственно принятия решения. Объективность дискретной и непрерывной ОИ, ПР и УП в конечном счете подтверждается достижением с той или иной степенью точности поставленной цели управления. Но есть промежуточный этап – точка 2’, расположенная до

начала практической реализации управления в точке 3 (рисунок 3), где возможна алгоритмическая проверка возможности достижения поставленной цели (хотя она может проводится и параллельно с выделением цели в процессе ПР). Такая проверка, дополнительно, является способом ***интерсубъективного*** дискретного обмена для объяснения причин именно такого ПР и УП.

В случае с непрерывной обработкой информации это сделать невозможно до точки 3 (рисунок 3), ни алгоритмически вывести и проверить принятое решение, ни вступить в ***интерсубъективное*** общение [4], потому что переход от точки 2 к точке 3 происходит для субъекта «мгновенно». После точки 3, мы можем уже попытаться обосновать ПР и УП, как для себя, так и для других, но к реальному процессу ОИ и ПР это не будет иметь никакого отношения. Но как само ПР при непрерывной ОИ, несмотря на это, всё равно претендует на истинность и по каким причинам?

Эволюционно основной задачей БС было:

- ориентация во внешнем пространстве;
- управление движением своего внутреннего пространства для движения во внешнем пространстве;
- управление движением своего внутреннего пространства для изменения объектов внешнего пространства.

От истинности таких решений зависела жизнь первобытного человека, поэтому настройка непрерывной обработки информации правого полушария на истинность - тоже результат естественного отбора. Если субъектом не объективно воспринимается внешняя ситуация, не корректно происходит управление телом, то либо субъект БС остается голодным и умрет, либо его съедают.

Отсюда непрерывная обработка информации, результат который подтверждается только лишь ощущением (чувством), направлена на истинность, если только нам удается уловить это ощущение (чувство). Таким образом, чувство становится знанием. Но если, исходя из каких-то соображений, субъект не принимает это ощущение (чувство) и принимает решение противоречащее чувству, то весь организм сигнализирует об этом - на этом и основана работа детектора лжи. Видимо существуют устойчивые зоны мозга, в которых пересекаются обработка информации и управление внутренними органами и если сознательно серьезно нарушается непрерывная ОИ, то тут же нарушается неосознанное управление внутренними органами. Это может привести к потере здоровья. В этом же смысле можно понимать теорию стресса Г.Селье, когда нарушение законов функционирования сознания нарушает физиологию тела и иногда критично.

8 Пространственная вложенность форм БС

Вложенность форм БС, обладающих собственной памятью и вниманием, наводит на интересные размышления в сфере источников принятия решений для внешних и внутренних форм БС.

В данном случае получается, что биологическая система $С_2$ (рисунок 4) формирует текущую информацию для биологической системы $С_1$ и ее информационная граница $ИГ_1$ находится внутри пространства формы биологической системы $С_2$. Также память биологической системы $С_2$ включает в себя память биологической системы $С_1$.

Таким образом, возникает сложное совместное взаимодействие как текущей информации, так и памяти при принятии решений и управлении каждой из биологических систем.

В настоящий момент увеличивается количество практических исследований на эту тему.

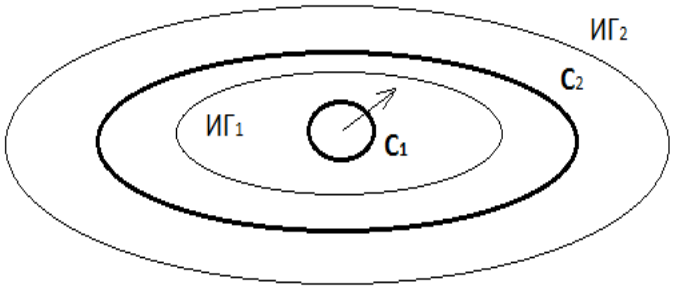


Рисунок 4 – Вложенные формы биологических систем C_1 и C_2

9 Информация и время, повторяющаяся информация

Прошлое существует для БС ровно настолько, насколько работает «глубина» памяти БС. Долгосрочное будущее планирование управление БС осуществляется ровно настолько, насколько связана в циклы периодически повторяющаяся ***информация***.

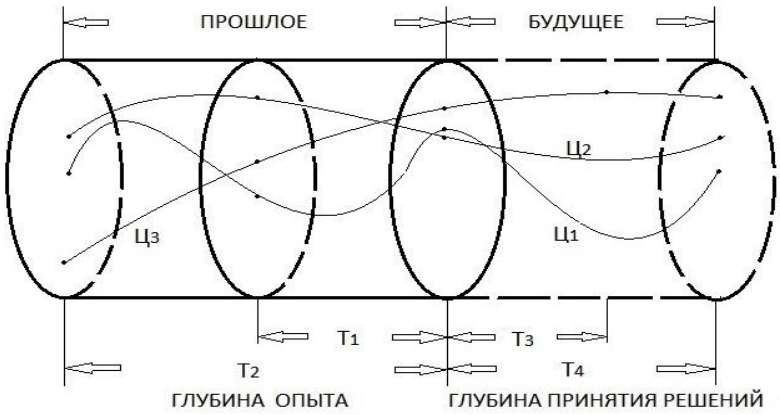


Рисунок 5 - Глубина опыта (памяти) и цикличность текущей информации

Основополагающие повторения внешней ***информации***, позволяющей БС планировать свое движение в будущем, задает движение космоса. Это смена дня и ночи, лета и зимы.

Интересным представляется соотношение понятий ***информации*** и ***времени***.

С одной стороны ***информация*** является третьей составляющей понятий ***материя*** и ***энергия***. Не может быть ***материи*** без ***энергии*** и ***информации***, ***энергии*** без ***материи*** и ***информации***, и ***информации*** без ***материи*** и ***энергии***.

С другой стороны ***информация*** соответствует понятию ***времени*** в парах ***материя – пространство, энергия – движение, информация – время***.

Информация может быть повторяющейся с определенной частотой, может быть просто повторяющейся и может быть новой для БС, являющейся по сути носителем прошлой ***информации*** (опыта, памяти).

Информация, повторяющаяся с определенной частотой, создает ощущение ***времени*** у БС.

Заключение

Взаимодействие внешнего пространства с формой БС происходит в физическом слое. Это физическое воздействие сравнивается с памятью БС на физическом уровне и при совпадении переходит в психическую информацию.

Память БС хранит в связанном виде физическую и психическую информацию о прошлых ситуациях, через которые прошла БС.

В жизненном цикле биологической системы всегда присутствует два периода – период формирования фрагментов памяти – связывание определенной физической информации с психической (обучение), и период активного использование наработанных связей.

Большое значение для БС системы имеют пространственные границы восприятия информации, определяемые возможностями и набором органов чувств.

Также необходимо обратить внимание на глубину памяти БС и способности БС связанно видеть периодически повторяющиеся фрагменты информации по всей глубине памяти.

Внимание определяет границы настоящего времени БС, необходимого на один цикл соотношения текущей ситуации (информации настоящего времени) с памятью, приводящее к осознанию текущей ситуации (переходу информации с физического уровня на психический). Самим процессом осознания (перехода) мы не управляем. Современная наука различными способами пытается разобраться в физической сути этого процесса.

В данный момент мы можем сказать совершенно точно, что процесс осознания является результатом миллионов лет эволюции биологических систем и этот процесс был связан с естественным отбором по критерию адекватности внешней информации и её внутреннему представлению. Неадекватность восприятия и перехода от физической информации к психической приводила к гибели своего носителя.

Список литературы

[1] Эндрю А. Искусственный интеллект: Пер. с англ./Под ред. и с предисл. Д.А. Поспелова. -М: Мир, 1985. 264с.

[2] Анохин К.В. Что происходит в мозге, когда рождается мысль? Популярная механика №11(121), ноябрь 2012. С.66-67.

[3] Геодакян В. А. Эволюционные теории асимметризации организмов, мозга и тела. Успехи физиологических наук. 2005. Т. 36. № 1. с. 24-53.

[4] Дубровский Д.И. Проблема «другого сознания». Вопросы философии, 2008, №1. - с. . 19-28.

Information Technologies
in Control and Management Systems
Информационные технологии в управлении

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ АГЕНТОВ В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ (НА ПРИМЕРЕ ИНВЕСТИРОВАНИЯ В РЫНОК НЕДВИЖИМОСТИ)

А.О. Алексеев[1], И.Е. Алексеева[1]

[1]Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29, Россия
alekseev@cems.pstu.ru, alekseeva@cems.pstu.ru
тел: +7 (342) 219-84-09

Ключевые слова: *задача выбора, предпочтения, неоднородные агенты, моделирование предпочтений, имитационное моделирование поведения, комплексное оценивание, риск, доходность, инвестиционные притязания, рынок недвижимости*

Abstract
The paper describes an approach to the mathematical modelling of heterogeneous agents' preferences based on the use of matrix integrated assessment method. This method makes possible convolve the factors of different nature essential for preferences carriers (agents), such as risk probability, amount of risk, profitability and etc. The preferences model is formed as composed derivation rules represented as a sequential matrix convolution. Interpolation of convolution matrices makes the preferences models continuous by using which the profitability required for an agent can be determined depending on the risk level in the context of personalized investment ambitions of the agent. Profitability depending on the risk level is a personalized boundary of agent's set possible actions by using which decision making process can be form. The approach proposed is shown based on example of investment in real estate market, which is author's subject and professional area.

Введение

В мультиагентных системах риски являются как следствием объективной реальности, окружающей агентов, так и следствием субъективности принимаемых управленческих решений, порождающей, так называемые, моральные риски (от англ. moral hazard), природа которых объясняется человеческим фактором, выражающимся в индивидуальном поведении агента, в соответствии с его умозаключением о складывающемся окружении, предыстории развития и способности агента прогнозировать перспективы развития [1].

Принимая за основу гипотезу о том, что основными факторами, мотивирующими людей к свершению определённых действий, являются жадность и страх, в простейшем случае (условно разделяя агентов по критерию жадность на альтруистов и эгоистов, а по критерию страх – оптимистов и пессимистов) можно выделить четыре типа агентов, которых далее будем считать неоднородными агентами. В действительности же дихотомическое деление людей по данным критериям не сможет достаточно полно описать разнообразие людей.

Гетерогенность мультиагентных систем, характеризуемая многообразием типов агентов и, как следствие, многообразием принимаемых ими решений, делает актуальным разработку нового субъектно-ориентированного подхода к моделированию поведения неоднородных агентов с учётом их индивидуальных особенностей, например, склонность агента к риску, терпимость агентом риска и т.п.

Моделирование поведения участников мультиагентных систем традиционно относится к агентному, или агентно-ориентированному (от англ. agent-based modeling) виду

имитационного моделирования, описывающего изменение поведения моделируемого агента (группы агентов или системы, состоящей из разных взаимодействующих агентов), при определённых условиях. В данной же работе (а так же других работах автора и его коллег) используется понятие субъектно-ориентированного моделирования [1] и управления [2], поскольку акцент делается не на кумулятивном эффекте от взаимодействия отдельных агентов, а на субъективных причинах (предпочтениях) отличающегося поведения различных типов агентов.

В работе [1] автором предложена концепция субъектно-ориентированного моделирования многофакторных рисков, которая служит методологическим базисом данного исследования. Математическую основу исследования составляет моделирование предпочтений агентов [3] и имитационное моделирование их поведения в задаче выбора.

Стоит отметить, что имитационное моделирование является не только эффективным методом исследования сложных объектов или систем, но и практически единственным, если невозможен реальный эксперимент на исследуемом объекте, что по праву можно отнести в общем случае к мультиагентным системам и в частности к рынку недвижимости, на примере которого в данной работе иллюстрируются отдельные результаты имитационного моделирования поведения неоднородных агентов.

Кроме математического моделирования, ещё одним способом имитационного исследования является организация и проведение деловых имитационных игр [4] с участием реальных людей, выполняющих некоторые профессиональные роли (роли агентов) и действующих по определённым правилам с заданными условиями игры целями и критериями их достижения, а также с участием автоматов, или программных агентов с формализованными моделями принятия решений (под автоматами понимается специальная программа, в которых реализован алгоритм поведения лица, принимающего решения [4]).

В работе [1] отмечается, что для сценарного моделирования и прогнозирования поведения участников мультиагентных систем в условиях многофакторных рисков необходимо уметь моделировать и прогнозировать существенные факторы риска и рискообразующие параметры, что требует привлечения специальных математических методов, специфичных предметной области и протекающим в ней процессам и явлениям.

В связи с вышесказанным необходим выбор предметно-профессиональной области, на примере которой будет продемонстрированно моделирование предпочтений неоднородных агентов и имитационное моделирование их поведения. Для этой цели автором выбран рынок недвижимости, обусловленный профилем прикладных научных исследований автора и его коллег [5] и наличием авторских результатов в области оценки риска возникновения и разрыва экономического пузыря на рынке недвижимости [6].

Последующая структура работы состоит из содержательного и математического описания моделей предпочтений участников мультиагентной системы, предметной, и результатов имитационного моделирования поведения неоднородных агентов в рассматриваемой мультиагентной системе.

2 Содержательное и математическое описание моделей предпочтений участников мультиагентной системы и их моделей поведения

Моделирование предпочтений агентов возможно благодаря использованию непрерывных механизмов комплексного оценивания, агрегирующих разнородную информации об объектах сопоставления в единый комплексный (интегральный) показатель. Наличие непрерывного комплексного показателя позволяет ранжировать любые объекты на всем множестве их представления и определять степень преимущества (недостатка) некоторого объекта перед другими. Это обстоятельство делает возможным описание процедуры выбора (принятия

решения) носителем предпочтений – агентом (участником мультиагентной системы) и последующее имитационное моделирование его поведения в задаче выбора.

Матричная процедура комплексного оценивания основана на приведении всех существенных характеристик, влияющих на выбор агента, к единой шкале комплексного оценивания (в критериальное пространство, обладающее топологией и метрикой). В критериальном пространстве разнородные характеристики могут быть сравнены на качественном уровне. Свёртка качественных критериев выполняется путем формирования бинарных матриц свёртки, описывающих отношения носителя предпочтений к паре сворачиваемых параметров. Стоит отметить, что бинарная структура деревьев критериев и матриц свёртки обусловлена сложностью определения параметров модели при количестве сворачиваемых параметров более чем 2. В таком случае полная свёртка, описывающая функциональную связь между комплексной оценкой и набором входных критериев, описывается композицией бинарных свёрток. Интерполяция матрицы свёртки может быть осуществлена разными способами, например, как это предложено в [7, 9], или, используя теорию нечётких множеств, как это предложено в [10], или [11-13].

В соответствии с одним из положений концепции [1] – каждое действие участников мультиагентной системы должно рассматриваться с позиции рискового события и двойственности рискообразующих параметров: возможности возникновения рискового события – P (от англ., probability of risk – вероятность риска) и размера ущерба в случае наступления рискового события (amount of risk) – C, а также выгоды агента, получаемой в качестве компенсации за принимаемые риски. Свёртку рискообразующих параметров [14] можно интерпретировать как уровень риска. Свёртку уровня риска и уровня доходности можно интерпретировать как уровень инвестиционной привлекательности – IA (от англ. investment attractiveness). Поэтому для формализации процедуры выбора и моделирования предпочтений и поведения агента целесообразна свёртка именно этих факторов (Рисунок 1).

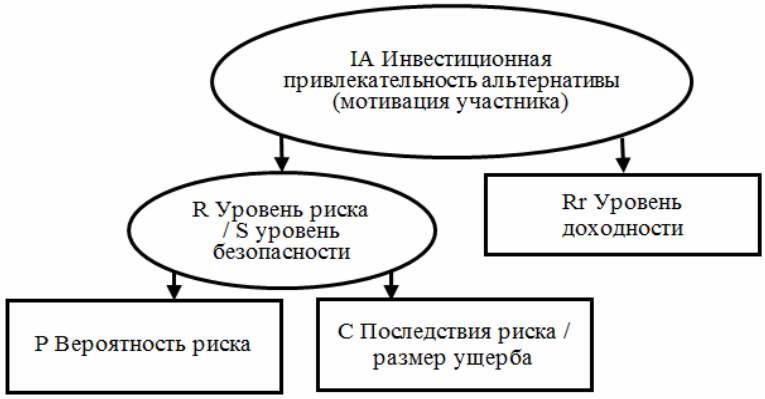


Рисунок 1 – Структура модели предпочтений участника мультиагентной системы

Для выполнения свёртки разнородных параметров необходимо привести их к единой качественной шкале. Для целей данного исследования будет использоваться четырёх бальная шкала D={1,2,3,4}, каждое значение которой имеет качественную интерпретацию (базовая интерпретация шкалы: 1 – неудовлетворительное, 2 – удовлетворительное, 3 – хорошее и 4 – отличное состояние объекта по оцениваемому критерию, соответственно).

Свёртка разнородных параметров возможна лишь на качественном уровне, для чего необходимо придать качественную интерпретацию баллов шкалы комплексного оценивания $X \in D$ (таблица 1).

Таблица 1 – Набор категорий и соответствующих им интерпретаций, используемых для комплексного оценивания параметров «Вероятность риска», «Размер ущерба» и «Уровень доходности»

X	Категории и соответствующие интерпретации		
	X_P – Вероятность риска	X_C – Размер ущерба	X_{Rr} – Уровень доходности
4	«незначительная», вероятность равна или близка к нулю	«низкий», риск несущественный по степени последствий	«высокий», максимальные ставки доходности доступные на рынке
3	«малая», вероятность возникновения риска в пределах нормы	«средний», риск приемлемый по степени последствий	«средний», соответствует средним ставкам доходности на рынке
2	«средняя», вероятность возникновения риска выше нормы	«высокий», риск критический по степени последствий	«низкий», соответствует ставке доходности ниже средней на рынке
1	«высокая», вероятность возникновения риска существенно выше нормы	«очень высокий», риск катастрофичный по степени последствий	«минимальный», на уровне безрисковой ставки

Для того чтобы матрица свёртки была неубывающей, то есть непротиворечивой, в модели предпочтений участника мультиагентной системы будет использоваться противоположное понятие риску – безопасность, которое будет определено в шкале комплексного оценивания следующим образом:

(1) $S = g(R) = 5 - R$,

где S (от англ. Safety – безопасность) – число, соответствующее определённой категории «уровень безопасности» (таблица 2), R (от англ. Risk – риск) – число, соответствующее определённой категории «уровень риска» (таблица 2).

Таблица 2 – Набор категорий и соответствующих им численных оценок, используемых для оценки параметров «Уровень риска» и «Уровень безопасности»

R	Уровень риска	S	Уровень безопасности
1	«низкий»	4	«высокий»
2	«средний»	3	«средний»
3	«высокий»	2	«низкий»
4	«очень высокий»	1	«очень низкий»

Для описания комплексной оценки *IA*, образующейся в результате свёртки параметров «уровень доходности» и «уровень безопасности», используются следующие категории: 1 – очень низкая; 2 – низкая; 3 – средняя и 4 – высокая инвестиционная привлекательность, соответственно.

Носитель предпочтений, используя категорические суждения в виде составных правил вывода «если вероятность риска … и размер ущерба …, то уровень безопасности …?» и «если уровень безопасности … и уровень доходности …, то инвестиционная привлекательность …?», отражает собственное (чужое, если субъектом моделирования является исследователь – формализующий составные правила вывода с рефлексией второго ранга) отношение к безопасности инвестирования денежных средств и ожидаемой доходности от их вложения, например, «если вероятность риска незначительна и размер ущерба очень высокий, то уровень безопасности низкий» и «если уровень безопасности низкий и уровень доходности высокий, то инвестиционная привлекательность низкая». Набор таких правил удобно представлять в виде матриц свёртки $M(X_P,X_C)$ (рисунок 2) и $M(X_{Rr},S)$ (рисунок 3):

					X_P, Вероятность риска
	S=**4**	*S*=**4**	*S*=**3**	*S*=**2**	4 – незначительная
	S=**4**	*S*=**4**	*S*=**3**	*S*=**2**	3 – низкая
	S=**3**	*S*=**3**	*S*=**2**	*S*=**1**	2 – средняя
	S=**3**	*S*=**2**	*S*=**1**	*S*=**1**	1 – высокая
X_C, **Размер ущерба**	4 – очень низкий	3 – средний	2 –низкий	1 – высокий	

Рисунок 2 – Пример матрицы свёртки, отражающей отношение носителя предпочтений к рискообразующим параметрам

					X_{Rr}, Уровень дохности
	IA=**4**	*IA*=**3**	*IA*=**2**	*IA*=**1**	4 – высокий
	IA=**3**	*IA*=**3**	*IA*=**2**	*IA*=**1**	3 – средний
	IA=**2**	*IA*=**2**	*IA*=**2**	*IA*=**1**	2 – низкий
	IA=**2**	*IA*=**1**	*IA*=**1**	*IA*=**1**	1 – минимальный
***S*, Уровень безопасности**	4 – высокий	3 – средний	2 –низкий	1 – очень низкий	

Рисунок 3 – Пример матрицы свёртки, отражающей отношение носителя предпочтений к безопасности инвестирования денежных средств и ожидаемой доходности от их вложения

Неубывающих матриц свёртки размерностью 4×4 существует 1236 (при условии, что соседние элементы по горизонтали или вертикали отличаются не более чем единицу), соответственно моделей предпочтений, учитывающих три фактора, в общем случае может быть образовано свыше полутора миллионов (1236^2=1527696).

Для создания неоднородных моделей предпочтений целесообразно использовать параметры неравномерности и несимметричности матриц свёртки, которые имеют содержательную интерпретацию, описываемую естественным языком.

Параметр неравномерности определяется как сумма элементов матрицы свёртки:

$$(2) \quad M^I = \sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{4} m_{ij},$$

где m_{ij} – элемент матрицы свёртки.

Параметр несимметричности определяется как сумма разницы симметричных относительно главной диагонали матрицы элементов, что можно формализовать следующим образом:

$$(3) \quad M^{II} = \sum_{j=2}^{4}\sum_{i=1}^{j}\left(m_{ij} - m_{ji}\right),$$

Для матрицы свёртки рискообразующих параметров параметр неравномерности показывает степень оптимистичности агента – чем сумма больше, тем агент оптимистичней, а параметр несимметричности показывает, что для агента важнее: вероятность наступления рискового события или уровень потерь? Если параметр несимметричности положительное число, то важнее потери; если параметр равен нулю, то вероятность и уровень потерь оказывают одинаковое влияние на принятие решений; если параметр отрицательный, то для агента важнее не последствия, а сама возможность наступления рискового события.

Для матрицы свёртки уровня доходности и уровня безопасности параметр неравномерности показывает степень жадности агента – чем сумма меньше, тем агент менее

жадный, а параметр несимметричности показывает, что для агента важнее: уровень безопасности (риска) или доходность? Если положительное число, то важнее безопасность инвестиций и уровень риска существеннее оказывает влияние на принятие решений; если параметр равен нулю, то уровень риска и уровень доходности оказывают одинаковое влияние на принятие решений; если параметр отрицательный, то агент склонный к риску, для него важнее доходность, нежели безопасность инвестирования.

Параметр несимметричности принимает значения от –10 до 10, а параметр неравномерности от 29 до 54. Используя эти параметры, удаётся содержательно описать довольно большое число моделей предпочтений, способное покрыть многообразие неоднородных агентов, в отличие от описанного во введение примера простейшей типологизации агентов. В работе [15] была показана возможность однозначной идентификации модели предпочтений типу агента с помощью данных параметров.

Матричная свёртка рискообразующих параметров в уровень безопасности:

(4) $S = M(X_P; X_C),\ S, X_P, X_C \in D = \{1,2,3,4\}$,

и последующая свёртка уровней доходности и безопасности:

(5) $IA = M(X_{Rr}; S),\ IA, S, X_{Rr} \in D = \{1,2,3,4\}$,

позволяет оценить инвестиционную привлекательность различных действий, осуществить их ранжирование по критерию инвестиционной привлекательности и их выбор.

Любую дискретную матричную свёртку можно интерполировать следующим образом:

(6) $S = j_6 + (j_8 - j_6)\cdot x_1 + (j_7 - j_6)\cdot x_2 + (j_9 + j_6 - j_8 - j_7)\cdot x_1 \cdot x_2,\ IA \in D = [1,4]$,

где x_1 и x_2 – остатки деления по модулю сворачиваемых параметров в непрерывном виде, например, X_P и X_C, соответственно:

(7) $x_1 = X_P \bmod 1,\ X_P \in D = [1,4],\ x_1 \in [0,1]$,

(8) $x_2 = X_C \bmod 1,\ X_C \in D = [1,4],\ x_2 \in [0,1]$,

j_6, j_7, j_8 и j_9 – элементы матрицы свёртки $M(X_P, X_C)$:

(9) $j_9 = M(\min(4;[1 + j_4]);\min(4;[1 + j_5]))$

(10) $j_8 = M([j_4];\min(4;[1 + j_5]))$

(11) $j_7 = M(\min(4;[1 + j_4]);[j_5]))$

(12) $j_6 = M([j_4];[j_5]))$

(13) $j_5 = \max(\min(X_C,4);1)$

(14) $j_4 = \max(\min(X_P,4);1)$

где [] – целая часть числа.

Аналогичным образом интерполируется матрица свёртки уровней доходности и риска. Стоит отметить, что описанный выше подход к интерполяции матрицы свёртки записан по аналогии с подходом, описанным в [9,11], однако отличается тем, что даёт результат эквивалентный случаям применения аддитивно-мультипликативной нечёткой процедуры комплексного оценивания (см. например, [16-17]), или при наличии статистических данных, позволяющих определить вероятность того, что входной параметр оцениваемого объекта будет соответствовать определённому значению критерию его состояния [18].

Поскольку матричная свёртка интерполирована на непрерывной области определения входных параметров, то для количественно-измеримых параметров необходимо построить функции приведения к непрерывной шкале комплексного оценивания. Функции приведения для параметров «Вероятность риска» и «Размер ущерба» будут убывающими, а для параметра

«Уровень доходности» возрастающей. В частном случае функции приведения могут быть линейными:

(15) $X_P = -3 \cdot (P - P_{\max}) / (P_{\max} - P_{\min}) + 1,\ X_P \in [1,4],\ P \in [P_{\min}, P_{\max}]$,

где P – вероятность наступления рискового события, или оценка, описывающая степень возможности его наступления, при этом область определения данного параметра может лежать внутри интервала [0,1],

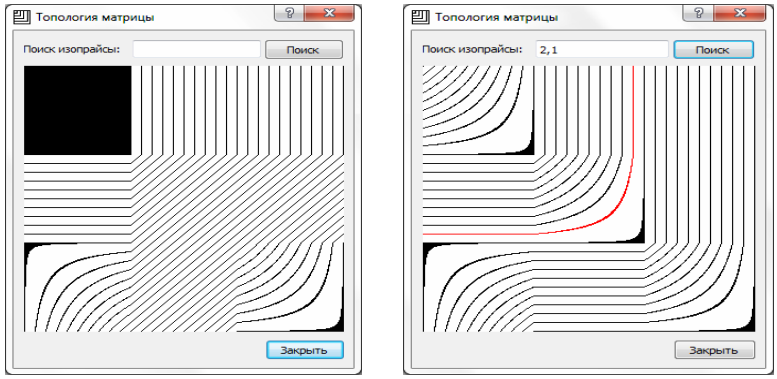
(16) $X_C = -3 \cdot (C - C_{\max}) / (C_{\max} - C_{\min}) + 1,\ X_C \in [1,4],\ C \in [C_{\min}, C_{\max}]$,

где C – размер ущерба в случае наступления рискового события, данный параметр целесообразно определять в относительном виде, в связи с чем область определения данного параметра может также лежать внутри интервала [0,1],

(17) $X_{Rr} = 3 \cdot (Rr - C_{\min}) / (Rr_{\max} - Rr_{\min}) + 1,\ X_{Rr} \in [1,4],\ Rr \in [Rr_{\min}, Rr_{\max}]$,

где Rr – ставка доходности, левой границей области определения которой целесообразно брать безрисковую ставку, а правой границей – максимальную ставку доходности, доступную на момент выбора действия.

По поверхности, полученной путём интерполяции дискретной матрицы свёртки (см. рисунки 2 и 3), определяются кривые безразличия с заданной оценкой уровня безопасности (рисунок 4, а) и уровня инвестиционной привлекательности (рисунок 4, б), называемые в разной литературе изоквантами, изоквалитами, изоутилами и изопрайсами.



а) б)

Рисунок 4 – Топологическое представление, полученное путём интерполяции, матрицы свёртки рисообразующих параметров – а); уровней доходности и безопасности – б);

Моделью предпочтений i–го агента будем называть кортеж, состоящий из функций приведения для параметров «Вероятность риска» (см. выражение 15), «Размер ущерба» (см. выражение 16), «Уровень доходности» – f (Rr) (см. выражение 17); наборов категорий, используемых для оценки этих параметров (см. таблица 1), параметра «Уровень безопасности» $t(S=\{1,2,3,4\})$ (см. таблица 2) и комплексной оценки; ориентированного графа $G(V,A)$ (см. рисунок 1), описывающего логическую связь между учитываемыми параметрами и комплексной оценкой; матриц свёртки $M_i(X_P,X_C)$ (см. рисунок 2) и $M_i(S,X_{Rr})$ (см. рисунок 3), отражающих индивидуальное отношение i–го носителя предпочтений к сворачиваемым параметрам:

(18) $\langle f_P(P), f_C(C), f_{Rr}(Rr), \{t(X_P)\}, \{t(X_C)\}, \{t(X_{Rr})\}, \{t(S)\}, \{t(IA)\}, G(X,V), M_i(X_P, X_C), M_i(S, X_{Rr}) \rangle$,

где X – множество вершин графа G: $\{X_P, X_C, S, X_{Rr}, IA\}$; V – множество упорядоченных пар вершин графа G: $\{\{IA,X_{Rr}\}; \{IA,S\}; \{S,X_P\}; \{S,X_C\}\}$.

Верификация модели предпочтений агента осуществляется путём сравнения результатов вычислительного эксперимента с результатами поведенческого эксперимента. В ходе поведенческого эксперимента респондентам предлагается среди набора альтернатив A = {1,…,n} выбрать те, которые на их взгляд являются для них полезными или выгодными (в данном примере инвестиционно-привлекательными). Каждый респондент даёт свои ответы в виде списка инвестиционно-привлекательных альтернатив $A_i^+ = \{a_i^{1+}, \ldots, a_i^{k+}\}$, $A = A_i^+ \cup A_i^-$.

Каждая альтернатива $a \in A$ должна характеризоваться доходностью и рискообразующими параметрами. Приведя значения аргументов к качественной шкале и свернув рискообразующие параметры в уровень безопасности, альтернативы могут быть представлены на области определения итоговой матрицы свёртки (рисунок 5, а).

Существование кривой безразличия IC_i, разделяющей, по мнению i-го агента – носителя предпочтений, множество альтернатив на привлекательные и непривлекательные (на рисунке 5, б черным цветом закрашены непривлекательные альтернативы), является условием того, что разработанная модель предпочтений i-го агента может служить моделью его реальных предпочтений:

(19) $\exists IC_i \mid \forall a \in A_i^+, IA_a \geq IC_i, \forall a \in A_i^-, IA_a < IC_i, A = A_i^+ \cup A_i^-$.

Такая кривая безразличия IC_i является индивидуальной границей допустимых действий для i-го агента и область выше этой границы образует множество его допустимых действий.

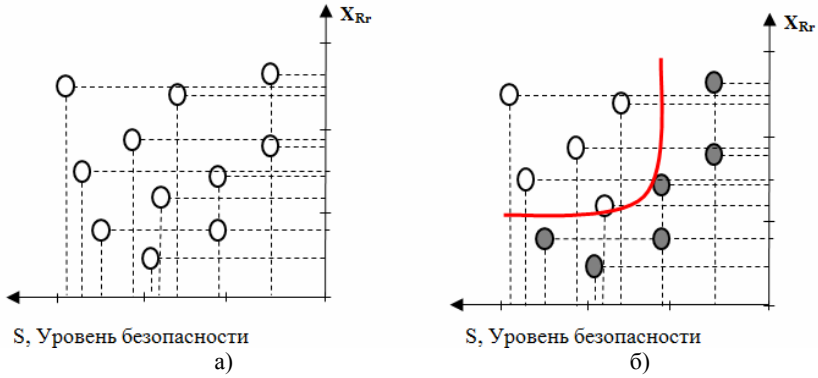


Рисунок 5 – Набор альтернатив – а); пример ответов респондента – б)

Для имитационного моделирования поведения неоднородных агентов необходимо определить персонализированную границу допустимых действий каждому агенту. Тогда модель предпочтений агента может быть моделью его цели и выступать в качестве функции полезности или целевой функции агента. Принцип действия агента в соответствии гипотезой А. Шопенгаэура [19] о законе достаточного основания мотивации, в соответствии с которым при наступлении мотива действие выполняется с такой же неизбежностью, как и следствия физической природы, может быть сформулирован следующим образом – если альтернатива принадлежит множеству действий агента (комплексная оценка превышает значение кривой безразличия, признанной границей допустимых действий, которую также можно интерпретировать как уровень притязаний агента, и другие факторы, определяющие множество допустимых действий, например, бюджет агента, не вытесняют альтернативу из множества допустимых действий), то у агента есть основание выбрать эту альтернативу и совершить соответствующее этой альтернативе действие. Из набора альтернатив, удовлетворяющих данным условиям, агент выбирает то, действие y, которое описывается максимальной комплексной оценкой.

(20) $y_i = Arg \max_{a \in A} \left(IA_a \mid IA_a \geq IC_i \right)$.

Стоит отметить, что перечень факторов, влияющий на выбор агента, может быть расширен и даже включать свойства нечисловой природы (качественно-описываемые параметры), поскольку матричный механизм комплексного оценивания может быть описан нечёткой процедурой комплексного оценивания.

Модель предпочтений субъекта считается формой искусственного интеллекта, воспроизводящей поведение конкретного человека в задаче выбора [2]. Поскольку модель предпочтений строится на полном множестве представления альтернатив, искусственный интеллект неманипулируем на представляемом множестве альтернатив. Искусственный интеллект уменьшает последствия проявления тайных компонентов системы предпочтений человека и создаёт возможности для организации и проведения деловых имитационных игр с участием автоматов – программных агентов или искусственных участников игры.

Учёт иррационального поведения людей, при математическом моделировании их предпочтений и поведения не возможен, в связи с чем это обстоятельство является причиной неизбежной погрешности имитационного моделирования поведения участников мультиагентной системы. Степень адекватности моделирования поведения участников мультиагентных систем в задачах выбора проверяют путём организации и проведения поведенческих экспериментов.

3 Содержательное и математическое описание предметной области – рынка недвижимости

Рынок недвижимости по своей экономической сути является составной частью рынка инвестиций. Это объясняется способностью недвижимости, во-первых, сохранять инвестиции даже в условиях экономического спада и падения цен на недвижимость, благодаря возможности получения денежного дохода от сдачи объекта в аренду, во-вторых, благодаря неденежному доходу, являющимся следствием роста стоимости объекта недвижимости в условиях экономического роста [6].

Опишем модель рынка недвижимости, используемую для имитационного моделирования предметной области. Под моделью рынка будем понимать совокупность кривых спроса и предложения. В данном случае кривые спроса и предложения будут линейными, однако стоит отметить, что подобное допущение не существенно снижает точность моделирования, что будет показано ниже (рисунок 6). На рынке недвижимости основное количество сделок купли-продажи свершают обычные потребители с целью улучшения жилищных условий. Эти сделки составляют основу данного рынка. Введём уравнения потребительского спроса и предложения.

Уравнение потребительского спроса будет иметь вид:

(21) $D_{cus}(t) = q_D - k_D \cdot Pr(t)$,

где $D_{cus}(t)$ – количество потребителей, готовых приобрести в момент времени t объект недвижимости по цене $Pr(t)$, k_D – модуль тангенса угла наклона прямой спроса, q_D – значение при котором прямая спроса пересекает ось ординат (параметр не имеет экономической интерпретации).

Аналогично описывается уравнение потребительского предложения:

(22) $S_{cus}(t) = q_S - k_S \cdot Pr(t)$,

где $S_{cus}(t)$ – количество собственников объектов недвижимости, готовых их продать в момент времени t по цене $Pr(t)$, k_S – тангенс угла наклона прямой спроса, q_S – значение при котором прямая предложения пересекает ось ординат (параметр не имеет экономической интерпретации).

Равенство выражений (21) и (22) является условием равновесия рынка, откуда можно выразить равновесную цену $Pr_{opt}(t)$ в момент времени:

(23) $Pr_{opt}(t) = (q_S - q_D)/(k_S + k_D)$,

Согласно экономической теории любой рынок стремиться к своему равновесному состоянию, в связи с чем используем модель индикаторного поведении [4] для описания данного процесса:

(24) $Pr(t+1) = Pr(t) + h(t) \cdot (Pr_{opt}(t) - Pr(t)), h(t) \in [0, 1]$,

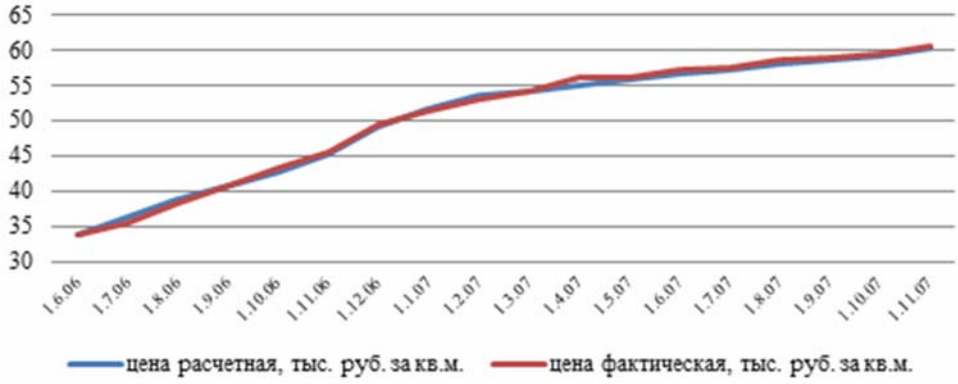
где $h(t)$ – шаг, с которым рынок будет приближаться к точке равновесия. Из выражения (24) легко заметить, что при $h(t)$ =0 рынок будет статичным, а при $h(t)$ =1 рынок достигнет точки равновесия всего за один временной отрезок. Стоит отметить, что в экономике строительства и на рынке недвижимости равновесие считается не достижимым, в связи с чем данные параметр стоит брать ближе к нулю.

В условиях дефицита (спрос превышает предложение) цена равновесная будет больше текущей цены. В этом легко убедиться, построив неравенство из выражений (21) и (22):

(25) $q_D - k_D \cdot Pr(t) > q_S - k_S \cdot Pr(t) => (q_S - q_D)/(k_S + k_D) = Pr_{opt}(t) > Pr(t)$,

Тогда согласно выражению (24) будет наблюдаться рост цен. Обратная ситуация будет в условиях профицита (предложение превышает спрос).

Сравним результаты моделирования цен на недвижимости и фактические данные на примере рынка недвижимости г. Перми.



Принятые начальные параметры модели рынка: $q_S(t_0) = 0$; $q_D(t_0) = 4300$; $k_S(t_0) = 36$; $k_D(t_0) = 36$; $Pr(t_0) = 33{,}8$, тыс. руб. за 1 кв. м.; $h(t_0) = 0{,}1$

Рисунок 6 – Результаты моделирования цен на рынке недвижимости г. Перми, за 2006-2007 гг.

В ноябре и декабре любого года активность на рынке недвижимости возрастает, в связи с чем в эти периоды были увеличены параметры $h(t=5=17) = 0{,}15$; $h(t=6=18) = 0{,}25$; $h(t=6) = 0{,}20$, в остальные периоды $h(t) = 0{,}1$. Также в связи с увеличивающимся спросом корректировался параметр $q_D(t)$, так, при $t>4$ $q_D(t) = 4400$; $t>10$ $q_D(t) = 4600$; $t>16$ $q_D(t) = 4800$. Последних допущений можно избежать, корректируя расчётное значение цены на инфляцию.

Инвестиционные сделки на рынке недвижимости приводят к изменению спроса и предложения и как следствие смещению точки равновесия, к которой будет стремиться рынок. В таком случае уравнения спроса и предложения будут содержать дополнительные слагаемые:

(26) $D(t) = D_{cus}(t) + IB(t) \cdot (1 - g(t)) = q_D - k_D \cdot Pr(t) + IB(t) \cdot (1 - g(t))$,

(27) $S(t) = S_{cius}(t) + IS(t) \cdot (1 - g(t)) = q_S - k_S \cdot Pr(t) + IS(t) \cdot (1 - g(t))$,

где $IB(t)$ – количество агентов, выступающих в роли инвесторов, готовых приобрести объекты недвижимости в момент времени t, $IS(t)$ – готовых продать; g(t) – параметр отражающий стремление обычных потребителей приобретать недвижимость по справедливой цене, соответствующей их прямой спроса и предложения.

Переменные $IB(t)$ и $IS(t)$ определяются в ходе деловой имитационной игры и являются суммой ответов участников игры на вопрос – «Кто, сколько готов прождать или купить объектов недвижимости, соответственно?» [20], или решениями программных агентов, что будет продемонстрированно ниже (см. раздел 4).

Выражение (24) с учётом инвестиционных сделок примет вид:

(28) $Pr_{opt}(t) = (q_S - q_D + (IB(t) - IS(t)) \cdot (1 - g(t)))/(k_S + k_D)$.

Как было отмечено во введении для моделирования и прогнозирования поведения носителей предметной деятельности требуется привлечение специальных математических методов, специфичных предметной области и протекающим в ней процессам и явлениям. Одним из наиболее существенных по степени последствий рисковых событий практически для любого рынка является экономический пузырь, в том числе рынка недвижимости.

В качестве меры доходности объектов недвижимости – Rr в данном исследовании выбран индекс доходности недвижимости, который вычисляется как отношение суммы дохода от сдачи в аренду объекта недвижимости и прироста его стоимости к доходности по безрисковым инвестиционным альтернативам:

(29) $Rr(t) = (Pr(t) + I_{rent} + I_{value})/(Pr(t) + I_{freerisk})$,

где Rr – индекс доходности недвижимости, I_{rent} – доход от сдачи в аренду недвижимости, I_{value} – прирост стоимости недвижимости, $I_{freerisk}$ – доход от безрисковой альтернативы.

За базу определения безрисковой доходности чаше берётся ставка доходности по государственным краткосрочным облигациям или облигациям федерального займа со сроком до погашения равному одному году – периоду, для которого определяется индекс. Критерием эффективности инвестиций в недвижимость является строгое превышение индекса доходности единицы (29), поскольку равенство единице означает, что доходность недвижимости, обладающая целым набором специфичных рыночных рисков, требующих компенсации инвестору, равна доходности по безрисковой альтернативе, что естественно делает недвижимость как объект инвестирования не привлекательным.

Частично модель оценки риска возникновения и разрыва экономического пузыря на рынке жилой недвижимости описана в работе [6], основанная на сравнении ставок капитализации объектов недвижимости, полученных с помощью метода рыночной выжимки и кумулятивного подхода. В основу модели была положена гипотеза о том, что при увеличении разницы между расчётными значениями ставок капитализации возрастает риск возникновения экономического пузыря. На качественном уровне данная гипотеза была подтверждена на примере нескольких крупных российских городов, однако, корреляция между разницей в ставках капитализации (определёнными методом рыночной выжимки и методом кумулятивного построения) и ценой на рынке недвижимости, в среднем составляет 62 %, что говорит о недостаточной зависимости между этими двумя показателями.

На основании сказанного выше был сделан вывод, что разница между ставками капитализации не может быть самостоятельным индикатором возникновения экономического пузыря, следовательно, требуется разработка специального индикатора, способного описывать и прогнозировать изменение цен в условиях кризиса.

Этим условиям удовлетворяет специально разработанный индекс риска разрыва экономического пузыря, рассчитываемый как сумма ставки дисконтирования и рекапитализации при отрицательном значении индекса доходности недвижимости:

$$(30)\quad REBRI = \begin{cases} Rd - \Delta \cdot Rd / \left((1+Rd)^n - 1\right), Rr > 0, \\ Rd + \Delta \cdot Rd / \left((1+Rd)^n - 1\right), Rr \le 0, \end{cases},$$

где Δ – изменение цен на недвижимость за предполагаемый период владения объектов недвижимости; Rd – ставка дисконтирования, определённая кумулятивным методом:

$$(31)\quad Rd = d + Rr + r_l + r_m + r_t,$$

где d – безрисковая ставка; Rr – индекс доходности недвижимости, вычисляемый согласно выражению (29) и выступающий в роли компенсации за риски вложения в рынок недвижимости; r_l – компенсация за риск ликвидности объекта недвижимости, определяемая как средняя ставка межбанковского кредитования на срок аналогичный типичному сроку экспозиции объекта недвижимости; r_m – компенсация за риск неэффективного управления, под которым понимаются потери доходности в случае отсутствия арендатора, и соответственно определяемая как средняя ставка межбанковского кредитования на срок аналогичный типичному сроку экспозиции объекта недвижимости на рынке аренды; r_t – компенсация за техногенные риски, определяемые по ставкам страховых полисов.

На основе ретроспективных данных о рынке недвижимости г. Перми с августа 2008 года по август 2009 года, когда было существенное снижение рынка недвижимости во многих крупных российских городах в результате экономического кризиса, было определено уравнение регрессии, где в качестве объясняющей переменной был выбран разработанный индекс риска (30), а объясняемой переменной цена:

$$(32)\quad Pr(t) = 406{,}1714 \cdot REBRI(t) + 65490{,}96.$$

Спецификация полученного уравнения регрессии представлена в таблицах 3 и 4. Стоит отметить, что для многих крупных российских городов получаются близкие значения регрессионной статистики и спецификации уравнений регрессии.

Таблица 3 – Регрессионная статистика

Показатель	Значение
Множественный R	0,98496
R-квадрат	0,97014
Нормированный R-квадрат	0,968787
Стандартная ошибка	1688,465

Таблица 4 – Спецификация уравнения регрессии

Переменные	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение
Constant	65490,960	550,7017	118,9227	$2{,}14E^{-32}$
β	406,1714	15,19133	26,73705	$2{,}87E^{-18}$

Распространяя полученное уравнение (32) на весь исторический период, имеющийся в распоряжении автора, была получена следующая картина:

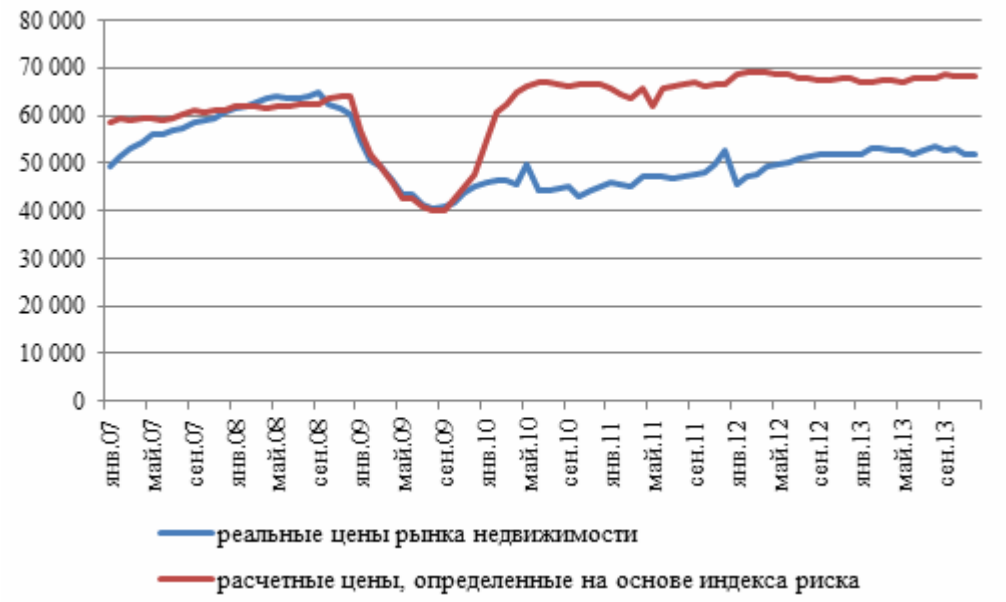


Рисунок 7 – Результаты моделирования цен на рынке недвижимости г. Перми за 2007-2013 гг. на основе использования индекса риска

Из рисунка 7 видно, что модельный ряд сходится с фактическими значениями цены во время кризиса (с август 2008 по август 2009 года – период на котором уравнение регрессии было идентифицировано), а в докризисный и посткризисный периоды наблюдается существенная разница между реальными ценами и расчётными значениями. Однако можно заметить, что модельное значение цены в эти периоды близко к полученной в уравнении регрессии константе и индикатор риска не существенно влиял на изменение расчётного значения цены. Поскольку уравнение было идентифицировано во время кризиса, то и результат моделирования можно называть кризисным, то есть результат моделирования показывает цену, при которой произошёл бы кризис на рынке недвижимости. Фактические ретроспективные данные именно это и показывают – при достижении фактическими цен модельного ряда происходит схождение этих рядов и происходит кризис. На основании вышесказанного была выдвинута гипотеза о том, что расстояние между фактическими и модельными ценами может выступать в качестве содержательно-интерпретируемого для носителей предметно-профессиональной деятельности индикатора риска.

4 Результаты имитационного моделирования поведения неоднородных агентов в мультиагентной системе (на примере рынка недвижимости)

В ходе вычислительных и поведенческих экспериментов разница между расчётными и фактическими ценами использовалась для определения рискообразующего параметра X_P, описывающего на качественном уровне возможность возникновения рискового события – в данном случае возникновения и разрыва экономического пузыря. Целью эксперимента являлось исследования влияния подобной информации (см. рисунок 7) о риске возникновения экономического пузыря на рынке недвижимости на поведение участников данного рынка.

В ходе экспериментов также использовалась информация об изменении индекса доходности (29). На рисунке 8 представлено историческое изменение относительного индекса доходности, полученного путем вычитания из $Rr(t)$ единицы:

Рисунок 8 – Изменение относительного индекса доходности недвижимости г. Перми за 2007-2012 гг.

Основной гипотезой поведенческих и вычислительных экспериментов являлось следующее предположение – что рациональные агенты, видя увеличивающийся риск возникновения экономического пузыря и уменьшающийся индекс доходности, будут уменьшать свою активность на рынке и перестанут инвестировать денежные средства.

Как отмечалось во введении имитационное моделирование или игровое имитационное моделирование являются практически единственным способом проверки подобной гипотезы в силу невозможности проведения эксперимента на реальной мультиагентной системе в данном случае рынке недвижимости.

Для имитационного моделирования рынка недвижимости были использованы приведённые в разделе 3 параметры модели рынка (см. рисунок 6). Эксперименты осуществлялись в двух видах: деловой игры с людьми и деловой игры с автоматами.

В ходе поведенческого эксперимента, в котором участвовали люди, участники деловой игры, получая информацию о ценах на рынке недвижимости – $Pr(t)$, риске – $REBRI(t)$ и доходности – $Rr(t)$, принимали решение о покупке или продажи определённого количества объектов недвижимости, определяя тем самым $IB(t)$ и $IS(t)$, соответственно. Эта информация использовалась для расчёта цены на следующий временной период согласно (28). Таким образом проводилась серия поведенческих экспериментов, результаты одного из которых приведены ниже (рисунок 9).

Для проведения вычислительного эксперимента и имитационного моделирования поведения программных агентов был создан генератор случайных матриц свёртки, являющиеся прообразами предпочтений неоднородных агентов. Информацию о ценах на рынке недвижимости – $Pr(t)$, риске – $REBRI(t)$ и доходности – $Rr(t)$ необходимо было привести к шкале комплексного оценивания, используя (15) – (17). Информация о цене использовалась для определения размера ущерба C как отношение суммы, которой агент рискует, к его бюджету. Затем полученное значение C приводилось согласно выражению (16) к шкале комплексного оценивания. Затем вычислялась комплексная оценка каждой альтернативы (см. раздел 2) и согласно (20) программный агент выбирал наиболее удовлетворительную альтернативу. Таким образом проводилась серия вычислительных экспериментов, результаты одного из которых приведены ниже (рисунок 10).

Рисунок 9 – Результаты поведенческого эксперимента

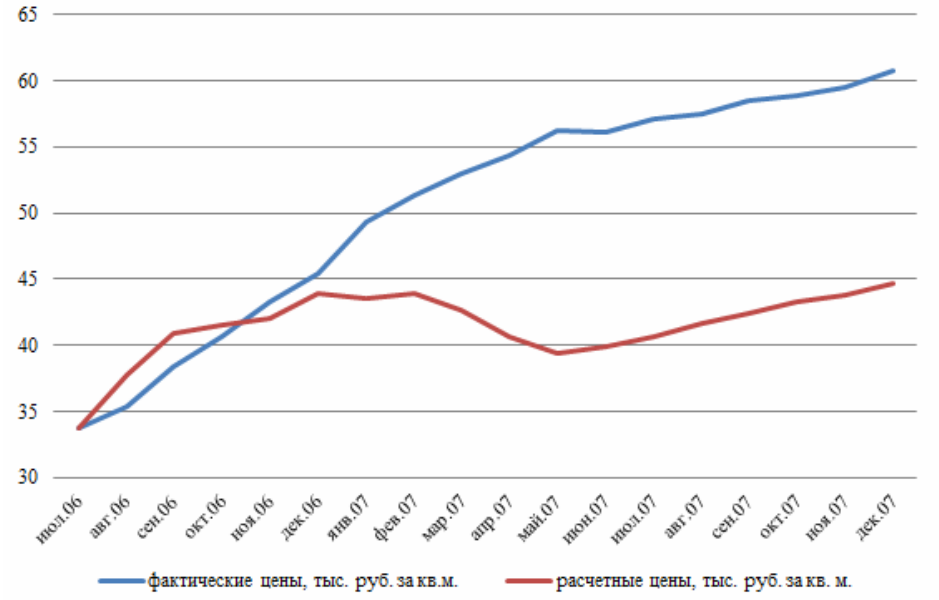


Рисунок 10 – Результаты вычислительного эксперимента

Из рисунков 9 и 10 видно, что как реальные люди, так и программные агенты останавливают активный рост рынка недвижимости в связи со снижающимся уровнем доходности и растущим уровнем риска.

Заключение

Имитационное моделирование поведения участников мультиагентных систем позволяет не только описывать, но и объяснять проявление, так называемых, моральных рисков, источником которых является субъективизм принятия управленческих решений. По этой причине предложенная в [1] концепция субъектно-ориентированного моделирования многофакторных рисков в мультиагентных системах по способу отражения знаний в области анализа и управления рисками является эссенциалистической (объяснительной), а не только феноменталистической (описательной). Имитационное моделирование позволяет исследовать влияние изменения параметров модели, описывающих предметную область, с целью прогнозирования поведения участников мультиагентной системы в складывающихся условиях и разрабатывать соответствующие воздействия на состав мультиагентной системы, структуру взаимодействия её участников, множество их допустимых действий, их целевые функции и информированность. Это позволяет разрабатываемой концепции субъектно-ориентированного моделирования многофакторных рисков выполнять прочие функции теории, к которым также относят [21] предсказательную (прогностическую) и предписывающую (нормативную) функции.

Благодарности

Работа подготовлена при финансовой поддержке ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Список литературы

[1] Алексеев А.О. Концепция субъектно-ориентированного моделирования многофакторных рисков в мультиагентных системах // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. №4 (76). 2015. [Электронный ресурс]. URL: http://uecs.ru/index.php?option=com_flexicontent&view=items&id=3440

[2] Харитонов В.А. Концепция субъектно-ориентированного управления в социальных и экономических системах / В.А. Харитонов, А.О. Алексеев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – №05(109). – IDA [article ID]: 1091505043. – Режим доступа: http://ej.kubagro.ru/2015/05/pdf/43.pdf, 1,125 у.п.л.

[3] Алексеев А.О. Алексеева И.Е. Математическое моделирование предпочтений экономических субъектов (агентов) // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. №4 (76). 2015. [Электронный ресурс]. URL: http://uecs.ru/index.php?option=com_flexicontent&view=items&id=3441

[4] Щепкин А.В. Игровое моделирование активных систем // Человеческий фактор в управлении / Под. ред. Н.А. Абрамовой, К.С. Гинсберга, Д.А. Новикова. – М.: КомКнига, 2006 – с. 475-486

[5] Научная деятельность кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение» [Электронный ресурс]. URL: http://pstu.ru/title1/faculties/stf/sim/?science=1&cid=64

[6] Алексеев А.О., Торсунова Н.А., Казимиров И.А. Оценка риска возникновения экономического пузыря на рынке жилой недвижимости города Иркутска // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. №1 (72). С. 149-161.

[7] Анохин А.М. Гусев В.Б. Павельев В.В. Комплексное оценивание и оптимизация на моделях многомерных объектов. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 79 с. (Научное издание / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН)

[8] Гусев В.Б., Павельев В.В. Использование непрерывных шкал при оценивании и принятии решений в сложных проблемных ситуациях. М.: ИПУ РАН, 2013. – 118 с.

[9] Гусев В.Б. Согласование критериев принятия решений при целевом планировании // Сибирский журнал индустриальной математики. 2005. том VIII, № 2 (22). С. 32-45.

[10] Андроникова Н.Г., Леонтьев С.В., Новиков Д.А. Процедуры нечёткого комплексного оценивания // Современные сложные системы управления: Тр. межд. науч.-пр. конф. – Липецк, 2002. – С. 7-8.

[11] Харитонов В. А., Винокур И. Р., Белых А. А. Функциональные возможности механизмов комплексного оценивания с топологической интерпретацией матриц свёртки // Управление большими системами. Выпуск 18. – М.: ИПУ РАН, 2007. – С. 129-140.
[12] Технологии современного менеджмента / В. А. Харитонов, А. А. Белых; под науч. ред. В. А. Харитонова. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 190 с.
[13] Интеллектуальные технологии обоснования инновационный решений: монография / В.А. Харитонов [и др.]; под науч. ред. В.А. Харитонова. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 342 с.
[14] Харитонов В.А., Алексеев А.О. Количественный анализ уровней риска на основе универсальной бинарной модели предпочтений лицом, принимающим решение (ЛПР) // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. 2009. №2. С. 13-23.
[15] Алексеев, А.О. Интеллектуальные технологии моделирования многофакторных рисков в задачах обоснования ставок дисконтирования и капитализации [Текст]: дис.….канд. экон. наук. 08.00.13: защищена 23.12.10: утв. 20.05.11 / Алексеев Александр Олегович. – Пермь, 2010. – 160 с.
[16] Алгоритмические основы нечеткой процедуры комплексного оценивания объектов различной природы / А.О. Алексеев и др. // Фундаментальные исследования. 2014. № 3 (часть 3). с. 469-474. URL: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10002965.
[17] Алексеев А.О., Алексеева И.Е. Процедуры нечёткого комплексного оценивания // XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ – 2014). – М.: ИПУ РАН, 2014. – С. 7983-7993. URL: http://vspu2014.ipu.ru/proceedings/prcdngs/7884.pdf.
[18] Бурков В.Н., Новиков Д.А. Как управлять проектами. М.: Синтег, 1997. - 190 с.
[19] Шопенгауер А. О четверояком законе достаточного основания / Собрание сочинений: Мир как воля и представления. М.: Престиж Бук, 2011. – 1032 с.
[20] Деловая игра в Политехе – Инвестиции в рынок недвижимости [Электронный ресурс]. URL: http://pstu.ru/news/2015/03/27/3668/
[21] Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология. – М.: Синтег, 2007. – 668 с.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ТЕКСТОВЫХ ДОКУМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕРЫ СЕМАНТИЧЕСКОЙ БЛИЗОСТИ ТЕРМОВ В WORDNET

Н.А. Бленда[1], А.В. Мельников[2]

[1]Челябинский государственный университет
454001, Челябинск, ул. Бр.Кашириных, 129, Россия
bna@csu.ru

[2] Челябинский государственный университет
454001, Челябинск, ул. Бр.Кашириных, 129, Россия
mav@csu.ru

Ключевые слова: *Семантическая близость, WordNet, YARN, кластеризация текстовых документов*

Abstract

This study describes the way to improve quality of clusterization of text documents using hierarchic thesaurus WordNet and semantic similarity metrics between synsets in WordNet. We also present ECOSA algorithm, which is used to reduce dimensions of documents' characteristic vectors. When using ECOSA, clusterization process consists of two steps: training and actual use. Training is performed on a training subset, and is supervised by an expert. The expert is presented with automatically created sets of characteristic vectors and then the expert assesses the quality of clusterization in the training subset. During the actual use, clusterization is fully automated.

Введение

На сегодняшний день накопилось достаточно много текстовых документов в электронном виде, например, корпоративные документы на предприятиях, web-страницы в интернет, электронные книги, научные публикации в научных электронных библиотеках[1]. Существуют различные инструменты, которые помогают работать с подобными большими хранилищами текстовых документов. Одной из задач таких систем является группировка документов по смыслу, что бы пользователю предоставить подобные документы или тексты по определенной тематике. Для решения этих задач могут использоваться различные алгоритмы кластеризации, простые как K-means или более сложные, например, метод нечеткой кластеризации c-means, но практически все алгоритмы работают с большими векторами признаков (характеристические вектора документов). Характеристический вектор документов содержит величины соответствующие частоте встречи слов в документе, а размерность вектора определятся количеством слов. Увеличение длины характеристических векторов документов ведет к увеличению сложности вычислений, поэтому с точки зрения использования вычислительных ресурсов, целесообразно уменьшать размерность характеристических векторов путем исключения из него характеристики малозначимых слов. Малозначимые слова или сорные слова так же могут вносить шумы при кластеризации, поэтому их то же необходимо исключить из анализа.

При исключении малозначимых слов присутствует некоторая субъективность. То есть если задачу определения малозначимых слов дать экспертам, то каждый эксперт может по собственным ощущениям составить разные списки малозначимых слов.

В статье будет предложен алгоритм, который позволяет получить хорошие представления характеристических векторов с использованием тезауруса WordNet и оценка качества кластеризации для помощи эксперту.

1 Описание тезауруса

Тезаурус WordNet был создан в Принстонском университете. В основе WordNet лежат синсеты. Синсет – синонимичный ряд слов, объединяющий слова со схожими значениями. Существует четыре типа синсетов: существительные, глаголы, прилагательные и наречия. Синсеты объединены в семантические сети семантическими отношениями. Так же существуют русскоязычные клоны WordNet: RussNet, Yet Another RussNet (YARN)[2], wordnet.ru. Исходя из того, что проект YARN построен по принципу WordNet, активно развивается, а так же в проект изначально заложена будущая интеграция через ILI индекс с тезаурусами на других языках, то данный проект является предпочтительным для дальнейшего использования.

В WordNet существует 6 типов отношений:

- гипероним (собака → животное);
- гипоним (животное → собака);
- has-member (факультет → профессор);
- member-of (пилот → экипаж);
- мероним: has-part (стул → ножка);
- антоним (отличник → двоечник).

В данной работе будут использоваться отношения гиперонимии и обратное ему - гипонимии. Тогда получаем следующее представление тезауруса:

(1) $T = < L, F, S, H, Sm, Root, Root_n, Root_v, Root_adj, Root_adv >$

где L – множество всех слов

F – функция принадлежности слова синсету, F: L → S

S – множество синсетов

H – отношение гиперонимии (подкласс → класс), H: S→S, H(собака, животное) – говорит о том, что ”собака” является подклассом ”животное”

Root_n, Root_v, Root_adj, Root_adv – корневые вершины для существительных, сказуемых, прилагательных и наречий

Root – корневая вершина, которая является суперклассом для Root_n, Root_v, Root_adj, Root_adv

Sm – семантическая близость. Функция Sm: SxS → [0..1], Sm(собака,животное)=0,5 говорит о том, насколько похожи по смыслу два синсета. Если значение равно 1, то можно говорить о максимальной похожести, если равно 0 – то о максимальной непохожести.

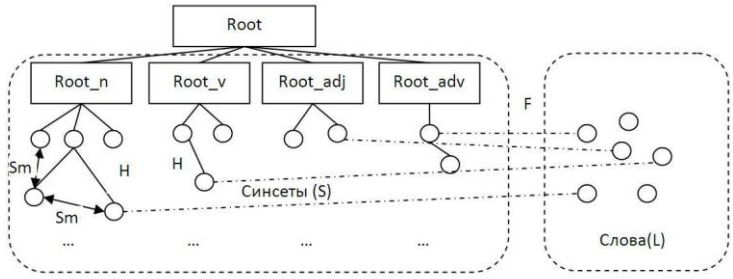


Рисунок 1 - Структура тезауруса

2 Семантическая близость

Семантическая близость – это сходство пар объектов (концептов, синсетов, слов). При этом не надо путать термин ”семантичекая близость” с термином ”семантическая связность”. Семантическая связность показывает то, как связаны между собой объекты в документе. На-

пример ”стол” и ”ножка” связаны между собой. “Ножка” стола является частью целого “стола”. Но при этом “ножка” и ”стол” являются совершенно разными сущностями и не похожи между собой. ”Самолёт” и ”вертолет” имеют много технических различий, но при этом они являются воздушными транспортными, то есть они похожи тем, что они могут летать - они являются семантически близкими. Еще более близкими понятиями могут быть ”Boieng B-737” и “Ту-154”.

Для оценки степени семантической близости существуют различные меры семантической близости. Обычно они нормированы от 0 до 1, соответственно от минимального до максимального значения. Минимальное значение равное SM(s1,s2)=0 соответствует тому, что синсеты s1 и s2 совершенно непохожи. Значение SM(s1,s2)=1 соответствует тому, что синсеты s1 и s2 максимально похожи друг на друга. В данной работе можно использовать различные меры семантической близости. С учетом того, что имеется тезаурус T построенный на базе WordNet, содержащий иерархические связи (отношения класс-подкласс), то можно использовать топологические меры семантической близости такие как (Sussna M), (Wu Z., Palmer M.), (Leacock C., Chodorow M.), (Li), (Nguyen H.A.). Все перечисленные методы расчета семантической близости учитывают длину пути в тезаурусе между синсетами и глубину их нахождения относительно вершины ROOT, поэтому в рамках данной работы будем использовать один из самых наглядных методов - Wu Z., Palmer M.[3].Тогда мера семантической близости вычисляется по следующей формуле:

$$(2)\quad \mathrm{Sm}(s1, s2) = \mathrm{Sm}_{\mathrm{palmer}(s1,s2)} = \frac{2*N3}{N1+N2+2*N3}$$

где N3 – глубина общего синсета s3 для s1, s2 по иерархии. N1, N2 длина пути от s1,s2 до s3 соответственно.

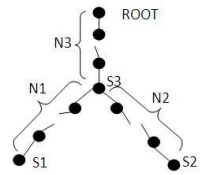


Рисунок 2 - Расчет семантической близости между s1 и s2 (Wu Z., Palmer M.)

3 Подход к уменьшению размерности характеристического вектора документа – ECOSA

Основой для построения процесса кластеризации документов послужил подход COSA (Concept Selection and Aggregation) [4]. Основной идеей COSA является то, что концепты с малым значением в характеристических векторах, заменяются одним концептом с большим весом, находящимся выше по иерархии в тезаурусе. К примеру, пусть имеется тезаурус рис.3. в котором вес встречи ”собака” – 0,001 и ”кошка” – 0,002. Из-за низкого веса данных концептов при уменьшении размерности характеристического вектора документов данные концепты пришлось бы убрать. При этом произошла бы потеря информации. Объем потерянной информации о документах можно уменьшить, если заменить данные концепты на концепт ”домашнее животное” с весом равным 0,003.

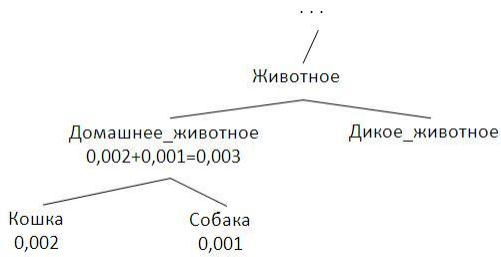


Рисунок 3 - Пример тезауруса с весами встречи концептов (COSA)

Несмотря на то, что ”кошка” и ”собака” по иерархии являются ”Домашние_животное”, но ”Домашние_животное” это более широкое понятие и при таком переходе происходит не только потеря части информации но и внесение искажений. Поэтому необходимо учитывать не только иерархию понятий в тезаурусе, но и степень их похожести, то есть меру семантической близости.

Так как в отличие от работы [4]. используется не онтология, а тезаурус WordNet, поэтому взамен термина “концепт” будем использовать термин “синсет”.

Предлагаем метод уменьшения размерности характеристического вектора с учетом семантической близости понятий Extended COSA (ECOSA). В примере рис.4. присутствует значение меры семантической близости между синсетами. Меры семантической близости рассчитываются попарно между всем синсетами сети. На рис.4. для наглядности показаны не все значения меры семантической близости - Sm.

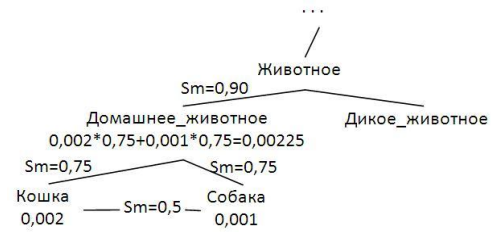


Рисунок 4 - Пример тезауруса с весами встречи синсетов и мерой семантической близости (ECOSA)

На рис.4. каждое значение характеристического вектора было перемножено на соответствующее значение Sm.

4 Описание процесса кластеризации документов с применением ECOSA

Процесс кластеризации с применением ECOSA состоит из 2-х основных этапов: обучения и эксплуатации.

В процессе обучения на вход системы подается обучающая выборка документов и происходит предварительная обработка документов. После предварительной обработки документов получаем характеристические вектора документов содержащие значения td/idf. После этого по алгоритму ECOSA происходит формирование представления характеристического вектора заданной длины. Представление характеристического вектора – это набор синсетов. Которые будут использоваться для дальнейшей обработке. Так же происходит расчет новых значений векторов. С каждым представлением характеристического вектора производится кластеризация и рассчитывается оценка качества кластеризации. Если экперта устраивает качество кластеризации, то обучение считается завершенным. В противном случае, эксперт может просмотреть другие варианты характеристических векторов и изменить размерность вектора.

В процессе эксплуатации множество всех текстовых документов поступает на предварительную обработку, в результате которой получаем характеристические вектора содержащие значения td/idf для каждого слова документа. Далее по алгоритму ECOSA происходит расчет характеристических векторов в соответствии с представлением характеристического вектора полученного в процессе обучения. Далее происходит кластеризации любым методом, например k-means.

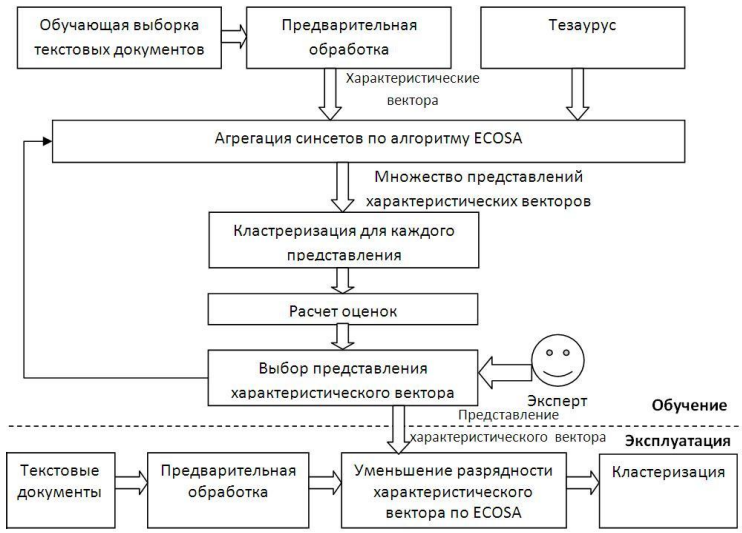


Рисунок 5 – процесс кластеризации документов с использование ECOSA

5 Предварительная обработка текста документа

Предварительная обработка текста заключается в сканировании документа и расчета частоты встречи для кадого слова. При этом из документа могут убираться стоп-слова. А так же все слова приводятся к некоторой нормальной форме.

Пусть

Tf(di,tj) – частота встречи термина tj в документе $di \in D, i = 1..N$, D – множество документов

Df(tj) – частота документов в которых встречается термин $tj \in L, j = 1..K$, L – множество всех терминов

Тогда td/idf (частота_термина / инверстная_частота_документа_по_термину) равна:

$$(3) \quad tdidf(di, tj) = Tf(di, tj) * \log\left(\frac{N}{Df(dj)}\right)$$

Если частота термина в документе большая, значит термин имеет большой вес для данного документа. Но если термин встречается во всех документах, то его вес для данного документа уменьшается – это вполне логично, так как если термин используется во всех документах примерно с одинаковой частотой, то он плохо подходит для кластеризации.

6 Агрегация синсетов по алгоритму ECOSA

Для начала необходимо отобразить термины (слова) на синсеты. А потом произвести подбор наилучших синсетов для характеристического вектора.

Функция F тезауруса T производит отображение термина на синсет. Тогда частота встречи синсета sk в документе di определяется суммой частот всех терминов, входящих в синсет.

А его весовая характеристика cfidf определяется как сумма tdidf терминов соответствующих синсету sk.

Тогда вес синсета sk по всему множеству документов:

(4) $W(sk) = \sum_{i=1}^{N} cfidf(sk, di)$

Основная идея алгоритма для получения представлений характеристических векторов следующая: Берутся все синсеты. Которые встречаются в документах и сортируются в порядке убывания их весов W. Если длина вектора получатся больше чем задал эксперт, то берется два самых правых синсетов (с минимальными значениями W) и объединяются в более крупный синсет по иерархии в тезаурусе. Так продолжается до тех пора пока не будет получен вектор заданной размерности.

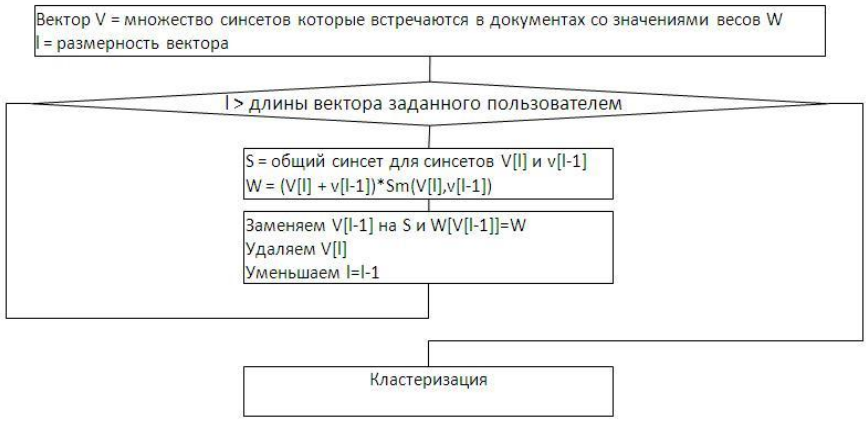


Рисунок 6 - Алгоритм ECOSA для получения представлений характеристического вектора

7 Оценка качества кластеризации

Пусть C={C1,C2,…Ck} – множество кластеров полученных после кластеризации текстовых документов, тогда расстояние от документа d до кластера Ci:

(5) $dist(d, Ci) = \frac{\sum_{p \in Ci} dist(d,p)}{|Ci|}$

где dist(d,p) –расстояние между документами d и p, p – документ из кластера Ci

Пусть

$$a(d, C) = dist(d, Ci), \text{ где } d \in Ci$$

$$b(d, C) = \min_{Cj \in C, d \notin Ci}(dist(d, Cj))$$

Тогда силуэт документа d, который показывает насколько близка граница чужого кластера для документа d, рассчитывается как

(6) $s(d, C) = \frac{b(d,C) - a(d,c)}{\max\{b(d,C), a(d,c)\}}$

А коэффициент силуэта, который характеризует качество кластеризации по всем документам:

(7) $s(d, C) = \frac{b(d,C) - a(d,c)}{\max\{b(d,C), a(d,c)\}}$

где D - множество документов

C – множество кластеров

Чем больше коэффициент силуэта, тем лучше качество кластеризации.

Заключение

В работе представлен один из подходов для решения задачи уменьшения размерности характеристических векторов текстовых документов. Особенностью ECOSA по сравнению с COSA является учет семантической близости понятий в тезаурусе. В отличие от простого урезания характеристических векторов текстовых документов происходит меньшая потеря информации о документе.

Так же ECOSA применяться не только для решения задач кластеризации, но и других задач: классификации, поиска документов, а так же расчета семантической близости между документами [1]

Список литературы

[1] Мельников А.В, Бленда Н.А. Поиск подобных научных публикаций с использованием методов глубинного семантического анализа// Уфа, 2014, Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Technologies for Information Processing and Management (ITIPM'2014) Volume 1. Ufa State Aviation Technical University, 2014

[2] Braslavski P., Ustalov D., Mukhin M. A Spinning Wheel for YARN: User Interface for a Crowdsourced Thesaurus // Proceedings of the Demonstrations at the 14th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics. — Gothenburg, Sweden : Association for Computational Linguistics, 2014. — P. 101–104.

[3] Wu Z., Palmer M. Verbs semantics and lexical selection //Proceedings of the 32nd annual meeting on Association for Computational Linguistics. – Association for Computational Linguistics, 1994. – С. 133-138.

[4] Hotho A., Maedche A., Staab S. Ontology-based text document clustering //KI. – 2002. – Т. 16. – №. 4. – С. 48-54.

САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ СЕТЕВЫЕ ЭКСПЕРТНЫЕ СРЕДЫ

Г.П. Виноградов[1], Ю.А. Воронин[1], Б.Ф. Зюзин[1]
[1]Тверской государственный технический университет
170023, Тверь, ул. Маршала Конева, 12, Россия
wgp272ng@mail.ru
тел: +7 (4822) 44-91-90

Ключевые слова: *экспертная среда, самоорганизация, сетевые технологии, согласование представлений, инновационное развитие*

Abstract
Рассматривается проблема построения самоорганизующихся сетевых экспертных сред для обеспечения инновационного развития производств, выпускающих высокотехнологичную и наукоемкую продукцию и услуги.

Введение

В XXI веке развитие организационных систем во все большей степени переходит от эволюционного к проектному. Управление этим процессом предполагает сочетание казуального подхода (причинно-следственного) с теологическим (целевая детерминация). Движущей силой развития становится деятельность, представленная множеством институциональных построений, ориентированных, прежде всего, на совершенствование инновационной деятельности [1]. Из них наиболее перспективной формой поиска, производства нового знания и определения направления его использования становятся саморазвивающиеся сетевые экспертные среды. Элементарной частью такой среды является эксперт-профессионал, владеющий современными телекоммуникационными технологиями, средствами Интернета [2]. Интеграция в сетевой структуре естественных интеллектов образует коллективный стратегический субъект, который является средством синергии знаний и действий в процессе развития.

В связи с этим ведущим направлением в теории управления в настоящее время следует считать проблематику организации саморазвивающихся инновационных сред, составной частью которых являются самоорганизующиеся сетевые экспертные среды. Необходима разработка методологических основ организации подобных сред и управления ими. Центральным аспектом в этом становится оценка субъектами (в дальнейшем агенты) ценности, полезности нового знания и технологий, оценка рисков, определение механизма их исключения, соотнесения нового знания с целями и задачами развития. Это требует, в свою очередь, новых моделей формирования представлений агентов о предметной области при определении направления развития.

1 Механизм самоорганизации сетевых экспертных систем

Саморазвитие предполагает вовлечение через использование сетевых технологий продвинутых потребителей товаров и услуг в инновационный процесс совершенствования потребительских свойств товаров и услуг, получения идей или контента путем обращения к их креативным способностям в обмен на вознаграждение, соответствующее вкладу. В Советском Союзе такое решение проблем называлось движением новаторов. На Западе оно было несколько расширено, модифицировано и названо краудсорсингом. Для его реализации разработаны соответствующие технологии. Однако их прямая реализация приводит

появлению большого количества информационного шума и мусора, содержащего, как правило, бездоказательные критические высказывания. Поскольку при оценке сложных систем, продуктов и услуг требуется не только гражданская позиция, но и квалификация, то необходима система, обеспечивающая направление поиска решений и идей, а также обеспечивающая фильтрацию, обобщение информации, определение ее ценности и перспективности. Способом повышения краудсорсинговых решений является синтез технологий краудсорсинга и сетевой экспертизы (рисунок 1).

По сравнению с традиционными технологиями поиска решения эти два подхода обладают следующими преимуществами [2]:

Самоорганизация. Создание идей, предложений по совершенствованию продукции и услуг практически неограниченным числом экспертов.

Независимость. Возможность получения информации, отражающей различные точки зрения с объяснением позиции.

Малобюджетность. Люди участвуют в подготовке предложений и выполняют оценки, как правило, безвозмездно или за небольшое вознаграждение, варьирование уровня вознаграждения в зависимости от результата.

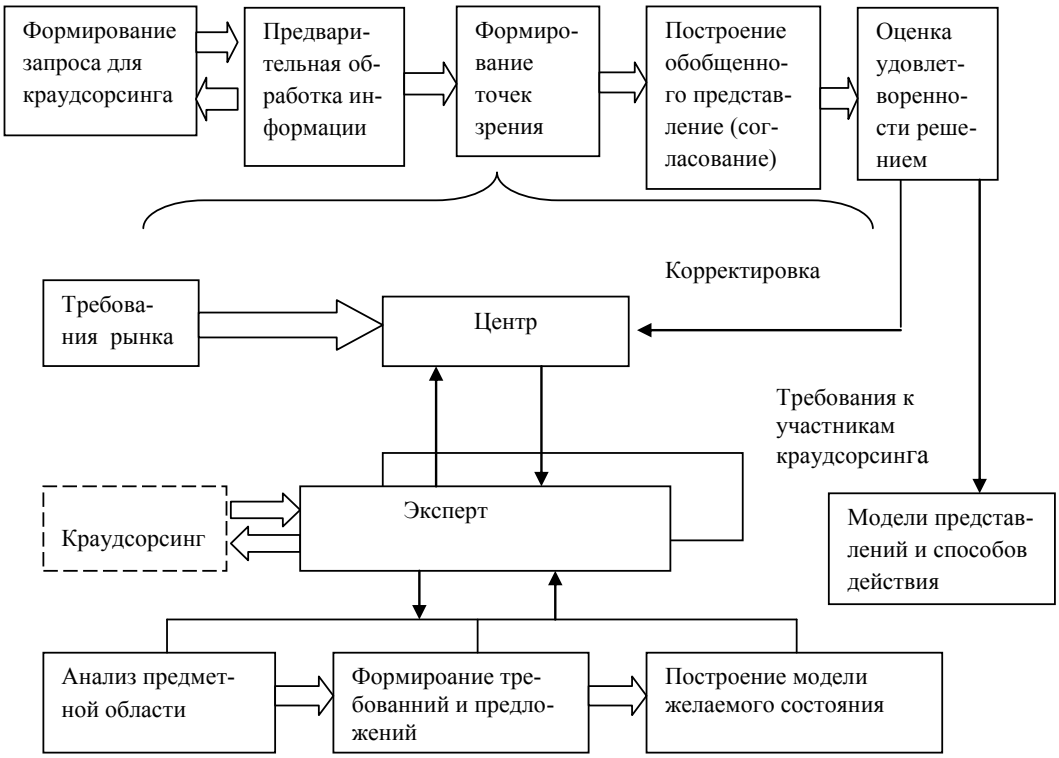


Рисунок 1 – Сетевая экспертиза на основе краудсорсинга

Поскольку модели принятия решений в сетевой экспертизе должны строиться достаточно быстро, то задачи по извлечению информации, очистки и предварительной обработки (выделению признаков, семантическая кластеризация, построение онтологий и т.п.) необходимо выполнять средствами краудсорсинга.

Центр формирует запросы, оформляют их дизайн, дорабатывают семантическую кластеризацию и онтологию предметной области. Цикл взаимодействия центра с экспертами будет продолжаться до тех пор, пока вклад новой информации в рост полезности сформированных представлений будет несущественным. Полученная модель представлений предметной области используется для формирования модели способа действия. Анализ удовлетворенности от принятого решения позволяет корректировать как модель представлений, так и модель способа действия (решения).

2 Математическая постановка и описание задачи принятия согласованных решений

Пусть задана иерархическая структура производства и потребления наукоемкой продукции перечислением входящих в нее агентов, описанием их прав и интересов, в соответствии с которыми они принимают решения. Кроме того, пусть определена регламентация процедур доступа, обработки и передачи информации. Будем считать, что возможности и права агентов в системе не одинаковы (что позволяет говорить об их неоднородности [3]). Неоднородность проявляется в различной степени влияния агентов друг на друга.

Для целей анализа будем рассматривать базовую модель иерархической системы, состоящей из центра (агент верхнего уровня) и агентов нижнего уровня. Согласно [4] разделим цели верхнего уровня условно на следующие группы:

1) Определение и согласование целей выживания и развития системы в целом в условиях неопределенности и динамики рынка;
2) Формирование согласованного восприятия внешней и внутренней среды системы;
3) Формирование согласованного представления о ситуации целеустремленного состояния
4) Разработка согласованного плана действий, учитывающего интересы всех подсистем;
5) Оптимизация по возможности обобщенных показателей эффективности функционирования системы, представляющих собой функции от параметров всех подсистем (агентов).

Решение последних двух задач может быть записано следующим образом:

(1) $(u, v) \in \Omega$,

где u – управление центра, $v = (v_1, v_2, \ldots, v_n)$ - вектор управлений подсистем, Ω - множество таких управлений, которые переводят систему в одно из состояний множества X (X – область желаемых состояний системы).

Условие (1) может быть выполнено лишь на основе некоторой совокупности предположение о поведении и информированности всех агентов системы. Примем следующие предположения:

1) центр может сформулировать желаемое состояние системы в виде некоторого набора обобщенных показателей, которые являются функциями параметров агентов. Конкретные зависимости центру в общем случае неизвестны, но для их определения он может использовать данные прошлых периодов функционирования системы, информацию о результатах, полученных конкурентами в данном сегменте рынка и результаты сетевой экспертизы. Такое предположительное знание будем называть представлениями центра о возможностях агентов и направлении развития системы;
2) на основе представлений о возможностях агентов и желаемых состояниях центр определяет свое управление (план действий и информационный запрос) $u \in U$ и сообщает его агентам; при известном управлении u i-й агент выбирает свое управление $v_i \in V_i(u_i)$, которое переводит его в состояние $y_i \in Y_i$, где Y_i – множество возможных состояний. Будем считать, что агенты взаимозависимы по выбору своих состояний. Это предполагает при выборе учет глобальных ограничений $Y^{гл}$. Следовательно, при выполнении условия

(1) система может находиться в одном из следующих состояний $Y = Y^{\partial\pi} \cap (\prod_{i=1}^{n} Y_i)$.

Здесь $\prod_{i=1}^{n} Y_i$ – это множество, определяемое локальными ограничениями, например, по объему выпуска, качеству, затратам и т.д.

3) пусть поведение агента соответствует гипотезе рационального поведения. Тогда выбор агента будет сделан так, чтобы максимизировать свой субъективно понимаемый критерий эффективности $G_i(u, v_i)$;
4) центр, в общем случае, приблизительно знает пространство управлений и критерии эффективности агентов, поэтому он должен для создания представлений о желаемых состояний агентов организовать с ними обмен информацией. Для этого он запрашивает у агентов оценки качества продукции и услуг u и желаемые состояния y_i, уточняет их интересы в окрестности полученного решения в обмен на стимулирование за получение встречной информации;
5) получив новую информацию, центр пересчитывает решение и задает новые вопросы агентам до тех пор, пока не будет получено точное или близкое к нему решение;
6) при наличии неопределенности факторов центр стремится в соответствие с принципом детерминизма снизить ее уровень за счет применения процедур, повышающих степень полезности своих представлений [5].

Описанная модель формирования плана развития производства предполагает, что агенты, как управляющие своими подсистемами, так и использующие ее на уровне своих представлений хорошо знают и «чувствуют» свои объекты управления и могут с достаточной степенью точности ответить на запросы центра.

Эти предположения позволяют определить множество допустимых управлений центра следующим образом

$$(2)\quad U^0 = \left\{ u \in U \mid V(u) = \prod_{i=1}^{n} V_i(u) \neq \varnothing,\ (u, v) \in \Omega,\ \forall v \in R(u) = \prod_{i=1}^{n} R_i(u) \right\},$$

где $R_i(u) = Arg \max_{v_i \in V_i(u)} G_i(u, v_i)$.

Если у центра имеется критерий эффективности $F(u, v)$, то оптимальным гарантирующим управлением является такое $u^0 \in U^0$, что

$$(3)\quad F^0 = \sup_{u \in U^0} \inf_{v \in R(u)} F(u, v)$$

Общность интересов центра и агентов определяется условиями на суммарное вознаграждение

$$(4)\quad \sum_{i=1}^{n} G(u_i, v_i) + F^0 \leq C(\bar{Y})$$

где $\bar{Y}$ – доход от выполнения заказов, $C(\cdot)$ – фонд материального поощрения или фонд оплаты труда.

Таким образом, при согласовании модели развития производства товаров и услуг в системе с не противоположными интересами необходимо рассматривать интеграционный тип возможного компромисса, поскольку величина распределяемого ресурса согласно (4) является величиной переменной, зависящей от их суммарных усилий. Поэтому цель согласования состоит в достижении суммарного выигрыша, и он может быть получен путем сообщения достоверной информации и совместным решением проблем. В системах, где агенты связаны общими интересами и целью, справедлив принцип запрета эгоизма, так как какой-либо агент может нанести ущерб системе, только если при этом он наносит ущерб себе.

Пусть объект управления *i*-го агента описывается уровнем затрат $y_i^{вх}$, уровнем выпуска $y_i^{вых}$ и набором режимных параметров z_i, с помощью которых агент может влиять на ход процесса в своей предметной области. Тогда множество возможных состояний *i*-го агента можно определить следующим образом

$$(5)\quad Y_i = \left\{ y_i \mid \underline{y}_i^{вх} \le y_i^{вх} \le \overline{y}_i^{вх},\ y_i^{вых} = w_i(y_i^{вх}, z_i) \in Y_i^{вых},\ z_i \in Z_i \right\}$$

Задача (1-5) является задачей поиска максимина со связанными ограничениями.

Обозначим через $y_i^{вых} = w_i^*(y_i^{вх}, z_i) \in Y_i^{вых}$ представление агента о функционировании объекта управления, тогда

$$(6)\quad Y_i^* = \left\{ y_i \mid \underline{y}_i^{вх} \le y_i^{вх} \le \overline{y}_i^{вх},\ y_i^{вых} = w_i^*(y_i^{вх}, z_i) \in Y_i^{вых},\ z_i \in Z_i \right\}$$

можно рассматривать как субъективные представления агента о множестве возможных состояний. Очевидно, оно определяется его знанием, опытом.

В свою очередь центр может иметь собственное представление о возможностях агентов в виде

$$(7)\quad Y_i^* = \left\{ y_i \mid \underline{y}_i^{вх} \le y_i^{вх} \le \overline{y}_i^{вх},\ y_i^{вых} = w_i^{ц}(y_i^{вх}, z_i) \in Y_i^{вых},\ z_i \in Z_i \right\}$$

В случае эффективных производств можно с достаточной степенью точности предположить выполнение гипотезы о полной информированности центра о возможностях, желаемых состояниях агентов и их продуктивности с точностью до параметров. Это означает, что центр располагает всей необходимой информацией о моделях V_i, $i = \overline{1,n}$ агентов, но не знает выбор агентов. В этом случае, как показано в [6], центр, используя это знание, рассчитывает управление $u^0 \in U^0$, а агент делает только один ход, выбирая свое состояние y_i и управление v_i из множества допустимых состояний $B_i(u_i) = Y_i(u_i) \cap Y_i$, пытаясь при этом максимизировать значение своей целевой функции

$$(8)\quad G_i(u_i, v_i) \rightarrow \max_{v_i \in B_i(u_i)}.$$

Тогда результат выбора всех агентов определяется в этом случае как множество $R(D)$ всех ситуаций, где $D = Y^{дл} \cap \coprod_{i=1}^{n} B_i(u_i)$ множество возможных состояний всей системы. Варьируя

управление $u = \{u_i,\ i = \overline{1,n}\}$, центр может проигрывать возможные сценарии поведения системы.

3 Алгоритм построения агентом множества согласованных состояний

Агент, обладая более детализированной информацией, может при создании центром более привлекательных условий u_k путем решения задачи (8) определять для себя такой вектор $x_k^{(h)}$, который позволяет расширить множество $X_k^{(h)}$ представлений центра о его возможностях, h – шаг итерационного процесса.

Обозначим через $\omega_k = \{\omega_k^{(h)},\ h = \overline{1,H}\} \in A_k$ – вектор параметров состояния, определяющий значения вектора действий $x_k^{(h)} = \left\{ x_{kj}^{(h)}, j \in [\overline{1,m_k}] \right\} \in X_k^{(h)}$. Можно считать, что этот вектор описывает знание агента возможностей контролируемого им объекта управления. Здесь A_k – множество возможных значений вектора состояния. Будем считать, что агент обладает способностями, знаниями, которые гарантируют существование $\Psi_k : A_k \to X_k^{(h)}$.

Доступный агенту уровень знаний о конструктивных особенностей потребляемой продукции и услуг делают справедливым предположение о существовании для k-го агента предельного множества параметров состояния. Обозначим через $O_k^* = \{o_k^* | o_k(x_k),\ x_k \in X_k^{(h)}(\omega_k^{(h)}),\ \omega_k^{(h)} \in A_k\}$ – множество достижимости или множество предельных возможностей.

Будем предполагать, что агент за счет своих креативных способностей, способности к самообучению и поиску новой информации при соответствующем стимулирующем воздействии центра способен определять такие состояния $\omega_k^{(1)} \in A_k$ и $\omega_k^{(2)} \in A_k$, что возможно $\omega_k^{(2)} \succ \omega_k^{(1)}$, где символ $\succ$ означает «более значимо» и при этом $X_k^{(1)}(\omega_k^{(1)}) \subseteq X_k^{(2)}(\omega_k^{(2)})$. Следовательно, существует такая последовательность $\omega_k^{(1)}, \omega_k^{(2)}, \omega_k^{(3)}, \ldots$, что $\lim\limits_{h \to \infty} o_k^{(h)}(x_k^{(h)}(\omega_k^{(h)})) = O_k^*$. То есть агент путем изучения объекта управления способен определить его предельные возможности для достижения желаемого состояния. Последовательность $\omega_k^{(1)}, \omega_k^{(2)}, \omega_k^{(3)}, \ldots$ будем называть последовательностью вскрытия резервов от потенциальных конструктивных решений за счет их доработки и упрощения в обслуживании.

Такая способность агента формировать расширяющееся множество способов действия позволяет определить следующие свойства целевой функции агента и областей достижимости:

$$\forall \omega_k^{(1)}, \omega_k^{(2)} \in A_k, \omega_k^{(2)} \succ \omega_k^{(1)}, X_k^{(1)}(\omega_k^{(1)}) \subseteq X_k^{(2)}(\omega_k^{(2)}) \mapsto E\varphi_k(x_k^{(2)}) > E\varphi_k(x_k^{(1)})$$

Это условие означает, что поведение агента при выполнении принципа рациональности соответствует закону повышающихся потребностей, который в литературе по психологии поведения определяет мотивированность и целеустремленность агента.

В реальных условиях агент при превышении некоторого порога значимости $\Delta = E\varphi_k(x_k^{(2)}) - E\varphi_k(x_k^{(1)})$ изменения ценности ситуации целеустремленного состояния по результату способен идентифицировать предпочтительные способы действия и видит открывающиеся возможности при изменении структуры своей информированности (знания).

Выработка решения при таком подходе заключается в реализации совокупности последовательных процедур, предназначенных для поиска промежуточных решений, на основании которых агент уточняет свои возможности и формирует окончательное решение. Полный цикл его формирования *k*-м агентом состоит в выполнении следующих шагов на этапе *h*:

1) Формирование множеств A_k и $X_k^{(h)}$ на основе знаний, опыта, интуиции и располагаемой информацией о параметрах состояния $\omega_k^{(h)}$. Просмотр множества A_k и формирование точки $O_k^{(h)*} = \left\{ o_k^{(h)*} | o_k^{(h)*}(x_k^{(h)}), x_k^{(h)} \in X_k^{(h)}(\omega_k^{(h)}), \omega_k^{(h)} \in A_k \right\}$. Проверка, существует ли $x_k^{(h)*}$ такое, что $o_k^{(h)}(x_k^{(h)*}) = o_k^{(h)*}$. Если – да, то $x_k^{(h)*}$ – это компромиссное решение, а $o_k^{(h)*}$ – прогнозируемая ситуация, в противном случае переход к п.2.
2) Решение задачи поиска потенциально-предпочтительного набора действий $x_k^{(h)*} \in X_k^{(h)}(\omega_k^{(h)})$, позволяющего сформировать вектор $\bar{o}_k^{(h)}$ предельных значений критериев при использовании имеющегося на данный момент знания о правиле $\Psi_k^{(h)}$ и структуре множества A_k. Так как компоненты $\bar{o}_{ki}^{(h)}$, $i = \overline{1,N}$ порознь достижимы, а вместе – нет, то делается попытка найти компромиссное решение. Если агент не согласен попытаться найти компромиссное решение за счет компенсаторных уступок по каждому критерию, которые несколько хуже решения $\bar{o}_k^{(h)}$, то переход к п. 3, иначе к п. 5.
3) Исследование направлений возможного расширения множества *A*, организация процедур поиска новой информации (знания) о $\omega_k^{(h)} \in A_k$ и правиле $\Psi_k : A_k \to X_k^{(h)}$.
4) Если расширение множества Ak возможно, то переход к п. 1, иначе фиксация ситуации, что компромиссное решение не может быть найдено при выбранном векторе $o_k^{(h)*}$.
5) Получение сведений от агента достаточных для определения вектора $\underline{o}_k^{(h)} \prec o_k^{(h)*}$, где $\underline{o}_k^{(h)}$ минимальные требования агента к принимаемым им во внимание результатам.
6) Выполнение процедуры поиска минимально-предпочтительной точки в пространстве критериев по направлению предпочтения $\underline{o}_k^{(h)}, o_k^{(h)*}$, определение вектора $\omega_k^{(h)*} \in A_k$ и

$\underline{x}_k^{(h)*} \in X_k^{(h)}(\omega_k^{(h)*})$ – минимального значения плановых показателей, соответствующих значениям компонент вектора $\underline{o}_k^{(h)}$.

7) Если полученные значения для $\underline{x}_k^{(h)*}, \underline{o}_k^{(h)*}$ принимаются как компромиссное решение, то процедура останавливается, в противном случае переход к п. 8.

8) Для ограничений на $\underline{o}_k^{(h)}$ определяется приоритетная координата $i \in [\overline{1, N_k}]$, по которой делается расширение множеств A_k и $X_k^{(h)}$, так чтобы $o_{k^i}^{(h)}(x_k^{(h)}) = o_{k^i}^{(h)} + \Delta_{k^i}^{(h)}$, где $\Delta_{k^i}^{(h)}$ минимально возможное улучшение, которое является значимым для агента и определяется по его высказываниям о "гибкости" ограничения на основе выполнения процедур поиска дополнительной информации. Переход к п. 1.

Описанный алгоритм использует три типа механизмов, применение которых порождает интерактивный процесс для построения компромиссного решения.

Механизм анализа – это механизм, с помощью которого агент в момент *r* обрабатывает сведения, полученные на шаге *r*-1 для построения множеств P_k и X_k с целью определения x_k, y^{o*}, c^*, z^*. Здесь сопоставляются результаты, полученные на момент *r* с результатами на шаге *r*-1. формируется представление о значениях вектора o^{o*} и значений уступок по его компонентам. Строится предварительное представление о желательных значениях показателей $E\varphi_k(o(y^{o*}))$ и $EE_k(o(y^{o*}))$.

Механизм целеполагания – это механизм, который по результатам анализа определяет условия возможности достижения желательных значений x_k, y^{o*}, c^*, z^*, $E\varphi_k(o(y^{o*}))$, $EE_k(o(y^{o*}))$. Рассчитывается идеальная точка в пространстве оценок *o*, связанная с множествами P_k и X_k – это точка $\bar{o}^*$, имеющая координаты $\bar{o}_i^* = \mathbf{max}\ o_i(x(p)),\ i = \overline{1, L}$. То $p \in P_k,\ x \in X_k$ есть $\bar{o}^*$ – наибольшее значение оценки по координате *i*, которое может быть получено с помощью намеченных действий. Эта точка образует центр области поиска предпочтительных состояний. Если при найденном значении координат точки $\bar{o}^*$ ограничения не выполняются, то агент рассматривает возможность расширения множеств P_k, X_k и C_k за счет включения дополнительных переменных, осуществления структурных изменений и т.п. для ослабления наиболее жестких ограничений так, чтобы выполнялось включение $P_k(r) \subseteq P_k(r+1)$ и $X_k(r) \subseteq X_k(r+1)$. Если это невозможно, то формируется сведения о координатах $\underline{o}_i < \bar{o}_i^*$ точки $\underline{o}_i \neq \bar{o}_i^*$, которая была бы достижимой и лучшим компромиссом в окрестности точки

$\overline{o}^{*}$. Путем минимизации потерь $\sum_{i=1}^{L}\left|o_i - o_i^{o*}\right|$ определяются величины $p_i = o_i - o_i^{o*} \neq 0$ примерно эквивалентные, небольшие и значащие для агента.

Механизм самоорганизации – это механизм, который приводит к получению знаний о правилах Δ и Ψ для расширения множеств P_k, X_k и C_k. Он может иметь различные формы: 1) проведение экспериментальных исследований на объекте с целью улучшения своего представления о его функционировании; 2) анализ обстановки ν_{-k}; 3) привлечение экспертов для подготовки рекомендаций по улучшению режимов ведения процесса; 4) процедуры опроса персонала; 5) процедуры голосования и т.п.

Заключение

В статье приведены соображения, являющиеся основание для перехода с простого маркетингового анализа рынка и пассивного изучения потребностей потребителей товаров и услуг на использование активных методов. Основой их построения следует считать создание самоорганизующихся экспертных сред на базе современных сетевых и телекоммуникационных технологий. Такой подход означает также активное использование различных средств информационного управления для создания соответствующих информационных структур у экспертов. Побочным эффектом от применения предлагаемой технологии может быть расширение соответствующего сегмента рынка.

Благодарности

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта 14-01-00328\14.

Список литературы

[1] Gubanov, D., Korgin, N., Novikov, D., Raikov, A. E-Expertise: Modern Collective Intelligence, Springer. Series: Studies in Computational Intelligence, Vol. 558, 2014, XVIII, 112 p.
[2] Райков А.Н. Конвергентное управление и поддержка решений. - М.: Издательство ИКАР, 2009. – 245 с.
[3] Виноградов, Г.П. Моделирование поведения агента с учетом субъективных представлений о ситуации выбора / Виноградов, Г.П., Кузнецов В.Н. // Искусственный интеллект и принятие решений. № 3. с. 58-72.
[4] Vinogradov, G. Decision Making based of Subjective Conceptions of Decision situation / Vinogradov G. //. Interactive Systems and Technologies:the Problems of Human-Computer Interaction, - Collection of Scientific papers. Uljanovsk, 2011, pp. 403-414.
[5] Новиков, Д. А. Математические модели формирования и функционирования команд / Новиков Д.А.;– М.: Физматлит, 2008.
[6] Виноградов Г.П. Методы и алгоритмы принятия решений в автоматизированных системах управления производствами с непрерывной технологией на основе субъективных представлений: монография. / Г.П. Виноградов. Тверь: ТГТУ, 2013. 256 с.

Biography

1. Виноградов Геннадий Павлович, профессор кафедры информатики и прикладной математики, доктор технических наук, E–mail: wgp272ng@mail.ru

2. Воронин Юрий Анатольевич, аспирант, E–mail: wgp272ng@mail.ru

3. Зюзин Борис Федорович, Лауреат премии Правительства в области науки и техники, доктор технических наук, профессор, E–mail: zbfru@yandex.ru

ИНТЕГРАЦИЯ ОНТОЛОГИЙ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ИХ РАЗВИТИЯ

И.Д. Виноградов

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
vid@svptus.ru
тел: +7 (8462) 332-39-27, факс: +7 (8462) 333-27-70

Ключевые слова: *процесс интеграции онтологий, глобальная и локальная интеграция онтологий, анализ онтологических изменений*

Abstract
The article presents the support ontology merging on the base ontology-driven change discovery analisys of ontology evolution.

Введение

В настоящее время существует множество технологий интеграции онтологий, которые находят свое применение в различных сферах деятельности [1-6]. Они группируются по двум основным направлениям интеграции онтологий. Первое направление связано с объединением множества онтологий в единую, общую онтологию, предназначенную для решения универсума задач предметной области (ПрО) [1-4]. Такое направление назовем глобальным подходом интеграции онтологий. Второе направление, представим как локальный путь интеграции онтологий. Он означает сосуществование отдельных онтологий. Их интеграция производится только на этапе решения конкретной задачи ПрО [5,6]. Первое направление интеграции не является рациональным с точки зрения использования информационных ресурсов и требует больших затрат по обеспечения целостности глобальных онтологий. Оно ориентировано на охват глобальных информационных пространств типа Интернет. Наиболее перспективным для решения прикладных задач является локальный путь интеграции онтологий. В частности, при построении онтологий, извлекаемых из реляционных баз данных (data-driven ontologies) [6-8]. Данный путь лишен недостатков глобальной интеграции, однако требует дополнительного внимания временному аспекту развития онтологий. Необходимость учитывать историю прикладных онтологий предопределено их независимым друг от друга развитием. Поскольку онтологии развиваются и формально могут создаваться даже без прямого участия человека, то знание их истории в процессе интеграции становится актуальной задачей. Степень интеграции онтологий также является функцией, зависящей от времени. Во временном аспекте своего развития прикладные онтологии могут семантически «сближаться», или «отдаляться» друг от друга. Анализ онтологических изменений (АОИ) (ontology-driven change discovery), как форма формализации познавательного процесса, может проводиться за произвольный период времени при соблюдении условия хранения всей истории развития онтологии [9]. Для формального представления знаний о динамике развития онтологий пользуются различными графическими нотациями описания состояний онтологии в форме диаграмм переходов состояний, например, в нотации сетей Петри [10]. Недостаток существующих средств интеграции онтологий заключается в отсутствии применения в них средств АОИ.

В данной работе рассматривается расширение методами АОИ подхода интеграции онтологий на базе методологии анализа формальных понятий (АФП) [11]. Особенностью данного расширения является проведение АОИ на уровне изменений формальных контекстов онтологий.

Практическое применение АОИ находит в задачах поиска максимума степени интеграции между двумя представлениями с учетом их динамики, т.е. нахождение таких состояний прикладных онтологий, при которых их семантическая близость максимальна. Такого рода задачи встречаются, например, при формировании интегрированного представления о потребительских предпочтениях [12].

1. Анализ онтологических изменений

АОИ предназначен для поддержки эволюционного развития онтологии (ontology evolution) и отвечает на вопрос, в каком направлении происходит ее развитие. Включает в себя следующие аспекты:

- фиксация состояний онтологии при наступлении предопределенных событий (добавление/удаление понятий, отношений «род»-«вид» и т.п.);
- восстановление состояния онтологии на определенный момент времени;
- поиск наилучшего состояния онтологии в пространстве состояний по заданным критериям (неполнота, избыточность, структурированность и т.п.);
- сравнительный анализ состояний онтологий (определение семантической близости);
- прогнозирование дальнейшего развития онтологии.

В рамках глобального подхода к развитию онтологий под эволюцией онтологии понимается ее непрерывная адаптация под возникающие внешние изменения и управление согласованием этих изменений с целью обеспечения глобальной целостности [4]. Такое понимание эволюции не совсем подходит для локального подхода развития онтологий. Здесь главным критерием становится целенаправленное развитие онтологии к достижению наилучшего представления о ПрО. Целенаправленность развития, прежде всего, полагает оценку состояний и прогнозирование дальнейшего развития онтологии.

Первоочередным условием для АОИ является наличие механизма управления событиями, с помощью которого фиксируются состояния онтологии при наступлении предопределенных событий, например, при добавлении новых понятий, их атрибутов и отношений между ними. Для этого обычно используют различные диаграммные техники. Чаще всего это диаграммы переходов состояний (STD) [10]. На основе механизма управления событиями можно восстанавливать любое состояние онтологии в форме отката от текущего состояния или генерации копии онтологии на дату наступления того или иного события. Возможно упрощение механизма управления событиями в системах конструирования онтологий на базе АФП [5-7]. Фиксировать события в данном случае можно уже не на уровне элементов онтологий, а на уровне их формальных контекстов. Здесь можно выделить базовые предопределенные события: добавление /удаление свойства объекта, добавление/удаление объекта и установка/снятие бинарного отношения инцидентности между объектом и свойством. Первые два события свидетельствуют о динамике смыслового содержания контекста, а следующие два о динамике объектного наполнения. Существуют и сложные события, такие как сужение множества свойств и множества объектов контекста или объединение контекстов, которые могут инициироваться как автоматически, так и самим пользователем.

Для определения тенденций развития онтологии или поиска ее наилучшего состояния в пространстве состояний используют различные критерии оценки состояний онтологии. Чаще всего это оценки неполноты, избыточности, структурированности, темпа роста и др. [13]. В качестве мощного инструмента для решения многокритериальных задач оценки состояний онтологии можно использовать метод анализа иерархий Саати [14].

Сравнительный анализ состояний онтологий основан на оценке их семантической близости [15]. По форме функции степени семантической близости при последовательном сопоставлении состояний онтологии можно отслеживать тенденции развития онтологии. Следовательно, АОИ дает возможность решать задачи прогнозирования тенденций развития онтоло-

гий на базе анализа временной последовательности их состояний. В качестве онтологической меры близости можно использовать нормализованную модель Тверски [15]. Модель рассматривает меру близости двух понятий через сопоставление их атрибутов (свойств объектов) как одинаковых, так и различных. Степень близости представим следующей формулой: $\mu(c_a, c_b) = \frac{f(A \cap B)}{f(A \cap B) + \alpha f(A - B) + \beta f(B - A)}$, где α,β - веса свойств; f – некоторая функция определяющая мощность множества аргумента; A – множество свойств понятия c_a и B - множество свойств понятия c_b. Модель Тверски более подходит для онтологической меры близости, чем геометрические модели, поскольку последние теряют наглядность при большом количестве сравниваемых свойств.

2. Объединение онтологий с поддержкой АОИ

Введем понятие пространства состояний онтологии $S = \{s(t)\}$ в форме множества состояний формальных контекстов $s(t) = K(t)$, зафиксированных в моменты времени $t \in T$, где T – произвольный период времени. Формальный контекст, находящийся в некотором состоянии s будет иметь следующий вид: $K_s = (G_s, M_s, I_s)$, где G – множество объектов, M - множество атрибутов; $I \subseteq (G \times M)$ - отношение, задающее наличие у объекта признака m.

Зададим на множестве состояний отношение R со свойствами рефлексивности, ассиметричности и транзитивности. Для оценки двух произвольных состояний онтологий введем следующие правила:

1. $s_a R s_b, K_a = K_b, s_a, s_b \in S \rightarrow s_a = s_b$ - два произвольных состояния онтологии тождественны, если тождественны их формальные контексты.
2. $s_a R s_b, \mu(K_a, K_b) = 1, s_a, s_b \in S \rightarrow s_a = s_b$ - два произвольных состояния онтологии тождественны, если степень семантической близости их формальных контекстов равна 1.
3. $s_a R s_b, \mu(K_a, K_b) = 0, s_a, s_b \in S \rightarrow s_a \neq s_b$ - два произвольных состояния онтологии совершенно разные, если степень семантической близости их формальных контекстов равна 0.
4. $s_a R s_b, K_a \leq K_b, \mu(K_a, K_b) > 0{,}5, s_a, s_b \in S \rightarrow s_a \leq s_b$ - состояние b является смысловым расширением онтологии, находящейся в состоянии a.
5. $s_a R s_b, K_a \geq K_b, \mu(K_a, K_b) > 0{,}5, s_a, s_b \in S \rightarrow s_a \geq s_b$ - состояние b является смысловым сужением онтологии, находящейся в состоянии a.

Определим функцию многокритериальной оценки состояния онтологии как $\omega(s), 0 \leq \omega(s) \leq 1$. Поиск требуемого состояния в пространстве состояний связан с нахождением максимума функции $\omega(s_i) \rightarrow \max \omega(s)$ по заданным критериям.

Первым вопросом, на который нужно ответить при объединении онтологий, удовлетворяют ли их текущие состояния требованиям прикладной задачи. По большей части ответ на данный вопрос остается за человеком, однако дополнительный сервис в форме АОИ не будет лишним. Операция объединения с поддержкой АОИ поможет пользователю определить наилучшие состояния объединяемых онтологий (см. рисунок 1). При крайних значениях их семантической близости $\mu(s_i, s_j) = 1, \mu(s_i, s_j) = 0$ операция объединения не приводит к извлечению новых знаний.

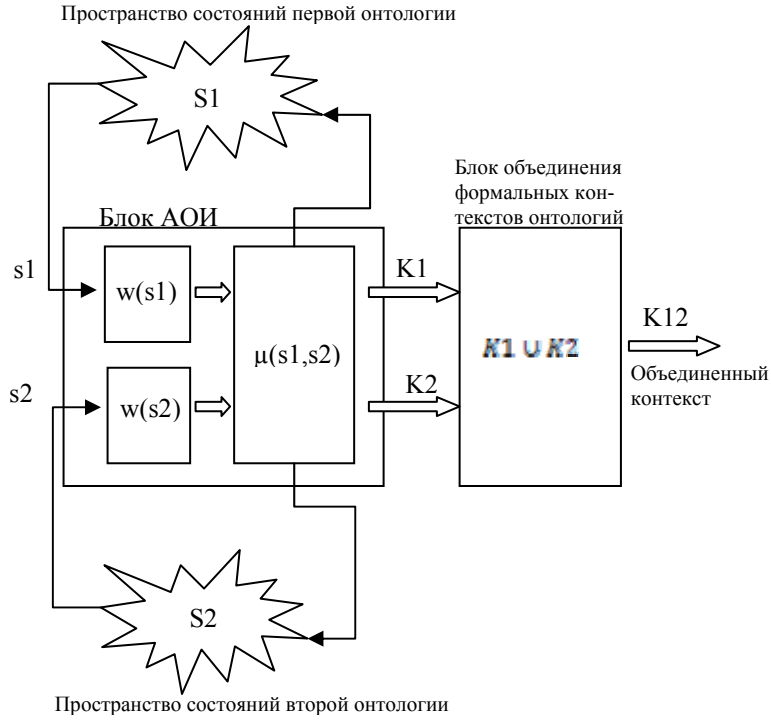


Рисунок 1 – Обобщенная схема процесса объединения онтологий на основе АФП с сервисом АОИ

3. АОИ в задачах анализа потребительских предпочтений

Потребительская проекция отражает рыночный спрос на продукцию. Ее формальное представление в форме онтологии потребительских предпочтений извлекается из формального контекста, составленного по результатам анкетирования фокус-групп потребителей. Онтология дает объективное ранжирование потребительских свойств по степени их важности для потребителя [12]. По различным потребительским проекциям строится множество формальных онтологий. Эти онтологии существуют и развиваются независимо друг от друга, т.е. имеют собственную динамику развития. Комплексный подход к анализу потребительских предпочтений требует создания интегрированного представления из множества независимых онтологий. Формально это достигается с помощью операции объединения онтологий [5]. Выясним, в чем же достигается преимущество АОИ при объединении онтологий. Известно, что под воздействием внешних факторов потребительская проекция со временем меняется, и соответственно меняется и ее онтология. АОИ дает пользователю знания о динамике потребительских предпочтений, что дает возможность прогнозирования состояний потребительской проекции в будущем. Далее с помощью АОИ оценивается качество построения онтологий по критериям избыточности, структурированности, полноты и т.д. Наконец АОИ выявляет скрытые знания при анализе семантической близости различных потребительских проекций в форме онтологий, давая возможность найти такие состояния проекций, при которых семантическая близость между ними максимальна. Обобщенная схема применения АОИ показана на рисунке 2. Социальная проекция представляет структуру потребительских свойств товара в разрезе социального статуса потребителя. В рамках одного и того же социального статуса представления о предпочтениях почти одинаковы. Экономическая проекция отражает потребительские пред-

почтения в ракурсе финансовых возможностей потребителя. Его финансовое состояние определяется бюджетом, размером сбережений, кредитоспособностью и другими характеристиками. Сближение социальной и экономической проекций свидетельствует об увеличении пересечения социальных и экономических представлений о рыночном продукте со стороны потребителя, например, стирание граней между престижностью и стоимостью товара.

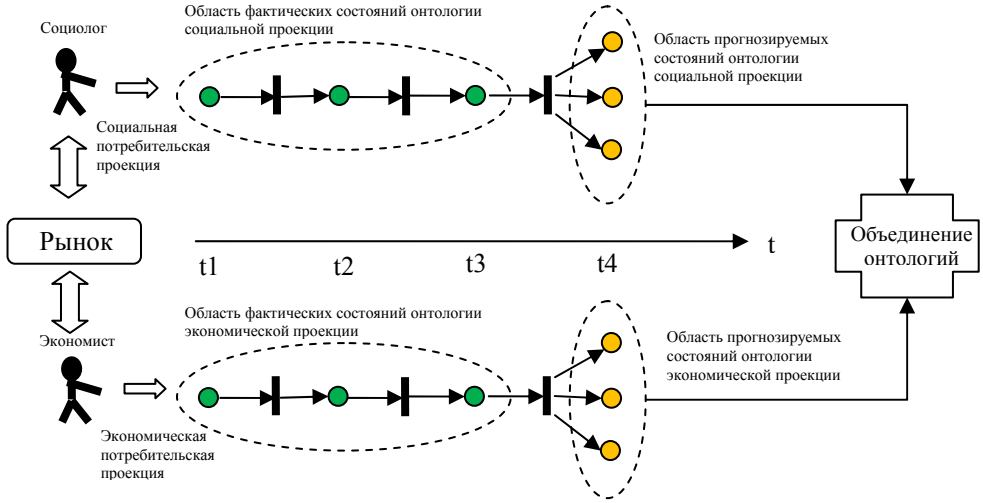


Рисунок 2 – Обобщенная схема развития

График функции степени семантической близости на рисунке 3 демонстрирует динамику изменения сходства/различия объединяемых онтологий. В момент времени t3 на графике максимум их семантической близости.

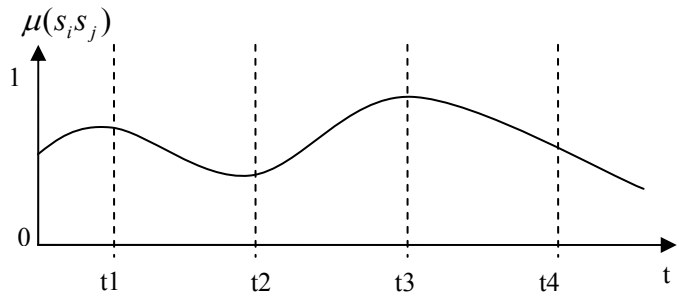


Рисунок 3 – График изменения во времени функции семантической близости онтологий

Заключение

Рассмотрена возможность применения АОИ в процессе интеграции онтологий. Основное достоинство АОИ заключается в анализе динамики развития онтологий и оценке качества их построения. Именно эти его качества могут быть использованы в операциях объединения онтологий.

Дальнейшим развитием работ в сфере интеграции онтологий будет решение проблемы оценки объема извлекаемых знаний. Это даст возможность определить потенциальную значимость интеграции онтологий для прикладных задач.

Список литературы

[1] Stumme G., Maedche A. FCA Merge: Bottom-Up Merging of ontologies. Proc. 17th Intl. Conf on Artifical Intelligence (IJCAI '01). Seattle, WA, USA. 2001, 225-230.

[2] Haase P., Stojanovic, L. Consistent Evolution of OWL Ontologies. Proc. of ESWC. (2005) 182-197

[3] Banerjee J., Kim W., Kim H.J., Korth H. Semantics and implementation of schema evolution in object-oriented databases, In Proceedings of the Annual Conference on Management of Data (ACM SIGMOD 16(3)), San Francisco, pp. 311-322, 1987

[4] Stojanovic L. Methods and Tools for Ontology Evolution //Tag muendlichen Pruefung: 05. Fugest 2004. P.239.

[5] Виноградов И.Д., Смирнов С.В. Алгоритм объединения концептуальных схем на основе реконструкции их формального контекста // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды III международной конференции (4-9 сентября 2001 г., Самара, Россия) – Самара: Самарский НЦ РАН, 2001. - С. 213-220.

[6] Виноградов И.Д., Смирнов С.В. Методика построения онтологий предметных областей в универсуме, представленном реляционной базой данных // Знания – Онтологии – Теории: Материалы Всероссийской конф. с международным участием (8-10 октября 2013 г., Новосибирск, Россия). Т. 1.– Новосибирск: Институт математики СО РАН, 2013. - С. 77-84.

[7] Stumme G. Acquiring Expert Knowledge for the Design of Conceptual Information Systems. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg 1999.

[8] Vogt F., Wille R. TOSCANA – A graphical tool for analyzing and exploring data // Graph Drawing'94. - LNCS 894. - Springer Berlin-Heidelberg: Springer, 1995. - P. 226-233.

[9] Слета В.Д., Сергеев А.С. Построение и эволюция онтологий // Известия ПГНУ им. В.Г. Белинского. 2010. №18(22). С.196-200.

[10] Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. — М: Мир, 1984. — 264 с.

[11] Ganter B., Wille R. Formal Concept Analysis. Mathematical foundations. - Berlin-Heidelberg: Springer, 1999.

[12] Виноградов. И.Д., Виттих В.А., Карпов В.М., Москалюк А.Н., Смирнов С.В. Изучение автомобильного рынка на основе онтологий потребительских предпочтений // Вестник компьютерных и информационных технологий. №1(7). 2005. С. 2-8.

[13] Кучеренко Е.И., Павлов Д.А. О проблемах выявления неполноты и избыточности в онтологических пространствах объектов исследования.- http://shcherbak.net/protivorechivost.

[14] Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. - М.: Радин и связь, 1989. 316 с

[15] Крюков К.В., Панкова Л.А., Пронина В.А., Суховеров В.С., Шипилина Л.Б. Меры семантической близости в онтологии // Control Sciences, N5, 2010. С. 2-14.

ПОСТРОЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ РАЗРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ КОГНИТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ

Г.В. Горелова[1], А.Е. Колоденкова[2], В.В. Коробкин[3]

[1]Южный федеральный университет
347928, Таганрог, пер. Некрасовский, 44, Россия
gorelova-37@mail.ru
тел: +7 (863) 439-42-64

[2]Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия
anna82_42@mail.ru
тел: +7 (347) 273-07-63

[3]Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем
им. академика А.В. Каляева Южного федерального университета
347928, Таганрог, ул. Чехова, 2, Россия
vvk@mvs.sfedu.ru
тел: +7 (863) 431-18-65

Ключевые слова: *когнитивная модель, информационно-управляющая система, оценка реализуемости, импульсное моделирование*

Abstract
Proposed to use the cognitive approach for modeling the functioning of security information-control systems, developed cognitive map also shows some results cognetive simulation, including impulse modeling scenarios of possible developments in the development of information-control systems.

Введение

В настоящее время большой вклад в обеспечение безопасного функционирования высокорисковых промышленных предприятий играют информационно-управляющие системы (ИУС), создаваемые на основе компьютерной техники и подчиняющиеся жестким требованиям по обеспечению безопасности и эффективности их функционирования с целью уменьшения появления аварийных ситуаций, приводящие к экономическим, экологическим или социальным убыткам, потерям. Однако при этом актуальной проблемой на сегодняшний день является принятие управленческих решений руководителем проекта на начальном этапе (предпроектном исследовании) разработки ИУС [1].

Одним из наиболее продуктивных решений проблем, возникающих в области управления и принятия решений при разработке ИУС, является предварительное проигрывание возможных рисковых ситуаций путем когнитивного моделирования [2,4]. Когнитивное моделирование позволяет качественно повышать обоснованность управленческих решений в сложной и быстроизменяющейся обстановке, отражать проблемы системы в модели, исследовать возможные сценарии возникновения опасных ситуаций, а также находить пути их разрешения в модельной ситуации.

В настоящей статье предлагается осуществлять комплексную оценку разработки ИУС на основе когнитивных моделей (карт) в период предпроектного исследования процесса разработки ИУС и импульсного моделирования сценариев возможного развития ситуации на моделях при разработке ИУС, позволяющих проектировать стратегии управления системой, а так-

же принимать решения, в соответствии с диктующими условиями внешней и внутренней среды.

1 Когнитивная карта «Предпроектное исследование процесса разработки ИУС»

Для того чтобы охарактеризовать разработку безопасной функционирующей ИУС, была разработана когнитивная карта (рисунок 1).

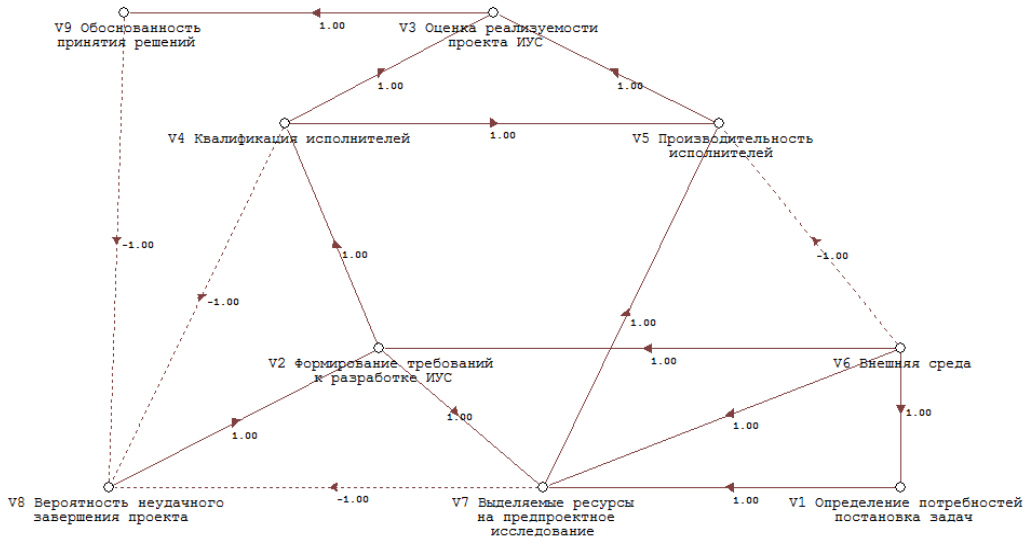


Рисунок 1 – Когнитивная карта «Предпроектное исследование процесса разработки ИУС»

Как известно, когнитивная карта представляет собой взвешенный ориентированный граф

(1) $G = <V, E>$,

где V – вершины графа, $V = \{v_i\}$, $v_i \in V$, $i = \overline{1,k}$; E – дуги графа, $E = \{e_i\}$, $e_i \in E$, $i = \overline{1,k}$.

Сплошные линии и символ «+1» обозначают положительную связь между вершинами V_i и V_j, т.е. увеличение (уменьшение) влияния вершины V_i вызывает увеличение (уменьшение) в вершине V_j, штрихпунктирные линии и символ «–1» означают отрицательную связь между V_i и V_j, т.е. увеличение (уменьшение) влияния вершины V_i вызывает уменьшение (увеличение) в вершине V_j [2].

На рис.1 концепт (вершина) V_1 – это определение потребностей, постановка задач, V_2 – формирование требований к ИУС (выяснение области применения, описания системных сервисов, определение аппаратных ограничений системы и т.д.), V_3 – оценка реализуемости проекта ИУС (сбор, анализ и структурирование информации о проекте в форме, позволяющей принимать решение о способах реализуемости ИУС), V_4 – квалификация исполнителей (уровень образования), V_5 – производительность исполнителей (скорость выполнения работ), V_6 – внешняя (изменения в нормативных документах, нестабильность политики и экономики), V_7 – выделяемые ресурсы (финансовые, временные) на предпроектное исследование, V_8 – возможность неудачного завершения проекта (отставание от графика работ, провал проекта, оценка рисков), V_9 – обоснованность принятия управленческих решений.

После разработки когнитивной карты был проведен ее анализ согласно разработанной когнитивной методологии [2,4]. Так, анализ структурной устойчивости показал, что система, представленная когнитивной картой, структурно устойчива, так как все ее 5 (нечетное число) циклов – отрицательные. Но система не устойчива ни по возмущению, ни по начальному зна-

чению, поскольку имеются корни характеристического уравнения матрицы отношений когнитивной карты больше единицы: max $|M| = 1{,}24$.

2 Примеры импульсного моделирования когнитивной карты «Предпроектное исследование процесса разработки ИУС»

Для того, чтобы проанализировать возможные сценарии развития ситуаций при разработке ИУС, отображенной когнитивной картой, было проведено их импульсное моделирование, позволяющее выявлять возможные сценарии развития ситуаций – от пессимистичных, до оптимистичных.

Далее приведены примеры наиболее характерных сценариев развития ситуаций, связанных с разработкой ИУС и дан их анализ.

Сценарий №1. Импульс поступает в **одну** вершину. Зададимся вопросом: «Что будет, если уменьшится количество оценок реализуемости проекта, $q_3 = -1$?» Это первоначально моделируется одноразовым единичным импульсом $q_3 = -1$, в остальные вершины возмущения не вносятся, т.е. вектор возмущений $Q = \{0,0,-1,0,0,0,0,0,0\}$, а начальные значения во всех вершинах полагаются нулевыми. Тенденции изменения сигналов в вершинах представлены на рисунке 2, где по оси абсцисс отмечены такты моделирования n, по оси ординат – величины импульсов, генерируемых в вершинах под влиянием анализируемых возмущающих воздействий.

Заметим, что в целях наглядности изображения графики импульсных процессов разбиты по 4 вершинам, при этом представлены результаты такого количества тактов моделирования, которое отражает тенденции изменений. Дальнейший вычислительный эксперимент показал, что на последующих тактах тенденции нарастания, убывания, колебания не меняются.

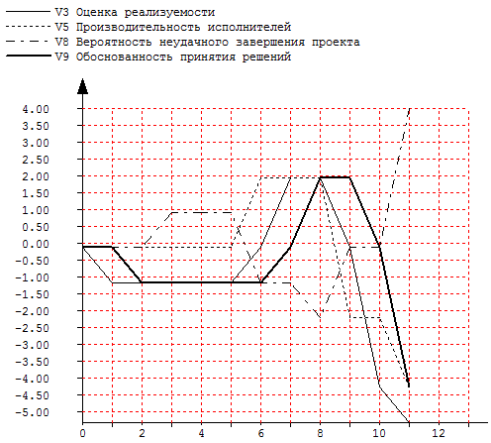


Рисунок 2 – Сценарий №1: уменьшается количества оценок реализуемости проекта

Рисунок 3 – Сценарий №2: увеличивается количество требований к разработке ИУС, уменьшаются ресурсы на предпроектное исследование

Из рисунка 2 видно, что при уменьшении количества оценок реализуемости проекта наблюдается тенденция ухудшения обоснованности принятия решений и увеличения вероятности неудачного завершения проекта. Это подтверждает необходимость проведения большого количества оценок реализуемости проекта.

Сценарий №2. Импульс поступает в **две** вершины. «Что будет, если увеличивается количество требований к разработке ИУС $q_2 = +1$, уменьшаются ресурсы на предпроектное исследование ($q_7 = -1$)?» (рисунок 3). Из рисунка 3 видно, что при увеличении количества требований к разработке ИУС и уменьшении ресурсов на предпроектное исследование, наблюдается тенденция увеличения вероятности неудачного завершения проекта и ухудшения обоснован-

ности принятия решений. Однако при увеличении ресурсов на предпроектное исследование, наблюдается тенденция увеличения обоснованности принятия решений.

3 Композиция когнитивных моделей, разработка параметрического векторного функционального графа

Объединение существующих технологий разработки когнитивных моделей разных типов нам представляется возможным в общей модели причинно-следственных связей – когнитивной модели в виде параметрического векторного функционального графа (2) [3, 4], матрица которой содержит и блоки в виде «простой» когнитивной карты (знаковый ориентированный граф, например, рисунок 1), и блоки, содержащие функциональные связи:

(2) $\Phi_{\text{п}} = << V, E >, X, F, \theta >$,

где $G = <V, E>$ – знаковый ориентированный граф;

$X = \{x_i\}$ – множество параметров вершин;

$F = f(v_i, v_j, e_{ij})$ – функция связи между вершинами;

θ – пространство параметров вершин.

Модели (2) соответствует матрица отношений, например, в виде (3)

$$(3)\quad A_G = \begin{array}{c|cccccc} & V_1 & V_2 & \dots & V_j & \dots & V_m \\ V_1 & 0 & 1 & \dots & b_0 + b_j x_j & \dots & 1 \\ V_2 & -1 & 0 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_i & 0 & f(v_i, v_j, e_{ij}) & \dots & ax^j & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_m & -1 & f_{ij} & \dots & 1 & \dots & 0 \end{array},$$

где f_{ij} – это функциональная зависимость параметров вершин, которая ставится в соответствии каждой дуге;

$$(4)\quad f(v_i, v_j, e_{ij}) = \begin{cases} +f_{ij}, \text{ если } \textit{рост}\ (\textit{падение})\ x_i \text{ влечет за собой } \textit{рост}\ (\textit{падение})\ x_j; \\ -f_{ij}, \text{ если } \textit{рост}\ (\textit{падение})\ x_i \text{ влечет за собой } \textit{падение}\ (\textit{рост})\ x_j. \end{cases}$$

Причем данная зависимость может быть не только функциональной, но нечеткой (в виде нечеткого треугольного числа) и стохастической. Кроме того, в более простом варианте она может существовать как «коэффициент усиления» $f_{ij} = w_{ij}$

$$f(v_i, v_j, e_{ij}) = \begin{cases} +w_{ij}, \text{ если } \textit{рост}\ (\textit{падение})\ x_i \text{ влечет за собой } \textit{рост}\ (\textit{падение})\ x_j; \\ -w_{ij}, \text{ если } \textit{рост}\ (\textit{падение})\ x_i \text{ влечет за собой } \textit{падение}\ (\textit{рост})\ x_j. \end{cases}$$

Отметим, что при разработке когнитивной модели в виде (2) часть ее (подграф) может быть построена по статистическим данным об объекте, часть – на основании обработки экспертных, нечетких и теоретических данных.

Композиция когнитивных моделей разработана по схеме «сверху», т.е. на начальном этапе разрабатывается когнитивная модель в виде когнитивной карты *G,* которая в дальнейшем уточняется и достраивается функционального графа $\Phi_{\text{п}}$, когда в структуру включаются не только качественные факторы, но и количественные, например, производительность исполнителей, объем запросов, ответов и т.п.

Данный принцип моделирования был применен при предпроектном исследовании процесса разработки ИУС и стратегии снижения рисков, приводящих к провалу проекта.

4 Анализ расширенной когнитивной модели «Предпроектное исследование процесса разработки ИУС»

На рисунке 4 представлена диаграмма причинно-следственных связей, соответствующая формулам расчета затрат времени на создание ПО ИУС без учета времени на согласование [5].

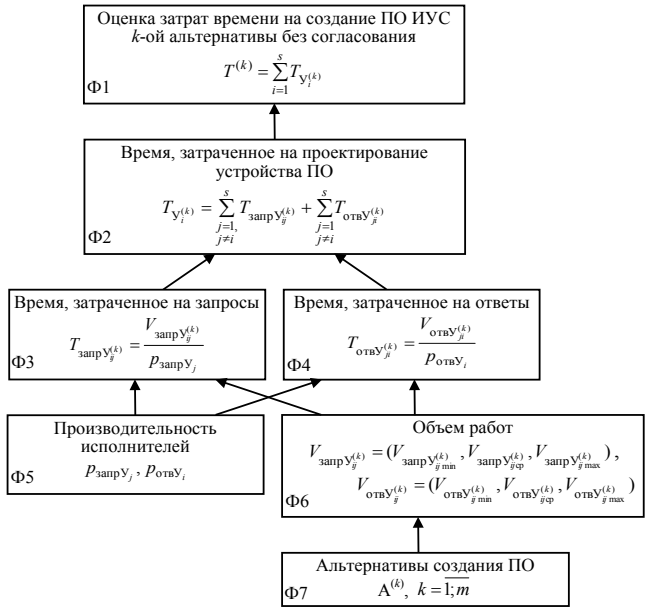


Рисунок 4 – Диаграмма причинно-следственных связей, соответствующая расчету затрат времени на создание ПО ИУС

На рисунке 5 изображена когнитивная карта, соответствующая диаграмме причинно-следственных связей.

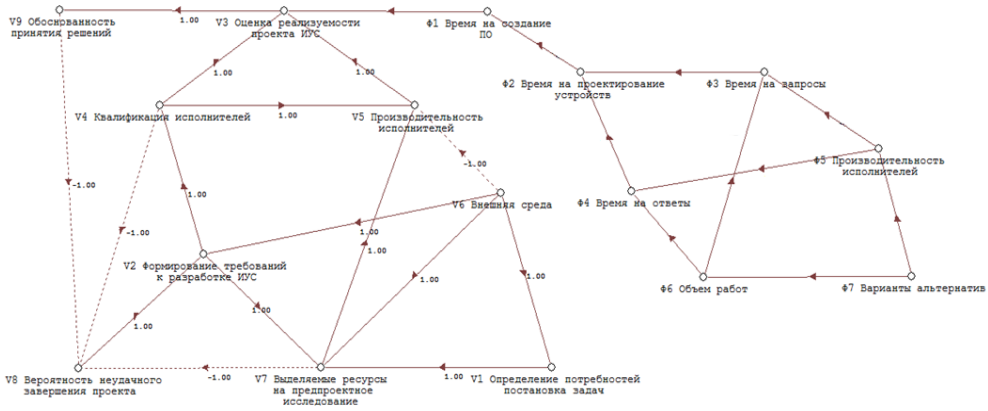


Рисунок 5 – Расширенная когнитивная модель «Предпроектное исследование процесса разработки ИУС»

Заметим, что вершину производительность исполнителей V5 и Ф5 можно объединить в одну, а также возможны (допускаются) другие связи между когнитивной картой G и параметрическим векторным функциональным графом $\Phi_п$.

На рисунке 6 представлен один из сценариев развития ситуации, связанной с разработкой ИУС, отображенной расширенной когнитивной моделью «Предпроектное исследование процесса разработки ИУС».

Сценарий №1. Зададимся вопросом: «Что будет, если увеличивается количество требований к разработке ИУС $q_2 = +1$, уменьшаются ресурсы на предпроектное исследование ($q_7 = -1$)?». При этом задан некоторый вектор начального состояния V(н), т.е. V_3(н) = {0,0,24,0,0,0,0,0,0}, где V_3(н) = 24 (время создания ПО).

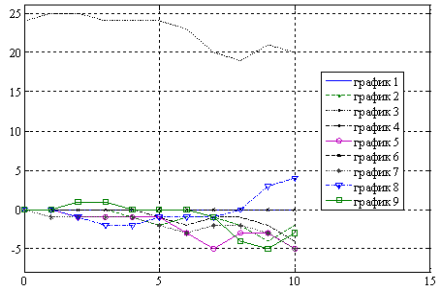


Рисунок 6 – График изменения значения вершин расширенной когнитивной модели

Здесь график 1 соответствует вершине 1 (V1), график 2 – V2, график 3 – V3 и т.д. Из рис. 6 видно, что значения весов вершин орграфа стремятся к некоторому постоянному значению, что свидетельствует об устойчивости системы.

Заключение

Таким образом, согласно приведенным примерам основных результатов импульсного моделирования (рис. 2, 3, 6) можно заключить, что разрешение ситуации провала проекта, может быть достигнуто на этапе предпроектного исследования. Использование инструментария когнитивного моделирования повышает обоснованность принятия управленческих решений руководителем проекта в быстроизменяющейся обстановке при создании ИУС, тем самым снижая риск человеческого фактора.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-06129 а).

Список литературы

[1] Коробкин В.В., Колоденкова А.Е. Один из подходов к оценке безопасности и рисков информационно-управляющих систем для атомных станций // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 (http://vspu2014.ipu.ru/ node/8581.pdf).

[2] Горелова Г.В., Мельник Э.В. О когнитивном моделировании развития ситуаций в регионе в условиях быстрых изменений среды и противодействия // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. Т. 116, №3. С. 65-78.

[3] Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. – М.: Наука, 1986.

[4] Горелова Г.В. Когнитивный подход к имитационному моделированию сложных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3. С. 239-250.

[5] Колоденкова А.Е. Оценка рисков создания программного обеспечения информационно-управляющих систем для высокорисковых промышленных предприятий в условиях интервальной неопределенности исходных данных // Вестник УГАТУ. 2015. №1 (67). С. 190-197.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СЛОЖНОСТИ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТРАССЫ

Д.Н. Демьянов

Казанский (Приволжский) федеральный университет
423812, Набережные Челны, пр. Сююмбике, 10А, Россия
demyanovdn@mail.ru
тел: +7 (8552) 39-71-40, факс: +7 (8552) 39-59-72

Ключевые слова: *автомобильная трасса, продольный профиль, оценка сложности, нечёткая логика, алгоритм*

Abstract

In the presented work the problem of estimating the complexity of highways by analyzing the characteristics of its longitudinal profile is considered. We propose an algorithm based on the use of fuzzy logic, which allows to make a reasonable conclusion about the degree of difficulty of the concerned route and compare the complexity of two routes of the same length in accordance with results of fuzzy calculations of the reference points heights. The results can be used in practice to select the optimal route of vehicle movement.

Введение

Пассажирские и грузовые перевозки с использованием автомобильного транспорта играют огромную роль в современной экономике. Целый ряд особенностей автотранспортных средств делает их фактически незаменимыми при перемещении малых групп пассажиров и сравнительно небольших объёмов груза на малые и средние дистанции. При этом в условиях жестокой конкуренции между перевозчиками неуклонно повышаются общие требования к срокам доставки при одновременном снижении себестоимости. Всё это приводит, в том числе, и к необходимости совершенствования алгоритмов, предназначенных для решения задачи маршрутизации.

Под задачей маршрутизации в общем случае понимается проблема выбора из заданной совокупности возможных маршрутов одного, наилучшего по некоторому критерию или совокупности критериев. За последние десятилетия разработано огромное количество алгоритмов решения этой задачи, основанных на применении различных математических методов [1]. Однако, большая часть разработанных алгоритмов ориентируется лишь на один критерий – общую длину маршрута, сводя проблему к решению задачи выпуклой оптимизации. Такая сугубо математическая постановка, с одной стороны, существенно облегчает поиск решения, но, с другой стороны, может приводить к получению результата, реализация которого на практике затруднительна. Особенно ярко это проявляется при использовании классических алгоритмов выбора маршрута в городских условиях – полученный результат, как правило, не учитывает особенности трассы (состояние, количество полос, количество перекрёстков и т. д.) а также её динамические характеристики (например, изменение загруженности отдельных участков с течением времени).

Схожая ситуация возникает и при прокладывании междугородних маршрутов: ориентация только лишь на один формальный показатель (длина трассы) без учёта остальных факторов может привести к получению далеко не оптимального результата. Например, формально более короткая дорога может быть более извилистой, что не позволит развить высокую скорость, и иметь сложный продольный профиль, что приведёт к повышенным затратам топлива на преодоление подъёмов.

Таким образом, можно считать весьма актуальной задачу выбора маршрута движения с учётом особенностей автомобильной трассы.

1 Постановка задачи

В общем случае автомобильная трасса характеризуется значительным числом различных разнотипных показателей, учёт которых является сложной задачей, требующей нетривиального подхода. В настоящей работе рассматривается задача выбора наилучшего маршрута движения с учётом особенностей продольного профиля автомобильной трассы. Сделанный выбор обусловлен тем фактом, что именно продольный профиль в большей степени определяет общую силу сопротивления движению, а следовательно, и топливную экономичность. Кроме того, при прокладке и модернизации трасс изменение продольного профиля является наиболее затруднительным, так как связано с выполнением большого объёма земляных работ.

В качестве примера на рисунке 1 представлен продольный профиль участков федеральных трасс М10 «Россия» и М29 «Кавказ» длиной 100 километров. Очевидно, что движение по первому участку может происходить с гораздо большей средней скоростью и меньшим расходом топлива, чем по второму. Безусловно, профили автомобильных дорог, соединяющих два населённых пункта, как правило, не столь сильно различаются между собой. Однако, во многих случаях это различие весьма существенно и может повлечь статистические значимые дополнительные затраты топлива при выборе более пересечённого маршрута.

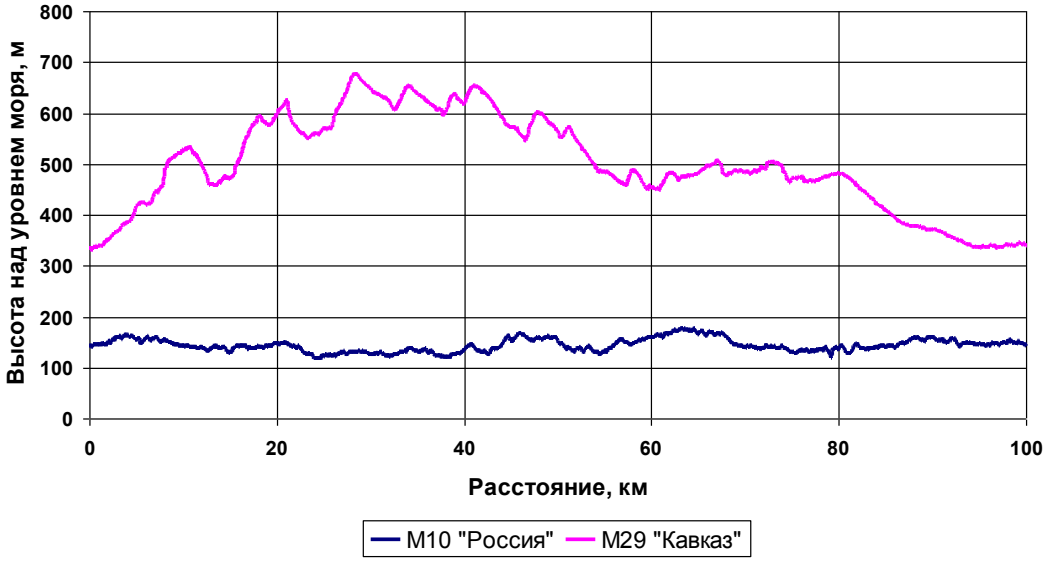


Рисунок 1 – Продольные профили участков двух федеральных автомобильных трасс

Известно достаточно много алгоритмов и методик нахождения числовых показателей, характеризующих сложность продольного профиля трассы, её пересечённость и помехонасыщенность [2]. Однако, в большинстве своём они сводятся либо к определению обобщённых интегральных характеристик (например, перепад высот между начальной и конечной точками трассы), либо требуют весьма точных измерений высоты над уровнем моря всех точек трассы (например, определение математического ожидания уклона). В первом случае полученные результаты позволяют судить о сложности трасы лишь приближенно, а во втором случае получение исходных данных является весьма трудоёмкой задачей, требующей больших финансовых и временных затрат.

Бурное развитие современных информационно-коммуникационных технологий, в частности, технологии спутникового позиционирования, позволило существенно снизить затраты на получение исходных данных о профилях изучаемых трасс. Однако, заявляемая точность определения высот для большинства серийно выпускающихся автомобильных GPS/ГЛОНАСС навигаторов и трекеров составляет несколько метров [3], а использование результатов таких измерений для определения числовых показателей, характеризующих сложность продольного профиля трассы, может привести к получению некорректных показателей.

В сложившейся ситуации задача исследования может быть сформулирована в общем виде следующим образом: требуется разработать алгоритм оценки сложности продольного профиля автомобильной трассы, используя результаты неточных измерений координат и высот отдельных её точек, а также алгоритм сравнения сложностей продольного профиля нескольких трасс между собой.

2 Получение исходных данных

Как уже отмечалось выше, погрешность измерения высоты при использовании современного серийно выпускающегося GPS/ГЛОНАСС оборудования может составлять несколько метров. На практике это означает, что при расстоянии 100 метров между соседними опорными точками погрешность измерения уклона может составлять десятки промилле. Учитывая, что рекомендуемые значения продольных уклонов автомобильных трасс не превосходят 40 промилле [4], получаемые результаты могут сильно искажаться и не отражать реальной картины.

Известно, что погрешность позиционирования с использованием GPS/ГЛОНАСС в большей степени является случайной, а не систематической [5]. Поэтому для снижения влияния случайных погрешностей предлагается многократное проведение измерений с последующим усреднением полученных результатов.

Ещё одной проблемой является то, что координаты опорных точек, получаемых в серии заездов, не совпадают друг с другом. Это обусловлено как погрешностями измерения, так и реальными отклонениями в процессе движения, вызванными изменением дорожной ситуации. В этих условиях имеет смысл осуществлять пересчёт координат опорных точек и определение высот промежуточных точек, чьи координаты являются фиксированными.

Учитывая приведённые выше соображения, можно предложить следующий алгоритм получения продольного профиля трассы для последующего анализа и обработки.

1) Зафиксировать координаты начальной и конечной точек трассы с максимальной возможной точностью (при наличии в зоне видимости наибольшего числа спутников).
2) Провести серию заездов в прямом и обратном направлении, сформировать набор треков с информацией о координатах и высотах опорных точек.
3) Для каждого трека рассчитать пройденное автомобилем расстояние по формуле гаверсинусов и определить зависимость высот опорных точек от пройденного пути.
4) Для каждого трека провести интерполяцию полученного профиля трассы кубическими сплайнами.
5) Для каждого трека рассчитать значения высоты в опорных точках регулярной сетки (с фиксированным расстоянием по горизонтали).
6) Определить среднее значение высоты и дисперсию для каждой точки регулярной сетки.
7) Провести обработку полученных результатов методами математической статистики, при необходимости удалить из выборки треки с резко выделяющимися результатами и вернуться на шаг 6.
8) Выбрать в качестве продольного профиля исследуемой трассы найденные усреднённые значения зависимости высоты точек регулярной сетки от пройденного расстояния.

Очевидно, что для получения более достоверного результата требуется провести как можно больше заездов.

По имеющимся данным о зависимости высот опорных точек от пройденного автомобилем расстояния осуществляется построение нормированной гистограммы уклонов трассы. Для её формирования следует выполнить следующие операции.

1) Для каждого участка трассы между двумя опорными точками рассчитать уклон трассы с учётом знака.
2) Определить наибольший и наименьший уклон участка трассы.
3) Определить количество интервалов и их границы, используя методы математической статистики (например, применив правило Стёрджеса).
4) Для каждого интервала определить количество участков трассы, уклон которых находится в пределах границ интервала.
5) Для каждого интервала определить долю входящих в него участков, разделив полученные ранее значения на общее число участков.

На рисунке 2 представлен результат выполнения описанного выше алгоритма для обработки усреднённого продольного профиля автомобильной трассы между городами Набережные Челны и Мензелинск.

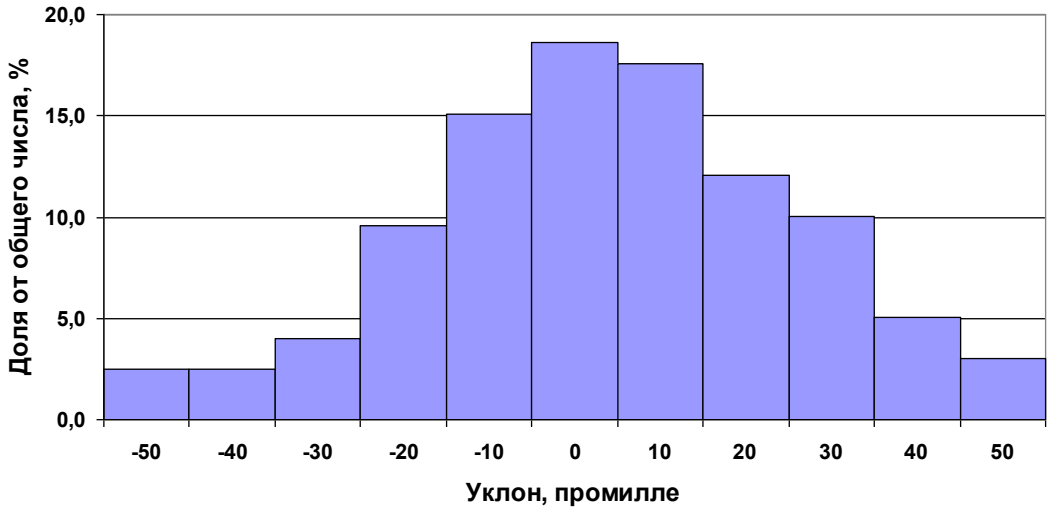


Рисунок 2 – Нормированная гистограмма уклонов трассы Набережные Челны - Мензелинск

Полученная таким образом нормированная гистограмма уклонов позволяет в дальнейшем существенно снизить объём данных, подлежащих анализу, сохраняя при этом наиболее важные с практической точки зрения сведения о профиле рассматриваемой трассы. Кроме того, её использование позволяет анализировать трассы с учётом только лишь особенностей их продольного профиля вне зависимости от общей длины.

3 Алгоритм оценки сложности трассы

Даже после предварительной обработки и усреднения результатов, полученный на начальном этапе продольный профиль автомобильной трассы является сильно зашумлённым, а построенная на его основе нормированная гистограмма уклонов описывает реальную трассу лишь приближенно, поэтому для дальнейшего анализа в настоящей работе предлагается использование аппарата нечёткой логики. Показано, что именно её применение является наиболее эффективным в задачах, связанных с обработкой данных в условиях неполноты и неточности сведений об окружающей среде и изучаемом объекте [6].

Прежде всего, требуется определить основные характеристики продольного профиля автомобильной трассы, наиболее важные с точки зрения топливной экономичности и безопасности движения. По результатам анализа экспертных оценок таковыми были признаны следующие показатели:

- доля горизонтальных участков и участков с пренебрежимо малым продольным уклоном;
- доля подъёмов с достаточно большим продольным уклоном (требующим переключения передачи);
- доля спусков, при движении с которых приходится задействовать тормозную систему;
- среднее значение продольного уклона;
- наибольшая крутизна подъёмов и спусков.

Описанные показатели были формализованы с использованием параметров нормированной гистограммы уклонов трассы. В качестве таковых параметров были использованы:

- значение функции в интервале около нуля;
- среднее значение;
- медиана распределения;
- максимальное по модулю значение;
- минимальное по модулю значение;
- доля участков с уклоном, превышающим рекомендованные нормативами показатели.

Для дальнейшего анализа полученных параметров в рамках идеологии нечёткого управления требуется представить их в форме лингвистических переменных. Для этих целей используется процедура фаззификации, при которой для каждого параметра определяется степень его принадлежности к определённым термам. В рамках настоящей работы для каждого параметра нормированной гистограммы уклонов определяется три терма, функция принадлежности имеет треугольный вид.

В качестве выходной величины будем использовать понятие сложности продольного профиля трассы. Это лингвистическая переменная, характеризующаяся семью термами, функция принадлежности имеет треугольный вид. Соответствующее ей точное значение будем называть в дальнейшем коэффициентом сложности продольного профиля трассы.

Путём анализа и обобщения опыта экспертов была сформулирована база правил, позволяющая по лингвистическим значениям параметров нормированной гистограммы уклонов трассы определить оценку сложности продольного профиля, используя алгоритм нечёткого логического вывода. Полученная оценка может быть использована непосредственно в процессе выбора одного маршрута движения из множества допустимых альтернатив в том случае, когда трассы существенно отличаются друг от друга по параметрам продольного профиля и достаточно близки по остальным показателям. В случае необходимости для получения конкретного числового значения коэффициента сложности можно воспользоваться одним из наиболее известных методов дефаззификации, например, методом центра тяжести.

Основные этапы алгоритма для оценки сложности продольного профиля автомобильной трассы представлены на рисунке 3.

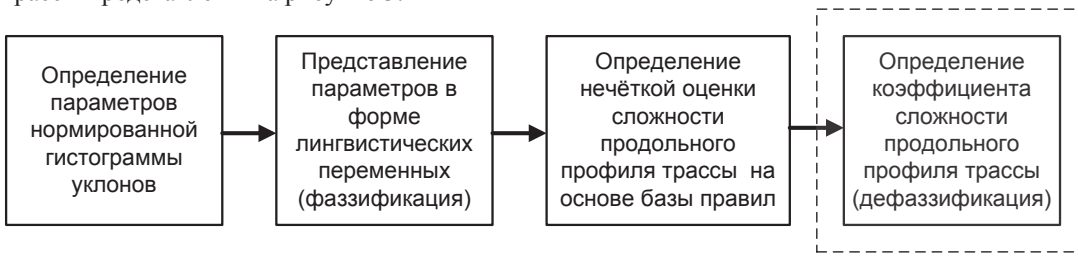


Рисунок 3 – Этапы оценивания сложности продольного профиля трассы

Представленный алгоритм может быть использован как для непосредственной оценки сложности выбранной трассы, так и для сравнения нескольких трасс между собой. В этом случае вводится дополнительный этап, на котором происходит либо попарное сравнение нечётких оценок сложности продольных профилей всех рассматриваемых трасс, либо сравнение коэффициентов сложности трасс с выбором наименьшего значения. Схема второго варианта реализации алгоритма представлена на рисунке 4.

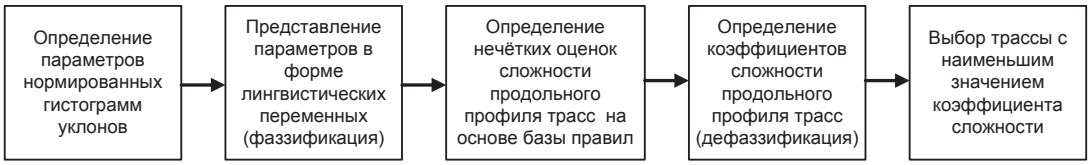


Рисунок 4 – Этапы процедуры выбора трассы с наименее сложным продольным профилем

Приведённый алгоритм может быть использован не только для сравнительного анализа продольного профиля трасс, но и для решения задачи маршрутизации. В случае, когда остальные параметры сравниваемых трасс (длина, количество полос, состояние дорожного полотна) достаточно близки, выбор трассы с наиболее простым продольным профилем позволит сэкономить топливо, обеспечить меньшую аварийность и износ узлов и агрегатов автомобиля, повысить комфортность труда водителей.

Заключение

В представленной работе предложен нечёткий алгоритм оценивания сложности продольного профиля автомобильной трассы по результатам серии неточных спутниковых измерений координат и высот опорных точек. Предложенный алгоритм позволяет оценивать рассматриваемую трассу как качественно, так и количественно, а также сравнивать сложность продольного профиля двух трасс между собой. Полученный результат может быть использован для решения задач выбора оптимального маршрута движения транспортного средства, а также для разработки более эффективных алгоритмов маршрутизации. В ходе дальнейших исследований планируется дополнить полученный алгоритм возможностью учёта извилистости трассы, количества полос, количества дорожных знаков и иной значимой информации, а также параметров самого автомобиля (динамический фактор, характеристики коробки передач и т. д.).

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-08-00651).

Список литературы

[1] Зак Ю. А. Прикладные задачи теории расписаний и маршрутизации перевозок. – М.: Либроком, 2012. – 394 с.
[2] Нефедов А. Ф., Высочин Л. Н. Планирование эксперимента и моделирование при исследовании эксплуатационных свойств автомобилей. – Львов: Изд-во при Львов. ун-те, 1976. – 160 с.
[3] GPS-CLUB [Электронный ресурс]: Сообщество любителей и профессионалов GPS-CLUB // ООО «Восход». URL: http://www.gps-club.ru (дата обращения 28.03.2015).
[4] СНиП 2.05.02-08. Автомобильные дороги / Система нормативных документов в строительстве. – М.: Центр метрологии стандартизации и нормирования в строительстве, 2008.
[5] Песков Ю. А. Морская навигация с GPS/ГЛОНАСС. – М.: Моркнига, 2010. – 148 с.
[6] Васильев В. И., Ильясов Б. Г. Интеллектуальные системы управления: теория и практика. – М.: Радиотехника, 2009. – 392 с.

ОНТОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА MTQFD

А.Я. Дмитриев[1,2], Т.А. Митрошкина[1]

[1]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (Национальный исследовательский университет)» 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34
dmitriev57@rambler.ru
тел.: +7 (927) 7021155

[2]Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарская государственная областная академия (Наяновой)»
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 196,
t.mitroshkina@gmail.com
тел.: +7 (927) 2612663

Ключевые слова: *модель, идентификация качества, QFD, развертывание функции качества, онтология, база знаний, менеджмент знаний, MTQFD, матричный метод QFD*

Abstract
The article covers the specifics of product quality design. There is proposed a new MTQFD method for improving product quality and competitive performance. The article summarises experience and results of product and manufacture processes design based on the ontological approach.

Введение

Эффективное управление качеством продукции и услуг на основе реализации принципа ориентации на потребителя – является на современном этапе важнейшим направлением повышения конкурентоспособности продукции и предприятий на международном уровне. В условиях глобализации рынка потребитель становится более опытным и требовательным, что в свою очередь вынуждает разработчиков сокращать сроки вывода на рынок новой или модернизированной продукции. В то же время применение устаревших методов не позволяет разработчикам сложных технических систем использовать огромную базу знаний по проектированию продукции и технологических процессов, накопленную за долгие годы деятельности. Достаточно часто знания не структурированы, проектирование продукции и разработка технологических процессов ведутся неэффективно. Не редки случаи, когда разработанная или модернизированная продукция появляется настолько поздно, что уже не нужна потребителю.

Целью работы является повышение качества и конкурентоспособности продукции за счет проектирования продукции и технологических процессов на основе онтологического подхода и эффективного применения метода развертывания (структурирования) функции качества QFD. Для достижения установленной цели необходимо решение следующих задач исследования: создание модели процесса идентификации качества как решения обратной некорректно поставленной задачи на основе онтологического похода и метода развертывания функции качества с усовершенствованным математическим аппаратом; разработка устойчивого матричного метода MTQFD (Matrix Technique QFD) определения приоритетов и артефактов изменения характеристик продукции и параметров технологических процессов; разработка методики учета информации с опорой на интерсубъективный подход и учетом погрешности входной информации на основе метода MTQFD (Matrix Technique QFD).

1 Онтологический подход в международных стандартах менеджмента качества

Проектирование и разработка онтологий (онтологический инжиниринг) – основа концепции менеджмента знаний (КМ - Knowledge Management) – на настоящий момент наиболее перспективный подход к управлению сложными "информационно наполненными" системами. Разработка систем менеджмента знаний включает несколько этапов: накопление, извлечение, структурирование, формализация и программная реализация, обслуживание. На данный момент разработано достаточно много онтологий (онтологических моделей) для описания и управления сложными системами в самых различных предметных областях - от искусственного интеллекта, медицины, интернет-технологий, до систем управления организациями, отдельных видов деятельности и продукции.

Разработке онтологий предшествует онтологический анализ, который может быть двух типов: исследующий существующую сложную систему (в результате – онтологии предметных областей) или опирающийся на абстрактные понятия, математические методы и походы (в результате – методо-ориентированные онтологии) [1].

Основная задача онтологического подхода – упорядочение знаний путем их систематизации, создания единой иерархии понятий, унификации терминов и правил интерпретации - отвечает общей цели повышения эффективности проектирования продукции в соответствии с требованиями и ожиданиями потребителя. Методология онтологического инжиниринга позволит оптимизировать процесс проектирования продукции с учетом не только требований и ожиданий потребителей, но и накопленной базы знаний разработчика.

Современные международные стандарты на системы менеджмента, включая стандарт на систему менеджмента качества ISO 9001, разрабатываются с использованием единого подхода и требуют управления базами знаний организаций. Так, новая версия стандарта ISO 9001 (ISO 9001:2015) разработана в соответствии с приложением к директиве ISO Annex SL (ISO/IEC Directives, Part 1 Consolidated ISO Supplement – Procedures specific to ISO). Директива устанавливает новый, единый стандарт для систем управления (не только ISO 9001, но и для других систем менеджмента), в соответствии с которым все стандарты систем управления будут приведены к единой структуре, и будут содержать единые названия разделов.

Пункт 7.1.6 ISO 9001:2015 «Знания организации» в проекте стандарта ISO 9001:2015 содержит требования по управлению базой знаний: определить знания, необходимые организации для реализации процессов и достижения соответствия продукции и услуг; информация должна храниться и быть доступной в той степени, в которой это необходимо; при изменении потребностей и тенденций, организация должна проанализировать комплекс существующих знаний и выработать методы получения новых знаний. Интеграция в ISO 9001 требований в области управления знаниями и внедрение риск-менеджмента являются основными направлениями обновления стандарта и приведения его к современному уровню развития управленческой науки.

2 Идентификация качества продукции на основе метода развертывания функции качества

Идентификация (определение) качества – ключевая задача обеспечения качества, от решения которой зависят дальнейшие этапы жизненного цикла продукции и в конечном итоге конкурентоспособность организации. В теории управления под идентификацией системы понимают определение структуры системы и ее параметров путем анализа входных и выходных данных системы. В работе основное внимание уделено структурной и параметрической идентификации с использованием современных методов управления качеством.

Методом идентификации качества и прямого воплощения требований потребителя в непосредственные характеристики новой (или модернизируемой) продукции является метод развертывания функции качества (Quality Function Deployment, QFD). Целью применения метода

является преобразование голоса потребителя (требований и ожиданий) в технические характеристики продукции и рабочие инструкции, визуализация, документирование и планирование качества продукции. Основным элементом метода QFD является именно развертывание требований потребителя в производстве и достижение соответствующих технических характеристик, отвечающих ожиданиям потребителя. То есть речь в данном случае идет о подготовке производства к выпуску нового изделия [2].

При реализации QFD и идентификации качества новой и сложной продукции трудности возникают в связи с тем, что задача идентификации качества, по сути, является обратной. Необходимо определить качество проектируемой продукции или услуги (причину) по высказанной или проявленной удовлетворенности (следствие). В отличие от решения прямых задач, решение задач, состоящих в обращении причинно-следственных связей (обратных задач), связано с преодолением определенных математических трудностей (особенно в случае, когда количество требований меньше количества характеристик). Успех решения обратных задач сильно зависит как от качества и количества исходной информации, так и от способа ее обработки. В то же время задача идентификации качества продукции и услуг является некорректной, так как не выполняются условия корректной постановки задачи: пространство исходных данных нестатично, для близких исходных данных существует множество решений и т.д. Некорректность также проявляется в высокой изменчивости требований во времени, неоднозначности невысказанных ожиданий и т.д. [3].

Таким образом, основными недостатками или ограничениями существующих подходов к идентификации качества на основе развертывания функции качества являются:

1) Сложность математического аппарата, трудоемкость вычислений и ограниченность возможного количества исходных данных. Наиболее часто для практических целей используется только I-II уровни QFD. В России QFD остается на настоящий момент в большей степени инструментом для научно-исследовательских работ.

2) Не учитывается некорректность задачи и наличие большого количества дополнительной информации: риск, погрешность исходной информации и т.д.

Для преодоления указанных сложностей была поставлена задача создания модели процесса идентификации качества как решения обратной некорректно поставленной задачи на основе метода развертывания функции качества с усовершенствованным математическим аппаратом.

3 Модель идентификации качества продукции на основе QFD и онтологического подхода

В развернутом виде QFD включает четыре уровня, и на каждом из них строится свой Дом качества (House of Quality, HoQ). После преобразования потребительских характеристик в технические (I уровень), последние преобразуются в характеристики компонентов (II уровень), далее – в параметры процессов (III уровень), а затем в требования к исполнению операций (IV уровень). Стандартный алгоритм реализации QFD включает постоянное обращение к базе знаний разработчика (таблица 1).

Для эффективного применения метода предлагается структуризация знаний и использованием онтологического подхода.

Стандартный подход к проектированию продукции подразумевает выбор концепции и определение технических характеристик продукции. При этом зачастую автором технического задания на проектирование является сам разработчик. Таким образом, учитывается база знаний в части класса «Концепция продукции» и атрибутов «Характеристики продукции».

В свою очередь, онтологическая модель проектирования качества продукции на основе метода QFD в первую очередь учитывает класс «Требования потребителя» (рисунок 1).

Таблица 1 – Обращение к базе знаний на основных этапах реализации QFD

Основные этапы реализации QFD	Обращение к разделу базы знаний
Формирование команды QFD	Методология формирования команд. База специалистов (включая персональные качества и навыки)
Уточнение и ранжирование требований потребителей	Маркетинговые исследования, модель Кано, голос потребителя VOC, таблица голоса потребителя VOCT
Формирование перечня технических характеристик продукции (компонента, параметров технологического или производственного процесса)	Бенчмаркинг, техническая база знаний, свои и чужие аналоги
Оценка взаимодействия технических характеристик продукции и требований потребителей (характеристик компонентов и характеристик продукции, параметров технологического и производственного процессов и характеристик компонентов)	Техническая база знаний
Оценка удовлетворенности потребителей и планирование развития продукции	Маркетинговые исследования, модель Кано, голос потребителя VOC, таблица голоса потребителя VOCT
Оценка взаимного влияния изменений технических характеристик продукции	Техническая база знаний
Анализ технических характеристик продукции конкурентов и установление целевых значений технических характеристик продукции	Бенчмаркинг, техническая база знаний, свои и чужие аналоги
Расчет приоритетов технических характеристик продукции (компонентов, параметров технологических и производственных процессов)	Техническая база знаний

Рисунок 1 – Онтологическая модель проектирования качества продукции на основе метода QFD с учетом требований потребителей

Требования потребителей в свою очередь определяются на основе анализа голоса потребителей и описываются перечнем требований (в соответствии с моделью Н.Кано состоят из базовых требований, контрактных требований и ожиданий потребителей), важностью требований (например, по 10-балльной шкале) и оценкой конкурентоспособности продукции / удовлетворенности потребителя (с учетом данных бенчмаркинга) (рисунок 2).

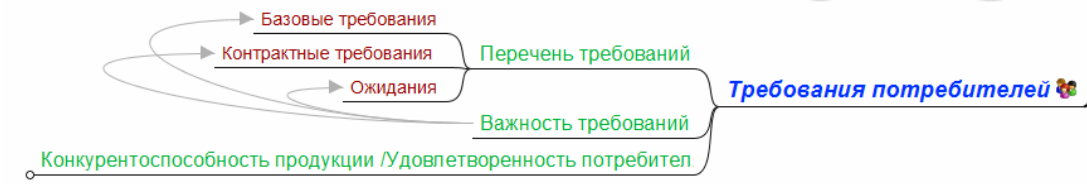


Рисунок 2 – Учет требований потребителей в Онтологической модели проектирования качества продукции на основе метода QFD

Таким образом, результатом проектирования на первом уровне QFD являются концепция продукции и характеристики продукции, которые в свою очередь описываются перечнем технических характеристик, взаимосвязью и значением характеристик (рисунок 3).

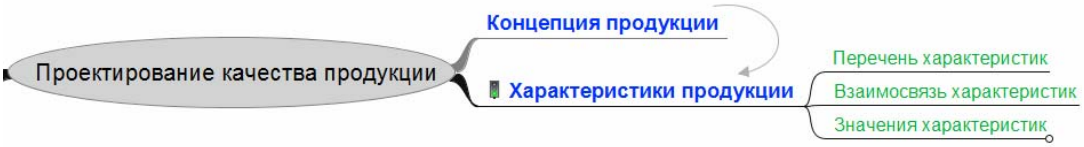


Рисунок 3 – Результат проектирования в Онтологической модели проектирования качества продукции на основе метода QFD (I уровень)

При этом целью проектирования является не только «разработка» или «модификация» продукции, а разработка или модификация продукции с учетом взаимосвязи характеристик и данных бенчмаркинга таким образом (рисунок 4), чтобы достичь необходимого уровня конкурентоспособности продукции (рисунок 5).

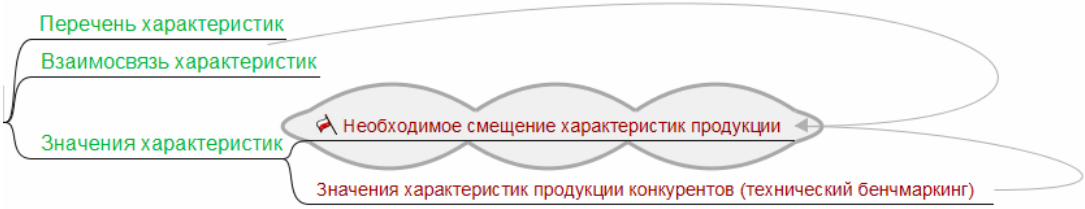


Рисунок 4 – Техническая задача проектирования в Онтологической модели проектирования качества продукции на основе метода QFD (I уровень)

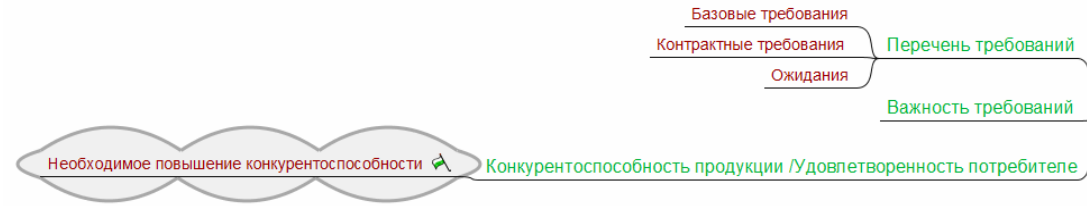


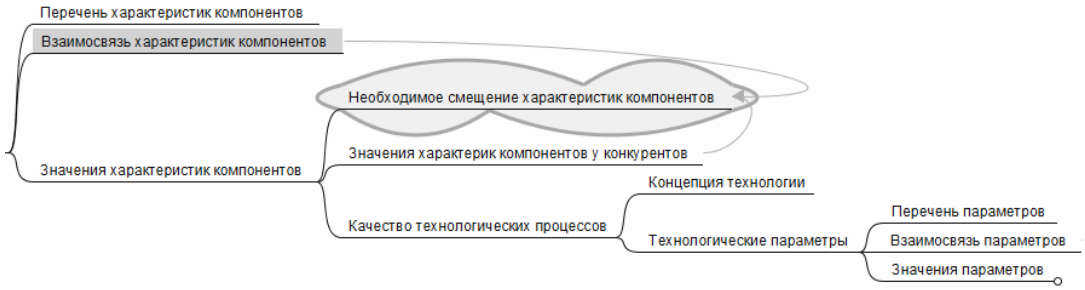
Рисунок 5 – Цель проектирования в Онтологической модели проектирования качества продукции на основе метода QFD (I уровень)

В случае проектирования продукции, состоящей из отдельных компонентов, большое внимание необходимо уделить проектированию качества компонентов. Производители сложных технических систем утверждают, что итоговое качество продукции на 80% зависит от качество компонентов, что в свою очередь определяется не только техническими характеристиками компонентов, но и качеством технологических процессов и условий производства (рисунок 6).

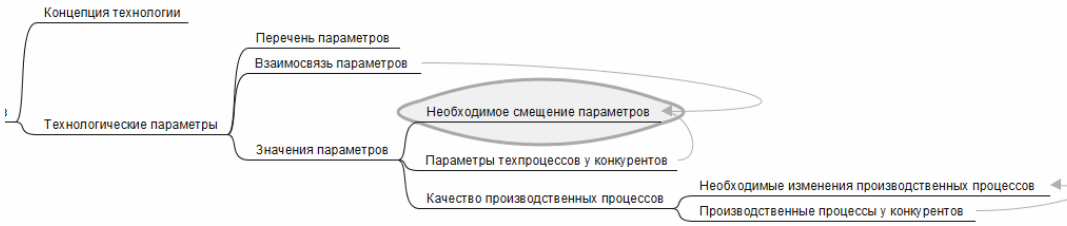
Таким образом, онтологическая модель проектирования качества продукции на основе метода развертывания (структурирования) функции качества QFD включает 4 уровня проек-

тирования (продукция, компоненты, технология, производство), при этом каждый из уровней описывается рядом взаимосвязанных атрибутов. Полученная модель демонстрирует масштабы исходных данных (базы знаний), трудоемкость вычислений при использовании стандартного математического аппарата и, в то же время, возможность и необходимость использования дополнительной информации: риск, погрешность исходной информации и т.д. (рисунок 7).

а) Проектирование качества компонентов в Онтологической модели проектирования качества продукции (QFD II уровня)



б) Проектирование качества технологических процессов в Онтологической модели проектирования качества продукции (QFD III уровня)



в) Проектирование качества производственных процессов в Онтологической модели проектирования качества продукции (QFD IV уровня)

Рисунок 6 – Проектирования качества компонентов, технологических процессов и производства в Онтологической модели проектирования качества продукции на основе метода QFD

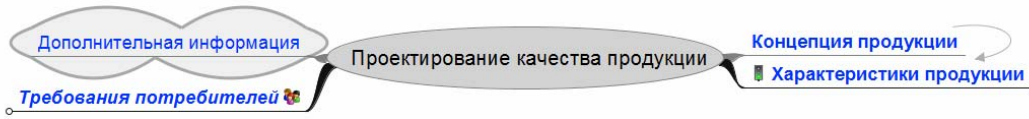


Рисунок 7 – Использование дополнительной информации в Онтологической модели проектирования качества продукции на основе метода QFD

На основе Онтологической модели проектирования качества продукции на основе метода QFD была разработана онтология с использованием инструмента Protégé, который включает редактор онтологий, позволяющий проектировать онтологии, разворачивая иерархическую структуру абстрактных или конкретных классов и слотов. Структура онтологии сделана аналогично иерархической структуре каталога. На основе сформированной онтологии в Protégé сгенерированы формы получения знаний для дополнения экземпляров классов и подклассов.

4 Разработка устойчивого матричного метода MTQFD определения приоритетов и артефактов изменения характеристик продукции и параметров технологических процессов

В связи с особенностями поставленной задачи и современными возможностями компьютерной обработки результатов предлагается в матричном методе MTQFD (Matrix Technique QFD) для решения использовать метод устойчивого приближенного решения матричного уравнения (1), позволяющий обоснованно учитывать широкий круг различной дополнительной информации [4].

(1) $$\overline{H} \cdot \delta\Theta = \delta\overline{P},$$

где δΘ – n-мерный вектор относительных отклонений параметров состояния (характеристик продукции),

$\delta\overline{P}$ – k-мерный вектор относительных отклонений признаков состояния (важности требований и ожиданий потребителей),

$\overline{H}$ – матрица размером (k×n) коэффициентов взаимосвязи требований и характеристик.

Матричная модель QFD позволяет учитывать дополнительную информацию. Например, вектор абсолютных значений приоритетов обобщенных характеристик продукции (I уровень QFD) Q_1 с учетом риска и конкурентной среды будет рассчитываться по формуле (2):

(2) $$Q_1 = diag(R_1) \cdot (H_1^T \cdot (diag(K) \cdot P)),$$

H_1 – матрица взаимосвязей требований и обобщенных характеристик, размером n×m,

P – вектор важности требований потребителей, размером n,

$diag(K)$ – диагональная матрица важности требований с точки зрения конкурентоспособности, размером $n \times n$,

$diag(R_1)$ – диагональная матрица оценки риска обобщенных характеристик, размером $m \times m$,

n – количество требований,

m – количество обобщенных характеристик продукции.

При оценке риска возможно использование приоритетного числа риска (*ПЧР*) или различных комбинаций составляющих *ПЧР* (баллы значимости, возникновения, обнаружения) [5]. Данная модель является единой для расчетов при реализации метода на всех уровнях QFD и упрощает восприятие и реализацию структурирования и развертывания функции качества с учетом риска [6, 7].

Повышение устойчивости и достоверности результатов идентификации качества при использовании матричного подхода возможно за счет использования дополнительной информации о погрешностях признаков состояния и возможных значениях параметров состояния.

Используя матричные преобразования и распространенный метод наименьших квадратов по формуле (3) получаем не только принятые в QFD оценки приоритетов изменения технических характеристик, но и другие оценки направлений дальнейшего совершенствования.

(3) $$\delta\hat{\Theta} = (H^T P H)^{-1} H^T P \delta P,$$

где P – весовая матрица погрешностей требований и ожиданий.

5 Предложения по разработке экспертной системы на основе метода MTQFD

Целью создания экспертной системы проектирования качества продукции на основе метода MTQFD является повышение качества продукции за счёт: автоматизированного хранения способов повышения конкурентоспособности продукции и удовлетворенности потребителей за счет изменения характеристик продукции, компонентов, параметров процессов или производства; разработки математической модели процесса идентификации качества продукции; формализации представления знаний экспертов; создания режимов консультации, обучения и приобретения новых знаний.

Экспертная система опирается на существующие разработки в автомобилестроении, имеет стандартную структуру базы знаний (описание проблемной области, процедурные знания, декларативные знания, атрибуты и исходные данные консультации) [8] и обеспечивает решение неформализованных задач на основе неточных знаний, представляющих опыт экспертов при проектировании продукции и разработке технологических и производственных процессов. База знаний кроме конкретной информации о требованиях потребителей и характеристиках продукции содержит модели проблемной области для компонентов, технологических и производственных процессов, включающие собственно описание этой области и знания о порядке решения задач (сценарий консультации). Экспертная система обеспечивает решение задач на основе базы знаний, включающей знания из различных классификаторов, а также опыт экспертов при проектировании продукции и разработке технологических процессов. Экспертная система ориентирована на идентификацию качества продукции на этапах разработки продукции, компонентов, технологических и производственных процессов (все 4 уровня QFD).

Заключение

Апробация разработанного подхода и метода MTQFD проведена на примере проектирования автопровода ПВАМ с учетом дополнительной информации о результатах анализа рисков конструкции и процесса FMEA [4, 6, 7]. Применение метода позволило повысить качество и конкурентоспособность продукции за счет расчета приоритетов и уточнения технических характеристик продукции и параметров технологических и производственных процессов.

Список литературы

[1] Виттих В.А. Онтологический анализ и синтез при управлении сложными открытыми системами. //Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды V международной конференции. (Самара, 17-21 июня 2003 г.).-Самара: СНЦРАН, 2003. С. 50-60.

[2] Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А., Вашуков Ю.А. Развертывание функции качества (QFD). Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева. Самара, 2009. – 54 с.

[3] Жданов А.И. Введение в методы решения некорректных задач. Учебное пособие / А. И. Жданов; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Самарский гос. аэрокосмический ун-т им. акад. С. П. Королева". Самара, 2007. – 87 с.
[4] Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А. Метод идентификации качества продукции на основе матричного подхода // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 4-4. С. 879-891.
[5] Вашуков Ю.А., Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А. Анализ видов, последствий и причин потенциальных несоответствий (FMEA). Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева. Самара, 2008. – 31 с.
[6] Родионов В.Н., Попова Т.В., Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А. Метод разработки инноваций с учетом рисков в производстве автотракторных проводов // Кабели и провода. 2011. № 1 (326). С. 10-14.
[7] Родионов, В.Н. Инновационное преобразование рабочих мест на основе интеграции методов QFD и FMEA [Текст] / В.Н. Родионов, Т.В. Попова, А.Я. Дмитриев, Т.А. Митрошкина // Методы менеджмента качества. – 2011. - №8. - С.58-64.
[8] Демин В.В., Юнак Г.Л., Годлевский В.Е., Дмитриев А.Я. Концепция экспертной системы для проведения комплексного аудита поставщиков АО «АВТОВАЗ»: Сб. докл. IV Международной конф. «Развитие через качество – теория и практика». – Тольятти, 2000. – С. 67-74.

О ВЛИЯНИИ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ НА РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЗАДЕРЖЕК ВХОДНЫХ КАНАЛОВ НЕЙРОСЕТЕВОГО ОПТИМИЗАТОРА ПАРАМЕТРОВ ПИ-РЕГУЛЯТОРА

Ю.И. Еременко[1], Д.А. Полещенко[1], А.И. Глущенко[1]

[1]Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВПО Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС"
309516, Старый Оскол, м-н. Макаренко, 42, Россия
451222@sf-misis.ru
тел: +7 (4725) 45-12-22, факс: +7 (4725) 32-43-61

Ключевые слова: *адаптивное управление, ПИ-регулятор, нейросетевой оптимизатор, время задержки входных сигналов, нелинейный объекты управления*

Abstract

The problem of delay time calculation for input neurons used in PI-controller parameters neural tuner is considered. Adaptive control system with neural tuner is implemented in Matlab software. Neural tuner is based on neural networks and used for PI-controller parameters online tuning. The backpropagation training method is used. It is modified by adding a rule base containing conditions on choosing learning rate for the output layer neurons. The connection between the values of the delay time of neural network input neurons and a plant parameters values is shown. This conclusion is made as a result of 5760 conducted modeling experiments where two aperiodic links with time delay are used as the plant. Its parameters are changed during modeling process in order to implement the nonlinearity.

Введение

В настоящее время порядка 90% регуляторов, находящихся в промышленной эксплуатации, используют ПИ или ПИД алгоритм управления [1]. Такие регуляторы являются линейными, в то время как реальные объекты управления (ОУ) в большинстве случаев нелинейны. Подобное несоответствие приводит к тому, что коэффициенты регулятора, подобранные при первичной настройке для конкретного режима работы объекта, не позволяют получать сходных по качеству переходных процессов в других режимах (например, при загрузке нагревательной печи). Это ведет к увеличению времени на отслеживание уставок и, соответственно, расхода энергоносителя. Для решения данной проблемы необходимо автоматически перенастраивать параметры регулятора в процессе эксплуатации ОУ [2].

Одним из возможных решений данной проблемы является построение адаптивных систем управления технологическими процессами [1], автоматически подбирающих коэффициенты ПИД-регулятора. Всю совокупность методов построения таких систем можно разбить на две группы. Первая группа – это классические методы, такие как метод Циглера-Никольса [3], частотный метод А.Г. Александрова [4], метод, заложенный в основу работы адаптивных ПИД-регуляторов фирмы Siemens [2]. Большинство таких методов основано на идентификации ОУ с помощью тестовых сигналов. При этом идентификация объекта даже из сходных начальных условий может давать существенно отличающиеся результаты.

Вторая группа – это методы, основанные на методологии искусственного интеллекта, например, подходы, предложенные в [5–8], и, в частности, нейронные сети (НС) [8]. Однако, идеи, изложенные в [8] , имеют слишком общий характер для конкретных реализаций. Это связано с тем, что НС не обладает сведениями о специфике ОУ. Например, о невозможности принудительного охлаждения печи.

Для решения указанной проблемы авторами данной работы предложен метод построения нейросетевого оптимизатора параметров ПИ-регулятора [9], объединяющий НС для коррекции коэффициентов регулятора с базой правил ситуаций, когда необходимо проводить настройку. Данный метод предназначен для управления процессами, относящимися в соответствии с [10], к классу несимметричных. Важной задачей при построении нейросетевого оптимизатора является определение параметров НС. В частности, полученная по результатам исследований структура НС имеет пять входов, три из которых являются задержанными на равные интервалы Z секунд друг от друга выходными сигналами ОУ. Целью данного исследования является установление связи между динамикой ОУ и динамикой задержанных сигналов НС Z.

1 Структура нейросетевого оптимизатора

Предлагаемый обобщенный алгоритм работы нейросетевого оптимизатора параметров ПИ-регулятора приведен на рисунке 1.

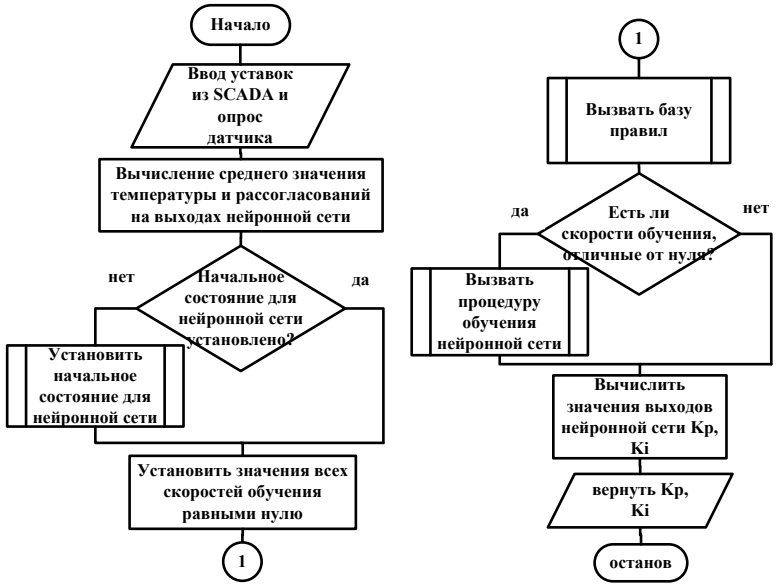


Рисунок 1 – Разработанный обобщенный алгоритм работы нейросетевого оптимизатора

Многие реальные технологические процессы являются несимметричными, то есть включают в себя два режима с различной динамикой. Например, нагревательные печи работают в режимах нагрева и охлаждения. В [10] было выявлено, что для оптимальности ведения и того, и другого процесса требуется два набора коэффициентов регулятора, а не один. В связи с этим, предлагается реализовывать нейросетевой оптимизатор в виде двух идентичных нейронных сетей, каждая из которых отвечает за управление коэффициентами регулятора для своего типа процесса. Переключение между НС предлагается производить в момент очередной смены задания. Обе сети начинают работу с формирования на своем выходе одинаковых коэффициентов регулятора, используемых на ОУ в текущий момент. Метод достижения этой цели описан в [9]. Обращение к НС происходит один раз в Z секунд.

До начала каждого из экспериментов создаются две необученные НС. Они имеют одинаковую трехслойную структуру, так как в соответствии с [11] любая непрерывная функция может быть аппроксимирована с необходимой точностью трехслойной НС. Количество и вид входов НС были определены экспериментальным путем в ходе исследований. Полученные результаты совпали с результатами, приведенными С.Омату в [8]. Во входном слое располо-

жено 5 нейронов: текущее задание по температуре (x_1); задержанный на 1 секунду (x_2), на Z секунд (x_3) и на $2 \cdot Z$ секунд (x_4) сигнал по выходу объекта управления; задержанный на 1 секунду сигнал управления, формируемый ПИ-регулятором (x_5). То есть (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) – это вектор входных сигналов в НС. Вопросом этой статьи является именно определение оптимального значения параметра Z в зависимости от параметров ОУ.

Проведенные исследования [12] показали, что 15 нейронов в скрытом слое является оптимальным числом. В скрытом слое была использована функция активации гиперболический тангенс, в выходном слое – линейная функция. С. Омату в своей работе [8] также использовал НС с 15 нейронами в скрытом слое для управления различными по своей динамике ОУ.

В выходном слое в общем случае используется два нейрона (отвечают за коэффициенты ПИ-регулятора K_P, K_I), так как в данном случае речь идет о ПИ-регуляторе.

Выбранная структура нейронной сети приведена на рисунке 2.

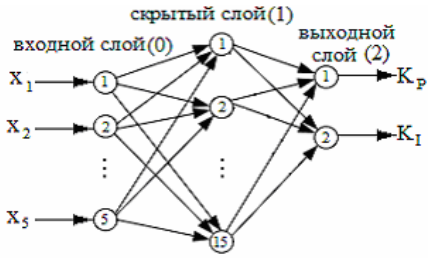


Рисунок 2 – Структура НС нейросетевого оптимизатора параметров ПИ-регулятора

Обе НС нейросетевого оптимизатора предлагается оперативно обучать с помощью алгоритма обратного распространения ошибки [8]. Общей целью обучения является минимизация рассогласования между выходом ОУ и заданием по температуре. В отличие от [8], в данной работе предлагается значения скорости обучения η_j для нейронов выходного слоя НС сделать различными и изменять их в течение работы системы. η_1 – это скорость коррекции весовых коэффициентов и смещения, отвечающих за формирование первого выхода НС, то есть – K_P. Соответственно η_2 отвечает за K_I. Необходимость такого подхода вызвана, во-первых, тем фактом, что порядок значений коэффициентов регулятора обычно различается (например, $K_P = 2 \cdot 10^{-1}$, а $K_I = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$), поэтому и скорость их настройки должна быть пропорциональна этому значению. Во-вторых, нет необходимости изменять коэффициенты регулятора постоянно, а в некоторые моменты коррекции требует только один из них. Поэтому в начале каждой итерации работы нейросетевого оптимизатора обе указанные скорости приравниваются к нулю, а затем происходит вызов предлагаемой базы правил. Условия правил описывают ситуации, когда необходимо использовать и обучать НС, а следствия – необходимые значения η_1, η_2. Если какое-либо из правил срабатывает, то происходит обучение НС. Данная база правил разработана по результатам многочисленных экспериментов. Ее структура подробно рассмотрена в [9, 12].

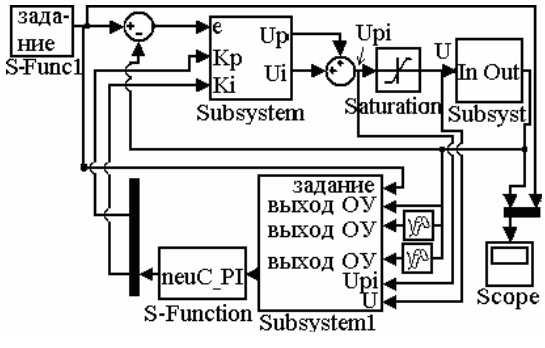


Рисунок 3 – Реализация в Matlab системы управления с нейросетевым оптимизатором

2 Реализация системы управления с нейросетевым оптимизатором

В пакете Matlab была реализована система управления моделью ОУ (рисунок 3), состоящей из двух апериодических звеньев со звеном запаздывания (1).

Контур управления представлен блоком Subsystem с ПИ-регулятором с нейросетевым оптимизатором (S-function *neuC_PI*). *Ui*, *Up*, *Upi* – сигналы управления на выходе *i*-, *p*-каналов и всего ПИ-регулятора соответственно, *e* – текущее рассогласование. Блок Saturation исполь-

зован для ограничения получаемого с ПИ-регулятора сигнала управления до диапазона [0;100]. U – управляющее воздействие, подаваемое на ОУ.

$$(1) \quad W(s) = \frac{K}{T_1 s + 1} \cdot \frac{1}{T_2 s + 1} \cdot e^{-\tau \cdot s}$$

Здесь K – коэффициент усиления ОУ, T_1 – постоянная времени ОУ, T_2 – постоянная времени датчика, τ – время запаздывания. Данная структура ОУ выбрана, так как, используя ее, возможно описать с заданной точностью большое число технологических объектов и процессов.

Для изменения состояния объекта непосредственно в процессе моделирования через каждые 12 смен задания производилось изменение коэффициентов T_1 и τ для модели ОУ, описанной выражением (1). В частности, для каждого опыта было использовано по два набора параметров модели (сочетания), между которыми осуществлялось подобное переключение: первое состояние – 12 переходов с параметрами ($T_1^{(1)}$, $\tau^{(1)}$) → второе состояние – 12 переходов с параметрами ($T_1^{(2)}$, $\tau^{(2)}$) → первое состояние – 12 переходов с параметрами ($T_1^{(1)}$, $\tau^{(1)}$). Значение T_2 всегда составляло 5% от T_1. Начальные значения коэффициентов ПИ-регулятора для каждого сочетания были подобраны для первого состояния ОУ. Задачей оптимизатора было сначала подобрать новые коэффициенты для измененного состояния объекта, а затем вернуть исходные параметры при возврате к исходному состоянию ОУ. Был выбран следующий график изменения заданий: 590^0C→640^0C→505^0C→590^0C. Для смены уставки выход ОУ должен был удерживаться в 5% окрестности значения разности текущего задания и предшествующего в течение 1800 секунд. Для каждого из сочетаний параметров ОУ также был проведен опыт с системой управления с обычным ПИ-регулятором, который использовал значения коэффициентов, подобранные для первого состояния ОУ, в течение всего эксперимента.

3. Результаты экспериментов

Всего было проведено 5760 экспериментов со 144 различными сочетаниями значений параметров модели ОУ. Для каждого такого сочетания было проведено по 40 опытов со значениями Z от 1 секунды до 40 секунд. В каждом таком наборе из 40 опытов выбирался лучший. Для этого был разработан критерий оптимальности в виде суммы следующих значений, нормированных в промежуток [0;1] относительно текущего набора из 40 опытов: временя текущего опыта, среднее перерегулирования за весь опыт и сумма квадратов отклонений выхода ОУ от задания за все время опыта. Выбирался опыт с минимальным значением критерия среди имеющихся. При этом использовались следующие ограничения: завершены все 36 переходных процессов, среднее перерегулирование за все время опыта не могло быть более 5% от разницы предшествующего и текущего заданий, а общее время опыта должно было быть меньше, что время, показанное системой с обычным ПИ-регулятором в таких же условиях. Значение Z для данного опыта выбиралось как лучшее для данного сочетания параметров ОУ.

Результаты моделирования приведены в таблицах 1 и 2. На пересечении столбца и строки указано оптимальное значение Z в секундах для текущих значений параметров ОУ, а в скобках – процент выигрыша по времени системы управления с нейросетевым оптимизатором относительно системы с обычным ПИ-регулятором. Если указан прочерк, то это означает, что ни при одном из значений Z не удалось получить результат, удовлетворяющий критериям качества, установленным для системы управления.

На рисунке 4 полученные результаты представлены в виде поверхности.

В качестве примера на рисунках 5-6 показаны результаты моделирования для сочетания параметров K=20, $T_1^{(1)}$=1500 с,$T_1^{(2)}$=2500 с, $\tau^{(1)}$=60с, $\tau^{(2)}$=90 с, Z=16. Время опыта с нейросетевым оптимизатором составило 28,9 часа, а с обычным ПИ-регулятором – 32,6 часа, то есть экономия по времени составила 11,3%.

Таблица 1 – Оптимальные значения параметра Z для времени запаздывания от 1с до 120 с

Время запаздывания Постоянная времени ОУ	$\tau^{(1)}$=1 с, $\tau^{(2)}$=2 с	$\tau^{(1)}$=5 с, $\tau^{(2)}$=10 с	$\tau^{(1)}$=10с, $\tau^{(2)}$=20 с	$\tau^{(1)}$=20с, $\tau^{(2)}$=40 с	$\tau^{(1)}$=60с, $\tau^{(2)}$=90 с	$\tau^{(1)}$=90с, $\tau^{(2)}$=120 с
$T_1^{(1)}$=10 с, $T_1^{(2)}$=20 с	1 (2%)	-	-	-	-	-
$T_1^{(1)}$=25 с, $T_1^{(2)}$=50 с	1 (1%)	-	-	-	-	-
$T_1^{(1)}$=50 с, $T_1^{(2)}$=100 с	1 (3%)	2 (3%)	2 (3%)	-	-	-
$T_1^{(1)}$=100 с, $T_1^{(2)}$=200 с	2 (7%)	3 (7%)	3 (4%)	5 (3%)	-	-
$T_1^{(1)}$=250 с, $T_1^{(2)}$=500 с	7 (11%)	7 (12%)	7 (13%)	7 (14%)	11 (7%)	-
$T_1^{(1)}$=500 с, $T_1^{(2)}$=1000 с	11 (16%)	11 (16%)	11 (16%)	11 (17%)	11 (12%)	13 (9%)
$T_1^{(1)}$=1500 с,$T_1^{(2)}$=2500 с	14 (9%)	14 (10%)	14 (11%)	14 (11%)	16 (11%)	16 (15%)
$T_1^{(1)}$=1500 с,$T_1^{(2)}$=5000 с	14 (20%)	14 (20%)	14 (21%)	14 (22%)	14 (20%)	17 (17%)
$T_1^{(1)}$=2500 с,$T_1^{(2)}$=5000 с	16 (28%)	16 (29%)	16 (31%)	16 (31%)	16 (35%)	17 (33%)
$T_1^{(1)}$=5000 с,$T_1^{(2)}$=7500 с	16 (15%)	17 (15%)	17 (15%)	17 (16%)	17 (17%)	17 (19%)
$T_1^{(1)}$=7000с,$T_1^{(2)}$=12000с	18 (12%)	18 (12%)	18 (11%)	18 (10%)	18 (10%)	22 (7%)
$T_1^{(1)}$=9000с,$T_1^{(2)}$=15000с	20 (20%)	20 (18%)	20 (18%)	20 (16%)	20 (17%)	20 (14%)

Таблица 2 – Оптимальные значения параметра Z для времени запаздывания от 120 с до 400 с

Время запаздывания Постоянная времени ОУ	$\tau^{(1)}$=120с, $\tau^{(2)}$=150 с	$\tau^{(1)}$=150с, $\tau^{(2)}$=200 с	$\tau^{(1)}$=200с, $\tau^{(2)}$=250 с	$\tau^{(1)}$=250с, $\tau^{(2)}$=300 с	$\tau^{(1)}$=300с, $\tau^{(2)}$=350 с	$\tau^{(1)}$=350с, $\tau^{(2)}$=400 с
$T_1^{(1)}$=10 с, $T_1^{(2)}$=20 с	-	-	-	-	-	-
$T_1^{(1)}$=25 с, $T_1^{(2)}$=50 с	-	-	-	-	-	-
$T_1^{(1)}$=50 с, $T_1^{(2)}$=100 с	-	-	-	-	-	-
$T_1^{(1)}$=100 с, $T_1^{(2)}$=200 с	-	-	-	-	-	-
$T_1^{(1)}$=250 с, $T_1^{(2)}$=500 с	-	-	-	-	-	-
$T_1^{(1)}$=500 с, $T_1^{(2)}$=1000 с	-	-	-	-	-	-
$T_1^{(1)}$=1500 с,$T_1^{(2)}$=2500 с	16 (18%)	16 (18%)	-	-	-	-
$T_1^{(1)}$=1500 с,$T_1^{(2)}$=5000 с	16 (29%)	16 (29%)	-	-	-	-
$T_1^{(1)}$=2500 с,$T_1^{(2)}$=5000 с	19 (27%)	22 (23%)	23 (24%)	26 (19%)	-	-
$T_1^{(1)}$=5000 с,$T_1^{(2)}$=7500 с	21 (20%)	23 (19%)	28 (16%)	30 (21%)	35 (30%)	40 (30%)
$T_1^{(1)}$=7000с,$T_1^{(2)}$=12000с	25 (7%)	25 (9%)	31 (9%)	29 (16%)	33 (28%)	40 (30%)
$T_1^{(1)}$=9000с,$T_1^{(2)}$=15000с	24 (14%)	24 (12%)	30 (11%)	29 (10%)	40 (18%)	40 (18%)

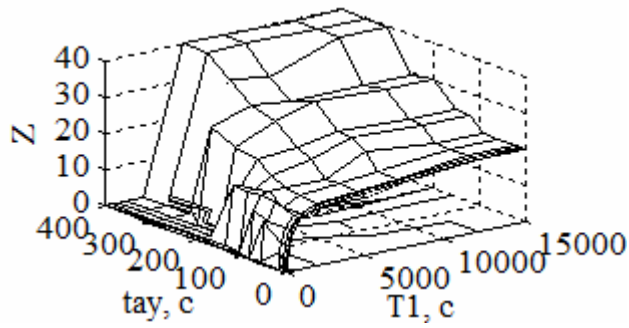


Рисунок 4 – результаты моделирования по определению кратности задержек Z входных сигналов НС

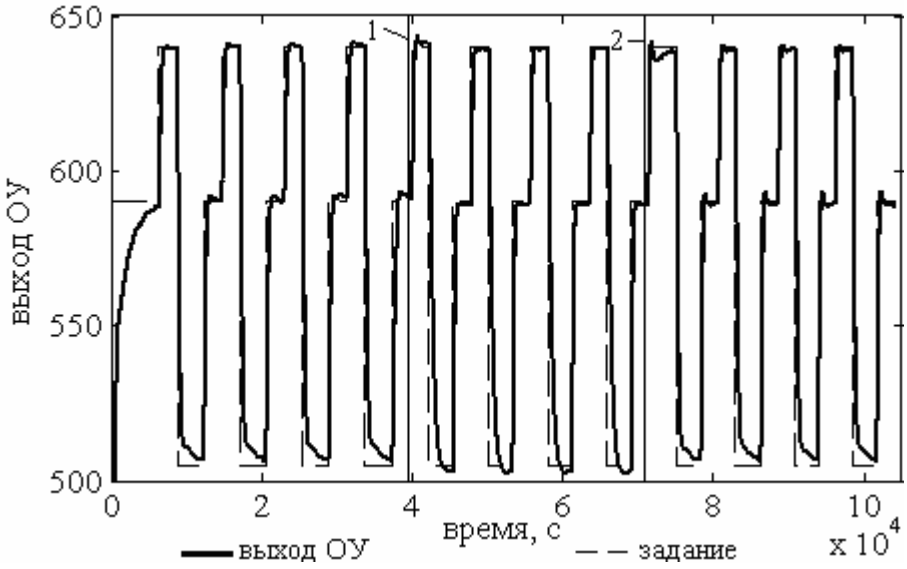


Рисунок 5 – Результаты работы системы с управления нейросетевым оптимизатором (1 – переход ОУ из первого состояния во второе, 2 – обратный переход)

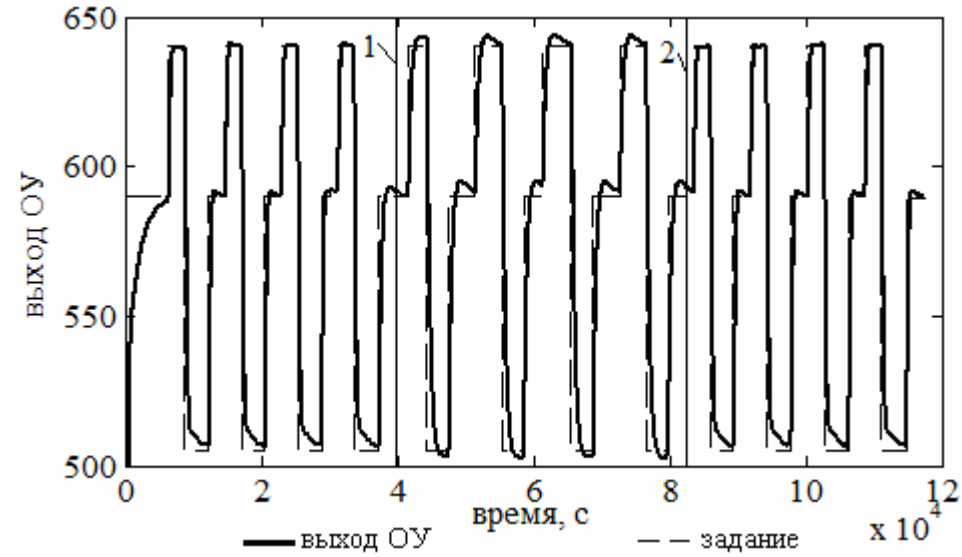


Рисунок 6 – Результаты работы системы с обычным ПИ–регулятором (1 – переход ОУ из первого состояния во второе, 2 – обратный переход)

На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы. Во-первых, предложенный подход к построению нейросетевого оптимизатора позволяет, используя одну и ту же структуру НС и базу правил, учитывать нелинейность ОУ с постоянными времени от 10 секунд до 15000 секунд и временем запаздывания от 1 секунды до 400 секунд. В то же время, система является работоспособной только если отношение времени запаздывания к постоянной времени ОУ составляет менее 0.1.

Во-вторых, кратность задержек входных сигналов НС влияет на качество работы оптимизатора и зависит от параметров T_1 и τ ОУ. Чем выше значения T_1 и τ, тем больше оптимальное

значение Z и наоборот. Учитывая тот факт, что к НС обращение происходит раз в Z секунд, было выдвинуто предположение, что значение Z связано с длительность переходных процессов, которая, в свою очередь, определяется значениями T_1 и τ. Анализ результатов, приведенных в таблицах 1 и 2, показал, что при найденных оптимальных значениях Z для каждого переходного процесса в период от его начала до входа контролируемой величины в 10% окрестность новой уставки НС была вызвана не менее 15 раз. Таким образом, при практическом использовании нейросетевого оптимизатора, зная текущее время переходных процессов на ОУ, можно примерно оценить необходимое значение параметра Z.

Заключение

Таким образом, нейросетевой оптимизатор позволил учитывать нелинейные характеристики ОУ, описываемые выражением (1), как с большой, так и с малой инерционностью, сохраняя при этом качество переходных процессов на требуемом уровне для различных режимов работы. Кратность задержек входных сигналов НС Z может быть оценена на практике, исходя из факта, что в течение конкретного переходного процесса в период от начала процесса до входа контролируемой величины в 10% окрестность новой уставки НС должна быть вызвана не менее 15 раз. Кроме того, использование оптимизатора позволило сократить время на выполнение графика задания на 1–30% в зависимости от параметров ОУ, что в реалиях производства позволит принести существенный экономический эффект.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №13-08-00532-а, 15-07-0609215-а), гранта Президента РФ № 14.Y30.15.4865-МК.

Список литературы

[1] Astrom K. J., Hagglund T., Hang C. C. and Ho W. K. Automatic tuning and adaptation for PID controllers. A survey. IFAC J. Control Eng. 1993. Practice 1. pp.699–714.
[2] Pfeiffer B.-M. Towards "plug and control": self-tuning temperature controller for PLC. International journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2000. №14. pp.519–532.
[3] Ziegler J., Nichols N. Optimum settings for automatic controllers. Trans. ASME. 1942. №65. Pp. 759–768.
[4] Alexandrov A.G., Palenov M.V Self-tuning PID-I controller. Preprints of the 18th IFAC World Congress. Milano, Italy. 28 Aug. 2 Sept. 2011. pp. 3635–3640.
[5] Chen J., Huang T. Applying neural networks to on-line updated PID controllers for nonlinear process control. Journal of Process Control. 2004. No.14. pp.211–230.
[6] Tan S.-H., Hang C.-C., Chai J.-S. Gain scheduling: from conventional to neuro-fuzzy. Automatica. 1997. 33.3. pp. 411–419.
[7] Zhao Z.-Y., Tomizuka M., Isaka S. Fuzzy gain scheduling of PID controllers. Control Applications, 1992., First IEEE Conference on. IEEE.
[8] Omatu S., Khalid M., Yusof R. Neuro-Control and its Applications. – London: Springer-Verlag, 1995.
[9] Eremenko Y.I., Poleshchenko D.A., Glushchenko A.I. About Heating Plants Control System Developing on Basis of Neural Network Usage for PID-Regulator Parameters Optimization. Applied mechanics and materials. 2014. Vol. 682. pp.80–86.
[10] Hagglund T., Tengvall A. An automatic tuning procedure for unsymmetrical processes. Proceedings of 3rd European control conference, 1995. pp.2450–2455.
[11] Hornik K., Stinchcombe M., White H. Multilayer feed-forward networks are universal approximators. Neural networks. 1989. №. 2(5). pp. 359–366.
[12] Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И., Фомин А.В. Об оценке применимости различных структур нейронной сети в реализации нейросетевого оптимизатора параметров ПИ-регулятора для управления тепловыми объектами // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – № 3.2(57). – С. 236–241.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ПРЕДПРИЯТИЙ И БАНКОВ НА МАКРОУРОВНЕ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Б.Г. Ильясов, И.В. Дегтярева, Е.А. Макарова, Т.А. Ефтонова

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия
ea-makarova@mail.ru
тел: +7 (989) 955-87-40

Ключевые слова: *управление, нейронные сети, нейро-нечеткие алгоритмы, предприятия , банки, кластер, макроэкономическая система, инвестиционный процесс.*

Abstract

In this paper, we suggest the structure of investment process management system and the procedure of intelligent decision making support on the basis of neural network and neuro-fuzzy algorithms and dynamical models. The neural networks are built for clustering the investment situations; they execute a multistage diagnostics of reasons of financial flows balance disturbances. The neuro-fuzzy network is proposed for giving recommendations in the field of discount rate correction for clusters of recession situations.

Введение

Современные условия экономического развития России характеризуются наличием ряда макроэкономических проблем, одной из которых является проблема управления инвестиционным процессом на макроуровне. В рамках исследования этой проблемы на кафедре технической кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета ведется разработка системы имитационного моделирования и интеллектуального управления (СИМИУ) взаимодействием предприятий и банков на макроуровне в неравновесных рыночных условиях. Назначение СИМИУ состоит в обеспечении поддержки процедур анализа процессов управления взаимодействием предприятий и банков, функционирующих в рамках многосекторной макроэкономической системы (ММЭС) и формирующих инвестиционный процесс ММЭС. В процессе разработки решаются следующие задачи. Во-первых, разработка когнитивной модели взаимодействия предприятий и банков, функционирующих в рамках ММЭС, которая описывает инвестиционный процесс ММЭС в виде трех взаимосвязанных контуров: основного контура «производство-потребление» и двух корректирующих контуров «сбережения-инвестиции» и «налоги-госзакупки» [1]. Во-вторых, разработка функциональных и динамических моделей процесса функционирования ММЭС с учетом рынков, которые описывают с помощью непрерывных нелинейных дифференциальных уравнений динамику процессов производства, распределения, обмена и потребления потоков денежных ресурсов с учетом накопленных запасов и рыночных механизмов [2]. В-третьих, разработка структуры системы интеллектуальной поддержки принятия решений в ММЭС на основе нейро-нечетких и нейросетевых технологий. В-четвертых, разработка нейро-нечеткой сети для принятия решений по корректировке ставки рефинансирования для кластеров ситуаций рецессии с учетом опережающей, своевременной или поздней диагностики причин нарушений балансов расходов и доходов секторов. В статье рассматривается решение третьей и четвертой задач, которые связаны с разработкой системы интеллектуальной поддержки принятия решений в ММЭС, включающей блоки нейросетевой кластеризации и нейро-нечеткого моделирования процессов принятия решений.

1 Структура системы управления взаимодействием предприятий и банков на макроуровне

При разработке модельного комплекса процесс взаимодействия предприятий и банков, формирующий инвестиционный процесс ММЭС, рассматривается, во-первых, на макроэкономическом уровне; во-вторых, в тесной взаимосвязи с воспроизводственным процессом, формирующим макроэкономический кругооборот финансовых и материальных потоков, и, в-третьих, в аспекте поддержания желаемых воспроизводственных пропорций, характеризующих отраслевую структуру реального сектора экономики (его структурные пропорции). Управление инвестиционным процессом на макроуровне осуществляется с целью обеспечения желаемых темпов формирования инвестиционных расходов секторами экономики и требуемых темпов обновления и накопления основного капитала в реальном секторе. При этом должно соблюдаться условие поддержания требуемых воспроизводственных пропорций, уровня цен и темпа выпуска валового внутреннего продукта (ВВП).

Базовыми элементами этой модели (концептами) ММЭС являются макроэкономические агенты (МЭА) и макроэкономические рынки, взаимосвязанные с помощью циркулирующих между ними финансовых потоков и управляемых на основе информации о рыночных ценах, объемах запасов и поведении секторов экономики.

Модель взаимодействия предприятий и банков на макроуровне включает в себя следующие десять моделей: модели функционирования предприятий трех производственных секторов (сектора AF1, AF2, AF3), образующих реальный сектор экономики; модель функционирования сектора домашних хозяйств (сектор H); модели функционирования секторов финансовых (сектор B) и государственных учреждений (сектор G); модели функционирования трех рынков благ (AM1, AM2 и AM3), выделенных по виду производимой продукции, и рынка денег (рисунок 1). Произведено распределение всех функциональных процессов воспроизводственного цикла между секторами ММЭС с выделением для каждого сектора основного функционального назначения.

Модель системы управления взаимодействием предприятий и банков на макроуровне разработана в классе иерархических систем и содержит три уровня управления.

Нижний уровень управления включает контуры управления, построенные на основе принципа обратной связи и предназначенные для регулирования процессов расхода финансовых ресурсов четырьмя макроэкономическими агентами (реальным сектором; сектором домашних хозяйств; секторами финансовых и государственных учреждений) в соответствии с плановыми темпами по выделенным функциональным направлениям путем формирования управляющих воздействий $U_1(t)=\{U_{11}(t), U_{12}(t), U_{13}(t), U_{14}(t)\}$.

Блок планирования построен с использованием четырех моделей. Первые две модели предназначены для первоначального расчета плановых темпов расхода ресурсов ММЭС. Оставшиеся две модели предназначены для подстройки с участием человека рассчитанных плановых темпов расхода ресурсов исходя из условия соблюдения балансовых тождеств для инвестиционного процесса и воспроизводственных пропорций.

Первая модель планирования предназначена для расчета плановых темпов выпуска ВВП и разработана на основе модели IS-LM Хикса-Хансена. Модель позволяет рассчитать равновесное состояние экономики, которое достигается одновременно на рынке благ и рынке денег, на основе информации о составляющих совокупного спроса, и о состоянии денежного рынка в виде зависимостей спроса на деньги Md и предложения денег Ms от процентной ставки r.

Вторая модель планирования предназначена для расчета плановых темпов валового выпуска производственными секторами ММЭС в зависимости от объемов используемых факторов производства (основного капитала и труда), разработана на основе производственной функции Кобба-Дугласа. Модели реализованы на языке MATLAB и встроены в разрабатываемую СИМИУ.

Третья модель планирования предназначена для корректировки рассчитанных с помощью первых двух моделей плановых темпов расхода ресурсов исходя из условия соблюдения балансовых тождеств на равновесном режиме и с учетом желаемых воспроизводственных пропорций. В модели предложен алгоритм расчета последовательного уточнения в диалоге с пользователем значений параметров и последующего перерасчета плановых темпов.

Четвертая модель планирования предназначена для корректировки плановых межсекторных потоков, сбалансированных для производственных секторов на основе методологии МОБ. Модели реализованы в среде Excel и встроены в разрабатываемую СИМИУ процессом взаимодействия предприятий и банков на макроуровне.

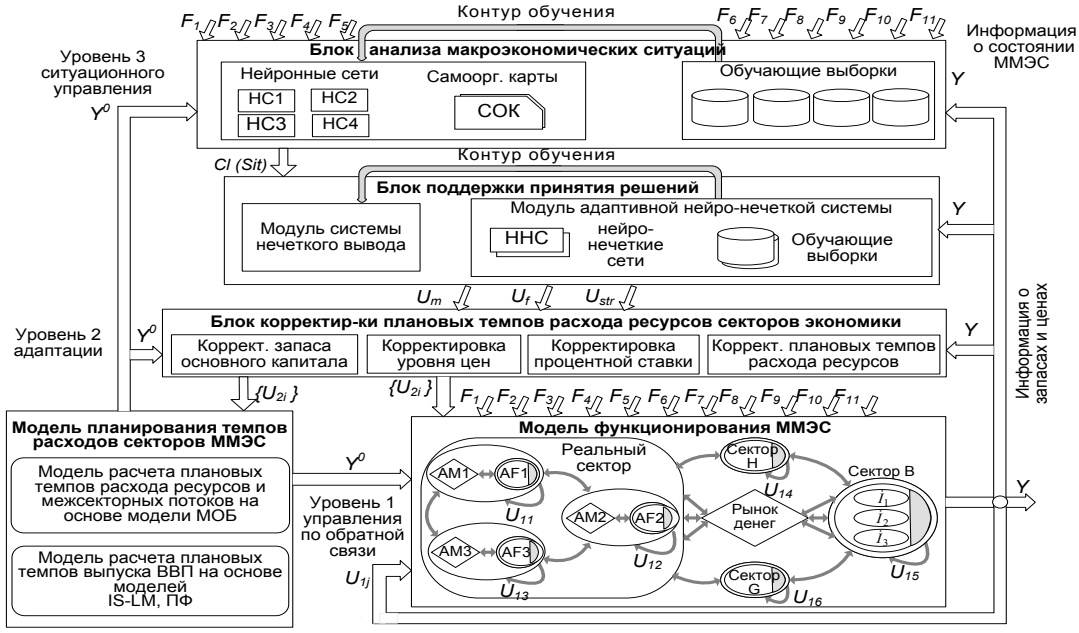


Рисунок 1 – Функциональная схема модели системы управления взаимодействием предприятий и банков на макроуровне

Второй уровень управления построен на основе принципа адаптации и предназначен для формирования управляющих воздействий $U_2(t)$, корректирующих плановые темпы расхода ресурсов на основе информации $Y(t)$ о состоянии всех подсистем ММЭС. Адаптация планов осуществляется в зависимости от текущих значений рыночных индикаторов (уровня цен, процентной ставки, цен на ресурсы), а также объема накопленных запасов секторов. Корректировка планов осуществляется для всех секторов экономики за исключением сектора государственных учреждений, правила поведения которого не корректируется на данном уровне, а формируются на следующем, более высоком уровне управления с использованием сценарного подхода.

Блок корректировки плановых темпов расхода ресурсов на основе информации об объемах запасов финансовых ресурсов (вектор U_{21}) представлен набором правил, реализованных в виде процедурных знаний и представленных на языке Matlab в виде m-файла. Работа алгоритмов корректировки осуществляется как в автоматическом, так и в автоматизированном режимах и основывается на информации о запасах секторов экономики. Алгоритмы встроены в динамическую модель взаимодействия предприятий и банков на макроуровне.

Блок корректировки плановых темпов расхода инвестиционных ресурсов на основе информации об объемах запасов основного капитала (вектор U_{22}) построен на основе модели Солоу, учитывает инвестиционные лаги и предназначен для корректировки темпов потоков обновления и выбытия капитала. Корректировка темпов потоков выбытия капитала для каждого производственного сектора выполняется на основе информации о текущем объеме запасов капитала, а также с учетом нормы амортизации *i*-го сектора. Корректировка темпов потоков обновления основного капитала осуществляется опосредованно за счет влияния запасов основного капитала на формирование производственных планов и совокупного предложения на рынках благ, ситуация на которых и служит информационным сигналом для наращивания или временного снижения инвестиционных расходов как компонента совокупного спроса.

Блок корректировки плановых темпов расхода ресурсов на основе информации об уровнях цен на рынках благ реализуется следующим образом. Текущее состояние рынков благ сказывается на поведении производственных секторов ММЭС и заключается в корректировке ими планов расхода ресурсов i-го сектора в зависимости от уровня цен при формировании совокупного предложения (зависимость прямо пропорциональная). Сектор домашних хозяйств корректирует планы расхода ресурсов на потребление как компонент совокупного спроса в зависимости от общего по экономике уровня цен по обратно пропорциональной зависимости. Кроме того, учтен эффект Пигу, согласно которому рост уровня цен вызывает снижение реальных запасов домохозяйств, что в дальнейшем сказывается на темпах потребления.

Блок корректировки плановых темпов расхода ресурсов с учетом процентной ставки реализуется следующим образом. Текущее состояние рынка денег сказывается на состоянии сектора финансовых учреждений и на состоянии производственных секторов, формирующих спрос на инвестиционные кредиты банковской системы. В зависимости от процентной ставки, формирующейся на рынке денег, происходит корректировка процентных ставок по кредитам, выдаваемым банковской системой производственным секторам. Изменение темпов формирования инвестиционных кредитов сектором финансовых учреждений оказывает влияние на валовые инвестиции производственных секторов, что сказывается через определенный лаг на объемах их основного капитала, а значит и на темпах выпуска продукции. Таким образом, изменение процентной ставки влияет на совокупное предложение через передаточный механизм денежно-кредитной политики.

Отметим, что алгоритмы корректировки плановых темпов расхода ресурсов секторами ММЭС на основе информации о состоянии рынков относятся к классу алгоритмов адаптации по входному (задающему) сигналу, реализованы в виде аддитивной корректировки плановых темпов расхода ресурсов секторами ММЭС, осуществляются в автоматическом режиме.

Третий (верхний) уровень управления построен на основе принципа ситуационного управления, предполагающего выполнение классификации текущей ситуации $Sit_i(Y)$ и преобразования ее в желаемую $Sit_j(Y^0)$ путем принятия множества решений *U(t)*. Применение ситуационного подхода предполагает использование знаний о текущих значениях множества макроэкономических индикаторов (темпах потоков, объемах запасов, рыночных факторах) как интегральную системную информацию, характеризующую состояние всей ММЭС в целом, так и ее отдельных функциональных подсистем. Верхний уровень управления предназначен для решения задачи координации функционирования секторов путем своевременного принятия решений, направленных на перераспределение потоков финансовых ресурсов и соответствует поддержке принятия решений для государственных органов власти.

Необходимость государственного вмешательства в экономику обусловлена неэффективностью адаптационных возможностей рыночных механизмов, не способных противодействовать негативным влияниям факторов внешней среды, и, как следствие, непропорциональному перераспределению запасов финансовых ресурсов между секторами экономики.

Функциональные особенности верхнего уровня управления требуют применения интеллектуальных технологий для решения слабоформализуемых задач принятия решений с участием человека. Особенность решения задачи классификации макроэкономических ситуаций состоит в необходимости выполнения человеком многопараметрического анализа ситуаций на основе большого количества макроэкономических индикаторов. Трудности такого анализа состоят: в недостаточности статистической информации о значениях макроэкономических показателей; в сложности формирования зависимостей при классификации ситуаций в динамике и принятии решений, а также в необходимости проведения многочисленных экспериментов с динамической моделью и анализа большого объема экспериментальных данных как по отдельному эксперименту, так и по всем экспериментам в целом. Перечисленные проблемы приводят к целесообразности применения нейросетевых методов для классификации макроэкономических ситуаций и поддержки принятия решений [3,4] .

Предложена процедура формирования интеллектуальных алгоритмов принятия решений при ситуационном управлении инвестиционным процессом ММЭС, которая предполагает выполнение многоэтапной кластеризации динамически неравновесных инвестиционных ситуаций на основе нейронных сетей Кохонена и формирование правил принятия управляющих решений на основе нейро-нечетких сетей.

2 Нейросетевая кластеризация инвестиционных ситуаций

Особенности предлагаемого подхода к решению задачи классификации неравновесных инвестиционных ситуаций состоят в следующем.

Во-первых, обучение нейронной сети предлагается проводить на основе экспериментальных данных, полученных при работе с динамической моделью. Это обусловлено тем, что после разработки динамическая модель превращается в средство для генерации новых знаний. Извлечение знаний осуществляется на основе интеллектуального анализа результатов многократного проведения имитационных экспериментов, которые заносятся в базу экспериментальных данных.

Во-вторых, из всех известных методов нейросетевого анализа данных наиболее предпочтительным является применение нейронных сетей (НС) Кохонена [5].

Для решения задачи формирования правил поддержки принятия решений предлагается применение технологии нейро-нечетких экспертных систем, позволяющей не только учесть знания эксперта, основанные на его опыте и профессионализме, но и учесть знания эксперта о закономерностях динамики функционирования ММЭС, полученные им в процессе работы с динамической моделью ММЭС при проигрывании различных вариантов управляемых сценариев.

Разработанные нейронные сети Кохонена реализуют многоэтапную кластеризацию инвестиционных ситуаций ММЭС в динамике; построены самоорганизующиеся карты кластеров неравновесных инвестиционных ситуаций. Классифицирующими признаками являются управляемые переменные; классифицируемыми объектами – инвестиционные ситуации, объединяемые в кластеры по мере сходства. Особенности процедуры нейросетевой кластеризации инвестиционных ситуаций заключаются в следующем.

1. Кластеризация инвестиционных ситуаций представляет собой процесс последовательной декомпозиции множества инвестиционных ситуаций по нескольким классификационным признакам, различающимся по уровням анализа процесса взаимодействия предприятий и банков на макроуровне (уровень ММЭС в целом, уровень секторов, взаимодействующих в составе ММЭС посредством рынков благ и уровень производственных секторов, взаимодействующих в составе реального сектора).

2. При формировании обучающих выборок учтен фактор времени, анализ которого необходим при выделении этапов распространения возмущений по контурам инвестиционного

процесса ММЭС. Выделены: этап воздействия на совокупный спрос при изменении инвестиционных расходов, влияющих на инвестиционных спрос как компонент совокупного спроса, и этап воздействия на совокупное предложение, следующий за изменением спроса с запаздыванием и обусловленный обновлением основного капитала производственных секторов, взаимодействующих в составе реального сектора.

3. При диагностике неравновесных состояний секторов производится анализ типа неравновесных режимов функционирования ММЭС, которые вызваны нарушением балансовых соотношений, характеризующих отклонения по финансовым потокам инвестиционных расходов как в рамках отдельно взятого сектора, так и между секторами ММЭС. Это балансовые соотношения: между темпами формирования сбережений и инвестиций; между темпами формирования валовых инвестиций и амортизации по всем производственным секторам и по ММЭС в целом; между текущими темпами получения нераспределенной валовой прибыли и формирования собственных инвестиций по всем производственным секторам и по ММЭС в целом.

В соответствии с приведенными особенностями процедуры кластеризации, произведено структурирование множества признаков для четырех нейронных сетей Кохонена, требуемых для кластеризации ситуаций на трех последовательно выполняемых этапах.

На этапе 1 рассматривается уровень ММЭС в целом. Первая нейронная сеть Кохонена НС1 выполняет кластеризацию макроэкономических ситуаций на основе обобщенной информации о состоянии ММЭС в целом с учетом типа экономического роста или спада.

Множество признаков, необходимых для анализа инвестиционных ситуаций на уровне ММЭС, включает признаки: совокупный спрос; совокупное предложение; уровень цен; валовой внутренний продукт; совокупные доходы населения; потребление; инвестиционные кредиты банков; валовые инвестиции реального сектора; суммарные налоги; государственные закупки; рыночная ставка процента; экспорт сырья.

На этапе 2 исследуется уровень производственных секторов с позиций соотношения между спросом и предложением. Вторая и третья нейронные сети Кохонена предназначены для дополнительной кластеризации неравновесных ситуаций рецессии, обусловленных снижением спроса на энерго-сырьевые товары со стороны иностранного сектора и учитывают тенденции изменения совокупного спроса и совокупного предложения.

Множество признаков, характеризующих темпы инвестиционных расходов и запасы капитала производственных секторов, включает признаки: валовая добавленная стоимость всех трех производственных секторов; валовые инвестиции стоимость всех трех производственных секторов; основной капитал всех трех производственных секторов.

На этапе 3 рассматривается уровень секторов ММЭС с позиций балансовых соотношений по инвестиционным потокам между предприятиями и банками. Четвертая нейронная сеть предназначена для анализа причин нарушения балансовых соотношений и определения типов неравновесных режимов функционирования ММЭС.

Признаки, характеризующие тип неравновесных режимов функционирования секторов ММЭС, представлены признаками, характеризующими: баланс сбережений и инвестиций по ММЭС в целом; баланс валовых инвестиций и амортизации по ММЭС в целом, а также по производственным секторам в отдельности; баланс собственных инвестиций и прибыли фирм по ММЭС в целом, а также по производственным секторам в отдельности.

По результатам обучения нейронных сетей построены самоорганизующиеся карты (СОК). Проведен анализ и формирование правил классификации макроэкономических ситуаций. Кластеры выделены в соответствии с анализируемыми тенденциями изменения экономики (тенденции роста ВВП и рецессии). Выделены кластеры ситуаций, незначительно отличающихся от плановых, далее называемым кластером плановых ситуаций. Группа ситуаций роста экономики представлена кластерами с учетом типов роста (инвестиционный тип роста, потребительский тип роста, экспортно-ориентированный тип роста, рост, связанный с увели-

чением госзакупок). Определены кластеры, соответствующие ситуациям экономического спада.

Отметим, что для корректировки количества кластеров также можно применить визуальный анализ. Если в пределах одного кластера какой-либо признак существенно изменяет цвет (значение), то этот кластер можно разбить на два; требуется увеличить количество кластеров. И наоборот, если по какому-либо кластеру невозможно найти хотя бы один признак, значительно отличающийся от других кластеров по цвету (значению), то требуется уменьшить количество кластеров. В результате такой циклической процедуры формируются границы кластеров; вопрос о принадлежности ситуации к тому или иному кластеру решается в процессе использования обученной НС.

3 Разработка нейро-нечеткой сети для поддержки принятия решений в области кредитно-денежной политики

Обучение нейро-нечеткой сети (ННС) проводится на основе данных, полученных по результатам кластеризации инвестиционных ситуаций с помощью построенных нейронных сетей. Это, во-первых, номер кластера, выданный второй или третьей нейронной сетью с учетом кластера инвестиционных ситуаций, выданных первой нейронной сетью ; во-вторых, это номер кластера, выданный четвертой нейронной сетью; в-третьих, это информация об объемах запасов секторов. Эти данные необходимы для формирования условной части правил принятия решений. Заключительную часть правила составляют решения по применению мер денежно-кредитной, фискальной или структурной политик. Таблица правил принятия решений формируется экспертом на основе результатов проведения многократных имитационных экспериментов.

Сформулированы особенности формирования правил принятия решений и обучающей выборки:

Если запасы секторов финансовых и государственных учреждений достаточно большие и позволяют принимать структурные решения, то наряду с множествами решений по применению мер монетарной Dec_m и фискальной Dec_f политик, формируется множество решений структурной политики Dec_{str}.

Формирование правил предполагает использование связок «и» и «или» при сочетании элементов множеств *Dec*. При этом одновременное применение нескольких или всех предлагаемых в множестве *Dec* решений должно проводиться с уменьшающими коэффициентами степени изменения управляющего фактора, а применение одного или нескольких решений – с увеличивающими коэффициентами, согласно движению по порядковой шкале влево или вправо от равновесного состояния (рисунок 2).

Представленная на рисунке порядковая шкала используется для описания кластеров со значениями в интервале от DM (Decrease Much - значительное уменьшение) до IM (Increase Much - значительное увеличение), что позволяет отразить степень удаления значений признака в каком-либо кластере от его значений в кластере плановых ситуаций. Плановый режим обозначен буквой М.

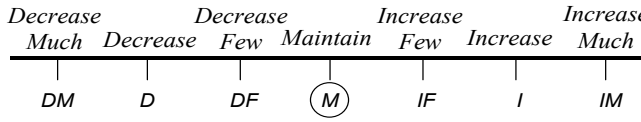


Рисунок 2 – Порядковая шкала для измерения значений признаков

Таблицы правил принятия решений формируются последовательно для выбранных кластеров второй и третьей нейросети $НС_{2,3}$ и параллельно с выбранными кластерами четвертой нейросети $НС_4$. Количество групп ситуаций характеризуется количеством сочетаний классов

ситуаций $НС_{2,3}$ с классами $НС_4$ и составляет 30 групп ситуаций. В таблице правил обучающей выборки, сформированной экспертом, не все ячейки с информацией об объемах запасов заполнены. При формировании обучающей выборки для нейро-нечеткой сети эти ячейки должны быть заполнены термами близкими к базовому равновесному состоянию (поддерживание планового режима – М). В случаях, когда совпадают номера кластеров, а также множество вариантов решений сходно, выполняется объединение строк таблицы правил.

В качестве примера рассматривается построение нейро-нечеткой сети для управляющего воздействия в виде корректировки ставки рефинансирования r_r как меры денежно-кредитной политики (r_r измеряется в процентах). Генерация структуры системы нечеткого вывода выполнена по методу субкластеризации. Количество термов определено автоматически.

Выполнен анализ построенной нечеткой модели с помощью программы просмотра правил, которая позволяет получать значения выходных переменных в зависимости от значений входных переменных. Особый интерес для исследования представляют поверхности нечеткого вывода, отражающие зависимости между запасами энерго-сырьевого и фондосоздающего секторов, номером кластера $НС_{34}$ и запасами банковской системы (рисунок 3).

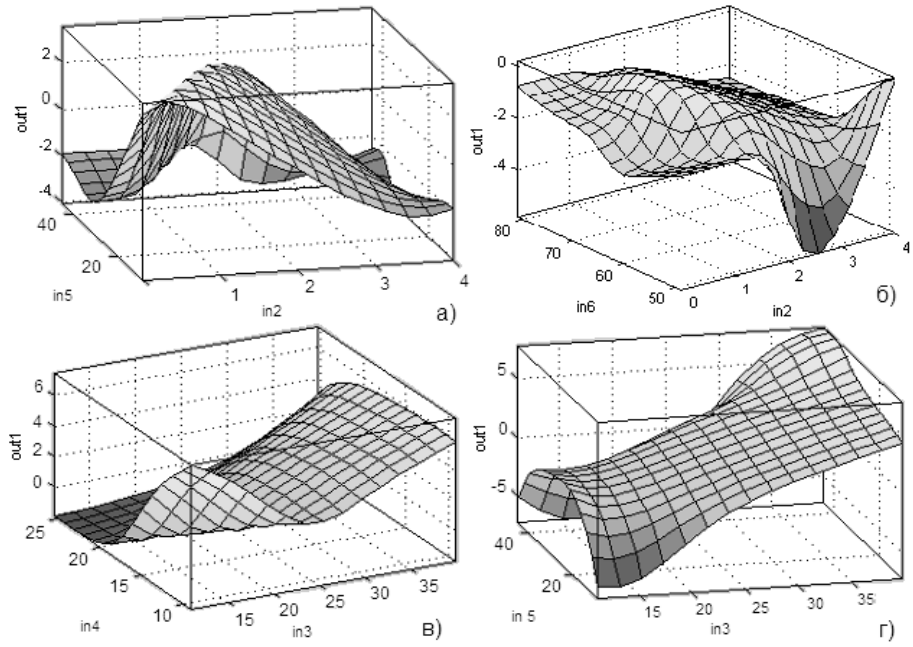


Рисунок 3 – Примеры поверхностей нечеткого вывода

Представленные на рисунке поверхности отражают зависимость выходной переменной out1 (процентной ставки) от следующих наборов входных переменных: номера кластера НС4 in2 и запасов банковской системы in5 (рисунок 3, а); номера кластера НС4 in2 и запасов государства in6 (рисунок 3, б); запасов энерго-сырьевого in3 и фондосоздающего in4 секторов (рисунок 3, в); запасов энерго-сырьевого сектора in3 и запасов банковской системы in5 (рисунок 3, г). Представленные виды поверхностей показали, в частности, что с переходом из кластера с благоприятными ситуациями к кластерам с умеренно неблагоприятными ситуациями и далее к кластеру с очень неблагоприятными ситуациями ставка рефинансирования снижается; с ростом запасов производственных секторов ставка рефинансирования увеличивается. Выполненный анализ позволяет сделать вывод о корректности зависимостей, заложенных в правилах, и о соответствии их известным в области макроэкономического анализа закономерностям.

Заключение

Таким образом, разработана система интеллектуальной поддержки процессом взаимодействия предприятий и банков на макроуровне с учетом запасов и рыночных механизмов. Разработанная СИМИУ позволяет реализовывать следующие возможности: имитационное моделирование процессом взаимодействия предприятий и банков в рамках ММЭС; интеллектуальный анализ экспериментальных данных, полученных по результатам имитационного моделирования, интеллектуальное управление и выдачу рекомендаций по управлению инвестиционным процессом ММЭС на основе нейросетевых и нейро-нечетких технологий. Кроме того, СИМИУ может быть использована в качестве обучающей системы для специалистов в области макроэкономического анализа и прогнозирования и в качестве исследовательской системы, для решения задач анализа, синтеза и исследования динамики поведения ММЭС как сложной социально-экономической системы. Программа обеспечивает создание имитационной модели и расчет параметров; расчет сбалансированных темпов потоков макроэкономической системы; имитационное моделирование по исследуемому сценарию; визуальный и информационный мониторинг процесса моделирования; корректировку параметров модели на основе текущей макроэкономической ситуации; построение, обучение и применение нейронечеткой сети для интеллектуального управления процессом взаимодействия предприятий и банков на макроуровне.

Список литературы

[1] Методология исследования и системного моделирования динамики инвестиционного процесса на макроуровне / Ильясов Б.Г., Дегтярева И.В., Макарова Е.А., Ефтонова Т.А. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVI Международной конференции – Самара: Самарский научный центр РАН, 2014. С. 337-351.

[2] Динамическое моделирование денежного рынка и его влияния на макроэкономический кругооборот финансовых потоков / Б. Г. Ильясов, И. В. Дегтярева, Е. А. Макарова, Т. А. Карташева // Вестник УГАТУ: научн. журнал Уфимск. гос. авиацион. техн. ун-та. 2011. Т. 15, № 5 (45). С. 175–189.

[3] Матвеева М. Г. Модели и методы искусственного интеллекта. Применение в экономике: учеб. Пособие / М. Г. Матвеева, А.С. Свиридов, Н. А. Алейникова. – М.:Финансы и статистика; ИНФРА-М, 2008. – 448 с.

[4] Чернов В.Г. Модели поддержки принятия решений в инвестиционной деятельности на основе аппарата нечетких множеств. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 312 с.

[5] Кохонен Т. Самоорганизующиеся карты / Т. Кохонен; пер. 3-го англ.изд. – М.:БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 655 с.

О КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЯ

Т.В. Мальцева[1], Н.В. Молокова[2]

[1]Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М. Ф. Решетнева
660014, Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, Россия
mal.ta13@mail.ru,
[2]Сибирский федеральный университет
660074, Красноярск, ул. Киренского, 26, Россия
nat_molokova@mail.ru
тел: +7 (391) 249-73-81

Ключевые слова: *компьютерная система, моделирование, процесс нефтезагрязнения, пористая среда, К-модели*

Abstract
This article focuses on the development of a computer system for modeling the dynamics of the spread of oil pollution, taking into account relevant factors. Statement of the problem of modeling is carried out in conditions close to the real conditions of such processes, depending on the available a priori information. The problem of modeling the process geofiltration oil in a porous medium in a new production, builds K model of the process. This allows you to move away from the assumptions on stage the problem and get the predicted values of the process variables of interest to the information environment that really is the case.

Введение

Актуальность настоящей работы определяется необходимостью своевременно получать и обрабатывать информацию об интенсивности и характере распространения разлитых углеводородов с целью выработки оптимальной системы мероприятий по предупреждению и ликвидации нефтяного загрязнения. Существенно повысить эффективность выполнения рекультивационных работ по восстановлению нефтезагрязненных участков возможно с помощью компьютерного моделирования и информационных технологий.

Проведенный анализ информационных ресурсов показывает, что в настоящее время существует множество моделей фильтрации углеводородов в пористых средах и программных комплексов, реализующих эти модели. Однако использование предлагаемых моделей для большинства загрязненных почв ограничивается по ряду причин: во-первых, трудности последующего оснащения модели адекватными исходными данными; во-вторых, модели не точны с практической точки зрения; в-третьих, высокая стоимость комплексов программ.

Данная работа посвящена разработке компьютерной системы, предназначенной для моделирования динамики распространения разлитых углеводородов с учетом действующих факторов.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1) Анализ предметной области.
2) Построение *К*-модели для оценки интенсивности и характера пространственно-временного распределения нефтезагрязнителя в пористой среде. Модель должна быть разработана с учетом современного уровня теоретических и экспериментальных данных по полноте и достоверности описания процесса.
3) Проведение вычислительного эксперимента, связывающего воедино теоретические и экспериментальные исследования.

1 Исследование предметной области

Анализ экспериментальных данных, показал, что попадая на поверхность земли, жидкие углеводороды начинают просачиваться по порам зоны аэрации, где преобладает вертикальная миграция под действием силы тяжести. Когда нефтепродукты встречают на своем пути менее проницаемый слой происходит их накопление и растекание в горизонтальном направлении. Преобладание тех или иных процессов превращения, миграции и аккумуляции нефти и нефтепродуктов в значительной мере зависят от природно-климатических условий среды [1, 2, 3].

Таким образом, на первом этапе исследования было установлено, что изучаемый процесс обладает значительной сложностью, т. к. при нефтяном загрязнении взаимодействуют три группы факторов, которые приходится учитывать при оценке последствий загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами: многокомпонентность состава нефти; гетерогенность состава и структуры почвенной экосистемы; многообразие и изменчивость внешних факторов. Кроме того, изучаемый процесс недоступен непосредственному изучению и экологически опасен для природной среды, биологических ресурсов и социальной сферы [4].

Поэтому прогноз динамики распространения углеводородов с учетом действующих факторов и выявления участков с высокой степенью нефтезагрязнения требует применения современных методов математического моделирования.

2 *К*-модель процесса нефтезагрязнения пористой среды

В ходе моделирования и исследований следует стремиться к тому, чтобы получаемые модели были максимально согласованы с реальностью. С учетом этого на следующем этапе работ была принята попытка сформулировать задачу моделирования исходного процесса в постановке, снимающей целый ряд допущений и предположений, связанных с недостатком априорной информации. В связи с этим предлагается использовать новый тип математических моделей – *К*-модели, предложенные профессором А. В. Медведевым [5]. *К*-модели строятся в условиях, когда априорная информация об исследуемом объекте одновременно принадлежит к разным уровням и базируются на триаде: фундаментальные законы, параметризованные зависимости и качественные сведения о переменных[6, 7].

Определим параметры нефти, которые будем учитывать в модели: μ – вязкость нефтезагрязнителя; $\rho_н$ – плотность нефтезагрязнителя; $T_н$ – температура нефтезагрязнителя; $P_н$ – давление нефтезагрязнителя; θ – фракционный состав нефтезагрязнителя; χ – переменная, показывающая наличие механических примесей. Вектор параметров нефти $Q_1(t) = (T_н, P_н, \theta, \chi, \mu, \rho_н)$.

Определим параметры почвы, которые будем учитывать в модели: m – пористость почвы; k – проницаемость почвы; s – величина удельной поверхности частиц почвы; l – влагоудерживающая способность частиц; r – размер частиц; q – процентное соотношение частиц определенного размера; ς – форма частиц; λ – способность частиц к деформации; ψ – наклон местности, на которой произошел разлив. Вектор параметров почвы в модели $Q_2(t) = (m, k, s, l, \psi, r, q, \varsigma, \lambda)$.

Определим параметры окружающей среды, которые будем учитывать в модели: P – давление окружающей среды; T – температура окружающей среды; g – ускорение свободного падения; η – влажность воздуха; w – количество осадков; a – параметр, характеризующий состояние атмосферы. Вектор параметров внешней среды в модели имеет вид $Q_3(t) = (T, P, g, w, A, \eta)$.

Определим также дополнительные параметры модели:$V_н$ – объем вылившейся нефти; Gp – производительность насоса на нефтеперекачивающей станции, определяется по показателям приборов на нефтеперекачивающей станции; τ – период времени от возникновения аварии до остановки насосов на нефтеперекачивающей станции; $Dн$ – диаметр нефтепровода; $lн$ – длина участка поврежденного нефтепровода между двумя задвижками; $Кз$ – эмпирический параметр, устанавливаемый в зависимости от рельефа местности; L – глубина загрязненной

почвы, определяется шурфованием; *F*з – площадь разлива; a_0, b_0 – размеры нефтяного пятна на поверхности в момент времени, соответствующий прекращению последующего разлива нефти из трубопровода; *a*, *b* – размеры (границы) нефтяного пятна; $M_з$ – количество нефти и нефтепродуктов, вылившееся из нефтепровода, $M_{вн}$ – количество впитавшейся нефти, $M_и$ – количество испарившейся нефти, $u_и$ – скорость испарения нефти, $M_{зг}$ – количество нефтезагрязненного грунта, $\rho_{зг}$ – плотность нефтеагрязненного грунта; $M_п$ – количество нефти, разлитое по поверхности, $L_п$ – толщина слоя нефти на поверхности земли; $V_{зг}$ – объем просочившейся нефти, $\rho_п$ – плотность поверхностного слоя почвы, $\rho_г$ – плотность грунта, $k_п$ – проницаемость поверхностного слоя почвы; K_a, K_b – капиллярные силы, действующие по продольному и поперечному направлениям соответственно; *G* – обобщенный показатель качества грунта; $u = (u_x, u_y, u_z)$ – скорость фильтрации по трем направлениям, $\hat{\vec{u}} = (\hat{u}_x, \hat{u}_y, \hat{u}_z)$ – скорость фильтрации согласно закона Дарси [8]; u'_z – скорость вертикальной фильтрации, вычисленная в соответствии с принятыми государственными стандартами [9].

Входными являются определенные ранее параметры трех взаимодействующих систем: нефти (Q_1), почвы (грунта) (Q_2) и окружающей среды (Q_3).

На выходе модель выдает пространственные границы нефтяного пятна (П – площадь разлива, *L* – глубина проникновения нефтезагрязнителя) и уровень загрязнения (α).

Для математического описания движения жидкостей и газов в пористых средах, возникающего при разливе углеводородов, используются уравнение неразрывности, представляющее собой математическое выражение закона сохранения массы фильтрующейся жидкости в пористой среде и закон Дарси [8]. $\hat{D} = (\hat{S}_н, \hat{\vec{u}}, \hat{L})$ – переменные процесса (насыщенность, скорость фильтрации, глубина нефтезагрязнения).

На рисунке 1 показана схема многомерного стохастического процесса нефтезагрязнения. Где $\xi(t)$ – векторное случайное воздействие. Каналы связи *H*, соответствующие различным переменным, включающие в себя средства контроля, приборы для измерения наблюдаемых переменных; Q_{1t}, Q_{2t}, Q_{3t}, D_t, Π_t, L_t, α_t– измерение соответствующих переменных в дискретное время *t*; $h(t)$ – случайные помехи измерений переменных процесса.

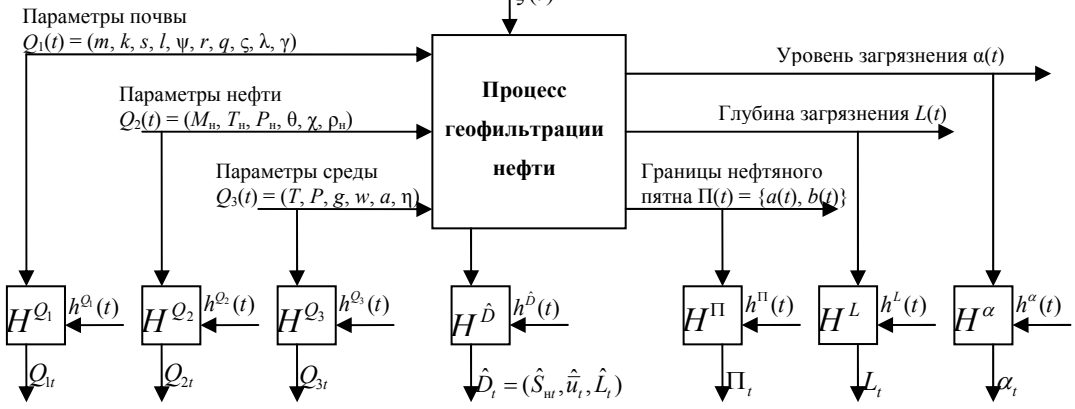


Рисунок 1 – Схема многомерного стохастического процесса геофильтрации нефти в пористой среде

Отметим также существенное отличие выходных переменных П(*t*), *L*(*t*) и α(*t*). Выходная переменная П(*t*) контролируется через интервалы времени Δ*t*, например, на основании данных аэросъемки; *L*(*t*) – через существенно большие интервалы времени Δ*T* (путем бурения шурфов по принятой технологии), α(*t*) – через *T*(*T*> Δ*T*>> Δ*t*) (посредством проведения химического анализа проб почв, полученных посредством шурфования). С практической точки зрения для

исследуемого процесса наиболее важным часто является контроль переменных $\alpha(t)$. Несмотря на то, что рассматриваемый процесс является динамическим, имеющиеся средства контроля вынуждают рассматривать его как статический с запаздыванием, тем не менее, выбор этого класса моделей не противоречит целям моделирования, так как результат моделирования имеет практическое значение уже в тот момент, когда переходный процесс закончился и перешел в установившийся режим.

На основании физических законов, уравнений теории двухфазной фильтрации, методик расчета основных параметров, применяемых службами экологической безопасности, а также сведений о самом рассматриваемом процессе структура математической модели имеет вид:

(1) $M_з = \rho_н \cdot V_н$, или $M_з = G_p \cdot \tau + l_н \cdot \rho_н \cdot \pi \cdot D_н^2 / 4$,

(2) $F_з = K_з \cdot M_з \cdot 10^3$,

(3) $\alpha = 10^3 \cdot M_{вн} / M_{зг} = 10^3 \cdot M_{вн} / \rho_{зг} \cdot F_з \cdot L$,

(4) $M_{вн} = M_з - M_п - M_и = M_з - V_п \cdot \rho_н - M_и = M_з - F_з \cdot L_п \cdot \rho_н - M_и$,

(5) $M_и(t) = u_и \cdot F_з \cdot t$,

(6) $u_и = f_{u_и}(\theta, a, w, \eta, T)$,

(7) $M_{вн} = S_н \cdot F_з \cdot L \cdot \rho_н$,

(8) $S_н = V_н / V_{зг} = V_н / M_{зг} \cdot L = M_{вн} / M_{зг} \cdot L \cdot \rho_н$,

(9) $L_п = M_з / F_з \cdot \rho_н - S_н \cdot L$,

(10) $\rho_{зг} = f_{\rho_{зг}}(\rho_н, \rho_г, S_н)$,

(11) $a_0 = f_{a_0}(T, P, \eta, w, \rho_н, M_з, \psi_x, \theta, \rho_п, k_п, t)$,

(12) $b_0 = f_{b_0}(T, P, \eta, w, \rho_н, M_з, \psi_y, \theta, \rho_п, k_п, t)$,

(13) $S_н(t) = f_{S_н}(M_з, \rho_н, \mu, \eta, K_a, K_b, L(t), \hat{S}_н(t, L), \gamma)$,

(14) $K_a = f_a(m, k, G, l, s, \psi_x)$,

(15) $K_b = f_b(m, k, G, l, s, \psi_y)$,

(16) $G = f_G(r, q, \varsigma, \lambda)$,

(17) $L(t) = f_L(u_z(t), K_a, K_b, \hat{L}(S_н, t))$,

(18) $u'_z(t) = f_{u'_z}(\mu, F_з, M_з, g, k, \hat{u}_z(t))$,

(19) $a(t) = f_a(a_0, u_x, M_н, \psi, t, S_н)$,

(20) $b(t) = f_b(b_0, u_y, M_н, \psi, t, S_н)$,

(21) $u_x = f_{u_x}(\theta, \chi, m, k, T, P, \mu, \rho_н, K_a, \hat{u}_x)$,

(22) $u_y = f_{u_y}(\theta, \chi, m, k, T, P, \mu, \rho_н, K_b, \hat{u}_y)$,

(23) $u_z = f_{u_z}(\theta, \chi, T, P, \mu, \rho_{\text{Н}}, w, a, g, \eta, u'_z, \hat{u}_z)$,

(24) $m = f_m(s, l, r, q, \varsigma, \lambda)$,

(25) $k = f_k(s, l, r, q, \varsigma, \lambda)$,

(26) $\rho_{\text{Н}} = f_{\rho_{\text{Н}}}(\theta, T_{\text{Н}}, T, P)$,

(27) $\hat{u} = (\hat{u}_x, \hat{u}_y, \hat{u}_z) = -k \cdot k_1(\hat{S}_{\text{н}}) / \mu \cdot (\nabla p_{\text{н}} - \rho_{\text{н}} \cdot \overline{g})$,

(28) $m \cdot \dfrac{\partial \hat{S}_{\text{н}}}{\partial t} + \left[\dfrac{\partial(\rho_н \hat{u}_x)}{\partial x} + \dfrac{\partial(\rho_н \hat{u}_y)}{\partial y} + \dfrac{\partial(\rho_н \hat{u}_z)}{\partial z} \right] = 0, \; m \cdot \dfrac{\partial(1 - \hat{S}_{\text{н}})}{\partial t} + \left[\dfrac{\partial(\rho_в \hat{u}_x)}{\partial x} + \dfrac{\partial(\rho_в \hat{u}_y)}{\partial y} + \dfrac{\partial(\rho_в \hat{u}_z)}{\partial z} \right] = 0$

(29) $div\left[(k_1(\hat{S}_{\text{н}}) + \mu\, k_2(\hat{S}_{\text{н}}))\nabla p_н\right] = -div\left[\mu\, k_2(\hat{S}_{\text{н}})\nabla p_c(\hat{S}_{\text{н}})\right] + k_1(\hat{S}_{\text{н}})\rho_н \overline{g} + \mu k_2(\hat{S}_{\text{н}})\rho_в \overline{g}$.

В построенной модели уравнения (1) первая часть, (3), (4), (5), (8), (27), (28) относятся к фундаментальным законам теоретической физики [2, 4]; уравнения (1) вторая часть, (2), (7), (9), (29) – параметризованные зависимости, установленные на основании ранее проводимых исследований [9], остальные уравнения системы на данный момент не могут быть параметризованы из-за недостатка априорной информации.

Для восстановления стохастической зависимости между переменными по данным выборок (y_i, x_i, $i = 1,\ldots, s$) могут быть использованы непараметрические методы [6].

(30) $y_s(x) = \sum_{i=1}^{s} y[i] \prod_{j=1}^{k} \Phi\left(\dfrac{x_j - x_j[i]}{C_{s_{x_j}}}\right) \Bigg/ \sum_{i=1}^{s} \prod_{j=1}^{k} \Phi\left(\dfrac{x_j - x_j[i]}{C_{s_{x_j}}}\right)$,

где $y \in R'$, $x \in R^k$ – выходные и входные переменные, $\Phi(\cdot)$ – колоколообразные функции, параметры размытости C удовлетворяют условиям сходимости [6].

Проанализируем схему решения модели (1) - (29). Действительно, уравнения (1), (2), используемые в методике расчета экологического ущерба [9], развязаны относительно остальной системы, аналогично уравнения (5), (6), определяющие испарение нефтезагрязнителя с поверхности грунта. Для расчета количества нефтезагрязнителя в (1) используется та формула, которая соответствует имеющимся данным: рассчитывается по вылитому объему или исходя из параметров трубопровода, при этом плотность нефти определяется по формуле (26). Простой подстановкой данных решаются уравнения (16), (24) - (26), определяющие основные показатели нефти и почвы, которые в известных моделях, в качестве необходимых с точки зрения разрешимости задачи допущений, принимаются за постоянные. На основании проведенных вычислений получают решение уравнений (11), (12) и (14), (15).Далее рассчитываются значения интересующих переменных по модели двухфазной фильтрации (блок уравнений (27) - (29)) и используются для решения уравнений (21) - (23), определяющих скорость фильтрации. Оставшиеся уравнения, определяющие выходные переменные процесса, не могут быть развязаны и решаются как система нелинейных алгебраических уравнений на основании уже решенных уравнений системы.

3 Вычислительный эксперимент

Был проведен вычислительный эксперимент по построению К-модели для случая двух входных и двух выходных переменных, который в общем случае можно расширить на случай большей размерности. Исходными данными для моделирования являются следующая система уравнений:

$$(31)\quad \begin{cases} x_1 + x_2 = \sqrt{u_1} + 0.5u_2; \\ F(x_1, x_2, u_1, u_2) = 0, \end{cases}$$

а также выборка наблюдений входных - выходных сигналов $S = \{u_1[i], u_2[i], x_1[i], x_2[i]\}$, $i = \overline{1,500}$.

Второе уравнение в системе (32) представим в виде непараметрической зависимости, таким образом, К-модель исследуемого процесса имеет вид

$$(32)\quad \begin{cases} f_1 = x_1 + x_2 - \sqrt{u_1} - 0.5u_2 = 0; \\ f_2 = x_2^n - \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{500} x_2[i] \cdot \Phi\left(\dfrac{u_1 - u_1[i]}{Cs_{u1}}\right) \cdot \Phi\left(\dfrac{u_2 - u_2[i]}{Cs_{u2}}\right) \cdot \Phi\left(\dfrac{x_1 - x_1[i]}{Cs_{x1}}\right)}{\sum\limits_{i=1}^{500} \Phi\left(\dfrac{u_1 - u_1[i]}{Cs_{u1}}\right) \cdot \Phi\left(\dfrac{u_2 - u_2[i]}{Cs_{u2}}\right) \cdot \Phi\left(\dfrac{x_1 - x_1[i]}{Cs_{x1}}\right)}. \end{cases}$$

Прогнозные значения выхода в заданных точках $\tilde{u}$ будут находиться на основании непараметрических оценок, использующих информацию о невязках,

$$(33)\quad \begin{aligned} \xi_1[i] &= f_1(\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, x_1[i], x_2[i]), \quad i = \overline{1,500}, \\ \xi_2[i] &= f_2(\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, x_1[i], x_2[i]), \end{aligned}$$

следующего вида:

$$(34)\quad \begin{cases} \hat{x}_1 = \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{500} x_1[i] \cdot \Phi\left(\dfrac{\varepsilon_i}{Cs_{\varepsilon i}}\right) \cdot \Phi\left(\dfrac{u_1 - u_1[i]}{Cs_{u1}}\right) \cdot \Phi\left(\dfrac{u_2 - u_2[i]}{Cs_{u2}}\right)}{\sum\limits_{i=1}^{500} \Phi\left(\dfrac{\varepsilon_i}{Cs_{\varepsilon i}}\right) \cdot \Phi\left(\dfrac{u_1 - u_1[i]}{Cs_{u1}}\right) \cdot \Phi\left(\dfrac{u_2 - u_2[i]}{Cs_{u2}}\right)}, \\ \hat{x}_2 = \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{500} x_2[i] \cdot \Phi\left(\dfrac{\varepsilon_i}{Cs_{\varepsilon i}}\right) \cdot \Phi\left(\dfrac{u_1 - u_1[i]}{Cs_{u1}}\right) \cdot \Phi\left(\dfrac{u_2 - u_2[i]}{Cs_{u2}}\right)}{\sum\limits_{i=1}^{500} \Phi\left(\dfrac{\varepsilon_i}{Cs_{\varepsilon i}}\right) \cdot \Phi\left(\dfrac{u_1 - u_1[i]}{Cs_{u1}}\right) \cdot \Phi\left(\dfrac{u_2 - u_2[i]}{Cs_{u2}}\right)}. \end{cases}$$

В ходе реализации описанного выше алгоритма прогноза (34) - (35), на основании К-модели (33), при не зашумленных данных были получены следующие результаты в ста точках: среднеквадратичная ошибка моделирования по первому выходу 0.0059, по второму0.0135, суммарная ошибка 0,0194.

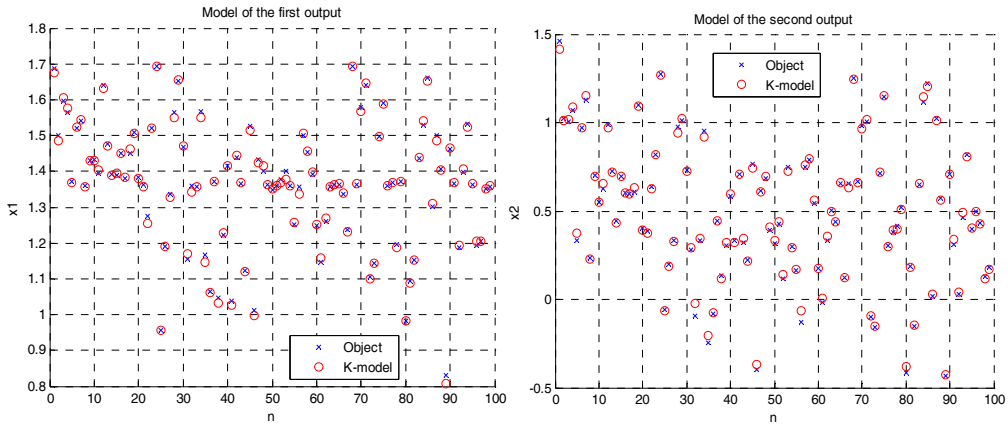


Рисунок 2 – Сравнение прогнозных результатов, полученных с помощью К-модели, с данными измерений в ста точках

Заключение

В работе проведено исследование процесса нефтезагрязнения почвы с целью постановки задачи моделирования в условиях, максимально приближенным к реальным условиям. На основании полученных данных о характере и специфике процесса предложены новые модели процесса, объединяющие в себе фундаментальные законы теории фильтрации; параметрические уравнения, полученные на основании проводимых ранее исследований, а также выявленные закономерности, не поддающиеся параметризации в силу недостатка информации о виде зависимости и ограниченности средств контроля. Также представлены результаты вычислительного эксперимента для случая меньшей размерности безотносительно рассматриваемой задачи, показывающего работоспособность предложенного алгоритма моделирования.

Список литературы

[1] Катастрофы: аварии на нефтепроводах [Сайт] / Catastrophes: accident sat oil-pipelines. URL: http://www.uischool8.ru/old/netproject/baikal/katastr/katastr-0.htm(дата обращения: 25.07.2013).

[2] Тюленева В. А., Соляник В. А., Васькина И. В., Шалугин В. С. К вопросу исследования фильтрации нефти в почвах //Вісник КДПУ. Випуск 2/2006 (37). Частина 2, С. 110–112.

[3] Росляк А. Т. Физика пласта: Курс лекций.–Изд-во Томского политехнического университета. – Томск, 2008. – 131 с.

[4] Molokova N. V., Konnykh M. A. Modeling of the Dynamics of Spreading of Spilled Hydrocarbons Taking into Account the Gravity-Capillary Interaction // Журнал СФУ. – Красноярск, 2012. – Вып. 5(4), С. 462–470.

[5] Медведев А. В. Теория непараметрических систем. К-модели // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 3. С.57-62.

[6] Мальцева Т. В., Медведев А. В.О компьютерном исследовании К-моделей // Вестник СибГАУ. – Красноярск, 2013. – Вып.3 (49).

[7] Мальцева Т. В., Медведев А. В., Молокова Н. В. О К-моделях и их приложении [Электронный ресурс] М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2014. С. 2992–3003.Электрон. текстовые дан. (1074 файл.: 537 МБ). 1 электрон. опт. диск (DVDROM). ISBN 978-5-91450-151-5. Номер государственной регистрации 0321401153.

[8] Каневская Р. Д. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов / Р. Д. Каневская. – М., Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2002.

[9] Загвоздкин В. К., Заикин И. А., Быков А. А., Макиев Ю. Д., Малышев Д. В., Назаров В. Б. Методика оценки эколого-экономических последствий загрязнения земель нефтью и нефтепродуктами // Проблемы анализа риска. – М.: Финансовый издательский дом «Деловой экспресс», 2005. – 1(2), С.6–28.

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОЙ КОМПАНИИ

А.С. Рагузин, Н.Г. Губанов
Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
RAS-83@mail.ru

Ключевые слова: *система синхронизации времени, модель временной шкалы, метод сравнения временных шкал, метод коррекции временной шкалы, метки времени*

Abstract
The article describes the construction of a functional model of time synchronization of information systems, which is based on the protocol NTP. This system is optimal for time synchronization at the power of the regional power grid company. Introduced the term base model of system time synchronization. In the article the mathematical modeling of the local timeline, means of comparison of time and their correction. The obtained results allow to choose the appropriate means, depending on the imposed requirements of the accuracy and stability.

Введение

Вопрос организации типовой комплексной системы синхронизации времени (ССВ) информационных систем региональной электросетевой компании (РСК) был рассмотрен в статьях [1, 2]. Такая ССВ охватывает значительно число различного рода информационных систем технологических объектов РСК. Уточненная типовая схема организации ССВ представлена на рисунке 1.

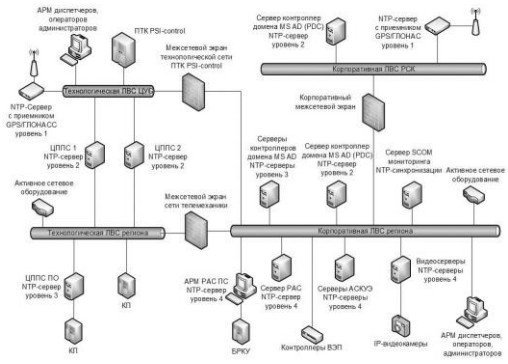


Рисунок 1 – Типовая схема организации ССВ

В качестве наиболее оптимального способа поддержания единого времени, в [1] было предложено использовать стандартизированный протокол синхронизации времени NTP, широко применяемый в пакетных сетях передачи данных. В данной статье рассмотрены вопросы разработки функциональной модели такой ССВ, а также методов моделирования ее работы.

1 Описание ССВ, разработка функциональной модели и выбор объектов моделирования

Определим ССВ как набор временных шкал (ВШ), распределенный на значительной территории, и средств, обеспечивающих синхронизацию их показаний и использующих стандартные протоколы обмена данными для сетей с коммутацией пакетов.

При этом ССВ может быть реализована разными методами, применяемыми для получения исходной ВШ, для передачи меток времени (МВ) (каналы передачи данных, протоколы), для сравнения и корректировки ВШ (фазовая, либо частотная подстройка).

С целью наиболее рационального применения имеющихся в РСК технических ресурсов, в качестве структурной основы, моделируемой ССВ, в [1] была взята структура сетей передачи данных РСК, с включенными в нее информационными системами, организованная по технологии пакетной передачи данных Ethernet. В связи с этим структура ССВ в большинстве случаев определяется топологией, построенной в РСК, сети передачи данных, и в общем виде представляет собой схему дерева, а на различных участках линейную цепь, либо схему «звезда».

В случае организации функционирования ССВ на каком-либо участке по схеме «звезда», появляется возможность производить синхронизацию всех локальных ВШ на узлах, расположенных в лучах «звезды», напрямую с эталонной ВШ на узле, расположенном в центре. Во втором случае, при функционировании ССВ по линейной схеме, каждый её узел синхронизирует свою локальную ВШ с ВШ предыдущего узла. Таким образом, функциональную схема ССВ описывающая процесс синхронизации от узла с эталонной ВШ до последнего узла, расположенного в одной из ветвей дерева, можно представить в виде линейной схемы, состоящей из N узлов, которые последовательно объединяются каналами передачи данных (рисунок 2). При этом, процесс синхронизации ВШ последнего узла с первой осуществляется через некоторое количество промежуточных узлов. Из-за появления в процессе синхронизации ошибки на каждом участке схемы и их суммирования по всем участкам, точность синхронизации времени падает.

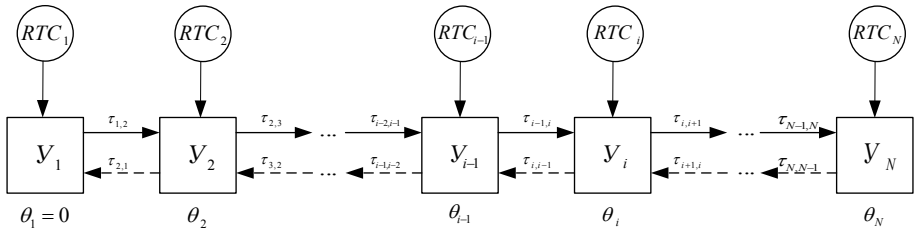


Рисунок 2 – Функциональная схема одной из ветвей ССВ

На рисунке 2: $У_i$ – *i*-й узел моделируемой ССВ; RTC_i – аппаратные часы реального времени узла $У_i$; $\tau_{i-1,i}$, $\tau_{i,i-1}$ – задержки в канале передачи от узла $У_{i-1}$ к узлу $У_i$ и от узла $У_i$ к узлу $У_{i-1}$ соответственно; θ_i – ошибка времени ВШ узла $У_i$; относительно ВШ узла $У_1$ где i = 1...*N*. $У_1$ – узел, ВШ которого считается эталонной; $У_{i-1}$ – ведущий узел, $У_i$ – ведомый узел (i = 2...*N*).

Задача установления единого времени для всех узлов системы сводится к некому набору последовательных задач синхронизации ВШ двух соседних узлов схемы, при этом ВШ узла $У_i$ сравнивается с ВШ узла $У_{i-1}$, а затем корректируется на значение разницы, полученной при сравнения их шкал.

Из-за большого количества узлов, входящих в типовую ССВ, провести полное качественное описание и анализ функциональной схемы, приведенной на рисунке 2, становится довольно сложной задачей. Поэтому, для упрощения этой задачи, введем понятие базовой модели, которая будет включает в себя два соседних узла. Для каждой базовой модели системы, объединяющей $У_{i-1}$ и $У_i$ (i = 2...*N*), определяется θ_i - ошибка ВШ узла i относительно ВШ узла i–1. Таким образом, ошибку любого узла ССВ относительно исходного, ВШ которого принята эталонной, можно определить, как $\theta_i = \sum_{j=2}^{i} \theta_j$ для $i = 2, 3, \ldots, N$.

На всех узлах моделируемой ССВ для получения первоначальной локальной ВШ используются аппаратные часы реального времени (англ. Real Time Clock, RTC). Следует разделить ВШ на аппаратные (кварцевые часы, используемые в аппаратном оборудовании) и системные (программные часы, используемые в операционных системах). После включения устройства, в

течение начальной загрузки, операционная система синхронизирует системные часы, т.е. системную ВШ с аппаратными часы, аппаратной ВШ. После этого, те и другие ВШ определяют время независимо.

Узлы ССВ включены в общую сеть каналом передачи данных. Каждый узел включает программные средства синхронизации своей системной ВШ с системной ВШ другого узла. Синхронизация ВШ одного узла с ВШ другого узла достигается путем обмена МВ между этими узлами с помощью сетевых протоколов синхронизации. При этом один из узлов является ведущим, его ВШ считается точной, а другой ведомым.

Исходя из вышесказанного, определяются следующие объекты для моделирования ССВ:

1) аппаратные часы;
2) средства синхронизации ВШ;
3) средства коррекции ВШ.

В качестве способа моделирование целесообразно выбрать математическое макромоделирование, которое, определяя основные параметры моделируемых объектов, позволяет получить их простое математическое описание, сохраняя при этом основные принципы их функционирования [3].

2 Модель локальной временной шкалы

Как уже было сказано, в моделируемой ССВ ВШ на узле формируется от сигналов аппаратных часов реального времени. Большинство RTC использует кварцевый генератор с резонатором на частоте 32768 Гц, но некоторые используют частоту питающей сети.

Представим абсолютное время с помощью некоторого процесса, который может быть описан следующим колебанием $s(t) = A\mathbf{sin}P(t)$, где t – абсолютное время, A – амплитуда колебаний, $P(t)$ – фаза колебаний.

Для идеального колебания идеального генератора фаза описывается следующим выражением $P(t) = 2\boldsymbol{\pi}v_{const}t + \varphi_{0_{const}}$, где $v_{const} = 1/T_{const}$ – постоянная частота колебаний, T_{const} – постоянный период колебаний, $\varphi_{0_{const}}$ – начальная фаза колебаний в t_0.

Тогда абсолютное время может быть описано выражением $t = [P(t) - \varphi_{0_{const}}]/2\boldsymbol{\pi}v_{const}$.

Но на практике для реального генератора, применяемого в RTC, значения частоты v и фазы φ_0 зачастую отличаются от идеального генератора и изменяются с течением времени под воздействием различных факторов. Поэтому для локальной ВШ справедливо

$$T(t) = \frac{2\boldsymbol{\pi}vt + \varphi_0 - \varphi_{0_{const}}}{2\boldsymbol{\pi}v_{const}} = \frac{v}{v_{const}}t + \frac{\varphi_0 - \varphi_{0_{const}}}{2\boldsymbol{\pi}v_{const}},$$

где первый член v/v_const описывает масштаб локальной ВШ, а второй – сдвиг начала отсчета локальной ВШ от t_0.

Для приведения локальной ВШ к абсолютной требуется совместить начало отсчета этих шкал t_0 и уравнять частоты колебаний, так как при увеличении v локальная ВШ будет ускоренной, а при уменьшении – замедленной.

Точность показаний ВШ характеризуется ошибкой времени, которая может быть представлена как [4]

(1) $\theta(t) = T(t) - t$.

Для задач синхронизации времени вместо абсолютной применяют так называемую эталонную ВШ $T_{ref}(t)$, полученную от «надежного источника времени». Тогда (1) можно представить в виде [4] $\theta(t) = T(t) - T_{ref}(t)$.

3 Метод сравнения временных шкал узлов базовой модели

В моделируемой ССВ принят клиент-серверный режим работы протокола NTP. Для обмена синхронизационной информацией между клиентами и серверами используются специ-

альные сообщения. Все значения времени представляются в двойном формате с битами, пронумерованными в обратном порядке. В качестве математического описания процесса сравнения ВШ двух узлов базовой модели ССВ, ниже рассматривается процесс сравнения по широко используемому в телекоммуникациях *методу двунаправленной передачи*.

На рисунке 3 представлена временная диаграмма, поясняющая процесс сравнения ВШ двух узлов базовой модели.

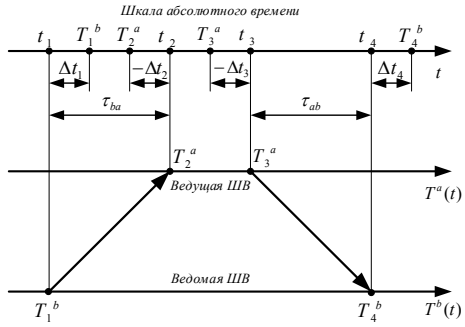


Рисунок 3 – Временная диаграмма сравнения ВШ двух узлов

В момент t_1 ведомый узел B фиксирует показание своей ВШ T_1^b и отправляет его в виде МВ ведущему узлу A. Узел A принимает ее и фиксирует этот момент по своей ВШ показателем времени T_2^a.

В момент t_3 узел A фиксирует показание своей ВШ T_3^a и отправляет его, а также T_2^a в виде МВ узлу B. Узел B принимает МВ T_2^a, T_3^a и фиксирует показание T_4^b своей ВШ.

По окончании цикла обмена сообщениями узел B имеет четыре МВ T_1^b, T_2^a, T_3^a и T_4^b. Они позволяют вычислить ошибку ведомой ВШ относительно ведущей.

Согласно представленной на рисунке 3 временной диаграмме, получается система уравнений:

$$\begin{cases}\tau_{ba} = (T_2^a - \Delta t_2^a) - (T_1^b - \Delta t_1^b),\\ \tau_{ab} = (T_4^b - \Delta t_4^b) - (T_3^a - \Delta t_3^a),\end{cases}$$

где $\tau_{ab} = t_2 - t_1$, $\tau_{ab} = t_4 - t_3$ – задержки распространения МВ в канале передачи от узла B к узлу A и от узла A к узлу B соответственно; $\Delta t_1^b = T_1^b - t_1$, $\Delta t_2^a = T_2^a - t_2$, $\Delta t_3^a = T_3^a - t_3$, $\Delta t_4^b = T_4^b - t_4$ – ошибки показаний ВШ. При этом, в случае эталонной ведущей ВШ принимается $\Delta t_2^a = \Delta t_3^a = 0$.

Имея в системе двух уравнений шесть неизвестных величин τ_{ab}, τ_{ba}, Δt_1^b, Δt_2^a, Δt_3^a, Δt_4^b, можно говорить о недостаточности априорных данных. Для устранения неизвестных, можно ввести новые параметры и условия, либо определить их некоторым другим способом.

Например, приняв величины $\Delta t_{12} = \Delta t_1^b - \Delta t_2^a$ и $\Delta t_{43} = \Delta t_4^b - \Delta t_3^a$, которые отражают разницу между ведущей и ведомой ВШ узлов A и B вначале и в конце цикла сравнения, можно из (2) получить систему уравнений с четырьмя неизвестными:

(2) $\tau_{ba} - \Delta t_{12} = T_2^a - T_1^b$, $\tau_{ab} + \Delta t_{43} = T_4^b - T_3^a$.

Складывая первое уравнение со вторым и вычитая первое уравнения из второго, получим из (3) систему вида [5]

$$(3)\quad \begin{cases}\tau_\Sigma + \Delta\theta = (T_4^b - T_1^b) - (T_3^a - T_2^a),\\ \theta_\Sigma - \Delta\tau = (T_4^b + T_1^b) - (T_3^a + T_2^a),\end{cases}$$

где $\tau_\Sigma = \tau_{ab} + \tau_{ba}$; $\Delta\tau = \tau_{ba} - \tau_{ab}$; $\Delta\theta = \Delta t_{43} - \Delta t_{12}$; $\theta_\Sigma = \Delta t_{12} + \Delta t_{43}$.

Как предлагалось выше, для уменьшения числа неизвестных в уравнении, введем ограничительные условия. Пусть:

- шкалы узлов A и B идентичны $\Delta\theta = 0$ или $\Delta t_{43} = \Delta t_{12} = \theta$, но при этом имеют неизменный временной сдвиг θ;
- задержки в канале передачи данных равны $\Delta\tau = 0$, $\tau_{ab} = \tau_{ba} = \tau$.

Тогда из системы (4) можно легко определить время распространения МВ в канале τ и временной сдвиг θ [6, 7]: $\tau = 0{,}5[(T_4^b - T_1^b) - (T_3^a - T_2^a)]$, $\theta = 0{,}5[(T_4^b + T_1^b) - (T_3^a + T_2^a)]$.

В другом случае, введя одно ограничительное условие, можно получить систему из трех уравнений. Пусть, при условии $\Delta\theta = 0$ или $\Delta t_{43} = \Delta t_{12} = \theta$, система уравнений (4) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \tau_\Sigma = (T_4^b - T_1^b) - (T_3^a - T_2^a), \\ \theta_\Sigma - \Delta\tau = (T_4^b + T_1^b) - (T_3^a + T_2^a). \end{cases}$$

Тогда, при известных задержках в канале $\Delta\tau$, можно определить временной сдвиг ВШ узлов базовой модели.

4 Методы коррекции шкалы времени

Как описано в [6] процедура коррекции времени протокола NTP использует две принципиально различные системы управления с обратной связью (СУОС). В СУОС с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) периодически с интервалом μ секунд происходит обновление значения фазы, которое напрямую используется для минимизации ошибки времени, а косвенно – ошибки частоты. В СУОС с частотной автоподстройкой частоты (ЧАПЧ) периодически с интервалом μ секунд происходит обновление значения частоты, которое напрямую используется для минимизации ошибки частоты, а косвенно – ошибки времени.

В качестве математического описания процесса коррекции ВШ, ниже описан довольно известный комбинированный метод подстройки [8], который основывается на одношаговой подстройке, но при этом управляет частотой. Определим, что значение погрешности между истинным и измеренным расхождением ВШ $\xi = \theta - \theta'$ после сравнения ВШ не выше заданного предела ошибки времени локальной ВШ $\pm\xi_M$.

Для начала рассмотрим *метод одношаговой подстройки*. Здесь значение времени ВШ изменяется скачкообразно на величину накопившейся ошибки за интервал времени μ (рисунок 4).

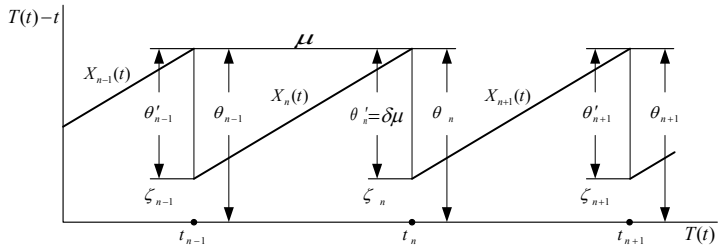


Рисунок 4 – Метод одношаговой подстройки временной шкалы

Так, согласно [8], из-за расхождения частот Δv на n-м временном интервале ВШ накапливается ошибка $X_n(t)$, которая растет с течением времени согласно следующему выражению $X_n(t) = \xi_{n-1} + \delta(t - t_{n-1})$, $t_{n-1} \le t < t_n$, где $\delta = \Delta v / v_{const}$ – величина частотного сдвига корректируемой ВШ.

Тогда, в момент времени очередной коррекции t_n, ошибка времени будет определяться, как $\theta_n = X_n(t_n) = \xi_{n-1} + \delta(t_n - t_{n-1}) = \xi_{n-1} + \delta\mu$.

Т.е., за интервал времени $\mu = t_n - t_{n-1}$ значение ВШ изменяется на $\theta'_n = \theta_n - \xi_{n-1} = \delta\mu$.

Таким образом, при проведении коррекции методом одношаговой подстройки, значение ведомой ВШ изменяется скачкообразно на θ'_n.

Особенностью *комбинированного метода подстройки*, является то, что после выполнения коррекции по методу одношаговой подстройки, вычисляется отклонение частотного сдвига, которое приводит к появлению ошибки ВШ за интервал времени μ, от номинального значения

(4) $\frac{\Delta v}{v_{const}} = \frac{\theta'_n}{\mu} = \frac{\delta\mu}{\mu} = \delta.$

Опираясь на (5), вносится поправка Δv в частоту генератора RTC, который формирует ВШ ведомого узла (рисунок 5).

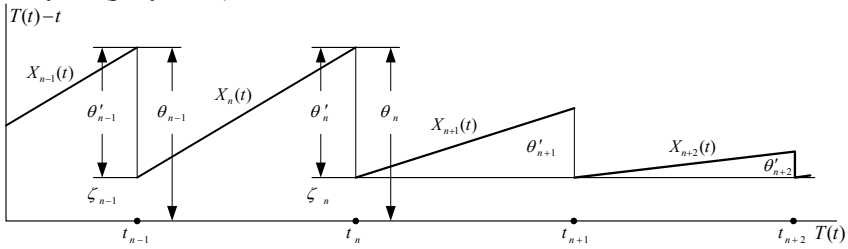


Рисунок 5 – Метод комбинированной подстройки ШВ

Таким образом, фильтром с СУОС при каждом обновлении данных синхронизации обеспечивается экспоненциальное затухание значения $X_n(t)$.

Заключение

Авторы считают, что полученные результаты, а именно описанные в статье методы моделирования основных системных задач при построении ССВ, позволят принимать эффективные решения в вопросах выбора оборудования для поддержания единого времени не только в информационных системах РСК, но и других гетерогенных распределенных системах. Это позволит повысить показатели точности и надежности синхронизации времени информационных систем, а значит обеспечить их более легкую интеграцию.

Список литературы

[1] Рагузин А.С., Шишков М.А., Носенко А.Ф. Синхронизация времени гетерогенных информационных систем технологических объектов региональной электросетевой компании // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды междунар. науч.-техн. конф.: сборник статей. – Самара: СамГТУ, 2011. – Т.2. – С. 7-12.

[2] Рагузин А.С., Шишков М.А., Носенко А.Ф. Мониторинг синхронизации времени информационных систем технологических объектов региональной электросетевой компании // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды III междунар. науч.-техн. конф.: сборник статей. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – Т.2. – С. 58-61.

[3] Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР: Учебник для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.

[4] Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи / Стефано Брени; Пер. с англ. Н.Л. Бирюкова, С.Я. Несвитской, Н.Р. Триски; под ред. А.В. Рыжкова. – М.: Мир, 2003. – 456 с.

[5] Коновалов Г.В., Новожилов Е.О. Моделирование способов передачи сигналов времени при частотно-временном обеспечении телекоммуникаций // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Молодые ученые – науке, технологиям и профессиональному образованию». – М.: Энергоатомиздат, 2008. – часть 4. – С. 205-208.

[6] Mills D.L. Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification. RFC 5905 // University of Delaware. – 2010. – June.

[7] Савчук А. В., Шапошников В. Н., Черняк И. П. Теоретические основы синхронизации текущего времени в телекоммуникациях // Зв'язок. – 2007. – № 3. – С. 5-9.

[8] Новожилов Е.О. Моделирование передачи сигналов времени в цифровых сетях электросвязи // Современные проблемы частотно-временного обеспечения сетей электросвязи: Сборник трудов междунар. науч.-техн. конф. – М.: ФГУП ЦНИИС, 2010. – С. 191-199.

УПРАВЛЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ МОБИЛЬНЫМ ОБЪЕКТОМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

А.А. Родькин

Набережночелнинский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», кафедра «Системный анализ и информатика»

Набережные Челны, проспект Мира, д.13

temnyi@gmail.com

тел: +7 (904) 666-44-22

Ключевые слова: *автономные транспортные роботы; алгоритмы машинного зрения; распознавание.*

Abstract

This article describes the main sequences of algorithms of car number detecting and recognizing, as well article describes software used to implement algorithms.

Введение

На данный момент наблюдается значительный рост рынка автономных мобильных роботов [1-3] для использования как в обычных, так и в сложных, быстро меняющихся условиях. Существует большое количество областей человеческой деятельности, где желательной является замена оператора-человека на автономного мобильного робота. Исследованиям в этой области посвящено большое количество научных работ, что привело к значительному прогрессу в разработке алгоритмов для автономных мобильных роботов.

Как первое приближение к решению глобальной задачи создания алгоритмов управления автоматизированным мобильным объектом может быть рассмотрена задача распознавания номера впереди едущего транспортного средства [1]. Номер потребуется для однозначной идентификации «ведущего» всей группы, а также служит «маркером» движения. Также с помощью разработанного алгоритма при использовании определённого набора классифицирующих признаков может осуществляться распознавание других типов объектов, служащих маркерами движения (дорога, тропа), или распознанных как препятствия (камни, деревья, реки).

Целью данной работы является модификация ранее разработанного алгоритма [1] при помощи модифицированного метода Виолы-Джонса с целью повышения точности работы и повышения процента эффективного распознавания номерных знаков. Как дополнение — предложим такой вариант, чтобы время исполнения алгоритма оставалось в тех же временных рамках, что и до модификации, а саму модификацию, таким образом, будем производить за счёт повышения требований к минимальной необходимой для работы вычислительной мощи.

Был проведен анализ существующих на Российском рынке программных продуктов определения номерных знаков. Эти коммерческие проекты имеют довольно высокую стоимость €1500 — 3000. Заявленная точность распознавания обычно завышена и не совпадает с реальной. При испытании демо-версий надежно распознаются лишь чистые номера высокой контрастности и относительно большого разрешения. В итоге на заявленную точность 90-98%, приходится реальная — 80-87% [1, 2].

Алгоритмы распознавания

Используемые алгоритмы локализации и распознавания номерных знаков естественно не публикуются, лишь некоторые компании называют их типы. Для распознавания обычно используют нейро-подобные и шаблонные алгоритмы.

Весомым ограничивающим фактором на цель использования системы является максимальная скорость автомобиля, при которой программа способна локализовать и распознать номер на движущемся транспорте. На что влияют во-первых способ установки камеры — высота и наклон; а во-вторых быстродействие обработки изображения автомобиля [4-6].

Решение многих проблем науки и практики приводит к необходимости извлечения полезной информации из различного рода многомерных данных, которые, по аналогии с оптическими изображениями, будем называть многомерными изображениями или просто изображениями [7]. Характерно, что эти задачи приходится решать при наличии различного рода мешающих факторов – помех, переменчивости условий наблюдения, динамики наблюдаемого объекта, взаимного перемещения приемника и объекта и т.п. Полезный сигнал может быть очень слаб по отношению к помехам и визуально неразличим. Нередко объем исходных данных очень велик, они поступают с большой скоростью и требуют обработки в режиме реального времени. Единственным выходом из такой ситуации является компьютерная обработка изображений. Для этого необходимо создание соответствующих математических методов описания и обработки изображений, а также программного обеспечения применительно к конкретным задачам.

Несмотря на огромное разнообразие практических задач обработки изображений, они сводятся к небольшому количеству следующих основных задач [7].

1) Фильтрация и улучшение визуального восприятия. Как уже отмечалось, полезное изображение может наблюдаться на фоне различных помех, которые и требуется по возможности ослабить. Кроме того, может потребоваться сделать изображение более контрастным, выделить контуры и т. д.
2) Обнаружение объектов и их идентификация. Требуется на фоне мешающих изображений найти интересующие нас объекты. Если таких объектов может быть несколько типов, то дополнительно нужно их классифицировать. В качестве примеров можно привести распознавание номеров проезжающих автомобилей, обнаружение и идентификацию летательных аппаратов и т. д. Иногда задача обнаружения ставится менее определенно – требуется обнаружить аномалии, т. е. участки изображений, чем-то отличающиеся от своего окружения [7].
3) Оценка геометрических трансформаций и совмещение изображений. В процессе наблюдения все изображения или отдельные его части могут перемещаться из-за динамики сцены, движения приемника. Таким образом, одни и те же части изображений находятся на наблюдаемых кадрах в разных местах, т.е. имеются геометрические трансформации изображений. Требуется оценить геометрические трансформации, т. е. совместить элементы одного изображения с соответствующими им элементами на другом [7].
4) Сжатие изображений. Большой объем и высокая скорость поступления данных ставят повышенные требования к накопителям и каналам передачи изображений. Использование специфики изображений часто дает возможность достигнуть значительно большего сжатия, чем это позволяют обычные архиваторы.

Кроме перечисленных задач собственно обработки, иногда возникает задача их понимания, т. е. «а что бы это значило и какие отсюда следуют выводы?»

В свою очередь, узкую задачу распознавания номера можно декомпозировать до нескольких мини-задач (каждая со своим собственным алгоритмом). При этом часть этих мини-задач можно возложить на оборудование и программное обеспечение сторонних производителей (применяя их в качестве т.н. «чёрных ящиков»).

Предлагаемая связь модуля видеозахвата и распознавания номера с оборудованием, функциями захвата и кодеками, а также другим дополнительным программным обеспечением сторонних производителей и разработчиков в наиболее общем виде представлена на рисунке 1:

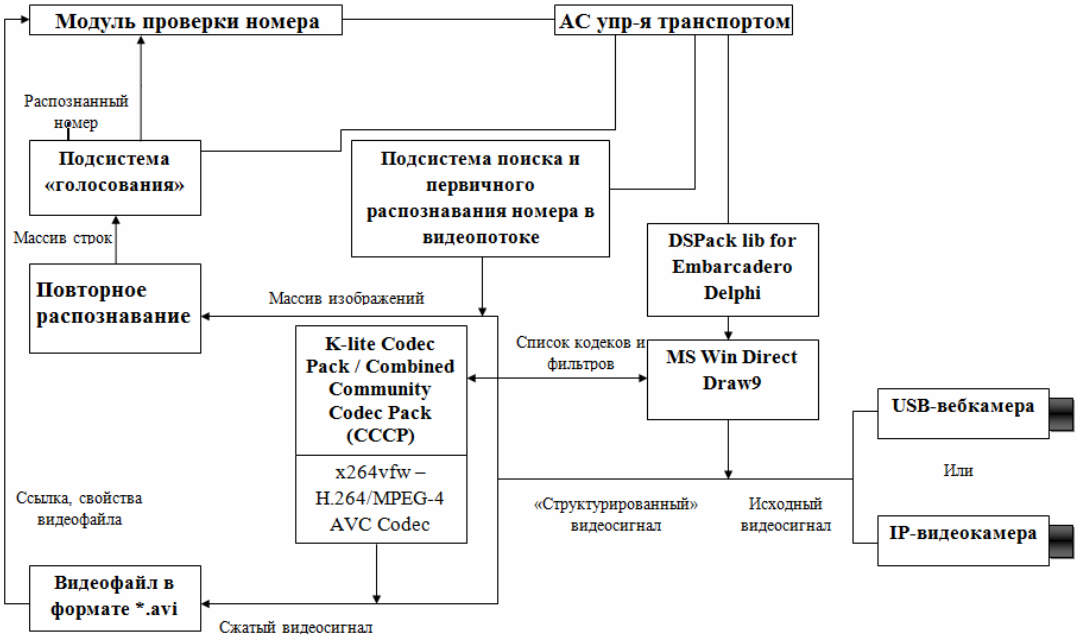


Рисунок 1 – Схема связи модуля распознавания номера с оборудованием и внешним программным обеспечением

Таким образом, сигнал может поступать как с USB-вебкамеры, так и с IP-видеокамеры., далее система с помощью функций MS DirectDraw9 получает доступ к отдельным кадрам или всему видеопотоку. Видеопоток кодируется сжимается и записывается на носитель в режиме «на лету». При использовании указанного выше кодека суточный объём видеоданных составляет около 4-10 Гб (в зависимости от разрешения). С помощью подсистемы определения номера АС получает момент его появления в кадре, кадры этого момента времени передаются алгоритму уточнения и с помощью подсистемы «голосования» определяется номер.

Алгоритм поиска номера в видеопотоке состоит из нескольких этапов:

1) Сканировать изображение до появления чего-нибудь, похожего на номер;
2) Найти номер на первом годном кадре;
3) Отследить положение номера на 10 кадрах;
4) Попытаться распознать номер на каждом кадре;
5) Провести голосование между кадрами за итоговый номер
6) Выдать результат.

В свою очередь, алгоритм определения области номерного знака в кадре (1, 2 этапы вышеописанной последовательности) состоит из следующих этапов (см. рисунок 2):

- Линейное растяжение;
- Медианная фильтрация;
- Фильтр Laplacian of Gaussian;

- Бинаризация;
- Морфологичекое раскрытие;
- Раскраска сегментов (в самом алгоритме не применяется, сделана для наглядности — позволяет оценить работу всего набора фильтров, направленного на превращение кадра в совокупность замкнутых контуров).

Рисунок 2 – этапы работы алгоритма определения области номерного знака

Следует заметить, что этот алгоритм не предназначен для распознавания цифровых и буквенных знаков на номере, а лишь для первичного выявления возможной области номера в пределах кадра, с целью последующей передачи более точным и ресурсоемким алгоритмам (и/или стороннему ПО для распознавания).

Так же на первом и втором этапах в качестве дополнительного алгоритма воспользуемся методом Виолы-Джонса для поиска границ номера в исходном кадре [8]. Ключевой момент — это использование каскадной модели (или вырожденного дерева принятия решений): в каждом узле дерева с помощью каскада принимается решение — может ли на изображении содержатся объект или нет. Если объект не содержится, то алгоритм заканчивает свою работу, если он может содержаться, то выполняется переход к последующему узлу. Обучение построено таким образом, чтобы на начальных уровнях с наименьшими затратами отбрасывать большую часть окон, в которых не может содержаться объект. В случае распознавания автомобильных номеров первый уровень содержит шесть классификаторов [9].

Следует учесть, что высокая скорость обсчета признака не компенсирует значительное количество различных возможных признаков. Поэтому с методом Виолы-Джонса используется вариация алгоритма обучения AdaBoost [10], как для выбора признаков, так и для настройки классификаторов. Мы же воспользуемся следующим решением: ограничим время работы алгоритма Виолы-Джонса временем, которое первый вычислительный поток центрального про-

цессора потратит на обработку изображения вышеупомянутыми фильтрами (линейное растяжение, медианная фильтрация, фильтр Laplacian of Gaussian, бинаризация, морфологичекое раскрытие). При завершении работы первого алгоритма — оборвём выполнение второго (выполняемого за счёт второго вычислительного потока) и совместим координаты границ объектов, найденных первым и вторым методами. Пересечения карт этих уровней дадут карту возможных областей местонахождения номера со значительно выросшей вероятностью.

Время ограничивается для того, чтобы выигрыш в точности поиска номерной пластины в пределах кадра не привёл к увеличению времени поиска, что критично для дальнейших этапов распознавания. В то же время требуется фактическое удвоение минимальной требуемой вычислительной мощи, что компенсируется выбором более мощного ЦПУ, обладающего двумя вычислительными потоками.

Рисунок 3 – работа алгоритма Виолы-Джонса (уровень 3)

Дальнейшее распознавание цифр и букв на номерном знаке происходит следующим образом:

1) С помощью подпрограммы распознавания находим в области номера цифры и буквы (сам алгоритм работает, как уже упоминалось, на уровне сравнения с готовыми образцами);
2) Повторный запуск алгоритма распознавания с целью исключения ошибок (только для найденных областей цифр, а не для всей области пластины);
3) Полученные на 10 кадрах номера сравниваются, набравшие большинство голосов символы передаются далее, для использования той или иной АС (рисунок 4).

Рисунок 4 — полное распознавание номера через алгоритм сравнения с образцами

Заключение

Таким образом, в ходе работы модифицированного алгоритма пройден полный цикл распознавания номерного знака. В ходе тестов на базе из 1400 номерных знаков при среднем времени в 800 мс на номер точность распознавания составила 94,8%.

Недостатком алгоритма выступает его возросшая по сравнению с протестированными аналогами ресурсоёмкость (требуется двухпоточный процессор), а так же время распознавания

в 800 мс. В то же время удалось значительно увеличить эффективный процент распознавания до ~95%.

Список литературы

[1] Родькин А.А., Разработка и исследование математических моделей и алгоритмов распознавания номера транспортного средства, Материалы Международной научно-технической конференции "Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2014" (МНТК "ИМТОМ-2014"), посвященной 90-летию со дня рождения Юнусова Файзрахмана Салаховича. Ч. 2. - Казань, 2014. -С. 104-108.

[2] Umit Ozguner, Tankut Acarman, Keith Alan Redmill, Autonomous Ground Vehicles, Artech House, 2011, 288 стр.

[3] Лисицкий Д.Н., Разработка алгоритмов управления движением автономных мобильных роботов, автореферат диссертации, 2012

[4] Jahne, B., Haussbecker, H., Computer Vision and Applications, Academic Press, 2000.

[5] Конушин, А. Введение в компьютерное зрение — курс лекций [Электронный ресурс] URL: http://coursesgraphiconru/main/cvint.

[6] Батанов, П. Распознавание регистрационных номеров с автомобилей с помощью Simulink MatLab [Электронный ресурс] URL: http://habrahabr.ru/blogs/image_processing/114529/

[7] Крашенинников В.Р. Основы теории обработки изображений: Учебное пособие. – Ульяновск: Ул-ГТУ, 2003. – 150 с.

[8] Viola P., Jones M., Robust real-time face detection. IJCV 57(2), 2004

[9] Lienhart R., Kuranov E., Pisarevsky V.: Empirical analysis of detection cascades of boosted classifiers for rapid object detection. In: PRS 2003

[10] A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting Journal of Computer and System Sciences, no. 55. 1997

ONTOWORKER: ПРОГРАММНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ДЛЯ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

В.А. Семёнова, В.С. Смирнов, С.В. Смирнов

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
queenbfjr@gmail.com, victorsmirnov92@gmail.com, smirnov@iccs.ru
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *формальная онтология, онтологический анализ данных, анализ формальных понятий, обобщенная таблица «объекты-свойства», ограничения существования свойств, массовая программная платформа*

Abstract

In this paper an Ontological Data Analysis software prototype based on the Excel table processor is described. Unlike the others well-known based on empirical data formal ontology designing tools which are organized in a way of "object-properties" congruence, this software system supports domain's of interest data accumulation circumstances. Which includes the undefined intersubjective dependences limited description, the properties' initially known existence restrictions tracking and the multi-valued logic usage while processing the empiric semantic statements "*x* object has *y* property".

Введение

Онтологический анализ данных (ОАД) – методический комплекс для выявления понятийной структуры, или *формальной онтологии*, предметной области (ПрО) на основе эмпирических данных, организованных в виде соответствия «*объекты-свойства*» [1]. Такое протоколирование результатов измерения интересующих исследователя свойств у наблюдаемых объектов ПрО – широко распространенная и стандартизированная форма структуризации эмпирической информации, известная как таблица «объекты-свойства» (ТОС) [2].

В основу ОАД положен теоретически хорошо обоснованный метод *анализа формальных понятий* (АФП) [3], в котором отражен классический подход к понятию как к фундаментальному эпистемологическому элементу, определяемому объемом и содержанием. Фактически ОАД представляет собой надстройку и прагматическую «заточку» АФП. В частности, в дополнение к АФП в ОАД:

- поддерживается построение *произвольных отношений* между объектами;
- допускается различного рода *неполнота* эмпирической информации, и, как следствие, обработка *противоречий* в извлекаемых из первичных данных *базовых семантических суждениях* (БСС) вида «объекту *x* присуще свойство *y*»;
- учитываются, как правило, имеющиеся у исследователя сведения о взаимосвязи измеряемых свойств объектов (так называемые «*ограничения существования*» свойств [4]).

В полном объеме методический комплекс ОАД предполагается внедрить в общецелевую систему объектно-ориентированного моделирования *gB* («*good Base*»/«*graceful object-oriented data Base*») - развиваемый в течение ряда лет в Институте проблем управления сложными системами РАН инструментарий, реализующий семантическое моделирование и проектирование [5]. Однако отработку достаточно сложного и объемного методического и алгоритмического комплекса ОАД разумно первоначально осуществить на более простой основе. Такой подход прагматически оправдан еще и потому, что ОАД имеет самостоятельную ценность и может применяться автономно как цельный инструмент интеллектуального анализа данных.

Все эти соображения послужили основанием для разработки представляемого данной статьей прототипа программного продукта *OntoWorker*, который кратко может быть охарактеризован как программная лаборатория для онтологического анализа данных.

1 Обзор методического обеспечения лаборатории

Схема на рисунке 1 дает представление об основных этапах и информационных моделях ОАД, определяя состав методического, а затем алгоритмического и программного обеспечения OntoWorker.

Предполагается, что доступная исследователю информация о ПрО представлена *обобщенной таблицей* «*объекты-свойства*» (ОТОС), которая в отличие от общепринятого протокола для представления эмпирических данных - таблицы «объекты-свойства» - имеет более богатую и сложную структуру.

Строки ОТОС представляют множество $G^* = \{g_i\}_{i=1,\dots,r}$, $r = |G^*| \geq 1$, объектов исследуемой ПрО, попавших в поле зрения исследователя (т.е. множество *объектов обучающей выборки*: $G^* \subseteq G$, где G – всё мыслимое множество объектов ПрО), столбцы соответствуют множеству $M = \{m_j\}_{j=1,\dots,s}$, $s = |M| \geq 1$, *измеряемых* у объектов *свойств*, фиксируемых *процедурами измерения*, которыми располагает исследователь, а ячейки – матрица A - хранят *результаты измерений*.

ОАД учитывает следующие *реалии* накопления эмпирической информации:

- *многократные независимые измерения* свойств у объекта из обучающей выборки. Т.е. усматривается, что каждый объект $g_i \in G^*$ подвергается, вообще говоря, нескольким *сериям измерений*: $Se_{(i)} = \{se_{(i)k}\}_{k=1,\dots q_{(i)}}$, $q_{(i)} \geq 1$, $i = 1,\dots, r$, - с помощью всего арсенала измерительных процедур, применяемых для исследования ПрО. $Se = \bigcup_{i=1}^{r} Se_{(i)}$ - множество всех серий измерений, $|Se| = \sum_{i=1}^{r} |Se_{(i)}| = m$;
- использование *нескольких независимых источников* для оценки одного и того же свойства объекта. Т.е. принимается во внимание, что каждое актуальное для исследователя свойство $m_j \in M$ измеряется, вообще говоря, с помощью множества *процедур измерения* (совпадающих в смысле назначения, или конгруэнтных по назначению) $Pr_{(j)} = \{pr_{(j)k}\}_{k=1,\dots p_{(j)}}$, $p_{(j)} \geq 1$, $j = 1,\dots, s$, причем всякая процедура $pr_{(j)k}$ характеризуется *степенью доверия* к ее результатам $t_{(j)k}$. $Pr = \bigcup_{j=1}^{s} Pr_{(i)}$ - арсенал всех процедур измерений, $|Pr| = \sum_{j=1}^{s} |Pr_{(j)}| = n$;
- *полную результативность* выполнения измерительной процедуры. Считается, что всякий акт измерения кроме ожидаемого результата - *символа из шкалы динамического диапазона* измерительной процедуры (собирательно обозначим любой такой результат лингвистической константой «**X**») - может дать еще три *особых*:
  - «**None**», который свидетельствует о нахождении значения измеряемого свойства за порогами чувствительности, вне динамического диапазона средства измерений, о «семантическом несоответствии» исследуемого объекта и измерительной процедуры и др. [1, 6];
  - «**Failure**», который фиксирует невыполнение задачи измерений (отказ, сбой измерительного средства, воздержание при голосовании и т.п.);
  - «**NM**» (от англ. *not measured* - не измерялось), который указывает, что в действительности в рассматриваемой серии измерений данная процедура измерений не использовалась (фактически это позволяет сохранить *двумерный* характер ОТОС).

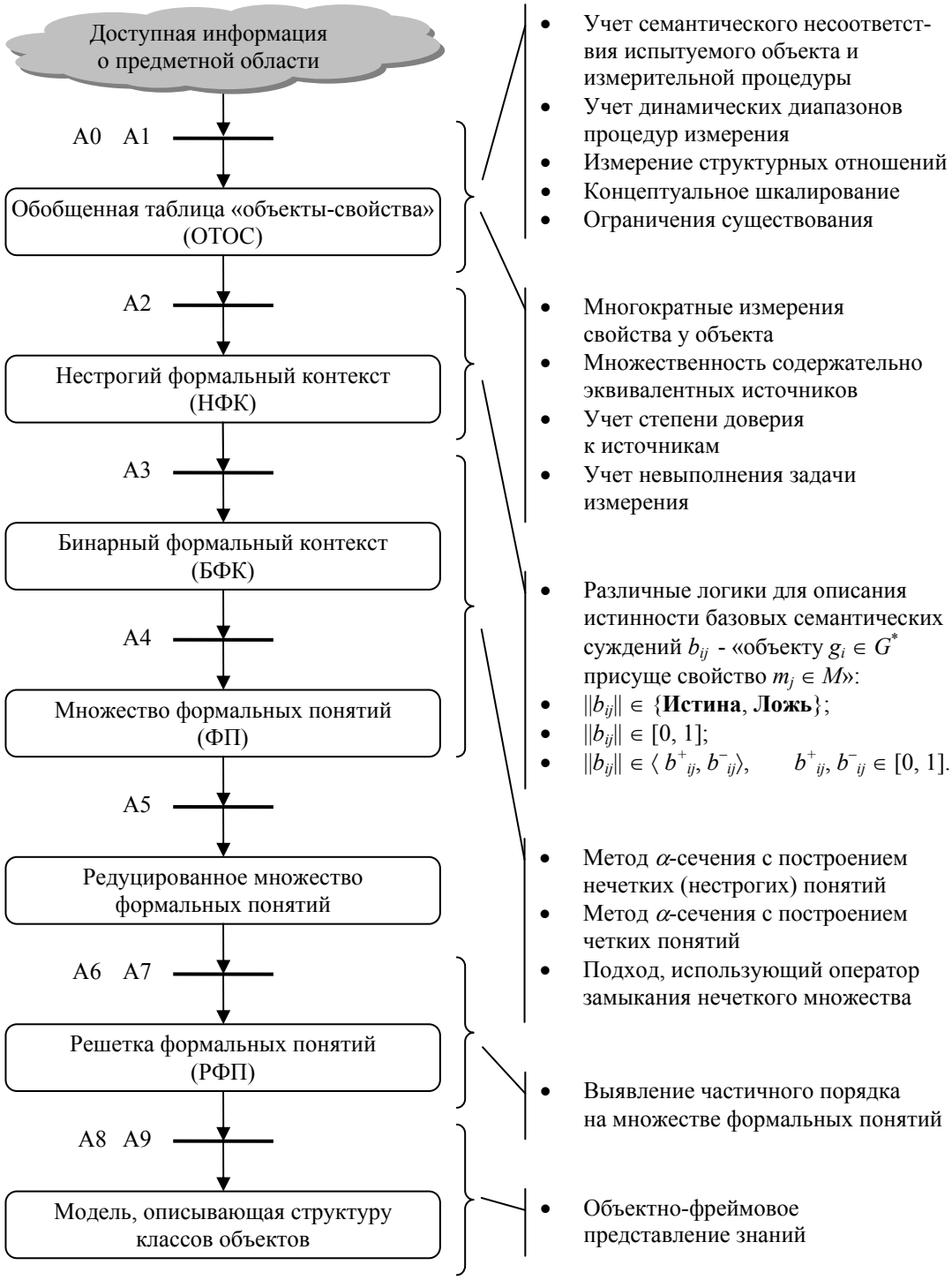


Рисунок 1 – Этапы и информационные модели онтологического анализа данных

В общем случае кроме протокола измерения свойств объектов исследуемой ПрО исследователю *априори* могут быть известны определенные *связи между свойствами*. Простые и мощные модели характерных типов подобных связей предложены в [4] в форме бинарных отношений «*ограничений существования*» свойств. Так пара свойств m_j, $m_k \in M, j \neq k$ для любого объекта ПрО (и, следовательно, для $\forall g_i \in G^*$) могут быть:

- *несовместимыми*, если, обладая свойством m_j, объект g_i заведомо не обладает свойством m_k, и наоборот;
- *обусловленными*, если, обладая свойством m_j, объект g_i непреложно обладает свойством m_k, хотя обратное может быть неверно;
- *взаимообусловленными*, если, обладая свойством m_j, объект g_i безусловно обладает свойством m_k, и наоборот (очевидно, что взаимообусловленность может быть описана двумя отношениями обусловленности).

Сложную зависимость свойств порождает фундаментальная когнитивная процедура АФП - *концептуальное шкалирование* [3], когда исследователь априори субъективно «расщепляет» фактический диапазон процедуры измерения свойства, образуя тем самым набор новых, замещающих «расщеплённое свойство» свойств объектов ПрО, которые измеряются в бинарной шкале наименований {**X**, **None**}. Возникающая между вновь вводимыми свойствами *концептуальная сопряженность*, может быть описана как их *парная* несовместимость [7].

Для совместного описания простых «ограничений существования» и парной несовместимости в *группах концептуально сопряженных свойств* (ГКСС) необходима уже *иерархическая модель* «ограничений существования». В ней простые ограничения «ограничений существования» задаются отдельно на уровне «нерасщеплённых» измеряемых свойств (или «архисвойств» известных до концептуального шкалирования), и отдельно - «внутри» ГКСС.

Наконец, для описания произвольных бинарных отношений между объектами ПрО вводится специальная *парная сопряженность* измеряемых *свойств-валентностей* [1, 8].

Схема на рисунке 2 иллюстрирует все описанные зависимости между измеряемыми свойствами, которые в целом определяют исходную для ОАД модель *ограничения существования свойств* (ОСС).

В итоге ОТОС-ОСС представляется кортежем

$$(G^*, M, Se, Pr, A, ГКСС, ПНС, ПОС, ПВ),$$

где

- $A = (a_{ij})_{i=1,\ldots,m;\, j=1,\ldots,n}$ – матрица результатов серий измерений Se свойств M у объектов из выборки G^*, выполненных с помощью процедур измерения Pr. Элементами этой матрицы могут быть константы **NM**, **None**, **Failure** и символы шкал динамических диапазонов измерительных процедур Pr (рисунок 3);
- $ГКСС$ - множество групп концептуально сопряженных свойств, $ГКСС = ГКСС_{о} \cup ГКСС_{м}$, $ГКСС_{о} \cap ГКСС_{м} = \varnothing$, $ГКСС_{о}$ - одиночные «нерасщеплённые» измеряемые архисвойства, $ГКСС_{м}$ - множественные группы, представляющие «расщеплённые» (подвергнутые концептуальному шкалированию) архисвойства, $1 \le |ГКСС| \le s$;
- $ПНС$ - пары несовместимых свойств $|ПНС| \le C^2_{|ГКСС|}$;
- $ПОС$ - пары обусловленных свойств $|ПНС| \le A^2_{|ГКСС|}$;
- $ПВ$ – пары ковалентностей $|ПВ| \le |ГКСС_{о}| / 2 + \sum_{i=1}^{|ГКСС_{м}|} ГКСС_{м,\,(i)} / 2$.

Таким образом, OntoWorker, прежде всего, должен обладать средствами ввода/построения ОТОС и ОСС (действие А1 на рисунке 1). Кроме того, учитывая задачи отработки и тестирования методов, алгоритмов и программных средств ОАД, в программной лаборатории целесообразно иметь средства *автоматической генерации* корректных ОТОС и ОСС со случайными и выбираемыми характеристиками (действие А0 на рисунке 1).

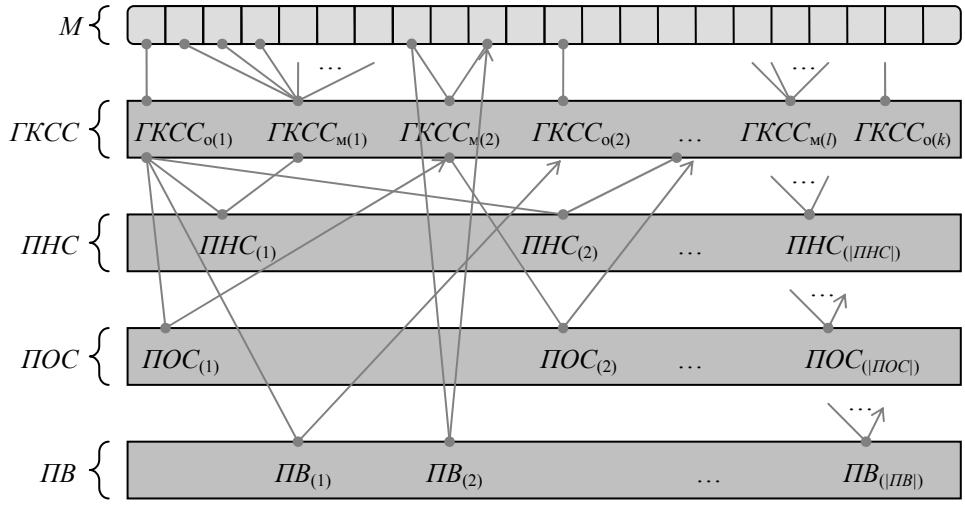


Рисунок 2 – Описание ограничений существования свойств у объектов предметной области

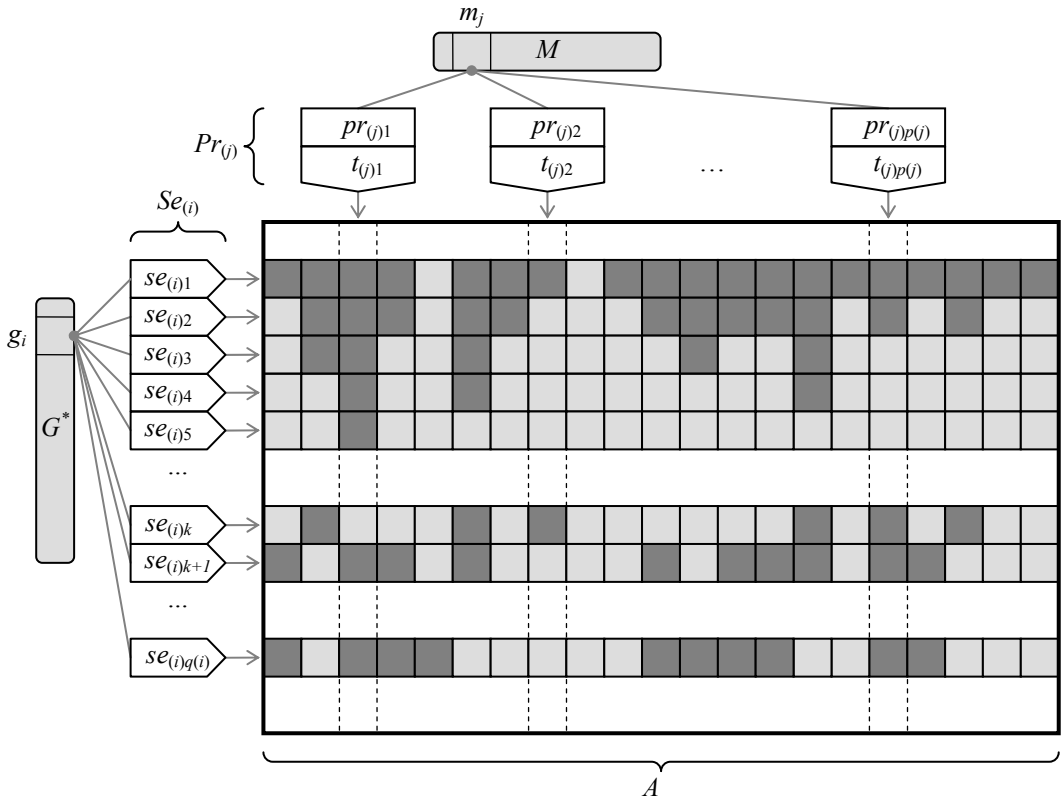


Рисунок 3 – Структура обобщенной таблицы «объекты-свойства» на основе двумерной матрицы (в матрице темные ячейки соответствуют результатам измерения **None**, **Failure** и **X**, а светлые – результату **NM**)

Первой задачей обработки исходной эмпирической информации, собранной в протоколе «объекты-свойства», является извлечение оценок БСС о ПрО вида «объекту *x* присуще свойство *y*», которые в совокупности образуют *формальный контекст* для задачи вывода *формальных понятий* (ФП - см. рисунок 1). Из ОТОС в общем случае можно извлечь лишь «мягкие» (нечеткие, нестрогие и т.п.) оценки БСС, для чего в ОАД предлагает применять аппарат многозначной векторной V^{TF}-логики [9, 10], который ведет к построению *нестрогого формального контекста* (НФК - см. действие А2 на рисунке 1).

К настоящему времени для *вывода* формальных понятий (действие А4 на рисунке 1) существует обширная методическая база [11, 12]. Применительно к обработке «мягких» формальных контекстов ОАД принципиально ориентирован на использование *метода альфа-сечения* [13] в специальном варианте, учитывающем ограничения существования свойств [7, 14]. Поэтому в OntoWorker выводу формальных понятий предшествует *рациональное* альфа-сечение НФК для формирования *бинарного формального контекста* (БФК) задачи вывода формальных понятий (действие А3 на рисунке 1).

Количество выводимых формальных понятий может оказаться слишком большим, что способно лишить ОАД главной ценности – сжатия информационно-логической картины ПрО. В настоящее время предложено несколько подходов к *редуцированию* формальных понятий, полученных при обработке эмпирической информации определенного объема и качества. Однако в прототипе OntoWorker реализацию этой функции было решено отложить.

Выводимое из БФК множество формальных понятий ПрО частично упорядочено по вложению объемов (т.е. отношению *обобщения* понятий) и образует *полную решетку* [3]. Метод построения *решетки формальных понятий* (РФП – см. рисунок 1) опирается на прямое сравнение объемов понятий и имеет вариант, доставляющий *транзитивную редукцию* отношения обобщения, формирующего РФП (действия А6, А7 на рисунке 1).

Завершающим актом ОАД является преобразование РФП в *модель, описывающую структуру классов* объектов ПрО (см. рисунок 1). По существу эта модель реализует хорошо известное объектно-фреймовое представление знаний о ПрО [15, 16] и рассматривается в ОАД как искомая *формальная онтология* исследуемой ПрО [1, 8].

Реализуемый в OntoWorker метод преобразования РФП в формальную онтологию ориентирован на практическое использование получаемого результата для проектирования объектно-ориентированных баз данных систем, основанных на знаниях. Таксономия классов формальной онтологии, как и решетка формальных понятий, может быть построена в двух вариантах: полном и с транзитивной редукцией отношения обобщения между классами объектов (действия А8, А9 на рисунке 1).

2 Основные алгоритмы лаборатории

Ограничимся описанием лишь двух алгоритмов, реализованных в OntoWorker.

2.1 Вывод формальных понятий

Знакомство и эксперименты с различными алгоритмами вывода формальных понятий позволили выбрать и адаптировать для ОАД алгоритм, описанный в [17]. Его достоинствами является простота и наглядность при приемлемой производительности.

В описании алгоритма использованы следующие термины и обозначения АФП [1, 3]:

- $\boldsymbol{K} = (G^*, M, I)$ – формальный контекст, где I – бинарное соответствие «объекты-свойства»;
- операторы Галуа φ, ω (общая нотация «'») для контекста $\boldsymbol{K}$:
  $\varphi(X) = X' = \{m_j \mid m_j \in M, \forall g_i \in X: g_i I m_j\}$ - общие свойства объектов, составляющих $X \subseteq G^*$, или Галуа-проекция X на M;
  $\omega(Y) = Y' = \{g_i \mid g_i \in G^*, \forall\ m_j \in Y: g_i I m_j\}$ - объекты, которые обладают всеми свойствами из $Y \subseteq M$, или Галуа-проекция Y на G^*;

- (X, Y) – формальное понятие, у которого $X \subseteq G^*$ - объем, $Y \subseteq M$ - содержание, причем $X = Y'$, $Y = X'$;
- $\boldsymbol{B}(\boldsymbol{K})$ - множество формальных понятий контекста $\boldsymbol{K}$;
- $(\boldsymbol{B}(\boldsymbol{K}), \leq)$ –замкнутая решетка понятий, причем $(X, Y) \leq (X, Y)$, если $X_1 \subseteq X_2$, или эквивалентно $Y_1 \supseteq Y_2$.

Таблица 1 – Алгоритм вывода всех формальных понятий формального контекста

Шаг	Действие
1	В исходно пустое множество формальных понятий $\boldsymbol{B}(\boldsymbol{K})$ помещается (M', M) - априори известный элемент каждого множества формальных понятий - *наименьшее понятие* решетки формальных понятий.
2	Перебирается множество объектов обучающей выборки $g_i \in G^*$.
2.1	Перебирается множество формальных понятий $(X, Y) \in \boldsymbol{B}(\boldsymbol{K})$.
2.1.1	Формируется пересечение свойств рассматриваемого понятия (X, Y) и Галуа-проекции рассматриваемого понятия g_i: $Intersection = Y \cap \{g_i\}'$.
2.1.2	Если *Intersection* отличается от содержания любого уже сформированного понятия в $\boldsymbol{B}(\boldsymbol{K})$ (для констатации этого факта осуществляется «внутренний» перебор уже сформированных формальных понятий), то множество формальных понятий пополняется новым понятием $\{Intersection', Intersection\}$.

2.2 Построение модели, описывающей структуру классов

Преобразование решетки формальных понятий в модель, описывающую структуру классов объектов, становится нетривиальной задачей, если учитывать перспективу генерации по описанию структуры классов *баз данных* для хранения денотативных онтологических моделей.

В общем случае формальные понятия в зависимости от структуры своих объемов имеют *три разновидности*:

- понятия первого вида описывают объекты, действительно *существующие* в анализируемой ПрО. Эти понятия определят классы объектов, которые заслуживают именование «*фундаментальные*»;
- понятия второго вида лишь обобщают в РФП другие понятия. В программировании такие классы известны как «*виртуальные*»;
- третий вид понятий характеризуется совмещением указанных черт понятий первого и второго видов.

Прагматические соображения требуют ограничиться при построении формальной онтологии лишь фундаментальными и виртуальными классами объектов, и в целом опираться на следующие принципы преобразования решетки формальных понятий в модель, описывающую структуру классов:

- все понятия решетки являются кандидатами в фундаментальные классы модели;
- в фундаментальный класс превращается минимальное (в терминологии решеток) понятие, содержащее объект в своем объеме;
- свойство сохраняется в максимальном понятии, содержащем это свойство в своем содержании;

- наибольшее понятие решетки (его признак – мощность объема равна мощности множества объектов) заведомо исключается из модели, если его содержание пусто;
- наименьшее понятие решетки (его признак – мощность содержания равна мощности множества свойств) заведомо исключается из модели, если его объем пуст;
- анализ понятий-кандидатов в фундаментальные классы ведется по ярусам ближайших суперпонятий, начиная с наименьшего понятия.

Описание реализованного в OntoWorker алгоритма, обладающего описанным качеством и результативностью, приведено в таблице 2.

3 Базовые структуры данных лаборатории

На рисунке 4 приведена концептуальная модель данных ПрО ОАД, определяющая базовые структуры данных, которыми оперирует OntoWorker.

Корневые вершины графа транзитивной редукции отношения наследования – терминальные вершины-истоки непомеченных маркером-кружком сплошных дуг на рисунке 4 – определяют классы объектов объектно-ориентированной модели данных программной лаборатории OntoWorker.

Пунктирные маркированные дуги указывают отношения между объектами классов. Кардинальность этих отношений различна, и встречаются все ее разновидности: например, отношение «*представлен серией*» имеет кардинальность «один ко многим», «*принадлежит серии*» - «один к одному», а «*обобщает*» - «многие ко многим».

Виртуальный класс «ОЦЕНКА ИСТИННОСТИ» определяет общие для каждого результата измерения и элемента соответствия «объекты-свойства» аспекты истинности БСС согласно векторной логике V^{TF}. Виртуальный класс « ОБЪЕКТ» интегрирует наиболее общие свойства объектов ПрО ОАД (на рисунке 4 не показаны), например, символическое имя.

Измеряемое свойство характеризуется типом, начальным значением и «активностью» - *if_updated*, - указанием (если он есть) демона, или триггера, активизирующегося при изменении значения свойства [17]. Впрочем, собственно в ОАД эти характеристики измеряемого свойства содержательно не интерпретируются.

В целом рассматриваемая модель данных отчетливо воспроизводит «физические» модели ПрО ОАД, представленные ранее на рисунках 2 и 3. Фактически пояснения заслуживают лишь классы «ГКССО» и «НМС».

Введение ГКССО-объектов, каждый из которых *представляет* определенную ГКСС («архисвойство») у отдельно взятого объекта обучающей выборки, т.е. *характеризует объект* (см. рисунок 4), вызвано реализацией в OntoWorker метода рационального альфа-сечения НФК для формирования корректного БФК (см. рисунок 1). В общем случае метод отыскивает предельно допустимый уровень доверия к исходным данным, или альфа-уровень, *индивидуально* для каждой группы концептуально сопряженных свойств объекта обучающей выборки [7, 14], поэтому соответствующий алгоритм должен манипулировать с данными, которые представляет ГКССО-объект.

Каждое *нормальное множество свойств* (НМС) [18] определяет оригинальный набор «архисвойств» у объектов обучающей выборки, *допустимый* в рамках модели ограничений существования свойств, предложенной в [4]. Подмножество архисвойств $Z \subset$ *ГКСС замкнуто*, если оно содержит все архисвойства, *обусловленные* любым членом Z; Z *совместимо*, если любые два члена Z не связаны отношением *несовместимости*; Z будет одним из нормальных множеств свойств во множестве всех архисвойств, тогда и только тогда, когда Z *замкнуто и совместимо*.

Множество НМС-объектов определяется совместно с формированием НФК (действие А2 на рисунке 1) и наряду с нечетким формальным контекстом служит исходной информацией при построении БФК (действие А3 на рисунке 1).

Таблица 2 – Алгоритм преобразования решетки формальных понятий в модель, описывающую структуру классов

Шаг	Действие
1	Исходная версия модели формируется как *копия* решетки формальных понятий.
2	В модели выделяется *наибольшее понятие*. Если его содержание пусто, то это понятие исключается из модели с разрывом его связей с субпонятиями.
3	В модели выделяется *наименьшее понятие*. Если его объем пуст, то: • это понятие исключается из модели с разрывом его связей с суперпонятиями; • из его *ближайших суперпонятий* формируется множество понятий-кандидатов в фундаментальные классы. Иначе множество понятий-кандидатов составляется из *одного* наименьшего понятия.
4	Перебирается множество понятий-кандидатов.
4.1	У каждого суперпонятия рассматриваемого кандидата *из объема исключаются объекты*, которые входят в объем кандидата (объем суперпонятия всегда не меньше объема любого понятия, которое обобщается суперпонятием).
4.2	У рассматриваемого кандидата *из содержания исключается всякое свойство*, которое входит в содержание хотя бы одного его суперпонятия (объединение содержаний всех суперпонятий всегда не больше содержания понятия, которое они обобщают).
4.3	Если объем рассматриваемого кандидата не пуст, то на основе этого понятия-кандидата формируется *фундаментальный класс*. При этом реализуется один из двух вариантов: • если у кандидата нет субпонятий, то он прямо фиксируется как фундаментальный класс; • иначе у рассматриваемого кандидата формируется *новое субпонятие*, в которое переносится объем (и только объем) кандидата. Это новообразованное понятие фиксируется как фундаментальный класс объектов. Содержание этого класса оказывается пустым, а у сохраняемого в модели как виртуальный класс кандидата пустым становится объем.
4.4	Суперпонятиями рассматриваемого кандидата бесповторно пополняется *перспективное* множество понятий-кандидатов.
5	Перспективное множество кандидатов *редуцируется*: сохраняются лишь корневые понятия отношения обобщения, определенного на перспективном множестве понятий-кандидатов.
6	Если перспективное множество понятий-кандидатов не пусто, то повторяются действия, начиная с шага 4.
7	Из сформированного множества классов исключаются те, у которых пусты и объем, и содержание. Такими подлежащими исключению классами могут оказаться лишь «*промежуточные*» (т.е. не корневые и не вершинные) классы построенной таксономии.

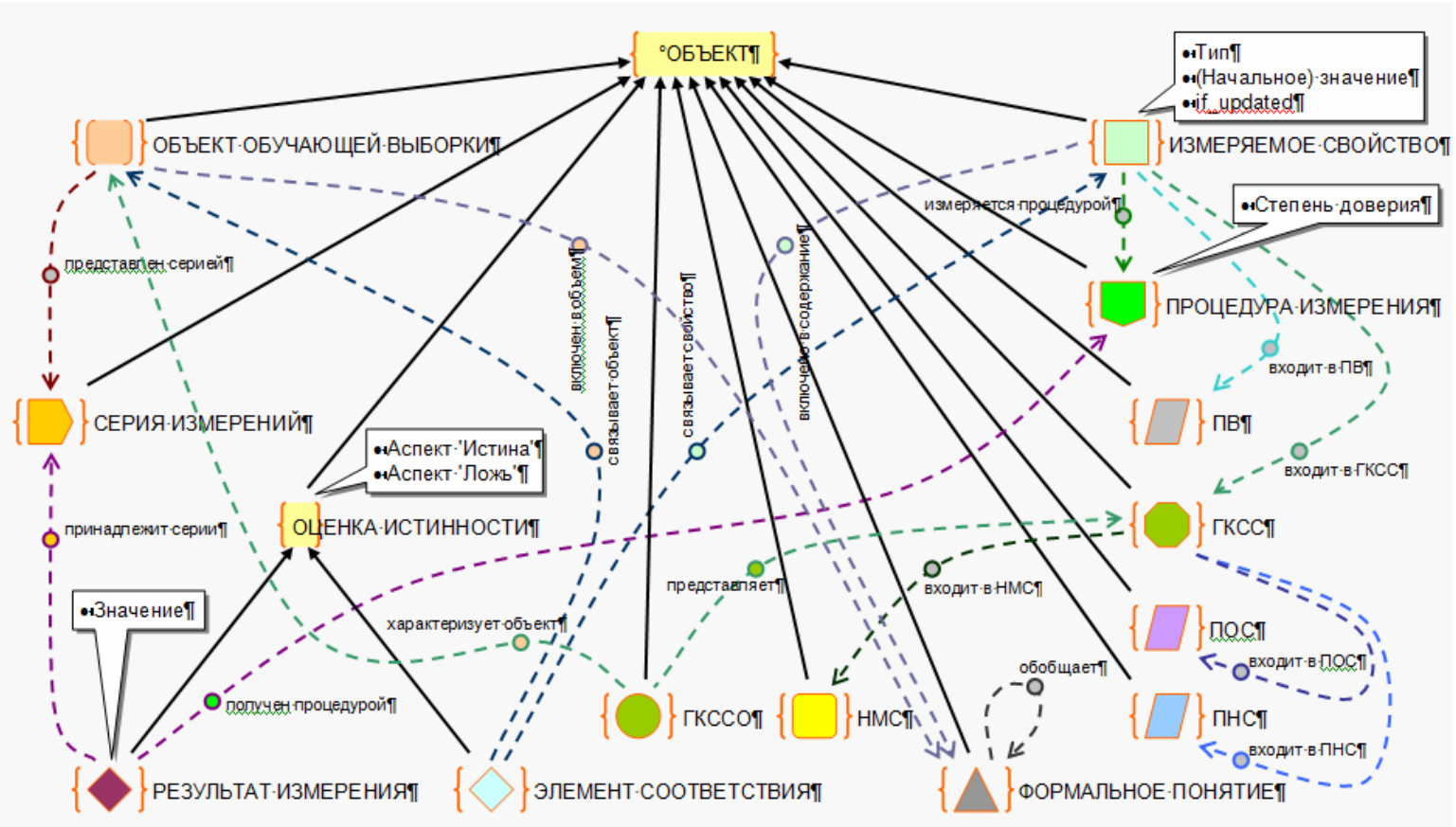


Рисунок 4 – Концептуальная модель предметной области «Онтологический анализ данных».
Здесь: ПВ – пара валентностей; ГКСС – группа концептуально сопряженных свойств;
ПОС и ПНС – пары обусловленных и несовместимых свойств; НМС – нормальное множество свойств

4 Программная платформа лаборатории

Программная лаборатория для ОАД OntoWorker реализована на платформе MS Excel, языком программирования которой является *Visual Basic for Application* (VBA) [19].

Семантические технологии, включая и интеллектуальный анализ данных для построения формальных онтологий ПрО, все шире проникают в повседневную практику и арсеналы компьютерного моделирования и создания информационных систем. Поэтому для удовлетворения «повышенного спроса» у растущего круга пользователей на такие технологии целесообразна разработка средств ОАД на массово используемых программных платформах, к которым, несомненно, принадлежит Excel.

Достоинства Excel общеизвестны. Это *широчайшее распространение и признание*; это действительно *богатейшая функциональность*; это простой, но достаточно мощный VBA - *встроенный язык программирования* с развитой интегрированной средой разработки приложений, включающей средства визуального проектирования пользовательских интерфейсов и инструменты автоматизации программирования; это возможность использования стандартных для MS интерфейсов *межзадачных коммуникаций* для общения с другими приложениями. И, несомненно, для быстрого *прототипирования* программных продуктов наиболее ценным качеством Excel является редкостное *единство* среды разработки пользовательских приложений и хранения данных.

Эти объективные (как впрочем, и некоторые субъективные для коллектива авторов) резоны определили выбор программной платформы для отработки методического комплекса ОАД. И, если вернуться к обозначенной во введении цели - воспроизведение в перспективе функциональности OntoWorker в *gB*-системе, обновляемой с некоторого времени как Excel-приложение [5], сделанный выбор видится точным.

Заключение

Сегодня в разной доступности имеются десятки систем информационного моделирования, имеющих в своей основе или интегрирующих методы интеллектуального анализа данных для выявления понятийной структуры исследуемых предметных областей (см., например, интернет-ресурс [20]). Эти инструменты отличаются методической оснащенностью, использованными для реализации платформами и языками (C++, Java и др., есть сведения и о применении Excel), способом реализации (настольные, клиент-серверные, облачные приложения), мощностью пользовательского интерфейса (особенно это касается графического представления результатов анализа) и т.д.

На этом фоне конкурентоспособность программной лаборатории OntoWorker обеспечивается, прежде всего, новизной и уникальностью методического и алгоритмического комплекса онтологического анализа данных. Налицо и преимущества использованной программной платформы, возможности которой для OntoWorker далеко не исчерпаны, например, в актуальной задаче оснащения созданной лаборатории эффективным графическим интерфейсом [21].

Благодарности

Работа выполнена при проведении исследований по теме «Разработка основ теории интерсубъективного управления с применением онтологических моделей ситуаций» в рамках государственного задания Институту проблем управления сложными системами РАН на 2013-2015 годы.

Список литературы

[1] Смирнов С.В. *Онтологический анализ предметных областей моделирования* // Известия Самарского научного центра РАН. - 2001. - Т. 3. № 1. - С. 62-70.

[2] Барсегян А.А. *Анализ данных и процессов* / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, И.И. Холод, М.Д. Тесс, С.И. Елизаров. - 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 512 с.
[3] Ganter B., Wille R. Formal Concept Analysis. Mathematical foundations. - Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1999.- 290 p.
[4] Lammari N., Metais E. Building and maintaining ontologies: a set of algorithms // Data & Knowledge Engineering. – 2004. - Vol. 48(2). - P. 155-176.
[5] Смирнов С.В. *Опыт создания средств семантического моделирования и проектирования на массовой программной платформе* // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2015): Материалы V международ. науч.-тех. конф. (19-21 февраля 2015 г. Минск, Беларусь) / Редкол.: В.В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУИР, 2015. – С. 413-416.
[6] Рубашкин В.Ш. *Представление и анализ смысла в интеллектуальных информационных системах*. - М.: Наука, 1989. - 192 с.
[7] Офицеров В.П. *Метод альфа-сечения нестрогих формальных контекстов в анализе формальных понятий* / В.П. Офицеров, В.С. Смирнов, С.В. Смирнов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVI международной конф. (30 июня - 03 июля 2014 г., Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН, 2014. - С. 228-244.
[8] Смирнов С.В. *Построение онтологий предметных областей со структурными отношениями на основе анализа формальных понятий* // Знания – Онтологии – Теории: Материалы Всероссийской конф. с международным участием (3-5 октября 2011 г., Новосибирск, Россия). Т. 2.– Новосибирск: Институт математики СО РАН, 2011. С. 103-112.
[9] Аршинский Л.В. *Векторные логики: основания, концепции, модели*. - Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2007. – 228 с.
[10] Офицеров В.П. *Использование V^{TF}-логики для определения формальных контекстов и построения онтологий предметных областей* / В.П. Офицеров, С.В. Смирнов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV международной конф. (25-28 июня 2013 г., Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН, 2013. - С. 291-297.
[11] Кузнецов С.О. *Алгоритмы построения множества всех понятий формального контекста и его диаграммы Хассе* / С.О. Кузнецов, С.А. Объедков // Известия академии наук. Теория и системы управления. - 2001. - №1. - С. 120-129.
[12] Незнанов А.А. *Оценка и сравнение производительности алгоритмов анализа формальных понятий* / А.А. Незнанов, Ф.В. Строк // Двенадцатая Национальная конф. по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2010 (20-24 сентября 2010 г., Тверь, Россия): Труды конф. Т. 2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. - С. 82-89.
[13] Смирнов С.В. *Нечеткий анализ формальных понятий и задача вывода онтологий* // Труды второй международной конференции «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений» (18-21 мая 2014 г., Уфа, Россия). Т. 1 – Уфа: Уфимский гос. авиационный технический ун-т, 2014. – С. 5-10.
[14] Коварцев А.Н. *Интеллектуализация формирования контекста для вывода понятийной структуры предметной области* / А.Н. Коварцев, В.С. Смирнов, С.В. Смирнов // Информационные технологии и системы: Труды Четвертой междунар. науч. конф. ИТиС-2015 (25 февраля - 1 марта 2015 г., Банное, Россия) / Отв. ред.: Ю.С. Попков, А.В. Мельников. - Челябинск: Изд-во Челябинского гос. ун-та, 2014. – С. 90-91.
[15] Dilger W. *Object-oriented Knowledge Representation – an Overview* / W. Dilger // J. New Generation Computation Systems. - 1989. - Vol. 2. No 4. – P. 339-363.
[16] Гаврилова Т.А. *Базы знаний интеллектуальных систем* / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2000. - 384 с.
[17] Yang K. M. *Fuzzy Concept Mining based on Formal Concept Analy*sis / K.M. Yang, E. H. Kim, S.H. Hwang, S.H. Choi // Int. J. of Computers. – 2008. - Issue 3. - Vol. 2. – P. 279-290.
[18] Пронина В.А. *Использование отношений между атрибутами для построения онтологии предметной области* / В.А. Пронина, Л.Б. Шипилина // Проблемы управления. 2009. №1. - С. 27-32.
[19] Уокенбах Дж. *Excel 2010: профессиональное программирование на VBA* / Дж. Уокенбах. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2011. – 994 с.
[20] *Formal Concept Analysis Homepage* - http://www.upriss.org.uk/fca/fca.html
[21] Смирнов С.В. *Принципы реализации Обозревателя онтологических моделей* / С.В. Смирнов, Е.Г. Суворова // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIV международной конф. (19-22 июня 2012 г., Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН, 2012. - С. 177-183.

УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ КИБЕР-ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

И.А. Степановская

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65, Россия
irstepan@ipu.ru
тел: +7 (495) 334-89-10, факс: +7 (846) 334-93-40

Ключевые слова: *самоорганизация, автономия объекта, интерсубъективность, формализация знаний*

Abstract
The article considers the possibility of using multi-agent approach to modeling and study of adaptive processes that are capable of self-organization. Model of real-time multi-agent expert system based on techniques of cognitive data visualization is proposed.

Введение

Инновационный подход к управлению крупномасштабными системами (КМС), включая административно-территориальные образования, транспортные системы, производственно-экономические системы, техносферу, экосистемы и др., базируется на «умных» кибер-физических систем (CPS - Cyber Physical Systems) [1-3].

Их технологическую основу составляют информационно-коммутационные технологии (ИКТ) радиочастотной идентификации RFID распределенных стационарных объектов, космической навигации GPS/ГЛОНАСС мобильных объектов, IP-адресации интернет ресурсов. Указанные ИТК позволяют интегрировать технические, программно-инструментальные, вычислительные и информационные компоненты КМС (системы, подсистемы, агрегаты, элементы) в глобальные многоагентные сети (МАС). Каждому агенту сети присваивается уникальный сетевой идентификатор и код области компетентности, используемые для сетевого обмена информацией об их текущем состоянии, истории жизненного цикла и т.п. Решение любой сложной задачи в такой системе формируется эволюционным путем самоорганизации за счет взаимодействия десятков и тысяч автономных агентов, подчиняющих некоторым корпоративным законам и правилам. Широко известны проекты «умных» материалов («CPS на кристалле»), робототехнических комплексов, интеллектуальных инженерных конструкций, автономных складских комплексов, технологий умного производства и эксплуатации изделий. Однако, представляя широкие возможности внедрения принципов CPS, указанные проекты демонстрируют складывающийся на практике фрагментарный характер перевода КМС на самоуправление, т.е. на уровне отдельных процессов и этапов их жизненного цикла. Учитывая, что CPS по своей значимости выходят на уровень критических интеллектуальных технологий, актуальным и значимым становится разработка системного подхода к переводу КМС на принципы самоорганизации. Целью данной работы является использование теоретических концепций и принципов, выработанных в синергетике – науке о системном управлении, для синтеза тиражируемых и развивающихся технологий самоорганизации.

1 Синергетический подход к системному внедрению кибер-физических принципов самоорганизации

Теоретическим обоснованием предлагаемого синергетического подхода служит тезис о нелинейности КМС. В отличие от линейных систем, для которых эффект внешнего воздействия пропорционален воздействию, нелинейные системы даже на малые внешние и управляющие воздействия могут отреагировать формированием контуров обратных связей. Резонансные (синергетические) эффекты, спонтанно возникающие в ближайшей и отдаленной временной перспективе, могут оказаться различными по характеру воздействия, в том числе противоположными результатам, ожидаемым от первоначальных малых воздействий. Недетерминированный характер реактивности даже в аналогичных условиях практически исключает применимость классического командного стиля к управлению «нелинейными» системами, игнорирующего присущие им внутренние синергетические закономерности. В связи с этим решение проблем управляемости нелинейных по своей природе КМС целесообразно связывать с некоторой концептуальной моделью синергетических эффектов и их системной динамики.

Адекватной моделью синергетического эффекта служит фрактал [4-6], представляющий саморазвивающийся эффект резонансного характера, проявляющийся в разных масштабах. Фрактальная модель представления контролируемых процессов в контуре системного управления практически ориентируется на выявление устойчивых процессов саморазвития, которые определяют коренные свойства нелинейных систем и знание которых необходимо для принятия решений. Одна из моделей системной динамики синергетических эффектов может быть представлена концепцией саморазвивающейся «целеустремленной» КМС, функционирующей в неопределенной внешней (негативной) среде. В рамках этой концепции фрактально-развивающийся резонансный эффект связывается с разными процессами и задачами системного управления. Фрактал одинаково применим для представления стратегии «эластичного» саморазвития, направленного на достижение целей, и для представления спонтанно проявляющихся и развивающихся рисков, сдерживающих, препятствующих или блокирующих достижение целей. Под «эластичностью» фрактала здесь понимается многоэтапное развитие, сопровождающееся формированием связей с новыми точками и факторами роста, расширяющихся от этапа к этапу, которые могут обеспечить непрерывное расширение и усиление эффектов роста и развития, полученных ранее при относительно слабых регулирующих воздействиях. Процесс синергетического саморегулирования «целеустремленной» КМС приобретает вид многоагентного развивающегося самоконтроллинга класса ED@RR (Early Detection & Rapid Response Systems), ориентированного на наиболее раннее обнаружение и быстрое реагирование на различные явления и проявления синергетических эффектов разной природы.

Унифицированный формат ED@RR предполагает стандартизацию программного обеспечения проектирования, обеспечивающую конфигурируемость и представление системы самоорганизации в виде динамической иерархически вложенной модульной структуры:

- самоорганизация в краткосрочной перспективе, основанная на методах междисциплинарного контроллинга,
- самоорганизация в среднесрочной перспективе по принципам прорывной для «целеустремленных» КМС стратегии эластично «развивающейся системы развивающихся систем»,
- самоорганизация «целеустремленных» КМС в долгосрочной перспективе, играющая роль точки роста для сфер, связанных с их сопровождением по этапам жизненного цикла (сферы науки, производства, транспортно-логистического сопровождения, удаленной эксплуатации и др.).

Кроме того, построитель системы самоорганизации позволяет организовать управление процессом информатизации каждого агента МАС в централизованном, распределенном и децентрализованном режимах:

1) централизованный режим гомогенной (однородной) реактивной сети агентов, функционирующих по принципу «одна и та же схема ED@RR для всех агентов МАС» (например, поведение «умного» материала в условиях динамики внешней среды);
2) распределенный режим гетерогенной GRID-сети исполнительных услуг, способной к самоорганизации «ветвящегося корпоративного многоагентного управляющего процесса»;
3) распределенный режим «вспыхивающего интеллекта», «стихийного лидерства», формируемый за счет переориентации поведения агентов на исследование и управление ситуацией, обнаруженной каким-либо одним агентом [7];
4) децентрализованный режим самоадаптации и обучения агента (группы агентов, МАС в целом), основанной на управлении «фильтрами» восприятия данных глобального мониторинга, в том числе:

- режим самоидентификации «встраиваемого образца» (технических и вычислительных средств) с детерминированным «фильтром» восприятия данных глобального мониторинга, поддерживающим стандарт подключения к разным экземплярам и типам CPS;
- режим самоконтроля качества предоставления услуг;
- режим саморазвития, выработки и апробирования методов выполнения ключевых исполнительный функций и расширения функциональных возможностей;
- режим самообучения для формирования управленческих стратегий «реактивного поведения» на основе уточнения особенностей текущих ситуаций и др.

С позиций предложенного синергетического подхода к самоорганизации КМС архитектура CPS полностью решает проблемы технической организации непрерывного автоматического глобального мониторинга на уровне различных компонент (подсистем, агрегатов, элементов технических, информационных, технологических, измерительных, организационных и др. процессов), приобретающих статус агента многоагентной системы индивидуальной и корпоративной самоорганизации. Каждый агент становится поставщиком и одновременно потребителем потоков сообщений глобального мониторинга. Воспринимая и передавая данные глобального мониторинга в режиме индивидуальной семантической фильтрации, агент формирует и реагирует на тот класс сообщений, который относится к сфере его компетентности. Однако полноценное использование практически неограниченных потенциальных возможностей информатизации развивающегося самоконтроллинга требует разработки унифицированных средств в классе когнитивных технологий проектирования, планирования, прогнозирования, визуализации и интерпретации сверхскоростных и свехобъемных потоков сообщений глобального мониторинга в универсальном формате ED@RR.

2 Перспективный облик системы проектирования развивающегося самоконтроллинга CPS

Предлагаемый перспективный облик системы проектирования развивающегося самоконтроллинга CPS представляет собой программное обеспечение многоагентных систем двух типов: многоагентного экспертного наблюдения и интерсубъективного аудита [8].

Система многоагентного экспертного наблюдения представляет собой когнитивную инфраструктуру [9-13] развивающегося самоконтроллинга, включающую следующие компоненты:

- система многоагентного экспертного наблюдения за распространением синергетических эффектов по иерархической структуре многокомпонентной целеустремленной системы, порожденных мультиплексным влиянием негативной среды,
- правила саморегулирования, представленные в формате "доски объявлений" агентов о своих потенциальных умениях поддерживать развитие «целеустремленной» системы, а

также снижать, предупреждать развитие угроз, восстанавливать нормативную гомеостатику контролируемой системы.

Система интерсубъективного аудита обеспечивает когнитивное проектирование системы многоагентного экспертного наблюдения, организационное управление задачами и компетенциями в процессе проектирования, регистрацию команды экспертов с распределением компетенций и соответствующих ролей, формирование концептуального дискурса, создание и отладку базы знаний в формате "доски объявлений" [14-15].

Работа система интерсубъективного аудита базируется на двух ключевых методах: когнитивной визуализации модели многокомпонентной целеустремленной системы на уровне системной динамики синергетических эффектов и визуализации формата «доски объявлений».

На обобщенном уровне метод фрактальной визуализации системной динамики синергетических эффектов представлен и проиллюстрирован на примере экологического саморегулирования качества водных объектов в масштабе водного бассейна (см. рисунок 1).

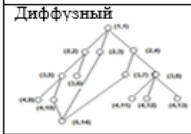
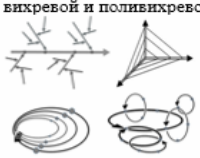
Образцы семантической индексации этапов распространения синергетических эффектов (СЭ) в многокомпонентных объектах негативного влияния факторов внешней среды			
Стволовидный	Шкала оценки динамики роста масштаба проявления СЭ по уровню охвата «целое-часть». Например, веерное распространение сверху- вниз или вейвлетное проявление снизу- вверх.	- Схема водотока, отображающая распространение загрязнений водного бассейна - Источник данных: «Водный кодекс» - Сервис обработки: «Классификатор Реестр водных объектов водного бассейна».	
Образцы семантической индексации этапов спонтанного формирования факторов мультиплексного влияния негативной среды			
Иерархический	Структура источников негативного влияния, используется для моделирования состава мультиплексного негативного влияния	- Отраслевая структура предприятий-водопользователей водного бассейна. - Источник данных: «Промышленные стандарты» - Сервис обработки: «Классификатор Реестр предприятий- водопользователей водного бассейна», индексированный в контексте отраслевой принадлежности.	
Диффузный 	Шкала последовательной трансформации и интеграции СЭ мультиплексного типа	- Модель оценки токсичности первичных и вторичных загрязнителей. - Источник данных: «Международные реестры» - Сервис обработки: «Классификатор Реестр загрязняющих веществ». Используется для моделирования фоновых и особо токсичных профилей антропогенного загрязнения водного бассейна.	
Циклический	Модель периодичности мультиплексного влияния негативных факторов	-Модель сбросов предприятий-водопользователей. - Источник данных: Отчеты водопользователей. - Сервис обработки: «Справочник Экологические паспорта водопользователей «Водхоз -2ТП».	
Образцы семантической индексации задач риск-контроллинга мультиплексного влияния негативной среды			
Иерархический	Модель мероприятий упреждающего управления	-Модель программно-целевого управления - Источник данных: Отчеты региональных администраций	Мониторинг эффективности программно-целевого управления водоохранной деятельностью. Мониторинг неуклонного снижения эффективности управления и потери управляемости.
Стволовидный, кратномасштабный, вихревой и поливихревой 	Модели профилей критического развития процессов (явлений, событий), представленные схемами причинно-следственных связей, линейных и циклических контуров обратной отрицательной связи.	Модель обоснования приоритетных и неотложных задач водоохранной деятельности.	

Рисунок 1 – Принципы фрактальной визуализации системной динамики синергетических эффектов

Метод предполагает использование иерархических топологий контролируемой целеустремленной системы, мультиплексного влияния негативной среды и риск-контроллинга «накопительного» синергетического эффекта, оказанного на контролируемую систему. Построитель фракталов связан с хранилищем реальных (или экспериментальных) сообщений глобального мониторинга CPS, планировщиком автоматического синтеза отчетов-диаграмм, визуа-

лизирующих данные глобального мониторинга, а также с системой моделирования и анализа системной динамики синергетических эффектов. Данная система выполняет следующие функции экспертного наблюдения:

- строит модель предельно допустимого мультиплексного влияния негативной среды;
- обеспечивает раннее обнаружение отклонений;
- оценивает угрозы потери управляемости гомеостатикой целеустремленной системы;
- находит возможные источники отклонений;
- обосновывает приоритетные и неотложные задачи упреждающего управления.

Метод визуализации формата «доски объявлений» обеспечивает спецификацию правил саморегулирования. Сложность этого процесса заключается в необходимости создания полных, непротиворечивых и независимых информационных ресурсов типа инструкций, директив и предписаний. Этот вид деятельности требует привлечения аппарата деонтической модальной логики [16], которая связывает высказывания с нормами: обязывающими, запрещающими или предоставляющими право. В последнем случае субъект может по своей воле исполнить или не исполнять действие.

Формально произвольное высказывание, описывающее состояние, норму, предписание и др., рассматривается как пропозициональная переменная x, которой сопоставляется префикс модальности следующих видов: R – разрешение, F – запрещение, J – безразлично, O- обязательно.

Введем обозначения: ¬ - знак отрицания, □ - знак конъюнкции, □ - знак дизъюнкции.

Для практического использования большое значение имеет наличие формальных критериев деонтической полноты и непротиворечивости. Префикс «обязательно» является базовым, через него формально определяются префиксы «запрещено», «разрешено»: Rx= ¬O¬x; Fx= O¬x; Jx= ¬Ox □ ¬Fx, «Всякое незапрещенное x разрешено»: Ox □ Jx □ Fx/ «относительно любого x верно, что оно или разрешено или разрешено от него воздержаться»: ¬(¬Ox □ O¬x).

Различают абсолютные (монадические) и относительные (диадические) деонтические логики. В монадической логике перед высказываем (предписанием) может быть поставлен произвольный префикс. В диадической логике к этой конструкции добавляется условие, например, «обязательно P при условии C».

Очевидна высокая информационная насыщенность и сложность создания правил саморегулирования в рамках формализма деонтической модальной логики. Предлагаемый способ визуализации с помощью «доски объявлений» направлен на существенное упрощение и автоматизацию этой процедуры представления знаний.

Рисунок 2 иллюстрирует основные принципы когнитивного представления и сравнения потенциальных возможностей разных агентов снизить общий уровень угроз в разных текущих ситуациях и сделать обоснованный выбор согласованных действий. Раскраска «Доски объявлений» соответствует градиентной шкале оценки текущих угроз и рисков развития (или текущих уровня достижения целей системы). Сообщениями на «доске объявлений» служат субъективные оценки возможностей агентов повлиять на ситуацию, представленные в сопоставительном контексте между собой и по отношению к оценке ситуации, а также по силе воздействия (оцениваемой по градиентной оценке ожидаемого уровня снижения рисков или усиления влияния на развитие). Такая сопоставительная оценка соответствует позиционированию объявления каждого агента на доске, соответствующем градиентной шкале оценки системных угроз и заключается в представлении информации следующих категорий:

- активные и пассивные агенты (способные и не способные оказать в текущей ситуации какое-либо влияние на динамику системного риска или роста), изображаемые соответственно на доске или вне ее;
- агенты, оказывающие позитивное и деструктивное влияние (снижая или усиливая системный риск), которые помечаются соответственно знаками «плюс» и «минус» («обязательно» или «запрещено» соответственно);

- агенты, способные оказать синергетический эффект в разных зонах опасности (сравнительно безопасных и чрезвычайно опасных, как, например, 4 и 1;
- агенты, различающиеся по интенсивности и масштабу влияния (через значение оценочной шкалы, например, 2 < 3 < 4, и относительный размер);
- группы независимых между собой агентов (например, 3 и 4) и группы близких по характеру влияния (например, агенты 2 и 3).

Рисунок 2 – Пример правила реактивной самоорганизации

Данная структура данных относится к разряду интеллектуальных интегрированных ресурсов (активных знаний) класса ED@RR, позволяющих автоматически синтезировать ответы на запросы типа «какие методы (средства, действия) применимы в ситуации с семантическим кодом X (при некотором векторе изменения семантического кода). Предложенный способ представления знаний удовлетворяет всем требованиям гибко масштабируемого образца интерсубъективного знания:

- концептуально формируется в предварительном режиме интерактивного обсуждения,
- используется как элемент системы интеллектуально-информационной поддержки принятия решений класса ED@RR в интерактивном режиме,
- допускает переформатирование в продукционную систему ED@RR реального времени, стратифицированную как по интервалам оценки текущей ситуации, так и по областям применимости методов.

Тем самым каждый метод (действие, модель) приобретает свой электронный паспорт «услуг», который может использоваться в конфигурировании grid-систем самоактивизирующихся услуг (при многоагентном наблюдении за ситуацией). Такой паспорт практически отражает SWOT-характеристики «услуги» применительно к разным ситуациям, представляя соответственно ее сильные стороны (Strengths), слабые стороны (Weaknesses), возможности (Opportunities) и недостатки (Threats). Для централизованного контура – используется в виде реактивной продукционной системы «Оценка (диапазон, вектор изменения, темпоральная характеристика изменения) ситуации - рекомендуемые действия».

Заключение

Кибер-физические системы по своей значимости выходят на уровень критических интеллектуальных технологий. К числу основных проблем их практического внедрения относится отсутствие программной инженерии знаний для процессов самоорганизации. Для решения этой проблемы в данной работе предлагается унифицированный подход к представлению зна-

ний в формате контроллинга класса ED@RR, основанный на когнитивной визуализации знаний.

Предложенный подход относится к интеллектуально-емким механизмам представления знаний, которые заменяют и стандартизируют прикладную терминологию экспертов разных узких областей компетентности, упрощают организацию интерсубъективного аудита, поддерживают дискурс-анализ и представление многоконтекстной информации, имеют машиночитаемый формат и допускают унификацию программно-сервисного сопровождения.

Список литературы

[1] Spimes, Кибер-физические системы и Промышленность 4.0 http://internetofthings.ru/issledovaniya/33-spimes-kiber-fizicheskie-sistemy-i-promyshlennost-4-0

[2] Кибер-физические системы http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/10180302

[3] IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Newworks, And Applications (CHSNA 2014)/ http://www.cpsna.org/

[4] Буховец А.Г., Буховец, Е.А., Бирючинская Т. Я. Использование фрактальных моделей в задачах классификации / // Системы управления и информационные технологии.-2009.- №1(37).- С. 117-121.

[5] Буховец А.Г., Буховец Е.А., Бирючинская Т. Я. Моделирование фрактальных свойств системных объектов // Вестник ВГУ. Системный анализ и информационные технологии.- 2011.- №2 - С. 22-26.

[6] Буховец А.Г., Буховец Е.А., Бирючинская Т. Я. Фрактальный подход к анализу данных в моделях многомерной классификации / А.Г. // Современная экономика: проблемы и решения.-2011.- №7(19). - С. 149-160.

[7] G Rzevski Self-organization in social system — Онтология проектирования. Научный журнал №4 (14), 2014, с.8-17.

[8] Виттих В.А. Понятие интерсубъективности в эвергетике. — Онтология проектирования. Научный журнал №4 (14), 2014, с.90-97.

[9] Цаплин В.В., Витковский В.В., Горохов В.Л. Когнитивные технологии визуализации многомерных данных для интеллектуальной поддержки принятия решений – Международный журнал «Программные продукты и системы», №3,2014, стр.22-25. http://swsys.ru/index.php?id=3853&page=article

[10] Петрова Н.В. Методическая система развития знаний в области информатики и информационных технологий на основе когнитивной визуализации знаний. Омский научны вестник, выпуск № 1 (125), 2014.

[11] Langley P., Laird J.E., Rogers S. Cognitive architectures: Research issues and challenges // Cognitive Systems Research/ 2009. v.10. n.2. pp.141-160.

[12] Станкевич Л.А. , Серебряков С.В. “Когнитивные системы и агенты”, Тр. СПИИРАН, 2006, вып. 3, том 1.

[13] Малинецкий Г.Г., Маненков С.К., Митин Н.А., Шишов В.В. Когнитивный вызов и информационные технологии - Вестник Российской академии наук, 2011, том 81, №8, с.707-716.

[14] Филлипс Л., Йоргенсен М. Дискурс-анализ. Теория и метод / пер. с англ. — Харьков: Изд-во Гуманитарный Центр, 2004. — 336 с.

[15] Макаров М.Л. Основы теории дискурса. — М.: ИТДГК «Гнозис», 2003. — С. 90.

[16] Бочаров В.А., Маркин В.И. Основы логики; Учеб. - М.:ИНФРА-М, 2002. — 296 с

[17] ГОСТ 7.32-2001. Отчет о научно-исследовательской работе: Структура и правила оформления / Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001.

[18] Wille R., Ganter B. Formale Begriffsanalyse. – Springer-Verlag, 1996.

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В УПРАВЛЕНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ДЕЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА И ОБРАБОТКИ ЗНАНИЙ

Л.Р. Черняховская[1], И.П. Владимирова[1], А.И. Малахова[1]

[1]Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия
lrchern@yandex.ru, ooo-flaming@mail.ru, aimalakhova@gmail.com
тел: +7 (347) 273-78-35, факс: +7 (347) 273-77-17

Ключевые слова: *управление взаимодействием деловых процессов, коллективное принятие решений, поддержка принятия решений, обработка знаний, онтология, синергетический эффект, управление качеством*

Abstract
The article considers organization of the analytical collective decision support in cooperative business processes management based on the principles of quality management and knowledge processing with the use of ontological engineering. Method and algorithm of analytical decision support, including the search of the cases of mathematical optimization methods and data mining methods applying, represented in the ontology, are described. It is shown, that for effective cooperative business processes management organization of the decision-making support in accordance with the principles of total quality management is needed.

Введение

Обеспечение эффективности управления взаимодействием деловых процессов, особенно в условиях действия факторов неопределенности и риска, характерных для современной социально-экономической среды, требует организации принятия решений в соответствии с принципами всеобщего управления качеством. Поддержка принятия решений в управлении взаимодействием деловых процессов требует привлечения в их обсуждение и реализацию всех работников организации, заинтересованных в принятии точных, обоснованных и оперативных решений.

Анализ современных исследований в области управления взаимодействием сложных процессов позволяет заключить следующее: основным предметом исследований является разработка и внедрение автоматизированных систем управления отдельными процессами, разработка мультиагентных систем, а также решение задач оперативно-диспетчерского управления в проблемных ситуациях; существенные результаты получены в применении известных методов математического моделирования и поддержки принятия коллективных решений при управлении процессами.

Сложные задачи принятия решений в условиях неопределенности и риска зачастую требуют принятия коллективных решений. При этом должна учитываться необходимость взаимодействия управляющих (акторов) при выработке коллективных решений, обеспечения оперативного доступа к необходимой информации, приобретения, накопления, использования и распространения знаний и опыта экспертов по принятию решений в проблемных ситуациях. В работе В.А. Виттиха [1] определено условие достижения консенсуса: «Для того чтобы совместными усилиями овладеть ситуацией, должны договориться о разделяемых всеми принципах принятия решений, о некоторых общих «правилах игры»». Выбор факторов, влияющих на

принятия решений, определение цели и критериев выбора альтернатив решений, определение отношений между проблемными ситуациями и методами их разрешения, должны осуществляться различными специалистами в составе коллектива лиц, принимающих решения. В работе [1] предложено для достижения согласия акторов между собой в логике принятия решений разработать онтологию. В данной статье рассматриваются подход к решению вопросов, связанных с разработкой онтологии, обеспечивающей обработку знаний об управлении взаимодействием сложных процессов в единой информационной среде, обеспечивающей поддержку принятия управленческих решений, в том числе коллективных.

1 Анализ проблем принятия решений в управлении взаимодействием деловых процессов

Примерами взаимодействия сложных динамических процессов являются: управление сложными, территориально распределенными системами в критических ситуациях; управление основными и вспомогательными процессами в производственных системах; управление программными проектами; управление качеством продукции и услуг; ведение переговоров по принятию оперативных и стратегических решений. Принятие решений при управлении взаимодействием сложных процессов осуществляется в условиях неопределенности влияния внешних факторов и неблагоприятных изменений внутренних параметров процессов, неопределенности оценки последствий принимаемых решений, недостаточно эффективного информационного взаимодействия управляющих при наличии различных (а иногда и противоречивых) целей и критериев управления процессами. В процессе организационного управления взаимодействием сложных процессов наблюдаются такие факторы как воздействие организаций друг на друга; взаимная обусловленность в действиях различных организаций; последовательное изменение состояния отношений между организациями.

Для достижения синергетических эффектов поддержки принятия решений необходимо разработать схемы организации принятия коллективных решений на основе принципов менеджмента качества и обработки знаний. При разработке данных схем необходимо учитывать экспертные знания и опыт лиц, заинтересованных в принятии коллективных решений, для чего разработана база прецедентов принятия решений в проблемных ситуациях, в соответствии с принципом всеобщего управления качеством, предполагающим принятие решений, основанных на фактах.

В цикле обработки знаний, основанном на прецедентах, важные этапы во многом зависят от наличия у сотрудников соответствующих знаний, готовности к сотрудничеству с коллегами, способности к применению формализованных методов принятия решений, пониманию ценностей и предпочтений других членов коллектива и согласованию оценок вариантов организационных решений. Цикл поиска решений на основе прецедентов включает следующие этапы: получение информации о текущей проблемной ситуации, сопоставление этой информации со свойствами прецедентов, хранящихся в базе знаний, выявление прецедента, наиболее близкого к текущей проблеме, адаптация выбранного решения, проверка эффективности каждого вновь полученного решения и занесение информации о новом прецеденте в базу прецедентов. Реализация перечисленных этапов требует активного участия работников организации, наилучшего использования их компетенций.

В результате онтологического анализа выявленных особенностей управления взаимодействием деловых процессов разработана онтология поддержки принятия решений [5]. Онтология создает основу для того, чтобы при управлении взаимодействующими процессами сторо-

ны, обменивающиеся информацией, могли правильно понимать друг друга. Интеграция моделей двух процессов на базе онтологии позволит наладить коммуникацию между сотрудниками, а также решит проблему получения достоверной и актуальной информации для принятия решений в условиях неопределенности.

Известные на сегодняшний день методологии проектирования информационно-управляющих систем, к которым относится разрабатываемая система поддержки принятия решений (СППР), основаны на процессном подходе, предполагающими смещение акцентов от управления отдельными структурными элементами на управление сквозными бизнес-процессами, связывающими деятельность всех структурных элементов. Разработка интеллектуальной СППР включает этап формулировки требований к организации поддержки и исполнения решений на основе концепции управления знаниями и онтологического инжиниринга. Совокупность требований к СППР включает: основные требования (определение основной цели ППР, обработку знаний и опыта экспертов, онтологический инжиниринг, обеспечение взаимодействия ЛПР и других заинтересованных лиц в процессе принятия решений, документирование принятия решений); функциональные требования и нефункциональные требования (рисунок 1).

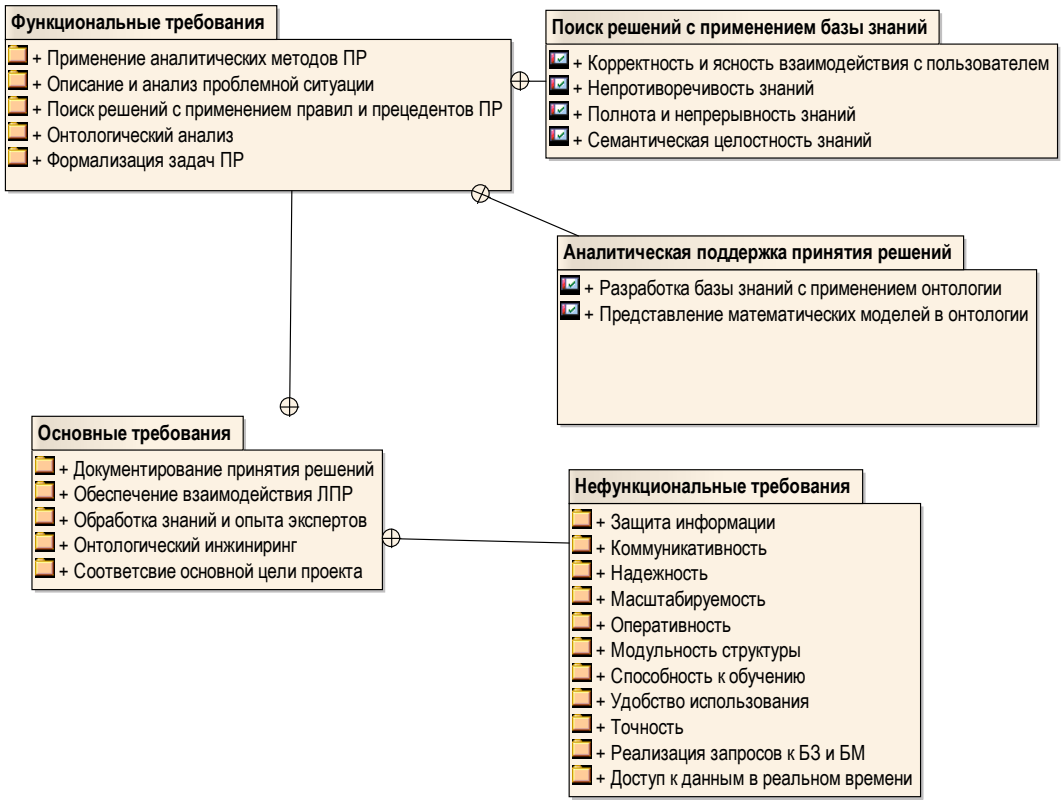


Рисунок 1 – Диаграмма требований к СППР

Функциональные требования к СППР сформулированы в соответствии с концепцией управления знаниями и онтологического инжиниринга. Нефункциональные требования были сформулированы для обозначения проблем, не связанных с функциональностью СППР. Эти

требования определяют не поведенческие аспекты системы в процессе ППР, а необходимые общие атрибуты системы, в том числе, надежность, оперативность, доступ к данным в реальном времени, обеспечение защиты конфиденциальной информации и т.д. Иерархия требований представлена в онтологии СППР.

2 Постановка задачи и аналитические методы коллективного принятия решений

Под задачей коллективного выбора согласно [2] понимается процедура принятия решения, основанная на совместном учете и/или согласовании индивидуальных предпочтений коллектива лиц, принимающих решения (КПР). Имеется КПР, состоящая из t человек, которые рассматривают возможные варианты решения проблемы (альтернативы, объекты, способы действия, кандидаты) $A_1, ..., A_m$, число которых может быть как конечным, так и бесконечным. Каждый из членов КПР независимо от остальных оценивает все варианты в соответствии со своими индивидуальными предпочтениями.

Предполагается, что выработаны общие для всех членов КПР правила организации и проведения процедур сравнения и выбора вариантов. Основываясь на индивидуальных предпочтениях всех членов коллектива и учитывая степень их влиятельности, требуется решить одну из задач: выделить лучшие варианты; упорядочить все варианты; отнести каждый из вариантов к одному из заранее заданных классов прецедентов.

В рамках проводимых исследований по оказанию поддержки принятия решений в управлении взаимодействием деловых процессов были подробно изучены известные процедуры коллективного (группового) принятия решений [2, 3].

По результатам проведённого анализа представленных методов принятия коллективных решений, а также в результате выявления особенностей организационных взаимодействий деловых процессов было замечено, что требуется формальная организация процессов принятия коллективных решений, обеспечивающая координацию или сотрудничество коллектива участников. Выбор метода коллективного принятия решений зависит от таких факторов, как тип организационной структуры, условия и причины возникновения проблемной ситуации, наличие ресурсов управления, в том числе временных. Формулировки методов коллективного принятия решений, наиболее соответствующих требованиям к СППР в части обеспечения взаимодействия КПР и формализации задач принятия решений, приведены в таблице 1. В современных условиях ведения деловых процессов в качестве инструментальных средств коммуникации могут использоваться сотовая связь, веб-конференции, онлайн-семинары, коммуникационные программы (Skype, Lync).

Таблица 1 – Методы коллективного принятия решений

№	Метод КПР	Описание метода	Преимущества	Недостатки
1	Решение, принимаемое экспертом	Выбирается эксперт, который в дальнейшем рассматривает вопросы и принимает по ним решения	Успешен, когда один из членов команды обладает значительным опытом в рассматриваемом вопросе	Отсутствует командное взаимодействие; не всегда ясно, кто из членов команды является экспертом; может быть выбрано наиболее распространенное решение
2	Решение путем усреднения мнений членов команды	Отдельно опрашивается каждый член команды, результаты усредняются	Чрезвычайные мнения исключаются; ошибки в основном исключаются; члены команды консультируются; метод успешен, когда длительное обсуждение нежелательно; могут приниматься срочные решения	Отсутствует командное взаимодействие, члены команды не в полной мере вовлечены в процесс принятия решения; мнения наиболее знающего меньшинства могут быть исключены; могут возникнуть или обостриться конфликтные ситуации, затрудняющие последующую эффективную работу
3	Решение, принимаемое руководителем после обсуждения в группе	Руководитель проекта созывает собрание, представляет проблему, выслушает мнения команды, и объявляет свое решение	Команда проекта вовлечена в процесс принятия решения; рассмотрение мнений членов команды повышает точность и правильность принимаемого решения, обеспечивается возможность достижения согласия	Члены команды могут соревноваться за внимание со стороны руководителя; члены команды могут поинтересоваться у руководителя о том «что конкретно он хочет услышать»; отсутствует ответственность команды за принятие решения; возможно манипулирование предпочтениями членов команды, фальсификация решений
4	Решение большинством голосов	Решение обсуждается до того момента, когда 51% или более членов команды не примут решение	Успешен, когда времени недостаточно для принятия решения на основе консенсуса; успешен, когда полная ответственность членов команды за реализацию решения умеренная	Члены команды в результате рассматриваются как «победители и проигравшие», что влияет на качество решения; решение меньшинства не обсуждается и может быть недооценено; не достигается полного взаимодействия в команде
5	Решение на основе консенсуса	Коллективное решение достигается путем эффективного и справедливого процесса коммуникации (все члены команды говорили и слушали, все мнения были оценены)	Наиболее успешный метод принятия решений в команде; абсолютно все члены команды выражают свои мысли и мнения по рассматриваемому вопросу; члены команды чувствуют себя полезными и услышанными	Требует больше времени для принятия решения, чем методы 1-4; хороших психологических качеств, коммуникативных навыков и умений работать в команде. Повышается ответственность за реализацию решений; обеспечивается возможность накопления и обработки данных о компетентности экспертов

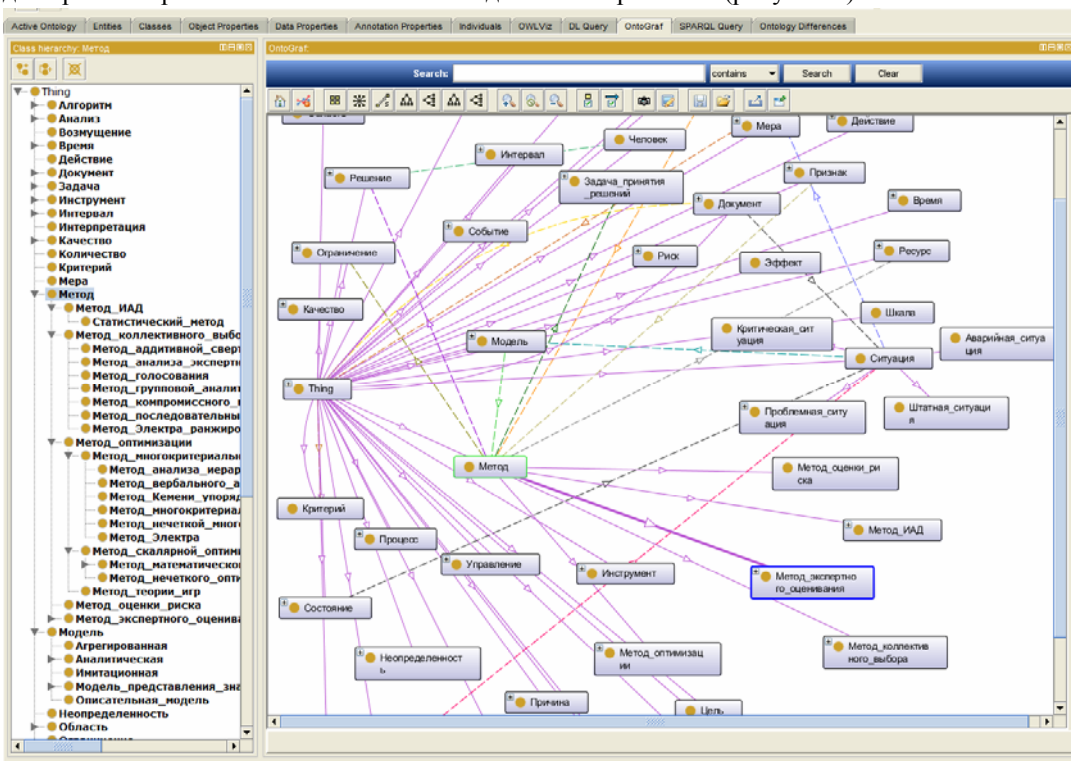
3 Разработка структуры интеллектуальной системы поддержки принятия решений

На основе разработанной методологии поддержки принятия коллективных решений в управлении взаимодействием сложных процессов предложена структура интеллектуальной СППР, включающая онтологию поддержки принятия решений, базу знаний с правилами и прецедентами, модуль поиска решений на основе правил и прецедентов, модуль интеллектуального анализа данных, модуль приобретения экспертных знаний, а также модуль оценки эффективности решений, принятых в едином информационном пространстве, организованном онтологией.

Онтология является основой разработки базы знаний системы поддержки принятия решений и выполняет две основные функции: определяет общую терминологическую базу для всех лиц, принимаемых решения; позволяет формулировать правила и прецеденты, используя однозначно понимаемые понятия предметной области.

Онтология включает также семантическую сеть аналитических моделей и методов, используемых для решения алгоритмических задач оптимизации с помощью существующих алгоритмов аналитической поддержки принятия решений. Для обоснования выбора вариантов решений в условиях ограниченных ресурсов применяются различные аналитические модели, например, модели математического программирования, игровые модели, модели многокритериального принятия решений, модели коллективного выбора.

Для каждой из перечисленных моделей существует множество методов поиска решений. В связи с этим одной из целей онтологического анализа является отображение множества задач принятия решений на множество методов поиска решений (рисунок 2).



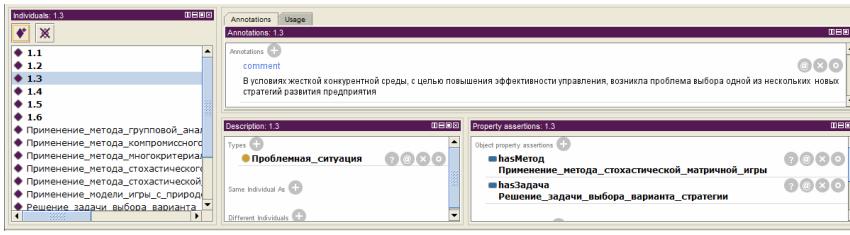


Рисунок 2 – Фрагмент онтологии аналитической поддержки принятия решений

Высокая сложность или невозможность адекватной формальной постановки слабоструктурированных задач может усложнить применение аналитических моделей. Для таких задач более соответствующим может явиться применение моделей и методов искусственного интеллекта. Онтологический анализ обеспечивает возможность представление как аналитических моделей и методов принятия решений, так и моделей и методов представления и поиска знаний, основанных на теории искусственного интеллекта.

В результате онтологического анализа выявленных особенностей управления взаимодействием деловых процессов разработана онтология поддержки принятия решений, основанная на принципе модульности структуры семантической сети. В соответствии с указанным принципом в семантической сети онтологии созданы модули, отображающие различные контексты поддержки принятия коллективных решений. Структура разработанной онтологии поддержки принятия решений может быть представлена в виде (1):

$$(1) \quad Onto = \left\langle Onto^{meta}, Onto^{app}, Onto^{amm}, Onto^{org}, Onto^{q} \right\rangle,$$

Метаонтологию $Onto^{meta}$ составляют общие понятия области управления знаниями такие, как «объект», «атрибут», «значение», «отношение» и т.п.

Предметная онтология $Onto^{app}$ содержит понятия, характерные для предметной области, структурированные в соответствии с иерархией, установленной для конкретного объекта. Наполненная предметная онтология $Onto^{app}$ может использоваться для разработки и рассматриваться как компонент базы знаний при работе с конкретной предметной областью.

В онтологии $Onto^{amm}$ отражены аналитические модели и методы, используемые для решения алгоритмических задач оптимизации с помощью существующих алгоритмов аналитической поддержки принятия решений.

Онтология $Onto^{org}$ включает в себя понятия из области организационного управления; а также задачи, модели и методы принятия решений. Она включает такие классы, как «задача», «проблемная ситуация», «решение», «область знаний» и другие.

В состав онтологии $Onto^{q}$ включены понятия из области управления качеством.

В онтологической базе знаний прецеденты представлены в качестве примеров действия в конкретных ситуациях и могут применяться для формирования решений в процессе интеллектуального поиска в базе знаний информационно-управляющей среды. Поиск, основанный на прецедентах, применяется в проблемных ситуациях, сложность которых не позволяет провести их конструктивную формализацию, но по которым имеется опыт (прецеденты) их успешного разрешения. Оценка эффективности решений, найденных в прецедентах, используется для обучения базы знаний. Важно подчеркнуть, что анализ эволюции ценности прецедентов принятия решений во времени способствует стимулированию улучшения и совершенствования процессов принятия решений.

Заключение

Использование прецедентов применения аналитических методов оптимизации для решения задач организационного управления взаимодействием деловых процессов позволяет повысить эффективность и качество управленческих решений с помощью явно определенных формальных процедур, основанных на поиске и применении адекватных методов оптимизации с применением онтологии.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 13-08-00321 «Интеллектуальное управление взаимодействием сложных процессов на основе онтологического анализа и обработки знаний в условиях неопределенности».

Список литературы

[1] Виттих В.А. Введение в теорию интерсубъективного управления. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. – 64 с.

[2] Петровский А.Б. Теория принятия решений: учебник для студ. высш. учеб. заведени / А.Б. Петровский. – ИМ.: Издательский центр «Академия», 2009. – 400 с.

[3] Johnson, D.W., and Johnson, F.P. Joining Together: Pearson New International Edition PDF eBook: Group Theory and Group Skills (11th ed.).

[4] Чернавский Д.С. Синергетика и информация (динамическая теория информации). – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 288 с.

[5] Поддержка принятия решений при стратегическом управлении предприятием на основе инженерии знаний / Под редакцией Л.Р. Черняховской. – Уфа: АНРБ, Гилем, 2010. – 128 с.

[6] Гвоздев В.Е., Черняховская Л.Р., Ровнейко Н.И., Малахова А.И. Интеллектуально-аналитическая поддержка принятия коллективных решений при управлении программными проектами // Материалы XVI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», 30 июня - 3 июля 2014 г. – Самара; Самарский научный центр РАН, 2014. С. 204–212.

[7] Черняховская Л.Р., Малахова А.И. Разработка моделей и методов интеллектуальной поддержки принятия решений на основе онтологии организационного управления программными проектами // Онтология проектирования: научн. журнал, Самара: Новая техника, 2014. – № 4 (10). С. 42–50.

УПРАВЛЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИЕЙ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Л.Р. Черняховская[1], В.Е. Гвоздев[1], А.Ф. Галиуллина[1], А.И. Малахова[1], Н.И. Ровнейко[1]

[1]Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия
lrchern@yandex.ru, wega55@mail.ru, gaf1205@ya.ru, aimalakhova@gmail.com, nicolaos@mail.ru
тел: +7 (347) 273-78-35, факс: +7 (347) 273-77-17

Ключевые слова: *инновационный проект, принятие решений, система массового обслуживания, онтологический анализ, управление знаниями, информационная система поддержки принятия решений, управление знаниями, имитационное моделирование*

Abstract

Managing the development of modern organizational systems, in many cases through the implementation of various types of projects. The innovative project is a type of investment project and is a system that contains many of the design decisions in different fields: scientific, technical, industrial, economic, managerial, organizational, marketing. In this regard, innovation is characterized by a high degree of management complexity and risk of making wrong or unreasonable decisions. In the creation and realization of innovative projects, the key success factors are targeted coordinated the activities of the subsystems of production systems management, government or commercial organizations that have a different vision of the innovative project; availability of tools and information resources that improve the efficiency of decision making in the management of innovative projects. For the solution of problems of innovative development of production systems offers the design and development methods for intelligent decision support based on ontological analysis, knowledge management, analytical and simulation modeling in the field of management of innovation projects.

Введение

Управление развитием современных организационных систем во многих случаях осуществляется через реализацию различного рода проектов. Инновационный проект является разновидностью инвестиционного проекта и представляет собой систему, содержащую множество проектных решений по различным областям: научная, техническая, производственная, экономическая, управленческая, организационная, маркетинговая. В связи с этим инновационная деятельность характеризуется высокой степенью сложности управления и риском принятия неверных или необоснованных решений.

В создании и реализации инновационных проектов ключевыми факторами успеха являются целенаправленная координированная деятельность подсистем управления производственными системами, государственными или коммерческими организациями, имеющих различное видение инновационного проекта, а также наличие инструментальных средств и информационных ресурсов, позволяющих повысить эффективность принятия решений при управлении инновационными проектами.

Для решения проблемы инновационного развития организационными системами предлагается разработка и развитие методов интеллектуальной поддержки принятия решений на основе онтологического анализа, управления знаниями, аналитического и имитационного моделирования в области управления инновационными проектами.

Разработка программного обеспечения информационной системы поддержки принятия решений осуществляется в соответствии с требованиями, которые предъявляются различными

правообладателями к программному продукту, т.е. к данной информационной системе, на разных стадиях его жизненного цикла. При формировании требований могут возникнуть противоречия, причины которых могут быть различными: разное видение различными субъектами управления потребительских свойств программного продукта [3]; различное оценивание проблемных ситуаций разными субъектами управления [4]; неопределенность состояния внешней по отношению к объекту управления среды [5, 6] и внутренней среды объекта управления [6, 7], а так же уникального сочетания внешней и внутренней сред [8]; отказ заинтересованных сторон от ранее данных обещаний и нарушение в одностороннем порядке достигнутых договоренностей [6, 9, 10] и др.

Выявление противоречий на ранней стадии разработки является критическим фактором успеха управления сложными системами. Своевременное выявление противоречий и нахождение способов их разрешения предотвращает появление трудностей в реализации проекта, что позволяет, в конечном итоге, сократить затраты на создание информационной системы поддержки принятия решений.

1 Разработка требований к инновационному проекту

При создании программного обеспечения (ПО) у специалистов очень часто возникают сложные проблемы, причина возникновения которых не всегда ясна, особенно при разработке инновационной программной системы. В частности, бывает сложно четко описать действия, которые должна выполнять разрабатываемая система. Описание функциональных возможностей и ограничений, которые накладываются на программную систему, называется требованиями к программной системе, а процесс анализа, формирования, документирования и проверки этих функциональных возможностей и ограничений называется разработкой требований.

Требования к программному обеспечению информационной системы поддержки принятия решений на определены в форме групп требований к программному продукту, например, функциональных, нефункциональных и др. Рассмотрим пример разработки требований к программному обеспечению предоставления государственных услуг. Совокупность требований к ПО поддержки принятия решений включает в себя: основные требования, функциональные и нефункциональные требования, экономические требования и требования к системе массового обслуживания (СМО).

Основные требования включают основную цель разрабатываемой системы. Программное обеспечение предоставления государственных услуг разрабатывается в целях информационного обеспечения процесса предоставления государственных услуг, а также обеспечения информационного межведомственного взаимодействия, т.е. взаимодействия между органами власти и учреждениями в электронном виде, участвующими в оказании государственных услуг в соответствии с требованиями нормативных правовых актов и методических документов. Кроме того, разрабатываемая система должна позволять вести централизованный контроль исполнения запросов государственных услуг, осуществлять оценку исполнительской дисциплины, оценку качества государственных услуг, а также документирование принятия решений.

Функциональные требования охватывают предполагаемое поведение программной системы, определяя действия, которые программная система способна выполнять (поддержка принятия решений в процессе предоставления государственной услуги, ведение журнала регистрации обращений граждан и др.).

Нефункциональные требования не связаны непосредственно с функциями, выполняемыми системой. Эти требования определяют не поведенческие аспекты системы в процессе предоставления государственных услуг, они связаны с такими интеграционными свойствами системы, как защита конфиденциальной информации, надежность, коммуникативность, обеспечение доступа к журналам и базам данных и т.д. При этом стоит отметить, что многие не-

функциональные требования относятся к программной системе в целом, а не к отдельным ее средствам; следовательно, нефункциональные требования являются более значимыми и критичными, чем отдельные функциональные требования.

Экономические требования подразумевают экономический аспект, который необходимо учесть при разработке ПО предоставления государственных услуг. Необходимо оценить возможные риски, экономическую эффективность, затраты времени на разработку ПО, стоимость реализации и сопровождения ПО предоставления государственных услуг.

Требования к системе массового обслуживания сформулированы с той позиции, что система предоставления государственных услуг является СМО и обрабатывает множество входящих заявок, или запросов государственных услуг от граждан. И соответственно, к этой системе, как к СМО, предъявляются определенные требования, которые должны быть выполнены для обеспечения соответствующего качества государственных услуг. К основным таким требованиям относятся: оперативность СМО, абсолютная, относительная и номинальная пропускная способность СМО, количество каналов обслуживания, коэффициент простоя.

Некоторые проблемы, которые возникают в процессе разработки требований, обусловлены тем, что отсутствует четкое понимание различия между этими разными уровнями требований. Требования обычно используются в качестве средства коммуникации между различными заинтересованными лицами. Это значит, что требования должны быть просты и понятны как для обычных пользователей программной системы, так и для ее разработчиков, проектировщиков и др. Для решения возникающих проблем необходимо четко различать требования разных уровней и определиться с толкованием термина того или иного требования. Для однозначного толкования терминов той или иной предметной области проведен онтологический анализ предметной области.

2 Онтологический анализ разработки информационной системы поддержки принятия решений

Онтология представляет собой спецификацию концептуализации [1, 2], формализованное представление понятий некоторой предметной области и отношений между понятиями. Онтологическое представление знаний используется для семантической интеграции информационных ресурсов, адекватной интерпретации содержания текстовых документов и поисковых запросов, которые представлены на естественном языке. Онтология позволяет обеспечить совместное использование экспертами, сотрудниками государственных учреждений общего понимания структуры информации, анализ и повторное использование знания в предметной области, а также обучение новым знаниям.

В разработанную онтологию в виде классов включены общие понятия поддержки принятия решений, проектного менеджмент и СМО. Фрагмент разработанной онтологии представлен на рисунке 1.

В основу моделирования требований к информационной системе положен интегрированный триадный принцип системного анализа – «целеполагание–средство–результат» [3]. Данный принцип требует рассмотрения проблемы в обобщенном варианте, когда анализируется соответствия между главными составляющими схемами принятия решений. Характерно, что в эффективном варианте имеет место согласование целей, средств и результата. В противном случае могут иметь место следующие ситуации: соответствие или несоответствие целей и средств достижения целей; соответствие или несоответствие целей и результатов; соответствие или несоответствие средств и результатов.

В онтологии предметной области модель требований к инновационному проекту представляется как ациклический граф (дерево целей), формально определяемое как $G = (V, E)$ состоящий из: множества вершин $V = \{V_1, V_2, ..., V_n\}$, где каждая вершина есть понятие, отображающее цель, которая должна быть достигнута в реализации проекта, множества ребер

$E(V_i, V_j)$, отображающих объектные отношения между понятиями; булевых функций, определяющих иерархическую структуру графа G [13]. Значение булевых функций $(V \times V)$ определяется в соответствии с иерархией требований, например, $Atr(V_i, V_j) = true$ если пользователь определяет, что цель, представленная V_i, должна быть удовлетворена перед тем, как цель, представленная V_j, удовлетворена, $V_i, V_j \in V$. Механизм оценки эффективности выполнения требований состоит в реализации запросов эксперта или группы экспертов к онтологии и критериальной процедуре принятия решений по оценке достижения целей на графе с использованием инструментов в виде технологий обработки экспертных оценок, а также имитационного моделирования [11]. На основе разработанной онтологии осуществляется формирование правил на языке SWRL (Semantic Web Rule Language).

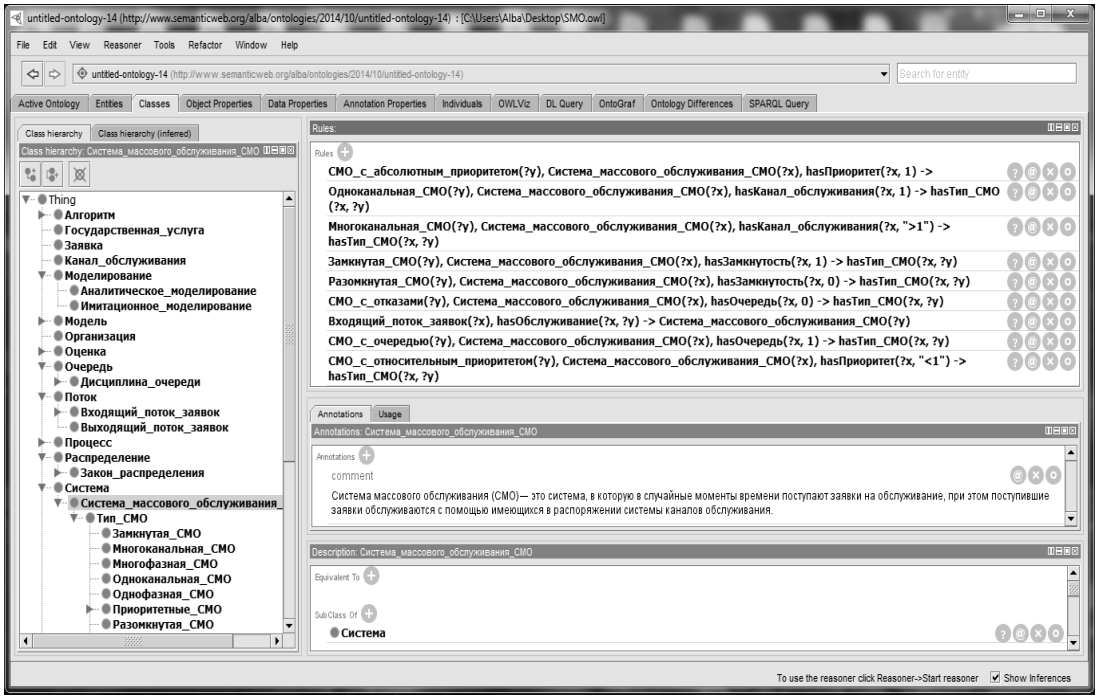


Рисунок 1 – Формирование правил принятия решений на основе онтологии СМО

Формирование правил принятия решений является расширением разработанной онтологической модели [12]. При формировании условной части и заключения в правиле используются объекты онтологии OWL-DL (OWL классы сущностей и их свойства, примеры сущностей и отношения между ними). Правила представляют собой достоверные утверждения о состоянии рассматриваемой системы в некоторый момент времени, на основе которых могут быть сделаны выводы, позволяющие вносить изменения в организационную систему предоставления государственных услуг, для повышения эффективности ее функционирования.

Заключение

Процесс управления реализацией инновационных проектов требует информационной и интеллектуальной поддержки для достижения достаточно высоких показателей эффективности и качества принятия решений. Для этой цели предложена разработка информационной

системы с применением онтологической модели, а также теории систем массового обслуживания.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 13-08-00321 «Интеллектуальное управление взаимодействием сложных процессов на основе онтологического анализа и обработки знаний в условиях неопределенности».

Список литературы

[1] Gruber T.R.. A translation approach to portable ontologies. Knowledge Ascuisition 5 (2); 1993.
[2] Guarino N., Giaretta. P. Ontologies and knowledge bases; Towards a terminological clarification. In: Mars N. (ed.). Towards Very Large Knowledge Bases: Knowledge Building & Knowledge Sharing. IOS Prerss: Amsterdam, NL; 1995.
[3] Козлов В.Н. Системный анализ, оптимизация и принятие решений. Учебное пособие. - Москва: Проспект, 2010. – 176 с.
[4] Виттих В. А. Организация сложных систем. Самара: Самарский научный центр РАН, 2010. – 66 с.
[5] Липаев В. В. Анализ и сокращение рисков проектов сложных программных средств. М: СИНТЕТ, 2005. – 224 с.
[6] Rzevski G. Managing Complexity. Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVI Международной конференции, Самара, 2014. С. 3–12.
[7] Макконнел С. Сколько стоит программный проект. СПб.: Питер, 2007. – 297 с.
[8] Гвоздев В.Е., Ильясов Б.Г. Пирамида программного проекта // Программная инженерия №1, 2011. С. 16–24.
[9] Йордон Э. Путь камикадзе. Издательство Лори, 2008. – 290 с.
[10] Гвоздев В.Е. Программные проекты: базовые термины и определения: учеб. пособие / В.Е. Гвоздев, О.Я. Бежаева, О.А. Ефремова, Г.И. Таназлы. Уфа: УГАТУ, 2011. – 218 с.
[11] Черняховская Л. Р. Поддержка принятия решений при стратегическом управлении предприятием на основе инженерии знаний. Уфа: АНРБ, Гилем, 2010. – 128 с.
[12] Галиуллина А.Ф. Имитационное моделирование деловых процессов как систем массового обслуживания // Актуальные проблемы науки и техники. Девятая Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых. Том 1. Информационные и инфокоммуникационные технологии. Сборник трудов / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: УГАТУ, 2014. С. 226–230.
[13] Y. Jiang, J. Hu and D. Lin, ”Decision Making of Networked Multiagent Systems for Interaction Structures”, In IEEE transactions on systems, man, and cybernetics part a: systems and humans, VOL. 41, NO. 6, November 2011.

Theory of Optimal Control and its Applications
Теория оптимального управления и её приложения

CONTROL OF INDUCTION ASSISTED HYBRID-WELDING PROCESSES TO JOIN HEAVY-WALLED STEEL COMPONENTS

B. Nacke[1], J. Neumeyer[2], H. Schülbe[3]
Institute of Electrotechnology, Leibniz Universität Hannover
Wilhelm-Busch-Str. 4, D-30167 Hannover, Germany
[1]nacke@etp.uni-hannover.de, [2]etp@etp.uni-hannover.de, [3]schuelbe@etp.uni-hannover.de
phone: +49 511 762-2872
fax: +49 511 762-3275

Key words: *induction heating, numerical simulation, laser welding*

Abstract
In order to weld heavy-walled metal sheets (16 mm and more) nowadays a hybrid process, that includes an electric arc and the laser beam, is frequently applied. Due to the high thermal conductivity of metals and the enormous temperature gradient between the laser-welded area and the not welded region around the bond, there is a big heat flow and the welded material is cooled down in very short time. This high decrease of temperature leads to decayed metallurgical qualities. In order to slow down the temperature drop an inductive process is appended to the hybrid welding device. Because of the high thickness of the metal sheets there are both an inductive preheating and an inductive postheating process added. To configure an optimal design for the inductors the numerical simulation is used and especially the heat generation of the welding process has to be included in a physical realistic way.

Introduction

So far joining of heavy-walled steel components having a sheet thickness above 10 mm is executed by multilayer submerged arc welding. The increasing demand for high-strength fine grained steel requires an enhanced productivity that can only be realized by robust and high-performance processes within a single process step.

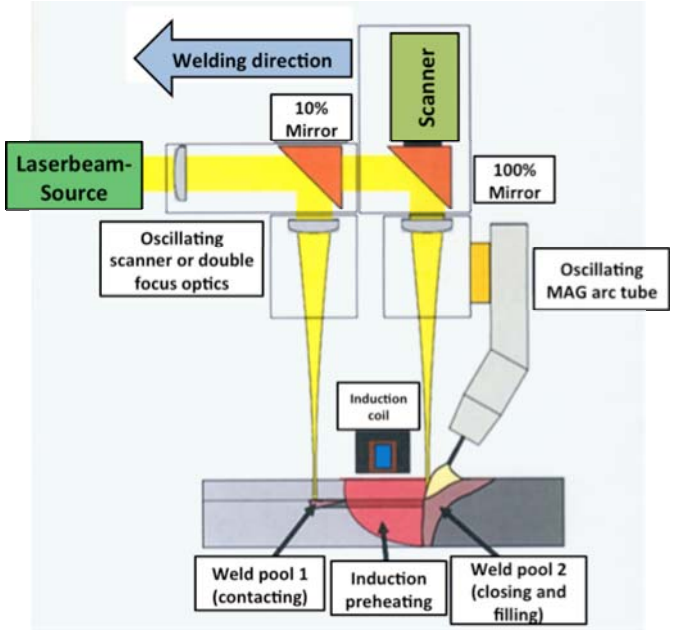
Workpieces made of fine grained steel offer very high solidity at low material effort and are suited excellent at the production of crane vehicles and for weight reduction at shipbuilding. Especially, these materials enable the construction of higher wind energy plants to cover the raising energy-demand of the world population, particularly in China, India and Brazil. The politically forced climate aims postulate a ratio of 35 % of the whole electric current generated by renewables. To realize this objectives on the one hand existing wind energy plants have to be upgraded ("Repowering"), on the other hand new plants on- and offshore require higher steel-based towers and basements.

Problem approach

The approach to raise the fabrication rate and production capacity of welded heavy plates made of fine grained steel is provided by the hybrid welding technology that facilitates high output power to join plate thicknesses above 10 mm. An application that uses a laser process and a metal-arc welding process simultaneously in a single common melting bath enables high welding penetration depths and speeds as well as increased gap bridging [1].

The limits of the welding process are defined by extremely tight temperature tolerances. The demanded temperature regime of a welding process can be ideally influenced and controlled by an induction preheating. By means of the so far implemented applications the demand of a homogeneously preheated seam at thick-walled sheets can be met only insufficiently. A bifid beam

assignment first produces a mechanical and therefore electrical connection of both sheets. Subsequent, a perpendicular arranged inductor causes an induced current that flows along the weld flanks and through the connection to achieve an optimal preheating in the relevant areas. The following hybrid-welding process, that contains the second stronger laser-beam part and the metal arc welding process, joins and finally fills up the weldseam (Picture 1). The described concept targets the robust applicability at often used welding positions and clearances. At the same time the production speed shall raise and so-called middle rip defects have to be avoided.



Picture 1 – Induction assisted laser-metal-arc hybrid welding process

Beside the single consideration of the electromagnetic-thermal coupled induction heating process also knowledge of structure-mechanic properties of the welded components and characteristics of the coupled hybrid-welding process are essential. Therefore an interdisciplinary team (hybrid welding, steel building, electro technics) was arranged to accomplish the postulated objectives.

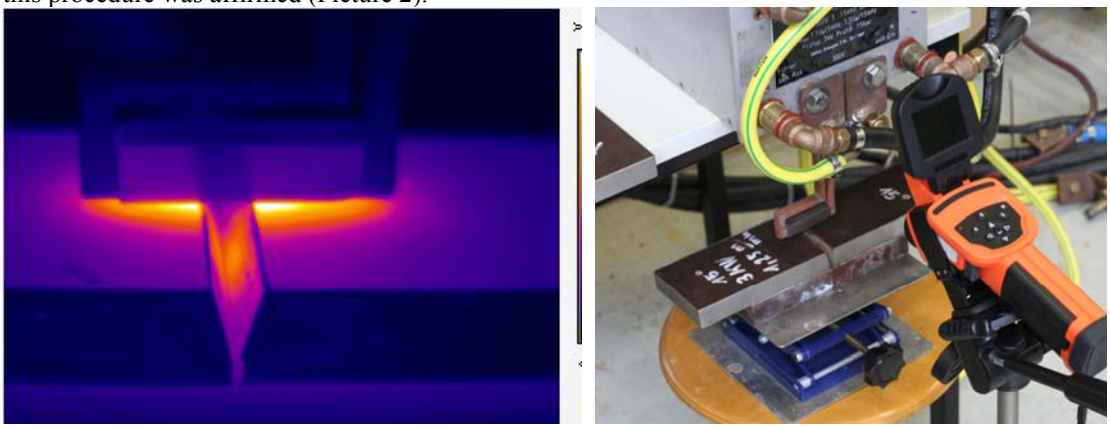
Optimization by simulation

For the design of the induction heating application that shall be adapted especially to this problem extensive FEA-simulations and parametric studies by use of the commercial software package ANSYS® are executed. During the development the claimed temperature regime along the weld flanks must be considered. The geometric dimensions of the inductor and the electromagnetic values are optimized keeping the acceptable maximum temperature and the temperature distribution at the start of the welding process in mind.

The induction assistance already demonstrated its capability to increase the productivity and to improve the microstructure at beam welding processes of sheets with a thickness up to 10 mm [2,3]. Thick-walled components between 10 mm and 23 mm often exhibit solidification cracks and therefore low welding qualities at one-layered welding procedures.

To counter this difficulty the employment of an assisting induction heating application is investigated that pre-heats the welding region optimally by use of a special arrangement. In contrast

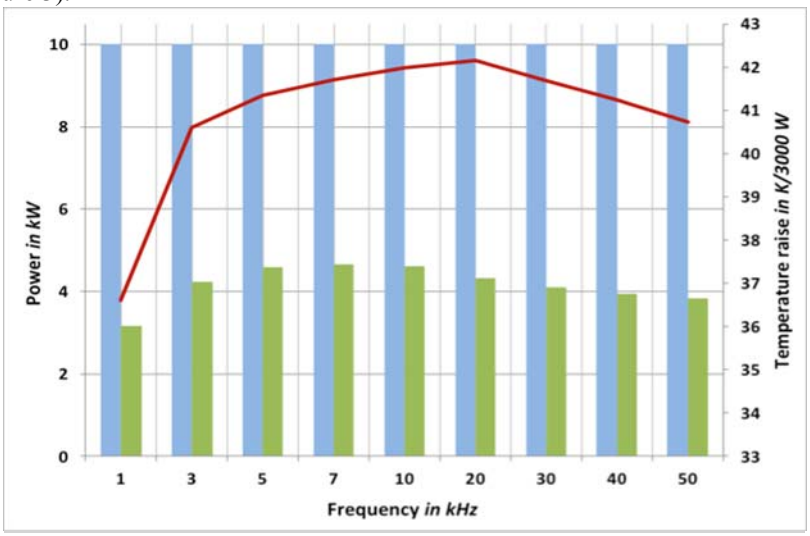
to the already successful implemented inductors here the current is driven perpendicular to the scanning direction to generate a direct heating within the weld flanks. During first feasibility studies that were executed by FEA-simulations and physical heating trials the fundamental functionality of this procedure was affirmed (Picture 2).



Picture 2 - Test rig for investigation of an induction heating unit

Using numerical parametric studies as well as self-developed analytical correlations the geometric parameters of the inductor were optimized at which the inductor's length and its width were the most focused values. These two quantities are directly influencing the width of the heated area, that especially defines the temperature gradients subsequent to the induction heating part, and the length of the heated area, that defines the required electrical power and the concentration of the heat generation.

The frequency of the inductor current and hence of the induced eddy current has a strong effect onto the distribution of the heat sources, the electromagnetic efficiency and the process efficiency. By numerical investigations the frequency that realizes a high and coevally homogenous temperature was estimated (Picture 3).

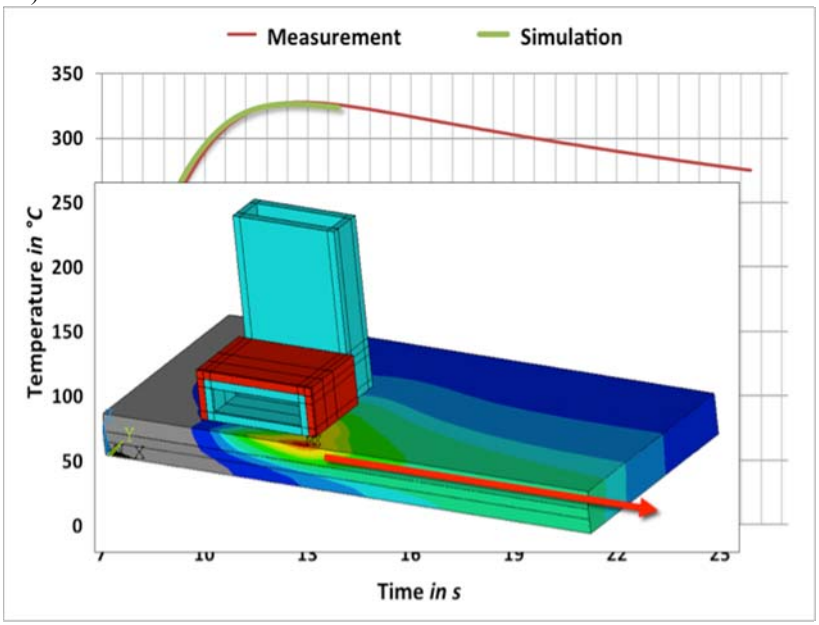


Picture 3 - Visualisation of the analyses results for determination of the optimal frequency

The comparatively weak contacting process that is performed before the induction heating leads to an electrical and mechanical contact of both components. Additional it effects a heat dumping in the workpiece. The induction heating process is highly depending on the specific material properties which again are depending on the temperature. The quantitative and qualitative impacts of the laser energy onto the temperature are investigated within these studies.

Experimental investigation

By the definition of all required geometric and electric parameters the inductor could be built at the INSTITUTE OF ELECTROTECHNOLOGY and provided to the LASERZENTRUM HANNOVER for the execution of physical tests. The comparison of measured data that were extracted with thermocouples and optical measurement procedures shows a high accordance between simulation and experiment and therefore verifies the calculated results. To achieve an even better congruence the consequences of the material properties (heat conductivity, heat capacity) are analyzed by numerical parametric studies (Picture 4).

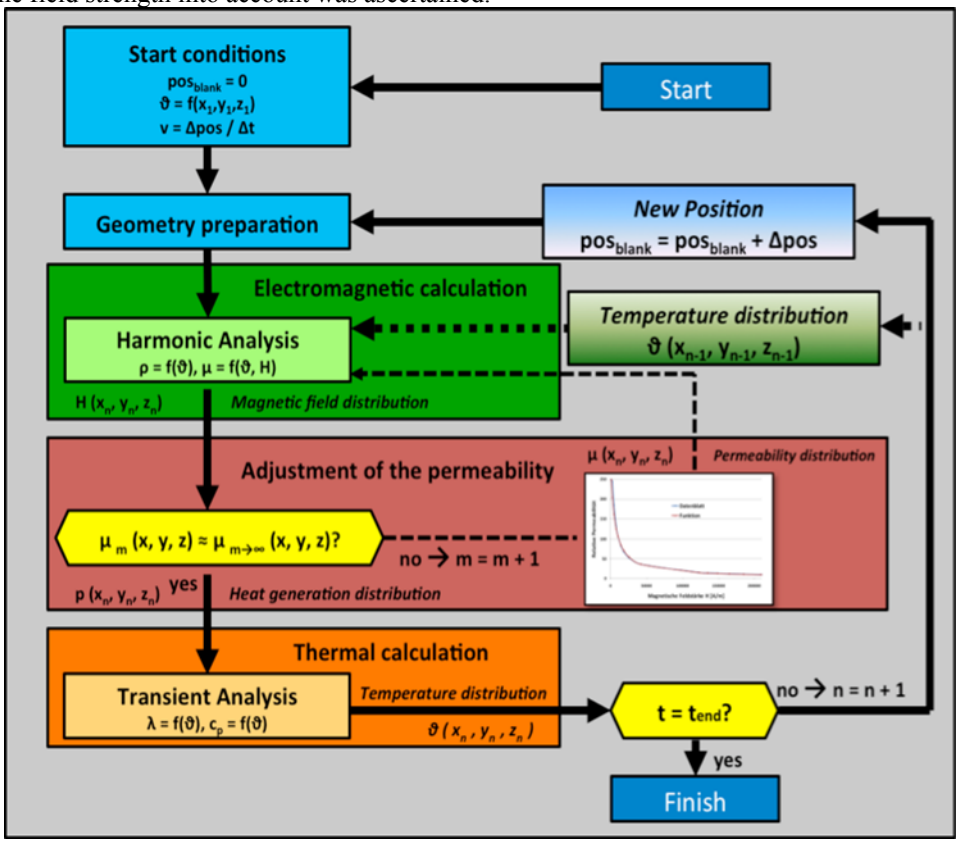


Picture 4 - Comparison of simulation and measurement

The evaluation of the physical experiments also shows the relation between applied electrical power and heading speed and reassures the assumptions.

After completion of the physical welding tests investigations concerning the resulting microstructure were conducted at the Institute for Steel Construction/Leibniz Universität Hannover and at the Laserzentrum Hannover. Regarding a thermomechanical rolled fine grained steel "S700MC" having a sheet thickness of 10 mm the induction assistance enables a good controlling of the hardness distribution within the basic material, the heat affected zone and the welded area. Further investigations at a "X70"-steel having a sheet thickness of 13,2 mm show that a huge implemented induction power results in large excess penetration. This problem can be solved by using the productivity-increasing effect of higher process velocities. By use of a welding consumable with a high content of manganese and by use of induction assistance the analyzed sheets could be joined without middle rip defects.

Beside the thermal dependency the permeability also possesses a dependency of the magnetic field strength [4]. So far the property-distribution was only implemented with a temperature dependency in the FEA-simulation tool at which the quantitative values are basing on empiric studies. An additional algorithm in the simulation considers the dependency of the magnetic field strength. The algorithm is based on a self-developed function and enables the adaption of the material specific values according the present field strength in fine sub-divisions (Picture 5). Generally a high conformance of the temperature curves of the previous results and the calculations that were done taking the field strength into account was ascertained.



Picture 5 - Executed simulation procedure

An important criterion of the investigations was the focused energy insertion in the seam to assist the hybrid welding process. To accomplish this claim special geometry variants with engraved inductors and tubular workpieces are developed and interpreted with numerical simulations. Compared to the reference system this analyzed inductors lead to the aspired increase of the current and heat generation in the weld flanks and therefore of the temperature raise.

To differentiate between the developed inductor and the so far applied inductors for welding processes up to 10 mm comparative calculations were executed. The simulation results could expose the advantages of the perpendicular inductor relating to focused power insertion and high temperature homogeneity in the weld seam for the smallest thickness of 10 mm and for the highest thickness of 23 mm as well.

Conclusion

The performed studies are able to show that the demand on the singe-layered production of heavy-walled steel sheets can be fulfilled by support of an optimized induction heating assistance. The adjustment of the laser and metal-arc parameters with the induction unit leads to a save and powerful joining process with high velocities while respecting high qualities of the weld seam.

References

[1] Dilthey, U.: Pilotstudie zum Einsatz des Laser-MSG-Hybridprozesses zum Hochleistungsschweißen von Stahl. Studiengesellschaft Stahlanwendung Düsseldorf, 2011.

[2] Mach, M.: Modelling and Application of Induction-Assisted Laser and Laser-Hybrid-Welding Processes, Sierke Verlag, 2012, ISBN 978-3-86844-450-6.

[3] Meier, O.: Laserstrahlschweißen hochfester Stahlfeinbleche mit prozessintegrierter induktiver Wärmebehandlung, Dissertation, PZH Produktionstechnisches Zentrum Hannover, 2005, ISBN 3-936888-93-0.

[4] Nacke, B.: Ein Verfahren zur numerischen Simulation induktiver Erwärmungsprozesse und dessen technische Anwendung, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen der Universität Hannover, 1987.

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF INDUCTION HEATERS DESIGN: PROBLEM SOLUTION BY MEANS OF ALTERNANCE METHOD

Yu. Pleshivtseva[1], E. Rapoport[1], B. Nacke[2], A. Nikanorov[2]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия

cscmp@iccs.ru

[2]Leibniz Universität Hannover, Institute of Electrotechnology
Wilhelm-Busch-Str. 4, 30167 Hannover, Germany
etp@etp.uni-hannover.de

Ключевые слова: *multi-objective optimization, induction heating, optimal control, alternance method, FEM analysis, heating accuracy, energy consumption*

Abstract

В статье рассмотрена проблема многокритериальной оптимизации индукционных печей для сквозного нагрева металлических полуфабрикатов перед последующими операциями пластической деформации. Задача многокритериальной оптимизации формулируется для типовых критериев, обеспечивающих максимальную точность достижения температурных кондиций заготовок и минимальный расход энергии. Оптимизационная процедура построена на базе альтернансного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами. Двумерная FLUX модель для численного анализа взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей интегрирована в оптимизационную процедуру. Представлены результаты оптимизации установки для нагрева цилиндрических алюминиевых заготовок.

Введение

Current and future research trends indicate a preference in multi-objective optimization because performance specifications often include several design criteria which cannot all be met at the same time. Traditionally, the multi-objective problem is reduced to introducing a single objective function as the weighted sum of the several objectives to be minimized [1].

However, the most informative description is represented by the Pareto front of non-dominated solutions, i.e. those for which the decrease of a one objective function is not possible without the simultaneous increasing at least one of the other functions. This means a family of optimal solutions appears; and the designer can select a single solution according to decision making criteria.

Induction heating is an absolutely necessary process in many different industrial production and processing chains. The paper describes main ideas and results demonstrated the research activities carried out by the authors in the field of multi-objective optimization of induction heaters design based on numerical coupled electromagnetic and temperature field analysis.

The multi-objective optimization problem of designing industrial induction heating installations is mathematically formulated in terms of the most important optimization criteria, e.g. temperature uniformity and energy efficiency.

Alternance method of optimal control theory is applied as effective tools for the practice-oriented problems solutions based on non-linear numerical coupled field analysis. Developed optimization procedure is tested and investigated for induction heating of aluminum cylindrical billet. Optimization of induction system for heating of an aluminum cylindrical billet is a result of one of many

joint scientific projects realized in close collaboration between Leibniz University of Hannover (Germany) and Samara State Technical University (Russia).

1 Field-based problem of multi-objective optimization in induction heater design

Induction heating is applied in various heat treatment processes where there is a need of achieving a required temperature distribution in the workpiece.

Multi-objective optimization problem of designing electromagnetic system can be formulated as non-linear constrained optimization problems characterized by a vector of objective functions $\overline{F}(\overline{p}) = \left\{\widetilde{f}_1(\overline{p}),...,\widetilde{f}_{n_f}(\overline{p})\right\}$ composed of $n_f \geq 2$ terms in the objective space $\Re^{n_f}$. A vector of variables $\overline{p} = (p_1, p_2, ..., p_{n_v})$ in the design space $\Re^{n_v}$ represents the geometric variables of the heater or other design parameters to be optimized. The dependence of the j-th objective $\widetilde{f}_j$, $j = \overline{1, n_f}$, on vector $\overline{p}$ rather complex. Since objective $\widetilde{f}_j$ is usually a field-based quantity, it depends on $\overline{p}$ explicitly and also implicitly, by means of the field solution. In fact, both the direct problem, through electromagnetic and temperature field equations, and the optimization problem, through objective functions, depend on parameters vector $\overline{p}$. In general, the following mapping applies:

(1) design parameters vector $\{p\} \rightarrow$ field $S(p) \rightarrow$ objective $\widetilde{f}_j(p) \equiv f_j(p, S(p))$, $j = \overline{1, n_f}$.

Accordingly, the minimization problem correctly reads

(2) find $\inf_{p} f_j(p, S(p))$, $p \in \Omega \subseteq \Re^{n_v}$, $j = \overline{1, n_f}$,

where $S(\overline{p})$ is the solution of the direct problem corresponding to the optimized parameters vector $\overline{p}$. Formulation (2) points out that the optimal synthesis of field $S(\overline{p})$ which takes place in the heater and the optimization of main design parameters are tightly interconnected. Moreover, $n_c \geq 1$ inequality constraints might be prescribed for the field and these constraints should be taken into account in optimization problem formulation [2].

The *j*-th objective function f_j in (2) might represent the value of a local quantity or some characteristics of the induction heater, like weight, volume or cost, and so on.

In induction heating processes a required temperature distribution (usually the uniform one) within the workpiece is the most important process target. Therefore, the heating system must be designed in such a way to achieve the optimal temperature field within the heated material. In this case, the most typical optimization approach makes the estimation of the heating accuracy by the absolute maximum deviation of the actual temperature distribution $T(\overline{x}, \overline{p}, t_{heat})$ at the end of heating process t_{heat} from desired one $T^*(\overline{x}) = const$, i.e. a objective function f_1 can be defined in the form of Chebyshev' norm:

(3) $$f_1(p, T(x, p, t_{heat})) = \max_{x \in X} \left| T(x, p, t_{heat}) - T^*(x) \right| \rightarrow \min_{p \in \Omega \subseteq \Re^{n_v}},$$

where $\overline{x} \in X$ is a vector of spatial coordinates defined in the domain X.

On the other hand, the main parameter influencing the process efficiency is the cost of energy used for heating. In this case it is proper to consider the total energy consumption during heating time as objective function f_2 to be minimized, which can be represented in the following integral form:

(4) $$f_2\left(p,T(x,p,t)\right)=\int_0^{t_{heat}} W(p,T(x,p,t),t)dt\,,$$

where $W(\bar{p},T(\bar{x},\bar{p},t),t)$ - a power of internally generated heat sources.

The solution of field-based problem (2)-(4) is quite troublesome and requires a module for calculating the physical process, associated with a module performing the minimization of objective function.

In the proposed optimization procedure the field analysis problem is solved by means of FEM, while the optimal design problem is solved by means of alternance method.

Actually, the idea of reformulating of design problem in terms of multi-objective optimization and solving in the Pareto sense is not new in itself. However, implementing the combination of a FEM code with optimization module based on the alternance method makes the proposed approach specific and original with respect to available literature.

2 Example of problem solution by means of the alternance method

For real-life problems of induction systems design, the designer may not be interested in having a large number of Pareto optimal solutions. Therefore, many multi-objective optimization problems are reformulated to find a manageable number of Pareto optimal vectors which are evenly distributed along the Pareto front and thus good representatives of the entire set of decisions. It is realistic from engineering point of view to select a single solution.

In the paper this strategy is applied to the typical process in the forging industry, i.e. the induction heating of aluminium billets before hot forming - where it is important to achieve as uniform as possible temperature distribution in the billet at the end of heating with the minimum consumption of energy (Figure 1). Since these requirements are in conflict in principle, it is necessary to solve a multi-objective optimization problem with respect to an appropriate set of variables.

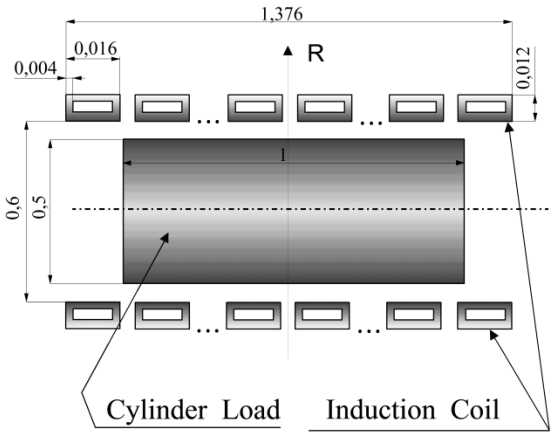


Figure 1 - Geometry of induction system for aluminium billets heating before hot forming

A space-time temperature distribution within inductively heated cylindrical billet is described by highly complicated system of interrelated Maxwell and Fourier equations for electromagnetic and temperature fields [3-4].

2D numerical model of batch induction heating for cylindrical billets has been developed at Samara State Technical University [5].The numerical solution of the coupled electro-thermal problem is based on a finite element method FLUX software used for electromagnetic and thermal physics simulations. The internal heat source distribution in the billet, calculated in electromagnetic analysis, is used as an excitation for thermal analysis, which provides simulation of thermal process during the next time step.

For electromagnetic analysis at each time step, temperature dependent electro-physical material properties are corrected after the temperature field computation at the previous time step.

Thermal analysis also includes simulation of thermal losses by convection and radiation from all open surfaces of the calculated system. A typical solution mesh is composed of 23656 linear tetrahedral elements.

The power $P(t)$ of internally generated heat sources and the heating time t_{heat} are the most significant process parameters that influence on temperature distribution. An appropriate optimization of heating process can involve an appropriate choice of power supply voltage $U(t)$ connected with the power $P(t)$ by non-linear function. Thus, an appropriate optimization of heating process can involves an appropriate choice of design variables $U(t)$ and t_{heat}. A reasonable assumption for the optimal design problem is that the optimized parameters remain within certain prescribed limits. Thus, it will be reasonable to select $U(t) = \text{const}$ and t_{heat} with values on the constraint intervals:

(5) $U_{\min} \le U \le U_{\max};\ t_{\min} \le t_{heat} \le t_{\max}.$

The ultimate goal of the induction heating process is to obtain the desired temperature uniformity within the billet before the subsequent technological operation. That is why an appropriate formulation of the requirements for these temperature limits is of primary importance. An objective function could be the heating accuracy, represented by the deviation between the actual final temperature distribution $T(r,l,t_{\text{heat}})$ and the desired one $T^*(r,l) = T^* = \text{const}$. Decreasing this deviation (i.e. increasing heating accuracy) leads to better conditions during metal hot working operation and cost reduction. The most typical optimization approach makes the estimation of the heating accuracy by the absolute maximum deviation of $T(r,l,t_{\text{heat}})$ from T^*. Then, the first objective function f_1 to be minimized can be defined in the form of Chebyshev' norm:

(6) $$f_1(p,T(r,l,t)) = \max_{r\in[0,R];\, l\in[0;L]} \left|T(r,l,t_{\text{heat}}) - T^*\right| \to \min_{p}.$$

Similar to (4), it is useful to define the second objective function f_2 as:

(7) $$f_2(p,T(r,l,t)) = \int_0^{t_{\text{heat}}} P(p,T(r,l,t))dt \to \min_{p}.$$

Generally, it is desirable to achieve the highest uniformity of temperature in the billet at the end of the heating process under minimum energy consumption. It means that when to consider the objective functions (6) and (7) independently, one would like to minimize both of them. However, because of the conflicting nature of these two objectives, it is physically impossible to do so at the same time. The conflict among the objective functions is one of the main motivations for multi-objective optimization researches [6].

Then, the statement of the problem of multi-objective optimization for the induction heating process described by 2D FLUX model can be formulated as follows: it is required to identify such values of optimized parameters $U = U^{\text{opt}}$ and $t_{\text{heat}} = t_{\text{heat}}^{\text{opt}}$ bounded by constraints (5) that provide billet heating from the initial temperature up to the desired temperature T^* with the lowest possible values of objective functions (6) and (7).

Solution of the formulated problem has been performed with respect to input data presented in Table 1 for the system geometry shown in Figure 1. All the computations have been done using the numerical model of heating process.

The results of problem solution are presented in Table 2. The relevant Pareto front in the objective space obtained as a result of the problem solution is shown in Figure 2. As one can see, decreasing a value of the first objective function f_1 leads to increasing a value of the second objective function f_2. This means that in accordance to the physical regularities the process with a better heating accuracy requires higher energy consumption [6].

Post Pareto front analysis consists of choosing a single solution from the obtained set of Pareto optimal solutions. From the technological point of view, based on technological requirements to the forging process, it is reasonable to select the solution represented by the point of Pareto front, exhibiting the following values of objective functions:

$f_1 = 40^0$ **C**; $f_2 = 249.91 \times 10^6$ J

that correspond to the following design problem solution in the decision space:

$U^{\text{opt}} = 347$ V; $t_{\text{heat}}^{\text{opt}} = 3.126 \times 10^3$ s.

Table 1 – Input data for the problem solution by means of the alternance method

Radius of the billet, m	0.25
Number of turns	69
Length of the billet, m	1.0
Inductor current frequency, Hz	50
Inductor voltage, V	370
Initial temperature, ^{0}C	20
Required temperature, ^{0}C	450
Ambient air temperature, ^{0}C	20
Material of the billet	Aluminum
Heat transfer coefficient, W/(m$^2 \times ^0 C$)	$\lambda(T) = 115(1 + 0.8 \cdot 10^{-3} T)$
$B(H)$, T	$B(H) = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot H,$
Electrical resistivity, Ohm	$\rho(T) = 0.3 \cdot 10^{-7} (1 + 0.007T)$
Volumetric specific heat, $\left[J/(m^3 \cdot ^0 C)\right]$	$\rho C_p(T) = 2.34 \cdot 10^6 (1 + 5.7 \cdot 10^{-4} T)$

Table 2 – Results of the problem solution [6]

U_{opt}, V	t_{heat}^{opt}, s	$f_1, ^0C$	f_2, J
456	1663	80	230.448×10^6
434	1868	70	233.283×10^6
405	2183	60	237.809×10^6
379	2543	50	242.83×10^6
347	3126	40	249.91×10^6

The similar computations have been performed for the other variations of heating conditions, billets radius and materials properties. The results of problem solution in all case studies demonstrate the analogous qualitative characteristics of optimal heating processes.

Conclusions

The design of the induction heaters implies the solution of coupled magnetic and thermal fields, along with the use of optimal design procedures to identify the best possible device or process.

A multi-objective problem for the optimal design of induction heater has been mathematically formulated in terms of the typical optimization criteria, e.g. maximum heating accuracy and minimum energy consumption.

Implementing the combination of a FEM code with optimization procedure based on the alternance method has been tested and investigated in practical optimization problems of induction heaters design. If only a single solution should be selected the alternance method of optimal control

theory can be applied that leads to a considerable reduction of iterations number and faster convergence of optimization procedure.

The obtained results are very promising and motivate continuation of the researches and extension of them to optimization of various industrial electromagnetic devices.

The developed optimization procedures are planned to be applied to the wide range of real-life problems of the optimal design and control for different induction heating installations.

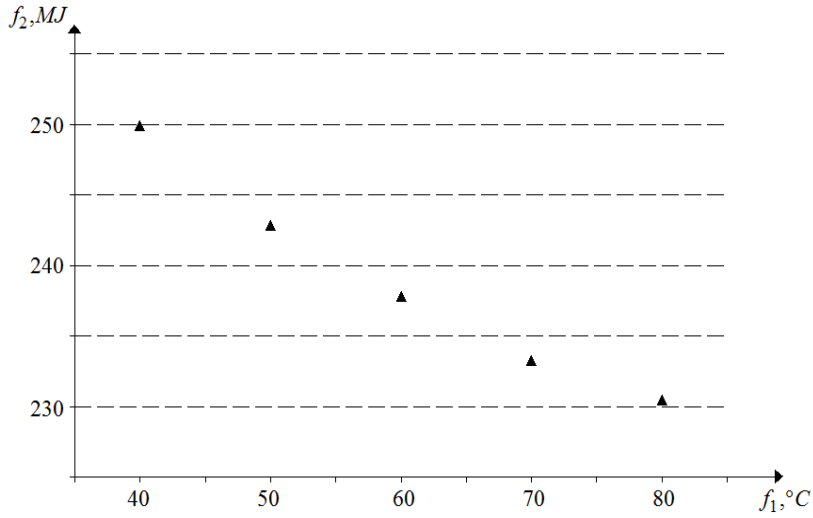


Figure 2 - Results of the problem solution in the objectives' space [6]

Acknowledgements

This research was partially financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (basic part of government contract, project No. 1436).

References

[1] Di Barba, P. Basic principles of Optimal Design of Electromagnetic Devices and Multi-objective Optimization. ASM Handbook, Volume 4C, Induction Heating and Heat Treatment. 2014 - pp. 359-365.

[2] Di Barba, et al. Multi-objective optimization of induction heating processes. Methods of the problem solution and examples based on the benchmark model', International Journal of Microstructure and Materials Properties, Vol. 8. Nos 4/5, 2013, pp. 357-372.

[3] Rapoport E., Pleshivtseva Yu. Optimal Control of Induction Heating of Metals Prior to Warm and Hot Forming, ASM Handbook, Volume 4C, Induction Heating and Heat Treatment, 2014, pp. 366-401.

[4] Rapoport E., Pleshivtseva Yu. Optimal Control of Induction Heating Processes. - London, N.Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, 2007. - 349 p.

[5] Pleshivtseva Yu., Dyakonov A., Popov A. Two-dimensional problem of optimal with respect to typical quality criteria control of through induction heating // Bulletin of Samara State Technical University, Issue Technical Sciences, 2014, № 2 (42), pp. 148-163.

[6] Pleshivtseva, Yu., Di Barba P., Rapoport E., Forzan M., Lupi S., Sieni E., Nacke B., Nikanorov A. Multi-objective optimization of induction heaters design based on numerical coupled field analysis // Int. J. Microstructure and Materials Properties. - 2014. - Vol. 9. - Nos.6.- pp. 532-551. ISSN online: 1741-8429.

CALCULATION AND OPTIMIZATION OF TEMPERATURE AND MICROSTRUCTURE IN INDUCTION SURFACE HARDENING

D. Schlesselmann[1], B. Nacke[2], A. Nikanorov[3]
Institute of Electrotechnology, Leibniz Universität Hannover
Wilhelm-Busch-Str. 4, D-30167 Hannover, Germany
[1]schlesselmann@etp.uni-hannover.de, [2]nacke@etp.uni-hannover.de,
[3]nikanorov@etp.uni-hannover.de
Phone: +49 511-2872
Fax: +49 511-3275

Key words: *numerical simulation, induction surface hardening, martensite calculation*

Abstract
In the present paper, a new numerical model for calculation and optimization of martensite microstructure in induction surface hardening processes is introduced. It takes into account the heating as well as the quenching process and uses the temperature history of a work piece to calculate martensite formation. The calculation is based on an empirical equation found by Koistinen and Marburger [1]. A comparison between the heat distribution within a work piece at the end of the heating process and the distribution of martensite after quenching is performed for different process parameters. Thus, it is determined, in which case the temperature distribution is sufficient to predict the hardened layer and in which case the microstructure has to be calculated to receive accurate results. The model is verified by comparing simulation results with different experiments.

Introduction

A numerical model for calculating full transient heating processes in induction surface hardening applications was developed at the Institute of Electrotechnology (ETP). The model has been successfully used for the investigation and design of complex induction hardening processes for several years. Instead of calculating martensite formation during quenching, the model uses the temperature distribution at the end of the heating process to predict the microstructure within the work piece [2]. This approach is valid for surface hardening depths which do not exceed a few millimetres. If bigger hardening depths have to be investigated, heat transfer from the surface of the work piece to its core becomes increasingly important. In this case, the temperature distribution might lead to inaccurate predictions of the hardened profile. Furthermore, heat transfer has to be considered, if there is a delay between heating and quenching. This undesirable situation occurs in many industrial hardening processes. To investigate situations as described above, a new algorithm for computing martensite microstructures is applied. The aim is to determine, if there is a critical depth, which requires a martensite calculation. In addition, situations are identified, in which a delay of quenching cannot be neglected. For this, the influence of different quenching situations on the critical depth is investigated. This includes different quenching intensities as well as different delay times. To verify the new algorithm, microsections of a straight cut gear are compared to computed martensite microstructures.

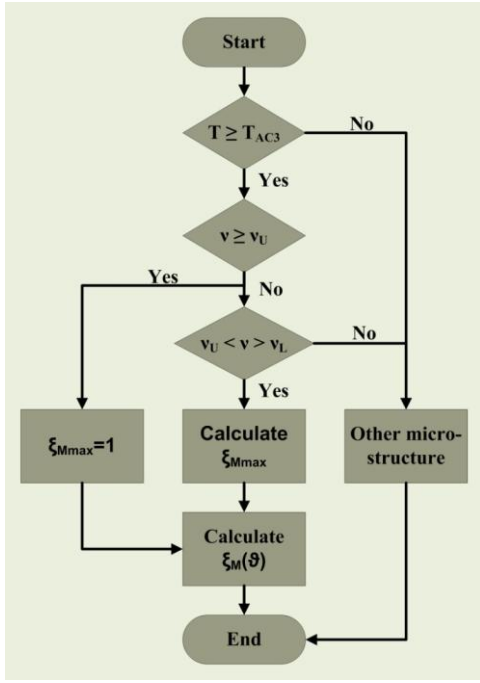
Algorithm for inductive heating process

The latest algorithm for the calculation of temperature profiles in induction surface hardening processes is an extended version of the algorithm developed at ETP several years ago. All calculations are performed with the FEM software ANSYS. Within a calculation a heating process is divided into several time steps. In each step a harmonic electromagnetic calculation is coupled to a transient thermal calculation resulting in the temperature distribution within the work piece. Material parameters are taken into account as a function of temperature. In addition, the relative electromagnetic permeability of the work piece is taken into account by a user defined module. It is also possible to calculate processes with several simultaneous frequencies.

Algorithm for calculating martensite microstructures

Subsequent to heating, the quenching process has to be taken into consideration, if the martensite microstructure of a work piece is computed. The heat transfer is represented by a coefficient as a function of temperature, which is assigned to all locations on the work piece's surface quenched with cooling agent. Coefficients for different agents and parameters like pressure and flow rate can be found in respective literature [3].

For calculating martensite microstructures the algorithm shown in Picture 1 has to be performed for every node of a FEM model. The algorithm starts with an analysis of each node's temperature history. Two conditions have to be met necessarily to receive a fully martensitic microstructure: First, the austenitizing temperature T_{AC3} has to be reached during heating. This is required for a complete austenitic transformation. Secondly, the upper critical cooling rate v_U has to be reached during quenching. In this case, diffusion of carbon and iron is not possible and microstructures other than martensite cannot form. The fraction of martensite ξ_M can be calculated according to an equation of Wildau and Hougardy [4]:



Picture 1 - Algorithm for calculating martensite

(1) $\xi_M(\vartheta) = \left[1 - \exp\left(-c_1(T_{MS} - \vartheta)^{c_2}\right)\right] * 100\%$

Formula 1 is based on an empirical approach by Koistinen and Marburger. By introducing an additional constant c_2 and taking into account that c_1 and c_2 strongly depend on the material's carbon content, Wildau and Hougardy suggest an equation suitable for a wide range of steels. The martensite fraction is only a function of the material's temperature ϑ after quenching. The formation of martensite begins below the martensite starting temperature T_{MS}.

If the speed of quenching is between v_U and the lower critical cooling rate v_L, diffusion of carbon and iron occurs. Therefore the resulting microstructure contains bainite, ferrite and perlite besides martensite. Formula 1 has to be extended with a factor ξ_{Mmax}, which represents the maximum martensite fraction at a certain cooling speed v.

(2) $\xi_M(\vartheta) = \xi_{Mmax}(v) * \left[1 - \exp\left(-c_1(T_{MS} - \vartheta)^{c_2}\right)\right] * 100\%$

This factor is unity for cooling rates higher than v_U and zero for rates lower than v_L where martensite formation does not occur. To determine ξ_{Mmax}, the contents of bainite ξ_B, ferrite ξ_B and perlite ξ_B are usually calculated. The residual fraction of martensite is then given by [5]:

(3) $\xi_{M_max} = 1 - (\xi_B + \xi_B + \xi_B)$

Several authors suggest using a semi-empirical approach by Johnson, Mehl and Avrami or Leblond to calculate microstructures occurring in diffusion processes [6-8]. Here, data that is derived from time-temperature transformation (TTT) and continuous cooling transformation (CCT) diagrams or determined by experiments is used to describe the formation. This approach is applied in simulations of many different processes, for example precision forging [9]. However, this paper is focused on calculating the martensite content within a relatively thin layer in induction surface hardening applications. Therefore, a more direct way to determine ξ_{Mmax} is suggested. By using a TTT diagram, ξ_{Mmax} can be determined for different quenching rates. It was found that the relation can be described as:

(4) $\xi_{Mmax}(v) = 1 - \exp\left[-(v - c_5)/c_6\right]$

For quenching rates lower then v_U first fractions of martensite occur at lower temperatures T_{MS}. Using data from the same TTT diagram T_{MS} is given as:

(5) $T_{MS}(v) = -c_3 * \ln(v) + c_4$

The suggested approach can only be used for quenching processes typical for induction surface hardening. More complex temperature time profiles require the approach of Johnson, Mehl and Avrami or Leblond. Furthermore, the direct approach does not take into consideration that austenite formation already starts at temperatures above T_{AC1} [10].

Investigation using a basic 1D model

The numerical model used for all basic investigations is one-dimensional and represents the infinite half space. It consists of a current fed inductor 2 mm above a work piece. Carbon steel C45 and alloyed steel 42CrMo4 are investigated exemplarily while taking into account their different material parameters [11-13]. To cover a wide range of hardening depths, frequencies of 62 kHz and 3 kHz are used in the simulation. These frequencies are also typical for technical applications. The maximum temperature allowed during heating is limited to 1200 °C. In addition, a depth d_{TH} (seen from the surface of the work piece) is defined for each simulation. The hardening temperature T_H has to be reached within this depth, meaning that the material is fully austenitized. The heating time t_{heat} as well as the inductor current can be derived from these restrictions. In general, T_H can be taken from continuous TTT diagrams and decreases if t_{Heat} is increased. Here, a constant value T_H, sufficient for the shortest heating time, is assumed to allow better comparability. However, T_H is varied for both frequencies because the initial heating time differs significantly. The parameters for investigating quenching are the delay time t_{delay} between heating and quenching and the intensity $q_{int.}$ of quenching. Quenching is maintained until the maximum temperature within austenitized areas is below 50 °C. To be able to compare temperature and martensite distribution, a depth d_M is defined. Within this depth the martensite fraction amounts to 95 % and is therefore considered to be fully martensitic.

Table 1 shows simulation results for a frequency f of 62 kHz and a work piece height h_{WP} of 100 mm. The large height of the work piece in relation to the hardening depth of a few millimeters means that the core temperature does not increase during heating. For a value of d_{TH} up to of 3 mm there is no deviation of d_M for C45 as well as 42CrMo4. Larger values of d_{TH} have not been

investigated with this frequency because of the small penetration depth. A decrease of the quenching rate from 2 m³/s*m² to 0.28 m³/s*m² and the influence of a delay of 1 s was checked for 42CrMo4 additionally. Also, in this case, a deviation between temperature and martensite profile did not occur. The good agreement of temperature and martensite profile can be explained with the big specific heat capacity of the work piece. Even with an austenitization depth of 3 mm and a heating time of 6.85 s, delayed quenching with a relatively small intensity is sufficient for complete martensite formation due to self-quenching.

Table 1 - Investigation with f = 62 kHz and hWP = 100 mm

Material	T_H [°C]	d_{TH} [mm]	d_M [mm]	t_{heat} [s]	t_{delay} [s]	Quenching agent	$q_{int.}$ [m³/s*m²]
C45	925	1,00	1,00	0,27	0	water	2,00
C45	925	2,00	2,00	1,75	0	water	2,00
C45	925	3,00	3,00	6,85	0	water	2,00
42CrMo4	925	3,00	3,00	6,30	0	water	2,00
42CrMo4	925	3,00	3,00	6,30	1,0	water	2,00
42CrMo4	925	3,00	3,00	6,30	0	water	0,28
42CrMo4	925	3,00	3,00	6,30	1,0	water	0,28

Table 2 - Investigation with f = 62 kHz and hWP = 6 mm

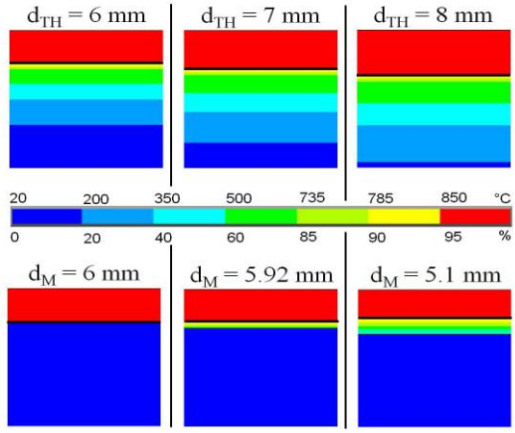
Material	T_H [°C]	d_{TH} [mm]	d_M [mm]	t_{heat} [s]	t_{delay} [s]	Quenching agent	$q_{int.}$ [m³/s*m²]
42CrMo4	925	3,00	3,00	2,90	0	water	2,00
42CrMo4	925	3,00	3,00	2,90	0	water	0,28
42CrMo4	925	3,00	3,40	2,90	0,5	water	0,28
42CrMo4	925	3,00	3,72	2,90	0	water	0,28
42CrMo4	925	3,00	4,68	2,90	1,5	water	0,28
42CrMo4	870	3,00	4,44	2,90	1,5	water	2,00

In Table 2 simulation results for a frequency of 62 kHz and a reduced work piece height of 6 mm are shown for 42CrMo4. The austenitization depth d_{TH} has a fixed value of 3 mm, which means that 50 % of the work piece is austenitized after heating. In this case, the heating time of 2.9 is significantly lower than 6.3 s in case of a work piece with a height of 100 mm. A decrease of the quenching intensity does not affect d_M. A deviation only occurs, if a delay is taken into consideration as well. A delay time of 1.5 s results in 78 % percent of the work piece having a fully martensitic microstructure. If adjusted to the heating time of 2.9 s, T_H has a value of about 870 °C. In this case, the deviation decreases and only 74 % of the work piece is fully martensitic. However, the influence of a delay is also evident here. In contrast to a work piece with a height of 100 mm, self-quenching does not occur. The average temperature after heating is much higher. Areas of the work piece further beneath the surface than d_{TH} are austenitized between heating and quenching because the heat cannot be transferred to a cold core.

Table 3 - Investigation with f = 3 kHz, hWP = 100 mm and variation of dTH

Material	T_H [°C]	d_{TH} [mm]	d_M [mm]	t_{Heat} [s]	t_{delay} [s]	Quenching agent	$q_{int.}$ [m³/s*m²]
C45	850	6,00	6,00	7,70	0	water	1,20
C45	850	7,00	5,92	11,00	0	water	1,20
C45	850	8,00	5,10	15,00	0	water	1,20

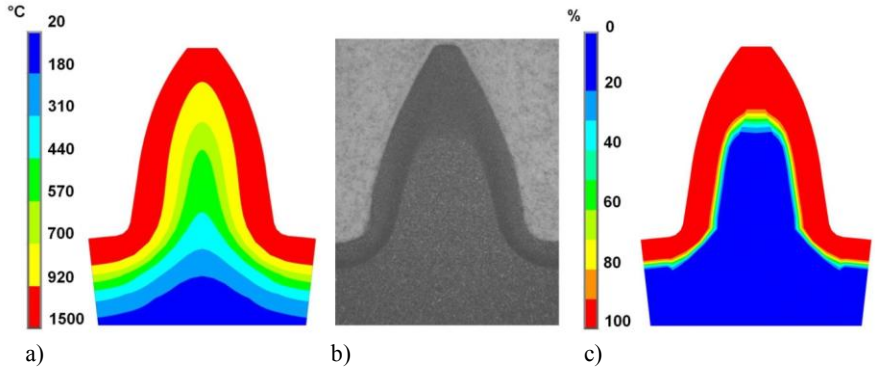
The investigation of hardening with a frequency of 3 kHz is shown in Table 3. The austenitization temperature was defined as 850 °C and a quenching intensity of 1.2 m³/s*m² was used. Up to an austenitization depth of 6 mm there is no difference between the temperature and martensite profile. Bigger austenitization depths result in a decrease of the fully martensitic area. This can be also seen in Picture 2, where temperature and martensite profiles are shown for different values d_{TH} from the left to the right. The deviation can be explained by taking a look at the heating times required for achieving these depths. For example, an austenitization depth of 8 mm requires a heating time of 15 s. The amount of heat energy induced into the work piece in that period of time can neither be dissipated fast enough by quenching of the surface with water nor by self-quenching. Therefore, cooling rates are lower than v_U and only fractions of material become martensitic. As can be seen in Picture 2c, the hardened zone does not have a sharp contour. Instead, martensite fraction decreases slowly towards the core of the work piece. It can be stated that longer heating times and bigger depths d_{TH} have a negative impact on the depth of full martensite.



Picture 2 - Investigation with f = 3 kHz, h_{WP} = 100 mm and d_{TH} with a value of a) 6mm, b) 7 mm and c) 8 mm

Verification

Picture 3 shows the microsection and simulation results of a hardened straight-cut gear. As described in [3], the gear was heated using simultaneous dual frequency (SDF®) and quenched with a water-air spray cooling afterwards. The temperature profile at the end of the heating process and the microsection show good agreement at the root and the flank of the tooth.



Picture 3 - a) Temperature profile, b) microsection and c) martensite profile of a straight cut gear

However, the microsection shows that the tip of the tooth is almost through hardened, whereas the temperature distribution indicates a hardening profile following the gear's contour. This can be explained by taking a closer look at the assumptions that are made when a temperature distribution is used to predict a hardening profile: As mentioned before, quenching is supposed to start without any delay after heating. If there is a delay, heat transfer from the surface of the work piece to its core has to be taken into account. The zone of austenitization might increase and therefore the hardened layer might as well. This effect is more pronounced at the tip of a tooth, because heat accumulates in this area, whereas self-quenching occurs in the root area and heat is transferred to the core of the work piece. The actual delay between the end of heating and the start of quenching was 0.4 s in the experiment. If this is considered in the simulation and the new algorithm to compute the martensite microstructure is used, a better agreement of microsection and simulation is evident for the tip: An increased hardening depth as well as the contour being less sharp can be seen if Picture 3c and Picture 3a are compared. The results for root and flank stay unchanged.

Conclusion

A module for the calculation of quenching and martensite fraction was implemented in the existing simulation tool used for computing inductive surface hardening processes.

Investigations with a 1D model have shown that the temperature distribution at the end of the heating process usually is sufficient for a good prediction of the hardened profile if a frequency of several 10's of kHz is used and the height of the work piece is much bigger than the hardening depth. In case of a relatively thin work piece, a delay between heating and quenching as well as the quenching parameters have an influence on the hardening depth and martensite formation has to be calculated to receive accurate results. If a frequency of only a few kHz is used to achieve bigger hardening depths, these parameters also have an influence and the martensite fraction should always be calculated.

The verification of the extended simulation tool made evident that a deviation of temperature and martensite profile might also occur when more complex work pieces like gears are hardened with induction. A calculation of martensite should always be performed in such investigations to check, if there is deviation compared to the temperature profile.

References

[1] Koistinen, D. P.; Marburger, R. E.: A General Equation Prescribing the Extent of the Austenite-Martensite Transformation in Pure Iron-Carbon Alloys and Plane Carbon Steels. Acta Metallurgica 7, 1959, pp. 59-60.

[2] Zedler, T.: Numerische Modellierung, Analyse und Design von induktiven Systemen für das Randschichthärten komplexer Werkstückgeometrien. Sierke Verlag, Göttingen, 1 edition, 2010.

[3] Golovin, G.; Zamyatin, M.: High frequency heat treatment. Mashinostroenie, Leningrad, 1990.

[4] Wildau, M.; Hougardy, H.: Zur Auswirkung der Ms-Temperatur auf Spannungen und Maßänderungen. Härterei-Technische Mitteilungen, 42, 1987, pp. 261-268.

[5] Börnsen, M.: Zum Einfluss von Gefügeumwandlungen auf Spannungen und Formänderung bei thermischer und mechanischer Belastung. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1 edition, 1989.

[6] Johnson, W. A.; Mehl, R. F.: Reaction Kinetics in Process of Nucleation and Growth. Transactions of the AIME, 135, 1939, pp. 416-458.

[7] Avrami, M.: Kinetics of Phase Change III. Journal of Chemical Physics, 9, 1941, pp. 177-184.

[8] Leblond, J. B.; Devaux, J.: A New Kinetic Model for Anisothermal Metallurgical Transformations in Steels Including Effect of Austenite Grain Size. Acta Metallurgica, 32, 1984, pp. 137-146.

[9] Behrens, B. A.; Bach, F. W.; Bouguecha, A.; Nürnberger, F.; Schaper, M.; Yu, Z.; Klassen, A.: Numerische Berechnung einer integrierten Wärmebehandlung für präzisionsgeschmiedete Bauteile. Journal of Heat Treatment and Materials, 67, 2012, pp. 337-343.

[10] Läpple, V.: Wärmebehandlung des Stahls. Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 10 edition, 2010.

[11] Weißbach, W.: Werkstoffkunde. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 18 edition, 2012.

[12] Wever, F.; Rose, A.; Peter, W.; Strassburg, W.; Rademacher, L.: Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle. Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1961.

[13] Petersmann, C.: Kondensator-Impuls-Schweißen höher kohlenstoffhaltiger, randschichtgehärteter Einsatzstähle am Beispiel eines Pkw-Sitzbeschlages. Shaker Verlag, Aachen, 1 edition, 2004.

О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

А.В. Банникова[1], А.В. Медведев[2]

[1]Сибирский Федеральный Университет

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия

office@sfu-kras.ru

тел: +7 (391) 291-27-33, 293-79-75

[2]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева

660014, Красноярский край, г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31, Россия

info@sibsau.ru

тел: +7(391) 264-00-14

Ключевые слова: *динамический процесс, непараметрическое дуальное управление, адаптивные системы*

Abstract

The problem of non-parametric control of dynamic objects with discrete - continuous nature of the process is considered. The main attention is paid to the construction of nonparametric system of dual control. In this regard, a brief overview of the levels of a priori information. The problem of dualism in the management of a dynamic process. Sufficiently detailed results of numerical experiments which show that using a nonparametric dual control algorithm significantly improves the quality control of dynamic systems, compared with typical control algorithms.

Введение

Современная теория управления, в значительной степени, относится к разряду параметрических. Это означает, что на этапе формулировки задачи идентификации и управления предполагается каким-то образом выбранная параметрическая структура модели, описывающая процесс, или некоторое уравнение, известное с точностью до параметров. Данный подход получил значительное развитие в рамках теории адаптивных управляющих систем [1], которая предполагает предварительную параметризацию объекта. Но часто априорной информации бывает недостаточно для обоснованного выбора параметрического класса моделей, так как исследователю часто приходится сталкиваться с малоизученными процессами и объектами, структура моделей для которых неизвестна. В случае, когда априорной информации недостаточно, чтобы выбрать параметрическую структуру модели исследуемого процесса, естественно использовать теорию непараметрической системы управления [2, 3]. Основное внимание в дальнейшем будет уделено задачам управления в условиях непараметрической неопределенности, а также случаю, когда априорная информация об исследуемом процессе соответствует одновременно как непараметрическому, так и параметрическому классу.

1 Постановка задачи

Рассмотрим динамический объект при различных уровнях априорной информации о нем. Первый соответствует варианту, когда известно, что динамический объект линейный, но структура параметрической модели его не известна, т. е. порядок уравнения не может быть определен, из имеющейся априорной информации.

Во втором случае, исследуемый процесс описывается уравнением:

(1) $x_t = f(x_{t-1}, x_{t-2}, ..., x_{t-k}, u_t)$,

где *f(.)* неизвестный функционал, x_t – выходная переменная процесса, u_t - управляющие воздействие, *k* – известная «глубина» памяти [4], так или иначе найденная на основании имеющейся априорной информации. Здесь существенным является, что вид функционала не определен с точностью до параметров. На рисунке 1 представлена блок-схема управления рассматриваемого процесса:

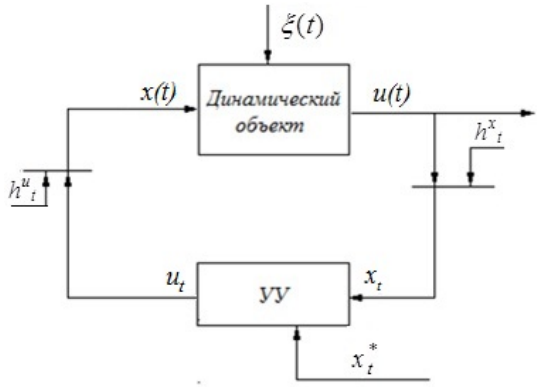


Рис.1 Блок – схема управления динамическим объектом

На рисунке 1 приняты обозначения: (*t*) – непрерывное время, индекс *t* – дискретное время, x^*_t – задающее воздействие, УУ – устройство управления, случайные помехи измерений $h^u{}_t$, $h^x{}_t$, соответствующих переменных процесса, $\xi(t)$ – векторная случайная помеха.

Контроль переменных осуществляется через интервал времени Δt, Таким образом, можно получить исходную выборку «входных-выходных» переменных $\{x_i, u_i, i = \overline{1,s}\}$, где S – объем выборки, индекс *h* у переменных объекта из соображения простоты опущен. Следует отметить, что в данном случае, параметрическая структура рассматриваемого процесса нам неизвестна, но можно говорить о частичной параметризации модели исследуемого процесса.

2 Непараметрическое дуальное управление

Недостаток априорной информации об объекте приводит к необходимости совмещать изучение объекта и управление им. При таком управлении управляющие воздействия носят двойственный характер. Они служат средством изучения, познавания объекта, но также и средством приведения объекта к требуемому состоянию. Такое управление, при котором управляющие воздействия носят двойственный характер, называют дуальным управлением[4].

Введем оператор объекта А, описывающий процесс, т.е. $x(t) = A < u(t) >$, где $u(t)$ - управляющие воздействие, $x(t)$ - выходная переменная объекта. Если существует оператор, обратный А, т. е. A^{-1}, $A^{-1}A = 1$ - единичный оператор, то

(2)
$$A^{-1}x(t) = A^{-1}Au(t),$$
$$A < u(t) >,$$
$$u(t) = A^{-1}x(t).$$

Задавая теперь траекторию $x(t) = x^*(t)$, находим из (2) идеальное значение $u^*(t)$. Таким образом (2) может быть отнесён к категории идеальных регуляторов. Однако проблема состоит в том, что в большинстве случаев его построить нельзя, тем более, что оператор А – неиз-

вестен. Рассмотрим следующий случай. Пусть объект описывается линейным дифференциальным уравнением неизвестного порядка. В этом случае при нулевых начальных условиях $x(t)$ [5]:

$$(3) \quad x(t) = \int_0^t h(t-\tau)u(\tau)d\tau,$$

где $h(t-\tau)$ - весовая функция системы, является производной переходной функции $k(t)$, т. е. $h(t) = k'(t)$. Известно, что обратным оператором (3) является оператор [5]:

$$(4) \quad u(t) = \int_0^t \nu(t-\tau)x(\tau)d\tau,$$

где $\nu(t-\tau)$ - весовая функция объекта в направлении «выход – вход» и $\nu(t) = \omega'(t)$, где $\omega(t)$ - переходная функция системы в том же направлении. В этом случае A представлен оператором (3), а A^{-1} – выражением (4). Следовательно, теперь проблема состоит в отыскании весовых функций $h(t)$, $\nu(t)$. Один из возможных путей решения этого вопроса состоит в снятии переходной характеристики на реальном объекте с последующей оценкой его весовой функции по результатам измерений $\{x_i = k_i, t_i, i = \overline{1,s}\}$. Непараметрическая модель (3) будет иметь вид:

$$(5) \quad x_s(t) = \int_0^t h_s(t-\tau, \vec{k}_s, \vec{t}_s)u(\tau)d\tau,$$

где $\vec{k}_s, \vec{t}_s$ - временные векторы: $\vec{k}_s = (k_1,..,k_s), \vec{t}_s = (t_1,..,t_s)$, а $h_s(\cdot)$ равна:

$$(6) \quad h_s(t) = \frac{1}{Sc_s}\int_0^t k_i H\left(\frac{t-t_i}{c_s}\right)dt,$$

где $H(\cdot)$ колоколообразные (ядерные) функции, c_S - параметр размытости, удовлетворяющие некоторым условиям сходимости [4]. Предлагается переходную функцию $\nu(t)$ получить на модели в направлении «выход – вход», т.е. «вспять». Таким образом, из соотношения:

$$(7) \quad x_s(t) = 1(t) = \int_0^t h_s(t-\tau, \vec{k}_s, \vec{t}_s)u(\tau)d\tau$$

можно получить выборки $\{u_i, t_i, i = \overline{1,s}\}$. Тогда непараметрический алгоритм управления линейной динамической системой примет вид:

$$(8) \quad u^*(t) = \int_0^t \frac{1}{SC_s}\sum_{j=1}^{s}\omega_j H'\left(\frac{t-\tau-t_i}{c_s}\right)x^*(\tau)d\tau,$$

где $x^*(\tau)$ - задающее воздействие.

Отметим, что неизвестные операторы A и A^{-1} оценивались по исходным переходным характеристикам процесса (уравнение процесса было неизвестно) в классе непараметрических статистик [4].

Непараметрический алгоритм дуального управления, подробно описанный в [2] имеет вид:

$$(9) \quad u_{s+1} = u_s^* + \Delta u_{s+1},$$

где u_s^* определяется по формуле (8), а $\Delta u_{s+1} = \varepsilon(x_{s+1}^* - x_s)$ – «изучающие» поисковые шаги. В этом и состоит дуализм алгоритма (9).

В случае, когда структура динамического процесса может быть частично параметризованна, т.е., мы можем говорить, что объект, представляющий собой динамическую систему, описывается уравнением $x(t) = f(x(t-1), x(t-2), ..., x(t-k), u(t))$, где k определяется на основании имеющейся априорной информации, в качестве u_s^* может быть принята следующая непараметрическая оценка функции регрессии по наблюдениям $\{x_i, u_i, i = \overline{1,s}\}$

$$(10)\quad u_s^* = \frac{\sum_{i=1}^{s} u_i \cdot \Phi\left(\frac{x_{s+1}^* - x_i}{c_s}\right) \prod_{j=1}^{k} \Phi\left(\frac{x_{s-j} - x_{i-j}}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^{s} \Phi\left(\frac{x_{s+1}^* - x_i}{c_s}\right) \prod_{j=1}^{k} \Phi\left(\frac{x_{s-j} - x_{i-j}}{c_s}\right)},$$

где $\Phi(\cdot)$ ядерная колоколообразная функция вида $H(\cdot)$.

4 Численное исследование

Проверка работоспособности изложенного алгоритма непараметрического дуального управления осуществлялась методами статистического моделирования. Для вычислительного эксперимента был выбран объект, описывающийся уравнением вида: $x_t = 0{,}4 \cdot x_{t-1} - 0{,}3 \cdot x_{t-3} + u_t)$, где x_t - выходная переменная процесса, u_t - входная переменная процесса. Отметим, что данное уравнение объекта нам *x(t) = k(t)* необходимо для имитации потенциально реального процесса для проведения вычислительного эксперимента. Переходная характеристика объекта представлена на рисунке 2.

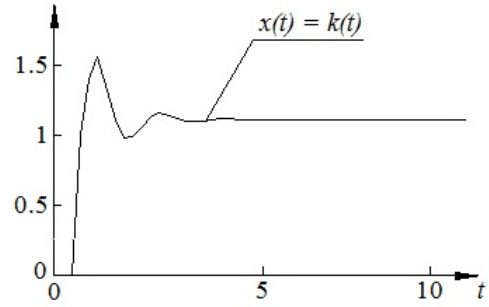


Рисунок 2 – Переходная характеристика процесса

Входная управляемая переменная задана в виде уравнения: $u(t) = \mathbf{sin}(0{,}5 \cdot t)$. Построим модель объекта с помощью непараметрической модели (5). Результаты моделирования представлены на рисунке 3:

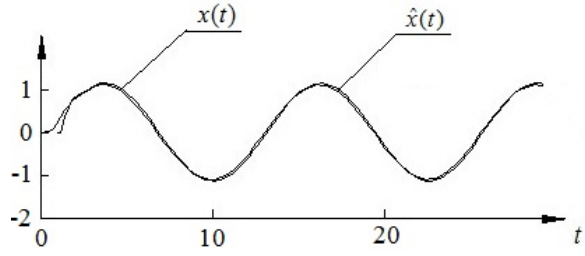


Рисунок 3 – Результаты моделирования процесса

На рисунке 3 приняты следующие обозначения: $x(t)$ - выход объекта, $\hat{x}(t)$ - выход модели объекта. Квадратичная ошибка моделирования равна 0,015. Как можно заметить из рисунка 3 непараметрическая модель (5) успешно справляется с задачей идентификации. Использование подобных моделей может оказаться полезным для управления динамическим процессом.

Сравним результаты непараметрического дуального алгоритма управления с типовым алгоритмом, в качестве которого был выбран ПИ – алгоритм. Объем выборки (u_i, x_i) равен 100. Рассмотри случай, представленный на рисунке 4, когда задание имеет траекторию $x^*(t) = 1.25 + \mathbf{sin}(0.5t)$.

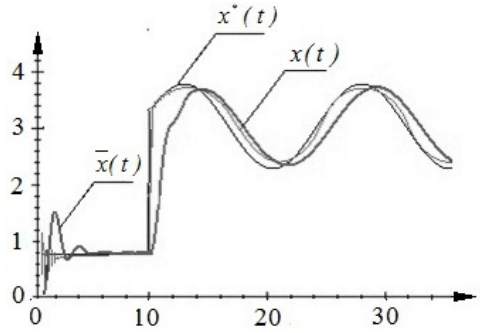


Рисунок 4 – Результаты управления при задании в виде траектории

На рисунке 4 приняты следующие обозначения: $x(t)$ - выход объекта, при управлении непараметрическим регулятором, $\bar{x}(t)$ - выход объекта, при управлении ПИ – регулятором, $x^*(t)$ - задание. Ошибка регулирования в случае непараметрического регулятора равна 0,07, для ПИ-регулятора ошибка возрастает до 0,34. Как мы можем заметить из рисунка 7, ПИ - регулятор, «не успевает» подстраиватся под задание, вследствие того, что оно имеет вид траектории. Напротив, непараметричекий регулятор, после «обучения», происходящего на первых тактах, приводит объект к заданию. Представим случай, когда x* задается случайным образом (рисунок 5):

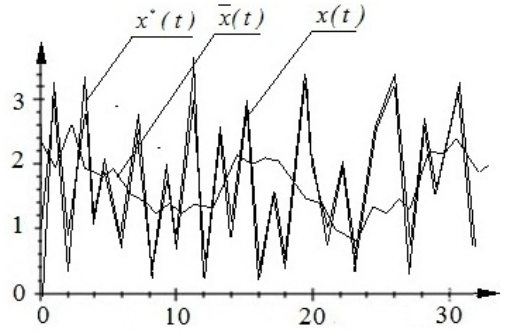


Рисунок 5 – Результаты управления при случайном задании

На рисунке 8 показано, как ведет себя алгоритм при случайном задании. Здесь мы представили случай, когда непараметричекий алгоритм дуального управления, явно превосходит типовой ПИ-регулятор. Из рисунка видно хорошее качество управления с помощью непараметрического регулятора даже при таком «экзотическом» варианте, когда задание носит случайный характер. С подобной задачей не справится ни один из известных регулято-

ров. На практике такой вариант задающего воздействия не встречается, однако, это представляет интерес с теоретической точки зрения.

Заключение

Выше приведены модели и алгоритмы дуального управления, ориентированные на случай непараметрической неопределенности, т.е. на случай, когда априорные сведенья об исследуемом объекте достаточно малы и не позволяют сколько-нибудь обоснованно выбрать параметрическую модель объекта. Конструирование непараметрического алгоритма управления связанно с оцениванием обратного оператора объекта по отношению к исходному интегралу Дюамеля, описывающему исследуемый процесс. Дальнейшее тесно связанно с построением непараметрической оценки весовой функции, «снятой» на модели в направлении «выход-вход». Как видно из приведенных результатов вычислительных экспериментом, такой путь оказался вполне оправданным.

Кроме того, рассмотрены также непараметрические алгоритмы в условиях частичной непараметрической неопределённости, также показавшие в ходе вычислительного эксперимента достаточно высокое качество управления.

Список литературы

[1] Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. Изд. «Наука», 1968г. – 400с.

[2] Медведев А.В. В. Теория непараметрических систем. Управление 1 // Вестник СибГАУ. 2010. № 4 (30). С. 4–9.

[3] Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник СибГАУ. 2010. № 4 (30). С. 15–21.

[4] Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. Москва. Изд. Физматгиз, 1963г. - 552с.

[5] Куликовский Р. Оптимальные и адаптивные процессы в системах автоматического регулирования. «Наука», М.,1967, 379с.

ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗТИГЕЛЬНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

В.Б. Демидович[1], И.И. Растворова[2], М.Ю. Хацаюк[3]

[1]Санкт-Петербургский электротехнический университет "ЛЭТИ",
197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, Россия
+79219475267, vbdemidovich@mail.ru

[2]Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
199106, Санкт-Петербург, В.О., 21-я линия, д.2, Россия
+79217593866, rastvorova@mail.ru

[3]ООО "НПЦ Магнитной гидродинамики",
660074, г. Красноярск, ул. Киренского 9а, Россия
+79130481816, e-mailmaxhac@ya.ru

Ключевые слова: *индукционный нагрев, численное моделирование, расплав титана, безтигельная плавка, электромагнитное поле, температурное поле, поле скоростей в жидком металле*

Abstract

A process for producing molten titanium inside of ingot by the induction method is proposed. Numerical simulation and experimental study were carried out on the layout. Electromagnetic, thermal and magneto-hydrodynamic fields were simulated. The principles of choice the frequency of the current and modes of heating and melting were defined.

Одним из наиболее перспективных материалов в металлургической промышленности является титан и сплавы на его основе. Однако из-за высокой прочности сплавов и трудностей их конечной механической обработки многие детали из титана, особенно небольшого размера, удобнее изготавливать методом прецизионного литья и сводить механическую обработку к минимуму.

Работу с данными материалами усложняют не только механические свойства титана и его сплавов. Титан и его сплавы в жидком состоянии имеют чрезвычайно высокую химическую активность. Титан реагирует с кислородом, азотом, водородом, вступает во взаимодействие с различными оксидами, образующими огнеупорные материалы, и восстанавливает их [1]. Поэтому плавка титана осуществляется в вакуумных камерах. Кроме того, расплав титана растворяет углерод графитового тигля, что приводит к резкому снижению пластичности сплавов, поэтому титан нельзя плавить в печах, футерованных обычными огнеупорами. Всё вышесказанное ведет к значительному удорожанию технологии литья титана и его сплавов.

Наиболее распространена дуговая плавка с расходуемым электродом, схема которого представлена на рисунке 1. В вакуумную камеру (3) помещают медный водоохлаждаемый тигель (6), расходуемый электрод (2) и литейные формы (5). Расходуемый электрод представляет собой шихтовой слиток титана или пруток, спрессованный из титанового порошка.

После вакуумирования печи зажигают электрическую дугу между электродом и дном тигля и прогревают тигель и электрод на малой мощности. При повышении мощности до рабочих ее значений происходит плавление расходуемого электрода, расплавленный металл постепенно заполняет тигель. По мере оплавления расходуемого электрода он автоматически опускается вниз электрододержателем (1). В связи с высокой теплопроводностью медного водоохлаждаемого тигля на его стенках образуется слой затвердевшего расплава толщиной

10...15 мм, который является своего рода футеровкой и называется гарнисажем (7). Смотровое окно (4) предназначено для визуального контроля и наблюдения за процессом.

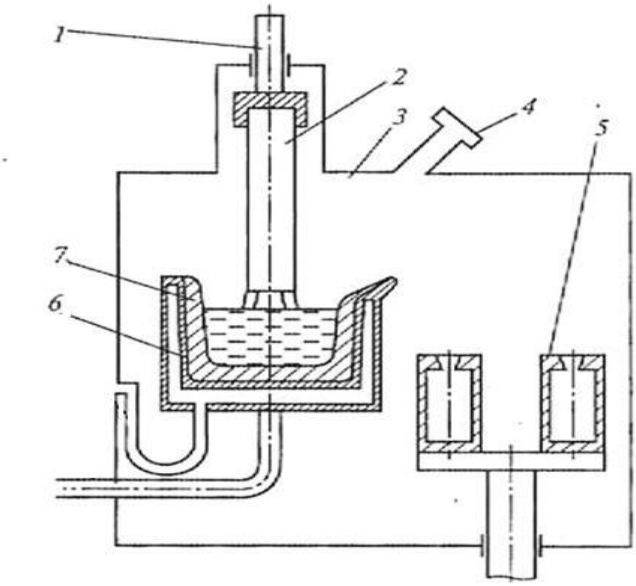


Рисунок 1 - Схема вакуумной дуговой печи [2]

Толщина слоя гарнисажа зависит от соотношения мощности, выделяемой дугой, и количества теплоты, отводимого от расплава через гарнисаж и тигель охлаждающей водой. При недостаточной мощности увеличивается толщина гарнисажа, и объем расплавленного металла уменьшается. Чрезмерная мощность дуги может привести к локальному расплавлению гарнисажа и медного тигля.

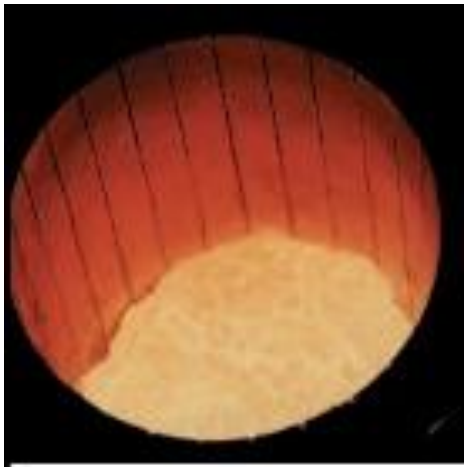


Рисунок 2 - Медный водоохлаждаемый "холодный" тигель

Индукционная вакуумная плавка и разливка в медном водоохлаждаемом тигле является также распространенным техническим решением данной проблемы [3]. Данный процесс возможен вследствие того, что в медном тигле, изготавливаемом из нескольких водоохлаждаемых медных сегментов (рисунок 2) [3], загрязнение загрузочного материала сведено к минимуму, а электромагнитное перемешивание расплава приводит к его химической и термической гомогенизации. Правильный выбор частоты тока, режим нагрева, оптимальный выбор конструкции сегментов позволяет существенно снизить электрические потери и добиться приемлемого полного КПД.

Компания ALD представляет на рынке индукционные установки LEICOMELT® с объемом расплава от нескольких кубических сантиметров до 30 литров (рисунок 3). В данных установках используются системы разливки наклоном тигля и донного слива, а диапазон

технологий разливки завершают формы для неподвижного и центробежного литья или постоянные формы из специальных сплавов, например титановых. Поскольку по своему принципу установки LEICOMELT® являются индукционными, они могут загружаться ломом, отходами и губкой вместо дорогих слитков круглого сечения.

Рисунок 3 – Установки LEICOMELT® для вакуумной индукционной плавки

Установки для литья титана и его сплавов позволяют проводить отливку деталей весом от 40 г до 2 кг и размером от 1 до 300 мм. Однако, можно с уверенностью сказать, что все технологии, как отечественные, так и зарубежные объединяет одно условие – процесс должен проходить в вакууме или в защитной атмосфере и характеризуется низкой производительностью и маленьким общим КПД.

Значительно упростить необходимое оборудование и повысить энергоэффективность можно способом получения расплава титана внутри цилиндрического слитка индукционным методом. С помощью данной технологии возможно получение расплава титана в обычной атмосфере без использования ваккумной системы, что в конечном итоге, безусловно, снизит энергозатраты при производстве и стоимость процесса в целом. В данном случае поверхность титановой заготовки будет служить защитным слоем гарнисажа и защитит расплав от примесей, не позволив ему реагировать сокружающей атмосферой. Сложность реализации процесса заключается в обеспечении режима нагрева, при котором поверхность заготовки обеспечивает достаточную прочность, в то время как внутри слитка находится расплав титана.

Вследствие скин-эффекта при индукционном нагреве тепловые источники распределены по сечению заготовки неравномерно: максимальное тепловыделение происходит на поверхности, с увеличением расстояния от поверхности интенсивность источников теплоты падает. Соответственно поверхностные слои имеют более высокую температуру, чем середина, причем эта разность температур тем больше, чем больше мощность, на которой осуществляется нагрев, и чем выше частота тока.

По мере разогрева заготовки происходит рост тепловых потерь в окружающую среду. Отвод теплоты с внешней поверхности качественно отражается на характере температурного поля: вследствие охлаждения поверхности в глубине заготовки образуется зона, имеющая более высокую температуру, чем поверхность [4].

Это явление имеет место при индукционном нагреве всех металлов, однако для титановых сплавов оно сильно проявляется из-за низкой теплопроводности и высокого уровня тепловых потерь. Перегрев внутренних слоев металла может привести, в конечном счете, к

расплавлению внутренних слоев. В данном случае поверхность титановой заготовки будет служить защитным слоем гарнисажа и защитит расплав от примесей, не позволив ему реагировать со средой. Следовательно, для титана возможно путем правильного выбора частоты тока, мощности и режима нагрева добиться получения расплава внутри слитка.

Процесс нагрева происходит до наступления теплового баланса мощности, поступающей в заготовку и тепловых потерь с поверхности.

Описанная технология выглядит конкурентоспособной и энергоэффективной по отношению к существующей технологии плавки в холодном тигле ввиду того, что в процессе не используется дополнительное оборудование для создания вакуума, а сам процесс получения расплава титана внутри слитка индукционным способом требует значительно меньшего времени и энергозатрат [5].

Исследования проводились как на численных моделях (рисунок 4), так и на экспериментальных макетах.

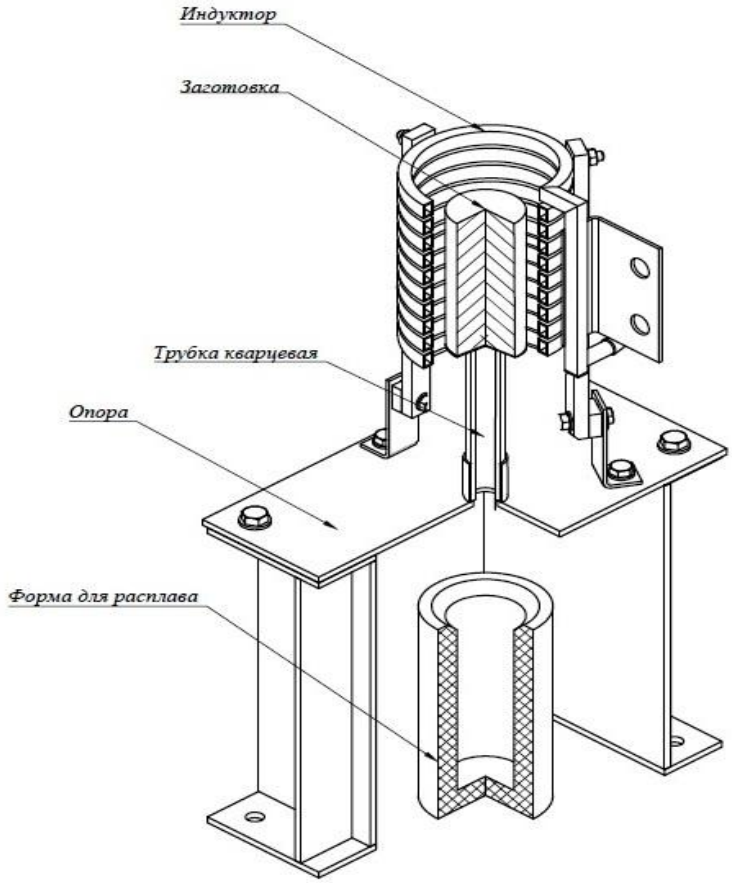


Рисунок 4 – 3D-модель электромагнитной системы нагрева и плавки цилиндрических заготовок

Численная модель, основанная на расчете двухмерного электромагнитного поля и температурного поля без учета магнито-гидродинамических эффектов показала, что при оптимальном выборе частоты и режима нагрева и плавки, максимально возможный объем расплава, полученный при нагреве титанового цилиндрического слитка составляет 75-76% [6]-[9].

Численное моделирование показало возможность реализации предложенной технологии, после чего полученные результаты были перенесены на экспериментальные исследования, проводимые на макете (рисунок 5).

Эксперимент проходил при следующих параметрах установки:

- Частота преобразователя 4000 Гц
- Ток индуктора ~1000-1100 А
- Напряжение индуктора 60-70 В
- Время нагрева и плавки ~720 секунд (до момента проплавления нижнего торца заготовки и слива металла)

Заготовка представляла из себя цилиндр диаметром 60 мм, высотой 100 мм из сплава ВТ6.

Рис.5 Макет индукционной системы

В ходе эксперимента было получено подтверждение численных результатов моделирования электрических параметров индукционного нагрева и плавки цилиндра от комнатной температуры до слива жидкой фазы титана. Однако было получено, что вместо 75% жидкой фазы по численной модели, масса жидкого металла от массы цилиндра может достигать 95%.

Физическое объяснение этого явления связано с необходимостью учета магнитогидродинамических процессов внутри цилиндра, когда возникает жидкая фаза титана.

Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований (рисунок 6), наглядно показали, что в ходе данного технологического процесса происходит сильное «размывание» металла внутри заготовки за счет движения жидкого металла под воздействием электромагнитных сил.

Рисунок 6 – Результат эксперимента. Остатки заготовки из ВТ6 диаметром 60 мм и высотой 100 мм. Стенка гарнисажа ~ 1,5 мм

Эксперимент на высокой частоте тока (50 кГц) подтвердил эту гипотезу. Электромагнитное поле на этой частоте из-за сильно выраженного скин-эффекта практически не проникает внутрь цилиндра и не может влиять на движение жидкого металла и образование жидкой фазы титана.

Уточненная математическая модель с моделированием магнитогидродинамических процессов внутри цилиндра позволяет обоснованно выбрать частоту и режим нагрева и плавки.

Течение металла внутри заготовки описывается уравнением Навье – Стокса, которое основано на законе сохранения импульса и для несжимаемой жидкости может быть записано в следующей форме [10]-[12]:

$$(1)\quad \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_i}\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \upsilon \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i,\ \mathrm{i} = 1,2,3,$$

где u_i – скорость жидкости, ρ – плотность жидкости, $\upsilon = \mu/\rho$ – кинематическая вязкость, p – давление и f_i – представляет собой вязкость внешней объёмной силы, действующей на жидкость. В приведённой выше и следующих формулах индексы могут принимать значение 1, 2 и 3, обозначая направления x, y и z.

В процессе плавления основными объёмными силами, действующими на металл, являются сила гравитации и сила электромагнитного поля.

Закон сохранения массы принимает для несжимаемой жидкости вид уравнения неразрывности:

$$(2)\quad \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

Если плотность жидкости не является постоянной, для замыкания системы используется следующее уравнение: ρ= ρ(T, p).

Для несжимаемой жидкости $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$. Это условие удовлетворяет для потока металла в индукционной системе «расплав – твердая заготовка», т.к. скорости потока много меньше скорости звука в данной среде. В связи с тем, что жидкость несжимаема, в модели отсутствует учёт плавучести. Если градиенты температур в жидкой среде не велики (несколько градусов), флуктуации плотности ρ' будут крайне малы: ρ' « ρ, таким образом, уравнение состояния среды может принять не зависимую от давления форму: $\rho = \rho_0 (1 - \alpha \Delta T)$, где ρ_0 – значение средней плотности, $\alpha = -\rho^{-1}\left(\partial\rho/\partial T\right)_p$ коэффициент термического расширения, ΔT – разница температур.

С другой стороны конвективному течению в металле способствует электромагнитное поле. Сила электромагнитного поля может быть представлена как: $f_{EM} = 0.5R \cdot e\left(j \times B\right)$, где j– плотность тока в индукторе; B – интенсивность магнитного поля.

В математической модели, использованной для исследования, в связи со значительными временными затратами на каждый численный эксперимент с целью упрощения влияние гравитации на движение металла не учитывалось.

Таким образом, уравнение Навье – Стокса может быть переписано в безразмерном виде, включающее число Рейнольдса Re, которое определяет отношение сил инерции к силам вязкости:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \tilde{t}} + \tilde{u}_j \frac{\tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_j} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_j \partial \tilde{x}_j} + \tilde{f}_i ,$$

где число Рейнольдса определяется как: $Re = \frac{UL\rho}{\mu} = \frac{UL}{\upsilon}$

В работе в качестве характерного размера L был принят диаметр заготовки, под значением скорости U понимается средняя скорость потока самых больших вихрей в потоке, υ динамическая вязкость расплава. Под характерным временем принят период обращения вихрей. В процессе моделирования для упрощения расчётов также не были включены уравнения, учитывающие перенос массы.

Для учета влияния процессов, протекающих при плавлении и затвердевании, термогидродинамическая модель дополняется моделью кристаллизации и плавления, основанной на методе «энтальпия–пористость». В уравнение движения добавляется дополнительный источниковый член: $\frac{(1-\beta)^2}{\beta^3+\xi} A|\tilde{u}_i|$,

где β – доля жидкой фазы;ξ=0,001 – число, предотвращающее деление на 0; A – постоянная двухфазной зоны, выражающая быстроту перехода скорости к нулю при затвердевании

Существует несколько подходов к моделированию турбулентности. Широко известен метод с осреднением уравнений Навье – Стокса по Рейнольдсу (ReynoldsAveragedNavier−Stokes – RANS) при замыкании рейнольдсовских напряжений полуэмпирическими моделями турбулентности, например k–ε моделью. Преимуществом RANS являются пониженные требования к вычислительной мощности компьютера, к ограничениям относится существенное упрощение пульсационной структуры течения. Именно данный метод был использован на данном этапе исследований гидродинамической задачи в качестве альтернативы прямого решения трёхмерных нестационарных уравнений Навье – Стокса. Значения всех необходимых параметров для расчета магнитогидродинамической

задачи извлекаются в ходе решения электромагнитной задачи. Совместное решение осредненных уравнений Навье-Стокса, уравнения теплопроводности и уравнения состояния с помощью методов численного моделирования RANS позволяют увидеть форму ванны расплава в процессе плавления внутренних слоев слитка и получить результат распределения вектора скоростей в расплаве (рисунок 7).

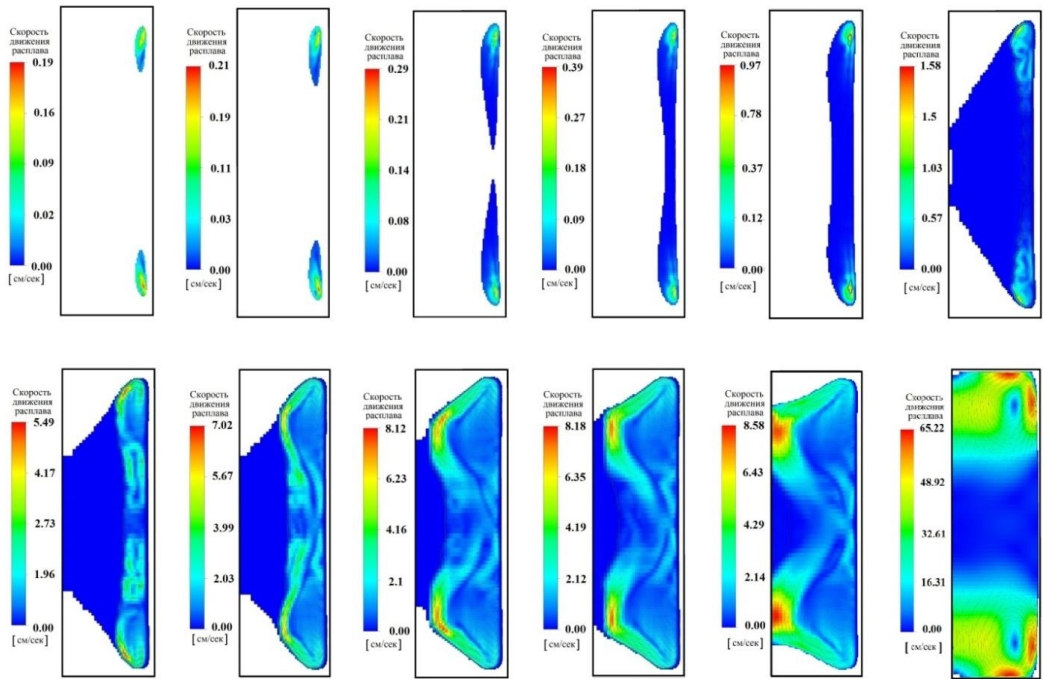


Рисунок 7 – Распределение средних скоростей в расплаве титана в разные моменты времени: с момента образования расплава (слева сверху) и до момента наступления термодинамического равновесия в системе (справа снизу).

Заключение

Теоретические и экспериментальные исследования показали возможность получения индукционным способом жидкой фазы титановых сплавов внутри цилиндрических слитков. Разработаны модели и определены условия достижения этих результатов.

Публикация выполнена в рамках государственной работы «Организация проведения научных исследований» базовой части государственного задания Минобрнауки России (задание №2014/187)

Список литературы

[1] Ильин А.А., Колачёв Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства, М.: ВИЛС - МАТИ, 2009. - 520 с.

[2] Ресурсы интернет-сайта http://www.trastcomp.ru

[3] Ресурсы официального интернет-сайта компании ALD http://www.ald-vt.ru

[4] Демидович В.Б., Комракова Г.Д., Стефанов Б.В. Сравнение индукционного нагрева крупногабаритных титановых заготовок на промышленной и низкой частотах/Технология легких сплавов, 1992, № 11 - 12, с. 46 – 48

[5] Индукционная установка для плавки титановых сплавов/ Полезная модель РФ №136666 Изобретения. Полезные модели / изд-во: ФИБС, Москва, 10.01.2014, №1

[6] В.Б.Демидович, П.А.Масликов, Д.А. Баранов, Ковинька А.А. Технологии электромагнитного получения литых изделий из титана и титановых сплавов/ Индукционный нагрев, №2(20), 2012, с.14-18

[7] V.Demidovich, P.Maslikov, V.Olenin // Innovative induction heating technologies of processing titanium alloys // Proceedings of the XVII UIE Congress 21-25 May, 2012 // St.Petersburg // pp.390-393

[8] В.Б.Демидович, П.А.Масликов, Е.А. Григорьев, В.А. Оленин Инновационные технологии обработки титановых сплавов с применением индукционного нагрева/ Индукционный нагрев, №3(21), 2012, с.26-28

[9] Victor Demidovich, Irina Rastvorova Induction Heating in the Processing of Ti &Zr. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2014, 6, PP. 404-441

[10] А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур, Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений/ учебное пособие Санкт-Петербургского Политехнического университета, 2012, 88с.

[11] С. Патанкар Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости/ Москва, 1984, 124с.

[12] Ф.В. Недопекин, В.В. Белоусов Моделирование гидродинамических и тепломассообменных процессов в металлургических технологиях/ Вестник удмуртского университета, вып.1, 2008, с. 189-199

ОБ АЛГОРИТМАХ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОРАДИОЗДЕЛИЙ

Н.В. Коплярова[1], А.В. Медведев[1], Е.А. Чжан[1]

[1]Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия
eachzhan@mail.ru
тел: +7 (965) 897-06-85

Ключевые слова: *управление, идентификация, адаптивные алгоритмы, дискретно-непрерывный процесс, технологический процесс, электрорадиоизделие*

Abstract
The problem of identification in non-parametric or part non-parametric uncertainty is studied. If a priori information is not sufficient for the initial statement of objectives, it is natural to use the theory of adaptive learning systems. The main purpose of the following paper is to give an algorithmic framework for modeling and process control within the production schedules.

Введение

Для промышленных производств типичным является последовательная, параллельная или последовательно-параллельная схема производства. Внутри производственных процессов могут быть перекрестны связи, что приводит к нелинейным системам. Для получения адекватной модели необходимо рассматривать не один из локальных объектов (линия производства электрорадиозделий), и всю группу объектов. Среди таких объектов могут быть как динамические, так и безынерционные с запаздыванием. Система группового управления объектом относится к более высокому уровню иерархии, чем система управления локальным объектом. При идентификации и управлении группой объектов крайне важным является объем априорной информации о каналах связи объектов, средства контроля соответствующих объектов. От этих факторов зависит математические постановки задачи, которые могут отличаться для различных объектов. В дальнейшем делается акцент на формулировку вышеназванных задач в условиях как параметрической, так и непараметрической неопределенности. В первом случае, как известно [1], необходимо представление модели объекта с точностью до вектора параметров с дальнейшей их оценкой по мере поступления текущей информации. Во втором случае можно ограничиться лишь качественными свойствами исследуемого процесса с последующей оценкой оператора объекта (чаще всего интегральных), по результатам выборки наблюдений [2].

Такого рода задачи актуальны при моделировании процесса производства электрорадиоизделий (ЭРИ): различные диоды, диодные матрицы, интегральные микросхемы и т.д. К ЭРИ при использовании в космической отрасли предъявляются высокие требования: безотказная работа во время всего срока эксплуатации, устойчивость к перепадам температур, воздействиям радиации. В этом случае ведение технологического процесса, следуя лишь указаниям ГОСТ или ТУ, может не привести к производству продукции высокого качества, т.к. на сегодняшний день нормы включают весьма широкий диапазон значений. Целесообразным является разработка адаптивной системы управления не локальным объектом, а всей технологической цепочкой.

1 Постановка задачи

Рассмотрим следующую схему технологического процесса, которая достаточно часто встречается на практике:

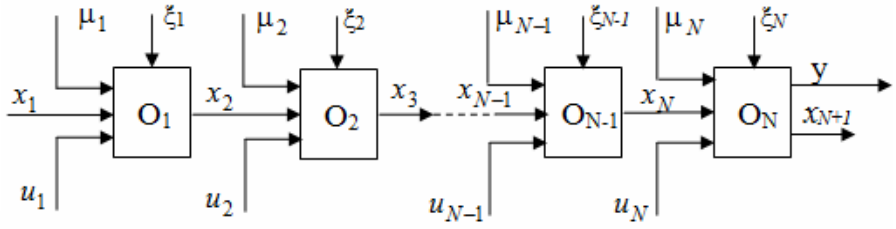


Рисунок 1 – Общая схема технологического процесса

Здесь приняты следующие обозначения: O_i, $i=\overline{1,N}$ – технологические объекты; $\boldsymbol{x}=(x_1, x_2,\ldots,x_N)$ – это характеристики, определяющие состав исходного продукта x_1 и полуфабрикатов $x_2,\ldots,x_N$, поступающих на вход технологических объектов; $\boldsymbol{\mu}=(\mu_1, \mu_2,\ldots, \mu_N)$ – всевозможные добавки, поступающие на входы объектов; $\boldsymbol{u}=\left(u_1,u_2,\ldots,u_N\right)$ – управляющие воздействия, $\boldsymbol{\xi}=(\xi_1, \xi_2,\ldots, \xi_N)$ – внешние помехи, действующие объекты технологической цепочки. Как видно из рисунка, технологический процесс представляет собой последовательность локальных объектов.

Последний объект технологической цепочки O_N имеет две выходные переменные. Первая из них $\boldsymbol{y}$ – это параметр, характеризующий качество готового продукта (изделия). Особенностью здесь является то, что параметр $\boldsymbol{y}$ измеряется через значительные промежутки времени и поэтому не может быть использован при управлении процессом. Выходная переменная $\boldsymbol{x_{N+1}}$ – это переменная, косвенно характеризующая готовый продукт, но контролируемая через значительно меньший промежуток времени по сравнению с переменной $\boldsymbol{y}$. В этом случае управление процессом осуществляется исходя из результатов измерений переменной $\boldsymbol{x_{N+1}}$.

В общем случае все описанные переменные представляют собой векторы. Для простоты рассмотрим скалярный случай. Характеристики выходных переменных x могут быть представлены в виде следующей зависимости:

(1) $$x_{i+1}(t)=f(x_i(t-\tau),u_i(t-\tau),\mu_i(t-\tau),\xi_i(t-\tau)),i=\overline{1,N-1},$$

где τ – запаздывание, которое по разным каналам связи может отличаться, но из соображений простоты в тексте мы приняли единое обозначение запаздывания τ.

Для всякого технологического процесса на производстве установлен технологический регламент, который определяет, в каком диапазоне значений должна находиться величина той или иной переменной процесса. Если значение данного параметра оказывается за пределами этого диапазона, то такое положение классифицируется как брак.

Для многих производств характерен довольно широкий диапазон изменения значений технологических переменных (рис. 2). Как следствие этого, часто имеет место факт получения брака при соблюдении технологического регламента.

На рис. 2 приняты следующие обозначения: x_i, $i=\overline{1,N}$ – входные и промежуточные переменные процесса; $a_i^{\min}$, $a_i^{\max}$, $i=\overline{1,N}$ – минимальная и максимальная границы диапазона допустимых значений переменных, определяемые технологическим регламентом; l_i, $i=\overline{1,N}$ – желаемая область значения переменных; y – выходная переменная всего технологического процесса, определяющая качество готового продукта; $a_y^{\min}$, $a_y^{\max}$ – границы допустимых зна-

чений переменной *y*, определяемые технологическим регламентом; l_y – требуемая область значения *y*.

Пусть параметр x_1 (например, температура) принял определенное значение из области $l_1 \in [a_1^{\min}; a_1^{\max}]$. Это значение может задаваться исходя, например, из качества продукта, поступившего на обработку. Заметим, что область l_1 много меньше всего интервала $[a_1^{\min}; a_1^{\max}]$. При этом параметр x_2 (к примеру, давление), статистически зависимый от показателя x_1, также принимает определенное значение из области $l_2 \in [a_2^{\min}; a_2^{\max}]$. Подобная ситуация происходит и для всех остальных переменных x_i, $i = \overline{1, N}$, соответствующих своему локальному объекту, а также для переменной процесса *y*.

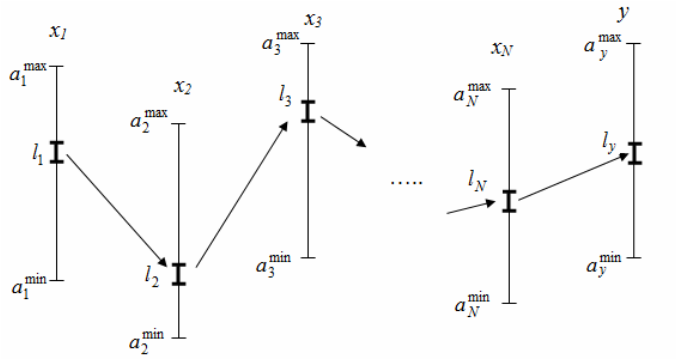


Рисунок 2 – Диапазоны значений переменных процесса, определяемые технологическим регламентом

На основании этого, можно заключить, что для рационального ведения процесса необходимо для каждого показателя x_i определить область $l_i \in [a_i^{\min}; a_i^{\max}]$, исходя из значений x_{i-1}, где $i = \overline{2, N}$. Область значения показателей *x* определяется границами технологического регламента. Представляется целесообразным осуществление технологического процесса проводить в соответствии со следующей схемой: если на i-ом переделе получены значения переменных, принадлежащих интервалу l_i, то на $(i+1)$-ом наиболее целесообразно, чтобы соответствующие технологические переменные принадлежали не всему интервалу $[a_{i+1}^{\min}; a_{i+1}^{\max}]$, а его подобласти $l_{i+1} \in [a_{i+1}^{\min}; a_{i+1}^{\max}]$.

Для различных современных производств характерно, что диапазон значений технологических переменных достаточно широк во всех сечениях технологического процесса, хотя и соответствует технологическому регламенту. Поэтому возникает очень непростая задача, связанная с оптимизацией технологического процесса в рамках технологического регламента. Такой характер работы компьютерной системы управления технологическим процессом приведет к уменьшению диапазонов значений параметров на каждом переделе, что, конечно же, повысит качество выпускаемой продукции и позволит избежать ситуаций, связанных с браком.

Решением данной проблемы может стать ужесточение норм технологического регламента. В этом случае необходимо не только разработать и утвердить новые нормы, но и перестраивать весь процесс, что является весьма затратным и неоправданным. Необходим высокий профессиональный уровень персонала, современное оборудование. Второй путь значительно более реалистичен, поскольку не требует капитальных затрат на реконструкцию с одной стороны, а с другой – позволяет существенно повысить качество выпускаемой продукции и

уменьшить потери при производстве тех или иных изделий. Для этого необходима разработка и внедрение интеллектуальных компьютерных систем (ИКС) оптимизации технологических режимов «внутри» технологического регламента. Подобные компьютерные системы оказываются, как правило, экономически эффективными.

2 Идентификация и управление объектами технологической цепочки

В зависимости от уровня априорной информации об объекте исследования выделяют методы идентификации в «узком» и «широком» смысле [3], иначе говоря, методы параметрической и непараметрической идентификации.

Методы параметрической идентификации предполагают значительный объем априорных сведений об исследуемом объекте, позволяющий обоснованно выбрать структуру параметрической модели, и соответственно, построить ее. Например, для технологического объекта O_2 параметрическую модель можно записать следующим образом:

$$\hat{x}_2^{\alpha} = A_1^{\alpha}\left(x_1, u_1, \mu_1, \alpha_1\right), \quad (2)$$

где A_1^{α} – параметрическая структура для локального объекта O_2, α_1 – вектор параметров. Структура A определяется для каждого локального объекта индивидуально. Модель (2) в общем случае можно переписать для произвольного объекта $O_{(i+1)}$ в виде:

$$\hat{x}_{i+1}^{\alpha} = A_i^{\alpha}\left(x_i, u_i, \mu_i, \alpha\right), i = \overline{1, N-1}. \quad (3)$$

В условиях недостатка априорной информации целесообразно использовать методы непараметрической идентификации. В этом случае непараметрическая модель локального объекта O_2 будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{x}_2^s = \frac{\sum_{i=1}^{s} x_2 \Phi\left(\frac{x_1 - x_1^i}{c_s^{x_1}}\right)\Phi\left(\frac{\mu_1 - \mu_1^i}{c_s^{\mu_1}}\right)\Phi\left(\frac{u_1 - u_1^i}{c_s^{u_1}}\right)}{\sum_{i=1}^{s} \Phi\left(\frac{x_1 - x_1^i}{c_s^{x_1}}\right)\Phi\left(\frac{\mu_1 - \mu_1^i}{c_s^{\mu_1}}\right)\Phi\left(\frac{u_1 - u_1^i}{c_s^{u_1}}\right)}, \quad (4)$$

где $\Phi(\cdot)$ – ядерная колоколообразная функция, c_s – коэффициент размытости ядра, соответствующий каждой переменной объекта, s – объем выборки наблюдений. Ядерная функция и коэффициент размытости ядра удовлетворяют некоторым условиям сходимости [4].

В общем виде модель (4) можно переписать в виде:

$$\hat{x}_{j+1}^s = \frac{\sum_{i=1}^{s} x_j \Phi\left(\frac{x_j - x_j^i}{c_s^{x_j}}\right)\Phi\left(\frac{\mu_j - \mu_j^i}{c_s^{\mu_j}}\right)\Phi\left(\frac{u_j - u_j^i}{c_s^{u_j}}\right)}{\sum_{i=1}^{s} \Phi\left(\frac{x_j - x_j^i}{c_s^{x_j}}\right)\Phi\left(\frac{\mu_j - \mu_j^i}{c_s^{\mu_j}}\right)\Phi\left(\frac{u_j - u_j^i}{c_s^{u_j}}\right)}, \; j = \overline{N-1}. \quad (5)$$

Как было сказано ранее, мы можем обладать различными объемами априорной информации о каждом локальном объекте технологической цепочки. В одних случаях этого объема будет достаточно для построения параметрической модели типа (3). В других случаях необходимо применять методы идентификации в «широком» смысле (5). Таким образом, система моделей, описывающая поведение всего технологического процесса, будет представлять собой синтез параметрических и непараметрических алгоритмов.

Для управления последовательным технологическим процессом на практике достаточно часто применяют следующую схему управления, представленную на рисунке 3.

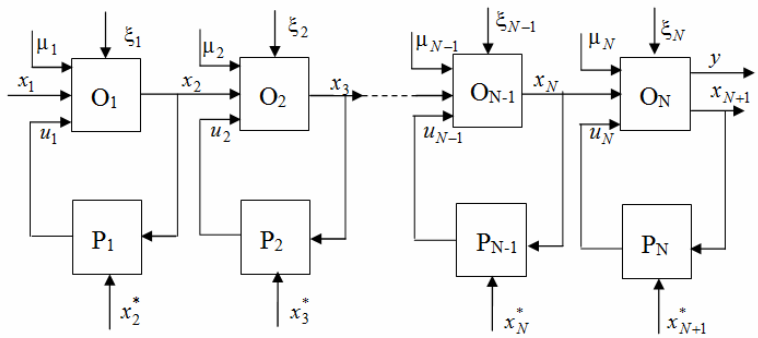


Рисунок 3 – Существующая схема управления последовательным технологическим процессом

Здесь O – локальные технологические объекты, P – регуляторы, x_i^*, $i=\overline{1,N+1}$ – задающие воздействия, определяемые оператором. Следует заметить, что некоторые компоненты вектора y в сущности являются настолько важными, что определяют стоимость полученного продукта при его реализации. Как видно из вышеприведенной схемы, управление не ведется по выходной переменной y, что связано с длительным временем ее измерения.

Недостатком подобной схемы является трудность определения задающих воздействий. На практике чаще всего они достаточно редко меняются, и это изменение находится в полном ведении оператора, который осуществляет эту операцию исходя из имеющегося опыта, конечно же, соблюдая технологический регламент.

В условиях малой априорной информации целесообразно использовать методы непараметрической теории адаптивных систем [5]. Ее отличие от существующей параметрической теории адаптивных систем состоит в отсутствие этапа выбора параметрической структуры модели на основании имеющейся априорной информации. В этом случае требования к априорной информации ослабевают. Здесь требуется информация на качественном уровне (статический или динамический объект, линейный или нелинейный и др.).

Рассмотрим непараметрический алгоритм дуального управления для отдельно взятого локального объекта описанной технологической цепочки, например, для объекта O_2. Управляющее воздействие в этом случае формируется по следующему закону

$$u_{s+1}^2 = u_{s+1}^{2*} + \Delta u_{s+1}^2, \tag{6}$$

где u_{s+1}^{2*} представляет собой компоненту, отвечающую за обучение алгоритма, а Δu_{s+1}^2 – «поисковый» шаг. Дуализм данного алгоритма состоит в том, что компонента u_{s+1}^{2*} содержит в себе «знания» об объекте, а компонента Δu_{s+1}^2 – изучающие «поисковые» шаги. В общем случае формулу (6) можно записать как :

$$u_{s+1}^i = u_s^{i*} + \Delta u_{s+1}^i,\ i=\overline{1,N}\ . \tag{7}$$

Компонента u_s^{2*} находится с использованием непараметрической оценки функции регрессии по наблюдениям и имеет вид (для объекта O_2):

$$u_s^{(2)*} = \frac{\sum_{i=1}^{s} u_1^i \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(3)*} - x_i^{(3)}}{c_s^{x_3}}\right)\Phi\left(\frac{\mu_{s+1}^{(2)} - \mu_i^{(2)}}{c_s^{\mu_2}}\right)\Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(2)} - x_i^{(2)}}{c_s^{x_2}}\right)}{\sum_{i=1}^{s} \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(3)*} - x_i^{(3)}}{c_s^{x_3}}\right)\Phi\left(\frac{\mu_{s+1}^{(2)} - \mu_i^{(2)}}{c_s^{\mu_2}}\right)\Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(2)} - x_i^{(2)}}{c_s^{x_2}}\right)}, \tag{8}$$

где $\Phi(\cdot)$ – ядерная колоколообразная функция, c_s – соответствующие коэффициенты размытости ядра. И ядерная функция, и коэффициенты размытости ядра удовлетворяют некоторым условиям [9]. В общем случае формула (8) имеет вид:

$$(9)\quad u_s^{(i)*} = \frac{\sum_{i=1}^{s} u_1^i \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(j+1)*} - x_i^{(j+1)}}{c_s^{x_{j+1}}}\right)\Phi\left(\frac{\mu_{s+1}^{(j)} - \mu_i^{(j)}}{c_s^{\mu_j}}\right)\Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(j)} - x_i^{(j)}}{c_s^{x_j}}\right)}{\sum_{i=1}^{s} \Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(j+1)*} - x_i^{(j+1)}}{c_s^{x_{j+1}}}\right)\Phi\left(\frac{\mu_{s+1}^{(j)} - \mu_i^{(j)}}{c_s^{\mu_j}}\right)\Phi\left(\frac{x_{s+1}^{(j)} - x_i^{(j)}}{c_s^{x_j}}\right)}, \quad j = \overline{1, N}.$$

Второе слагаемое в формуле (6) Δu_{s+1}^2 – «поисковый» шаг, который рассчитывается следующим образом:

$$(10)\quad \Delta u_{s+1}^2 = \gamma(x_{s+1}^{(3)*} - x_s^3),$$

где γ – некоторый коэффициент.

В более общем виде формулу (10) можно записать следующим образом:

$$(11)\quad \Delta u_{s+1}^i = \gamma(x_{s+1}^{(i+1)*} - x_s^{i+1}),\ i = \overline{1, N}.$$

Результаты исследования данного непараметрического алгоритма дуального управления были приведены в [5].

Заключение

Рассматривается задача идентификации и управления технологическим процессом, который состоит из группы локальных объектов. Подобный характер технологических процессов является типичным для аэрокосмической отрасли, производства электрорадиоизделий. Предлагается оптимизировать ведение технологического процесса внутри технологического регламента.

Поставлена задача управления внутри технологического регламента. В настоящей статье приведена некоторая алгоритмическая основа построения моделей и алгоритмов управления локальными объектами в условиях как параметрической, так и непараметрической неопределенности. Последнее приближает основные результаты статьи к практической разработке реальных компьютерных систем управления технологическими процессами.

Список литературы

[1] Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968. 400с.
[2] Медведев А.В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск: Наука, 1983. 173с.
[3] Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 681 с.
[4] Надарая Э.А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии. Издательство Тбилисского университета, 1983. 194 с.
[5] Медведев А.В. Теория непараметрических систем. Управление – I // Вестник СибГАУ. 2013. №2(48). С.57-63.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ НЕЦЕЛОГО ПОРЯДКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОМЕНТОВ

В.А. Кубышкин, С.С. Постнов, Е.А. Постнова

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65, Россия
vicalkub@ipu.ru, postnov.sergey@inbox.ru, post-ea@ya.ru
тел: +7 (495) 334-90-76

Ключевые слова: *оптимальное управление, метод моментов, динамические системы нецелого (дробного) порядка, производная Капуто*

Abstract

The paper deals with the optimal control problem for linear dynamic systems of fractional order. Systems with lumped and distributed parameters are considered. The optimal control problem of two kinds investigated: the problem to minimize the norm of control for the assigned time interval and the problem of control with the minimal time of the object transition into the desirable state with the given constraint on the norm of control. The problem is reduced to the classical moment problem. Conditions of correctness and solvability derived for the obtained moment problem. Some particular cases of fractional-order systems are discussed. The explicit solutions for the problems of optimal control were obtained in case of systems with lumped parameters. In case of system with distributed parameters an approximate solution analyzed for moment problem and different types of control considered (distributed, boundary and movable).

Введение

Аппарат дробного исчисления (интегро-дифференциального исчисления нецелого порядка) уже достаточно давно применяется для моделирования различных физических процессов и систем. Сегодня известен целый ряд областей науки, в которых общеизвестные модели формулируются в терминах операторов и уравнений нецелого порядка. Здесь стоит упомянуть и механику вязкоупругих материалов, и электрохимию, и теорию неоднородных диэлектриков [1-3]. Основными особенностями систем дробного порядка (т.е., систем, состояние которых описывается в терминах дифференциальных уравнений дробного порядка) является их временна́я и/или пространственная нелокальность: состояние таких систем в данный момент времени и/или в данной точке пространства зависит не только от предыдущего состояния или состояний в малой окрестности данной точки пространства, но определяется, вообще говоря, всей предысторией эволюции системы и ее состояниями (значениями некоторых характеристических функций) во всех точках пространства.

С 90-х гг. XX века дробное исчисление нашло применение и для описания динамических систем с управлением. Появилось понятие контроллеров нецелого порядка [4, 5]. В дальнейшем, уже в XXI веке, начали активно развиваться исследования в области математической теории управления системами нецелого порядка: были сформулированы понятия управляемости и оптимальности, даны постановки задач оптимального управления для таких систем [6]. При этом основным подходом, в рамках которого исследовались задачи оптимального управления, стал вариационный [6, 7-9]. Данный подход, как известно, не позволяет явным образом учитывать ограничения на норму управления и работать с разрывными управлениями. Известно также, что на сегодня не существует универсальных методов поиска оптимального управления, например, принцип максимума, аналогичный принципу максимума Л.С. Понтрягина для систем целого порядка, для систем дробного порядка не доказан.

Для систем целого порядка (в особенности, линейных) вполне универсальным инструментом исследования и решения задач оптимального управления является метод моментов,

применяемый для систем как с сосредоточенными [10], так и с распределенными параметрами [11]. В работах [12, 13] была обоснована применимость данного метода для исследования задачи оптимального управления линейными динамическими системами дробного порядка с сосредоточенными и распределёнными параметрами. Кроме того, в этих работах и работах [14-15] был разобран ряд частных случаев одно- и двумерных систем нецелого порядка. В настоящей работе представлен обзор полученных результатов по использованию метода моментов для исследования и решения задач оптимального управления системами нецелого порядка, а также приведён ряд новых примеров и в-общем рассмотрен случай подвижного управления системой с распределёнными параметрами.

1 Постановка задачи

1.1 Системы с сосредоточенными параметрами

Рассматриваются динамические системы вида

(1) $\;{}_0^C D_t^{\alpha_i} q_i(t) = a_{ij} q_j(t) + b_{ij} u_j(t) + f_i(t),\ t \in [0,T],\ i,j = \overline{1,N}$,

где $f_i(t)$ - возмущающие функции, a_{ij} и b_{ij} - коэффициенты. По повторяющимся индексам подразумевается суммирование. Дробная производная нецелого порядка $\alpha \in (0,1)$ от функции $q_i(t)$ понимается как левосторонняя дробная производная Капуто:

$${}_0^C D_t^{\alpha} q_i(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t \frac{dq_i(\tau)}{d\tau} \frac{d\tau}{(t-\tau)^{\alpha}}.$$

Начальные и конечные условия задаются в виде:

(2) $\;q_i(0) = q_i^0$,

(3) $\;q_i(T) = q_i^T,\ i = \overline{1,N}$.

Пусть вектор-функции $q(t) = (q_1(t),\ldots,q_N(t))$, и $u(t) = (u_1(t),\ldots,u_N(t))$, определены на отрезке $[0,T]$, $T > 0$. Пусть управление $u(t)$ принадлежит пространству $L_p[0,T]$, $1 < p < \infty$ с нормой

$$\|u\|_p = \sqrt[p]{\int_0^T \sum_{i=1}^N |u_i(t)|^p \, dt}.$$

Будем рассматривать также и случай $p \to \infty$, когда норма в пространстве $L_p[0,T]$ определяется тем же выражением, что и в пространстве $M[0,T]$ измеримых, почти всюду ограниченных на отрезке $t \in [0,T]$ функций:

$$\|u\|_{\infty} = \operatorname{vrai} \max_{t \in [0,T]} \max_i |u_i(t)|.$$

Фазовые координаты $q_i(t)$, $i = \overline{1,N}$, определяющие состояние системы, считаются обладающими всеми необходимыми свойствами для существования решений рассматриваемых ниже уравнений, в частности, дифференцируемыми хотя бы один раз.

Задача оптимального управления ставится следующим образом. Найти управление $u(t)$, $t \in [0,T]$, такое, чтобы рассматриваемая система (1) перешла из заданного начального состояния $q(0)$ в заданное конечное состояние $q(T)$ и при этом или

(А) норма управления $\|u\|$ в пространстве $L_p[0,T]$, $p>1$ достигла минимального значения, когда время управления T задано, (задача А), или

(Б) время управления T было минимальным при условии $\|u\| \le l$, $l>0$, где число l задано (задача Б).

1.2 Системы с распределёнными параметрами

Системы с распределёнными параметрами будем рассматривать на примере систем, описываемых уравнениями типа уравнения переноса:

$$(4)\quad {}_0^C D_t^{\alpha} Q(x,t) = K\frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2} + f(x,t) + u(x,t), \quad t>0, \quad 0\le x\le L, \quad 0\le \alpha \le 1,$$

где $f(x,t)$ - возмущающая функция, K - коэффициент переноса, $u(x,t)$ - распределенное или подвижное управление. Начальное и конечное условия задаются в виде:

$$(5)\quad Q(x,0) = Q_0(x),$$

$$(6)\quad Q(x,T) = Q^*(x),\ T>0.$$

Зададим граничные условия смешанного типа:

$$(7)\quad \left[b_{1,2}\frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} + a_{1,2}Q(x,t)\right]\Bigg|_{x=0,L} = h_{1,2}(t) + u_{1,2}(t),$$

где $a_{1,2}$ и $b_{1,2}$ - постоянные коэффициенты, $h_{1,2}(t)$ - граничные возмущения, $u_{1,2}(t)$ - граничные управления.

Функция $Q(x,t)$, описывающая состояние системы (4), считается обладающей всеми необходимыми свойствами для существования решений рассматриваемой начально-краевой задачи для уравнения (4) с начальным условием (5) и граничными условиями (7), в частности, дифференцируемой хотя бы один раз по времени и хотя бы два раза по пространственной координате.

При постановке задачи оптимального управления далее будем рассматривать отдельно следующие три случая, в каждом из которых управление определяется по-своему.

1. Распределённое управление, когда управление входит только в правую часть уравнения (4) (т.е., при этом полагается $u_{1,2}(t)=0$) и задаётся функцией $u(x,t)$, определенной в области $\Omega = [0,L]\times[0,T]$ и интегрируемой с некоторой степенью p по временно́й переменной и с некоторой степенью q по пространственной, $1<p<\infty$, $1<q<\infty$. В этом случае для краткости будем писать $u(x,t)\in L_{pq}(\Omega)$.

2. Подвижное управление, когда управление, как и в предыдущем случае, входит только в правую часть уравнения (4) и представляется в виде $u(x,t) = I(t)\Psi[x-x_0(t),\sigma(t)]$, где функция $I(t)\in L_p[0,T]$ определяет интенсивность управляющего воздействия, функция $\Psi[x-x_0(t),\sigma(t)]$ определяет форму пространственного распределения управляющего воздействия (при этом $\int\limits_G \Psi[x-x_0(t),\sigma(t)]dx = 1 \quad \forall\, t\in[0,T]$, G - область определения функции $\Psi[x-x_0(t),\sigma(t)]$ по пространственной переменной), функция $\sigma(t)$ является параметром формы распределения, а функция $x_0(t)\in L_p[0,T]$ - закон движения управляющего воздействия,

$1 < p < \infty$. Управление в данном случае может определяться как вектор $U(x,t) = (I(t), x_0(t)) \in L_p[0,T]$ [16, гл. 3].

3. Граничное управление, когда управляющее воздействие на систему осуществляется только на границах и связано с функциями $u_{1,2}(t)$, входящими в граничные условия (7) (т.е., в данном случае полагается $u(x,t) = 0$). При этом будем выделять две разновидности граничного управления: локальное или непосредственное, когда управлениями являются сами функции $u_{1,2}(t)$, и нелокальное или управление через привод, когда управления определяются в виде $\widetilde{u}_{1,2}(t) = {}_0^C D_t^{\alpha} u_{1,2}(t)$. В этом случае управлением будем называть вектор $U(t) = (u_1(t), u_2(t)) \in L_p[0,\infty)$ или $\widetilde{U}(t) = (\widetilde{u}_1(t), \widetilde{u}_2(t)) \in L_p[0,\infty)$, $1 < p < \infty$.

Задача оптимального управления ставится аналогично случаю систем с сосредоточенными параметрами с учётом того, что управление, обозначаемое в приводимой ниже формулировке как U, понимается в контексте одного из перечисленных выше случаев (распределённого, подвижного или граничного управления).

Задача А. Задан момент времени $t = T$, $T > 0$. Найти управление U, при котором система (4) с начальным условием (5) и граничными условиями (7) перейдет в конечное состояние (6) и при этом норма управления $\|U\|$ будет минимальна.

Задача Б. Найти управление U, при котором система (4) с начальным условием (5) и граничными условиями (7) перейдет в конечное состояние (6) за минимально возможное время $T > 0$ при заданном ограничении на норму управления $\|U\| \le l$.

2. Проблема моментов: постановка и исследование

2.1 Общие сведения

Как известно [10, 11], в случае целых неотрицательных значений α_i для систем типа (1) с начальными условиями (2) и конечными условиями (3) поставленная выше (раздел 1.1) задача оптимального управления сводится к конечномерной l-проблеме моментов следующего вида:

(8) $\int_0^T g_i(\tau) u(\tau) d\tau = c_i(T), \quad i = \overline{1,N}, \ t \in [0,T].$

Здесь $g_i(t) \in L_{p'}[0,T]$ – известные функции, c_i – известные числа. Задано также действительное число $l > 0$. Необходимо найти функцию $u(t) \in L_p[0,T]$, для которой выполнялись бы равенства (8) и условие:

(9) $\|u(t)\| \le l$.

Пространства $L_p[0,T]$ и $L_{p'}[0,T]$ являются сопряженными: $1/p + 1/p' = 1$, $1 < p < \infty$, $1 < p' < \infty$.

Необходимым и достаточным условием существования решения поставленной выше проблемы моментов (8)-(9) является существование конечного числа $\lambda_N > 0$ и N чисел $\xi_1^*, \ldots, \xi_N^*$, дающих решение следующей эквивалентной задачи на условный минимум [10, 11]. Найти

(10) $$\min_{\xi_1,\ldots,\xi_N}\left(\int_0^T\left|\sum_{i=1}^n \xi_i g_i(t)\right|^{p'} dt\right)^{1/p'} = \left(\int_0^T\left|\sum_{i=1}^n \xi_i^* g_i(t)\right|^{p'} dt\right)^{1/p'} = \frac{1}{\lambda_N}$$

при условии, что

(11) $$\sum_{i=1}^n c_i(T)\,\xi_i = 1.$$

Если данная задача имеет решение, то оптимальное управление для задачи А дается формулой [10, 11]:

(12) $$u(t) = \lambda_N^{p'}\left|\sum_{i=1}^n \xi_i^* g_i(t)\right|^{p'-1} sign\left(\sum_{i=1}^n \xi_i^* g_i(t)\right),\ t\in[0,T].$$

Решением задачи Б оптимального управления является минимальное время T^* перевода системы из начального состояния (2) в конечное состояние (3) и соответствующее управление $u(t)$ [10, 11]. Значения ξ_i^* и T^* в этом случае находятся как решение задачи (10)-(11) при заданном $\lambda_N(T) = l > 0$ и наименьшем T. Иными словами, T^* – это наименьший неотрицательный корень уравнения

(13) $$\lambda_N(T) - l = 0.$$

Оптимальное управление $u(t)$ для задачи Б определяется по формуле :

(14) $$u(t) = l^{p'}\left|\sum_{i=1}^n \xi_i^* g_i(t)\right|^{p'-1} sign\left(\sum_{i=1}^n \xi_i^* g_i(t)\right),\quad t\in[0,T^*].$$

Известно [10, 11], что ключевым условием, определяющим возможность постановки проблемы моментов (8)-(9) является возможность определения нормы функций $g_i(t)$ в пространстве $L_{p'}[0,T]$. Для разрешимости этой проблемы необходимо и достаточно, чтобы выполнялось условие $\lambda_N > 0$ или, что эквивалентно [10, 11], чтобы функции $g_i(t)$ были линейно независимы.

2.2 Системы с сосредоточенными параметрами

В работе [12] показано, что задача оптимального управления для систем типа (1) при нецелых положительных значениях α_i может быть сведена к проблеме моментов (8)-(9), где c= …, g(t)=… . Это следует из того, что решение системы (1) при нецелых α_i может быть представлено в следующем виде [17, с. 414]:

(15) $$q(t) = q(0) + \int_0^t e_\alpha^{A(t-\tau)}\left[Aq0 + f(\tau)\right]u(\tau)d\tau + \int_0^t e_\alpha^{A(t-\tau)}u(\tau)d\tau\ .$$

Здесь $e_\alpha^{At} = t^{\alpha-1}\sum_{k=0}^{\infty} A^k \frac{t^{\alpha k}}{\Gamma((k+1)\alpha)}$ – матричная α -экспонента [17].

В случае одинаковых показателей $\alpha_i = \alpha$ в уравнении (1), получено следующее условие, при выполнении которого проблема моментов может быть поставлена и будет разрешима [12]:

(16) $$\alpha > \frac{p'-1}{p'}.$$

Для частного случая системы (1), для которой $a_{ij}=\delta_{i,j+1}$, $b_{ij}=\delta_{iN}$, $f_i(t)=0$, $i,j=\overline{1,N}$, имеет место аналогичное условие, накладывающееся только на показатель последнего звена системы (т.е., на показатель единственного уравнения, содержащего управление) [12]. Следует отметить, что условие (16) тривиально выполняется в случае $u(t)\in L_\infty[0,T]$. В случае конечного p оказывается, что проблема моментов может быть поставлена не для каждого значения α.

2.3 Системы с распределёнными параметрами

Для системы (4)-(5), (7) известно общее решение [18, формула (14)]. Для конечного момента $t=T$ с учетом (6) данное решение может быть записано в виде:

$$Q(x,T)=Q^*(x)=Q^0(x,T)+v_1(x)u_1(T)+v_2(x)u_2(T)+\sum_{n=1}^{\infty}X_n(x)\int_0^T u^n(t)\frac{E_{\alpha,\alpha}\left[-\mu_n(T-t)^\alpha\right]}{(T-t)^{1-\alpha}}dt- \tag{17}$$
$$-\sum_{n=1}^{\infty}X_n(x)\int_0^T\left[v_{1n}u_1(t)+v_{2n}u_2(t)\right]{}_t^{RL}D_T^\alpha\left(\frac{E_{\alpha,\alpha}\left[-\mu_n(T-t)^\alpha\right]}{(T-t)^{1-\alpha}}\right)dt,$$

где

$$Q^0(x,T)=V(x,T)+\sum_{n=1}^{\infty}X_n(x)E_\alpha\left(-\mu_nT^\alpha\right)\left[Q_{0n}-V_n(0)-v_{1n}u_1(0)-v_{2n}u_2(0)\right]+$$
$$+\sum_{n=1}^{\infty}X_n(x)\int_0^T\frac{E_{\alpha,\alpha}\left[-\mu_n(T-t)^\alpha\right]\left[f_n(t)-{}_0^CD_t^\alpha V_n(t)\right]}{(T-t)^{1-\alpha}}dt-$$
$$-\left[\left[v_{1n}u_1(t)+v_{2n}u_2(t)\right]_t I_T^{1-\alpha}\left(\frac{E_{\alpha,\alpha}\left[-\mu_n(T-t)^\alpha\right]}{(T-t)^{1-\alpha}}\right)\right]\Bigg|_0^T,$$

$v_1(x)=\dfrac{a_2(x-L)-b_2}{a_2b_1-a_1b_2-a_1a_2L}$, $v_2(x)=\dfrac{b_1-a_1x}{a_2b_1-a_1b_2-a_1a_2L}$, $V(x,t)=v_1(x)h_1(t)+v_2(x)h_2(t)$; ${}_tI_T^{1-\alpha}$ - правосторонний интеграл Римана-Лиувилля [3, 17], ${}_t^{RL}D_T^\alpha$ - правосторонняя производная Римана-Лиувилля [3, 17]; μ_n и $X_n(x)$ - соответственно собственные значения и собственные функции однородной задачи Штурма-Лиувилля для уравнения (4) с граничными условиями (7); $u^n(t)$, Q_{0n}, $V_n(t)$, $f_n(t)$ и $v_{(1,2)n}$ - соответственно коэффициенты разложения функций $u(x,t)$, $Q_0(x)$, $V(x,t)$, $f(x,t)$ и $v_{1,2}(x)$ по системе функций $\{X_n(x)\}_1^\infty$; $E_\alpha(t)$ и $E_{\alpha,\beta}(t)$ - соответственно одно- и двухпараметрическая функция Миттаг-Леффлера [3, 17].

Величины $Q^*(x)$, $Q^0(x,T)$ и $v_{1,2}(x)$ в формуле (17) также можно разложить по системе функций $\{X_n(x)\}_1^\infty$. Поскольку данная система функций является полной, то для выполнения равенства в формуле (17) достаточно, чтобы аналогичное равенство выполнялось для любого n. Следовательно, будет иметь место следующая обобщенная бесконечномерная проблема моментов [13]:

$$\int_0^T\int_0^L g_n^0(x,t,T)u(x,t)dxdt-\int_0^T g_n(t,T)\left[v_{1n}u_1(t)+v_{2n}u_2(t)\right]dt=c_n(T), \tag{18}$$

или

(19) $\int_0^T \int_0^L g_n^0(x,t,T)u(x,t)dxdt - \int_0^T \widetilde{g}_n(t,T)\left[v_{1n}\widetilde{u}_1(t) + v_{2n}\widetilde{u}_2(t)\right]dt = \widetilde{c}_n(T)$

где $\widetilde{c}_n(T) = Q_n^0(T) + v_{1n}u_1(T) + v_{2n}u_2(T) - Q_n^*$, $c_n(T) = Q_n^0(T) + \left[v_{1n}u_1(0) + v_{2n}u_2(0)\right]E_\alpha\left(-\mu_n T^\alpha\right) - Q_n^*$,

$g_n^0(x,t,T) = \dfrac{E_{\alpha,\alpha}\left[-\mu_n(T-t)^\alpha\right]}{(T-t)^{1-\alpha}} \dfrac{X_n(x)}{\|X_n(x)\|^2}$, $\quad g_n(t,T) = {}_t^{RL}D_T^\alpha\left[\dfrac{E_{\alpha,\alpha}\left[-\mu_n(T-t)^\alpha\right]}{(T-t)^{1-\alpha}}\right] = -\mu_n\widetilde{g}_n(t,T)$,

$\widetilde{g}_n(t,T) = \dfrac{E_{\alpha,\alpha}\left[-\mu_n(T-t)^\alpha\right]}{(T-t)^{1-\alpha}}$. Формула (18) соответствует случаю локального, а формула (19) – нелокального граничного управления. При этом, в соответствии с замечаниями, сделанными при постановке задачи (раздел 1.2) выражение (18) рассматривается только для случаев, когда одно из слагаемых в левой части равно нулю.

Можно показать, что функции $g_n^0(x,t,T)$ линейно независимы $\forall n$ при $\alpha \in (0,1)$, $(x,t) \in \Omega$ и $T > 0$. Функции $g_n(t,T)$ также линейно независимы $\forall n$ при $\alpha \in (0,1)$, $(x,t) \in \Omega$ и $T > 0$. Следовательно, проблема моментов (18) будет разрешима при любом фиксированном n. Возможность постановки проблемы моментов (18) при любом фиксированном n может быть исследована так же, как и выше для систем, описываемых обыкновенными уравнениями дробного порядка [13]. В случае же бесконечномерной проблемы моментов исследование возможности ее постановки и разрешимости требует отдельного рассмотрения.

Рассмотрим теперь отдельно случай подвижного управления, т.е. $u(x,t) = I(t)\Psi\left[x - x_0(t)\right]$. Предположим дополнительно, что подвижное управляющее воздействие является точечным, т.е. $\Psi\left[x - x_0(t), \sigma(t)\right] = \delta\left[x - x_0(t)\right]$, а граничные условия задаются в форме Дирихле и являются однородными (т.е., в формуле (7) $b_{1,2} = 0$, $a_{1,2} = 1$ и $h_{1,2}(t) = 0$). Тогда выражение (18) примет вид:

(20) $\int_0^T g_n(t,T)I(t)X_n\left[x_0(t)\right]dt = Q_n^* - Q_{0n}E_\alpha\left(-\mu_n T^\alpha\right)$.

Выражение (20), очевидно, представляет собой бесконечномерную нелинейную проблему моментов. Исследование её можно проводить, как и в случае систем целого порядка, на основе методов, построенных в работе [16].

3. Примеры решения задачи оптимального управления в форме проблемы моментов

3.1 Одномерная линейная стационарная система с сосредоточенными параметрами

Рассматривается система (1) при $N = 1$ с начальным условием (2) и конечным условием (3) и $u(t) \in L_\infty[0,T]$. Тогда задачи А и Б сводятся к проблеме моментов (4), в которой

$g(\tau) = b\dfrac{E_{\alpha,\alpha}\left[a(T-\tau)^\alpha\right]}{(T-\tau)^{1-\alpha}}$,

$c(T) = q^T - q^0E_\alpha\left(aT^\alpha\right) - \int_o^T \dfrac{E_{\alpha,\alpha}\left[a(T-\tau)^\alpha\right]}{(T-\tau)^{1-\alpha}} f(\tau)d\tau$

(индексы у соответствующих величин, стоящих в формуле (1), опущены) [12]. Число λ определяется выражением [12]:

(21) $\lambda = \left| \dfrac{ac}{b\left[E_\alpha\left(aT^\alpha\right)-1\right]} \right|,$

Отсюда, в соответствии с (12)-(14), можно получить явные формулы, дающие решение задач оптимального управления А и Б соответственно:

$$u(t) = \frac{c}{b}\left| \frac{a}{E_\alpha\left(aT^\alpha\right)-1} \right|,\ t \in [0,T],$$

$$u(t) = l\,\mathrm{sign}\left(\frac{b}{c}\right),\ t \in [0,T^*],$$

где T^* - наименьший действительный неотрицательный корень уравнения (13) с учетом (21). Видно, что управления в данном случае не имеют точек переключения.

На рис. 1 приведены зависимости нормы управления в задаче А, определяемой выражением (21), от порядка системы α при различных значениях параметра a в случае $b=1$, $T=2$, $q_1^0=1$, $q_1^T=0$. Как видно из приведенных графиков, поведение нормы качественно различается для разных значений параметра a: при малых значениях ($a \le 0.5$) зависимость имеет монотонно спадающий характер, как и для случая $a=0$ (соответствующего одиночному интегратору дробного порядка [12,13]), при $a=1$ наблюдается монотонный рост, а в области $a \in (0.5,1)$ зависимость имеет экстремальный характер.

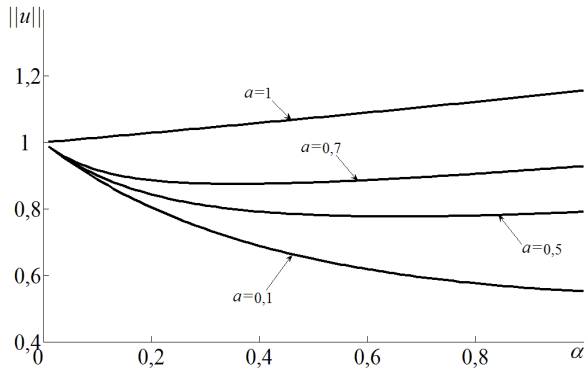


Рисунок 1. – Одномерная линейная стационарная система. Зависимость нормы управления от порядка системы.

3.2 Двойной интегратор

Рассмотрим двумерную систему вида

(22) $\begin{cases} {}_0^C D_t^\alpha q_1(t) = q_2(t), \\ {}_0^C D_t^\alpha q_2(t) = u(t). \end{cases}$

Начальные и конечные условия для системы (22) определим в виде (2) и (3) соответственно, при этом положим: $q_1^0 = q_2^0 = 0$, $q_1^T = T$, $q_2^T = 1$. Т.е., будем рассматривать задачу перевода системы из состояния покоя в состояние равномерного движения. Для аналогичной системы целого порядка такая задача была рассмотрена в монографии [11].

Будем рассматривать управление $u(t) \in L_2[0,T]$. Можно показать [12], что функции $g_{1,2}(t)$ и моменты $c_{1,2}$ будут выражаться следующими формулами:

$$g_1(\tau)=\frac{1}{\Gamma(2\alpha)}\frac{1}{(T-\tau)^{1-2\alpha}},\ g_2(\tau)=\frac{1}{\Gamma(\alpha)}\frac{1}{(T-\tau)^{1-\alpha}},$$

$$c_1(T)=q_1^T-q_1^0-\frac{q_2^0T^\alpha}{\Gamma(\alpha+1)}=T,\ c_2(T)=q_2^T-q_2^0=1.$$

Можно показать также, что решение проблемы моментов (8)-(9) приводит к следующему выражению для нормы управления [12]:

$$\lambda_2=||u(t)||=\frac{\sqrt{Z(3\alpha-1)}}{\alpha T^{2\alpha-1/2}},$$

где $Z=\left|(12\alpha^2-7\alpha+1)T^2\Gamma^2(2\alpha)-2(8\alpha^2-6\alpha+1)T^{\alpha+1}\Gamma(2\alpha)\Gamma(\alpha)+(6\alpha^2-5\alpha+1)T^{2\alpha}\Gamma^2(\alpha)\right|$.

Решение задачи А оптимального управления будет даваться следующим выражением:

$$u(t)=\frac{3\alpha-1}{\alpha^2T^{4\alpha-1}}(T-t)^{\alpha-1}\left[(T-t)^\alpha(4\alpha-1)((3\alpha-1)T\Gamma(2\alpha)-\right.$$

$$\left.-(2\alpha-1)\Gamma(\alpha)T^\alpha)+T^\alpha(2\alpha-1)((3\alpha-1)\Gamma(\alpha)T^\alpha-(4\alpha-1)T\Gamma(2\alpha))\right].$$

Аналогичным образом можно получить и решение задачи Б.

На рис. 2 показаны зависимости нормы управления от порядка маятника при различной величине T: $T=1$ (сплошная линия), $T=10$ (пунктирная линия) и $T=30$ (штрих-пунктирная линия). Видно, что в данном случае зависимости отличаются качественно.

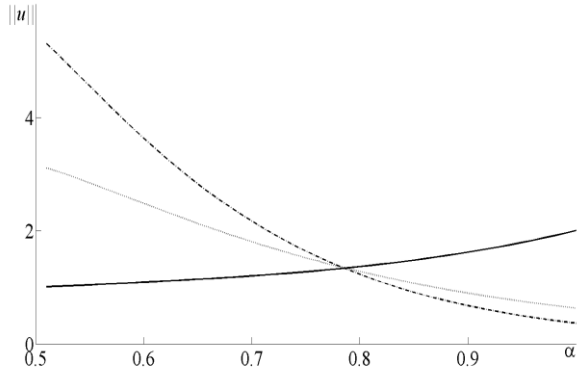


Рисунок 2. – Двойной интегратор дробного порядка. Зависимость нормы управления от показателя дифференцирования.

3.3 Одномерная линейная система с распределёнными параметрами

Будем рассматривать систему (4) в случае граничного управления. Поставим начальные и конечные условия в виде:

$$Q(x,0)=Q_0,$$

$$Q(x,T)=Q^T,\ Q^T>Q_0.$$

Граничные условия зададим в виде условий Дирихле:

$$Q(0,t)=u(t),$$

$$Q(L,t)=Q^T.$$

В данном случае можно построить приближённое решение задачи, заменив бесконечномерную проблему моментов конечномерной и проведя необходимые вычисления по аналогии

с рассмотренными выше случаями. В работе [13] было таким образом построено аналитическое решение задачи А на основе решения трёхмерной проблемы моментов. Поскольку полученное решение довольно громоздко, приведём здесь только иллюстрации.

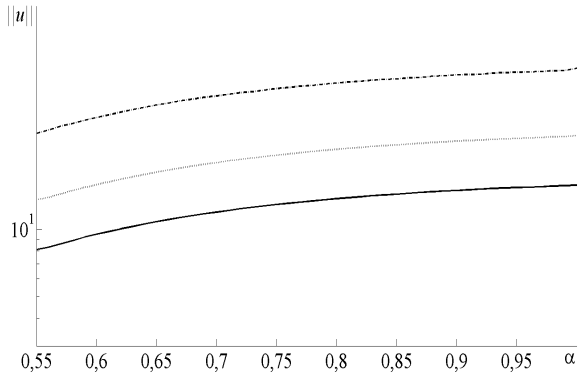


Рисунок 3. – Одномерная система с распределёнными параметрами. Зависимость нормы управления от показателя дробного дифференцирования в случае локального граничного управления. По оси ординат – логарифмическая шкала.

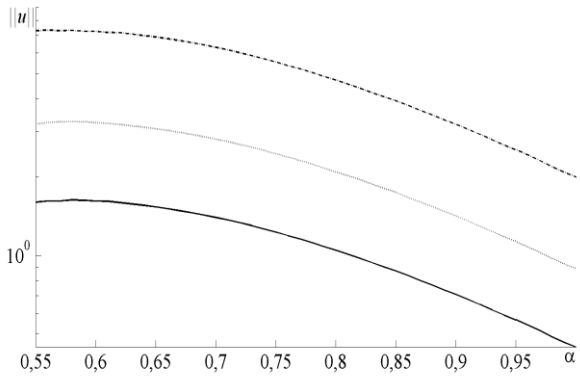


Рисунок 4. – Одномерная система с распределёнными параметрами. Зависимость нормы управления от показателя дробного дифференцирования в случае нелокального граничного управления. По оси ординат – логарифмическая шкала.

На рис. 3-4 представлены зависимости нормы управления от показателя дифференцирования α для случаев локального и нелокального граничного управления при различных значениях Q^T: $Q^T = 30$ (сплошная линия), $Q^T = 50$ (пунктирная линия), $Q^T = 100$ (штрихпунктирная линия). Остальные параметры заданы следующим образом: $Q_0 = 10$, $L = 1$, $T = 100$. Видно, что зависимости имеют качественно различный характер в случаях локального и нелокального управления. При этом в обоих случаях наблюдается одинаковая тенденция: норма управления растёт при увеличении разности $Q^T - Q_0$. На рис. 5-6 приведены временные зависимости локального и нелокального управлений при различных значениях показателя дифференцирования: $\alpha = 0.6$ (сплошная линия), $\alpha = 0.8$ (пунктирная линия), $\alpha = 0.9$ (штрихпунктирная линия).

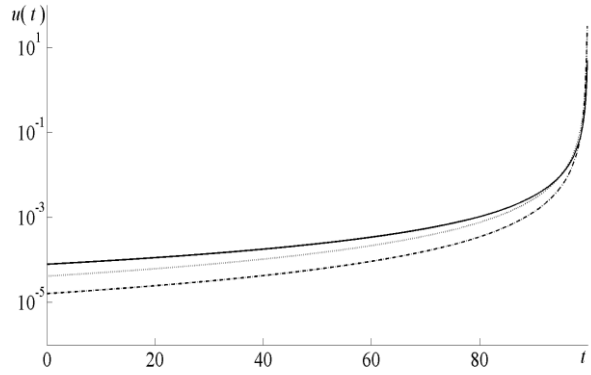


Рисунок 5. – Одномерная система с распределёнными параметрами. Временная зависимость управления при различной величине показателя дробного дифференцирования в случае локального граничного управления. По оси ординат – логарифмическая шкала.

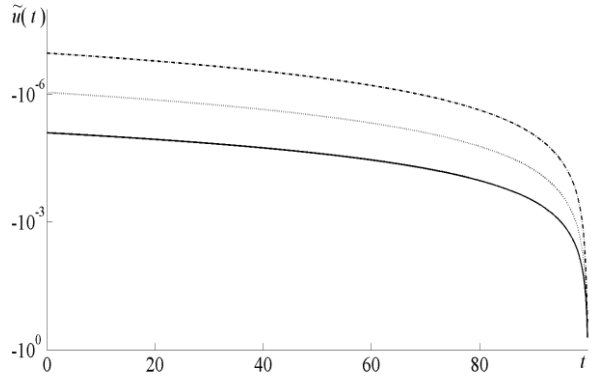


Рисунок 6. – Одномерная система с распределёнными параметрами. Временная зависимость управления при различной величине показателя дробного дифференцирования в случае нелокального граничного управления. По оси ординат – логарифмическая шкала.

Заключение

В данной работе представлены результаты исследования задачи оптимального управления для динамических систем, описываемых произвольным числом линейных дифференциальных уравнений дробного порядка с постоянными коэффициентами. Рассмотрены системы как с сосредоточенными, так и с распределёнными параметрами. При этом полагается, что допустимые управления принадлежат классу $L_p[0,T]$, $p>1$. Обоснована возможность сведения исследуемой задачи к форме проблемы моментов, для которой выведены условия, определяющие возможность её постановки и разрешимость. Показана применимость процедур поиска оптимального управления, применяемых для задач оптимального управления в форме проблемы моментов. Рассмотрен ряд примеров систем нецелого порядка, для которых явно построено оптимальное управление.

Полученные результаты могут быть использованы в задачах оптимального управления различными системами нецелого порядка, такими как вязкоупругие материалы, неупорядо-

ченные и сильно неоднородные полупроводники и/или плазмоподобные среды, электрохимические среды естественного и искусственного происхождения. При этом полученные в настоящей работе результаты могут быть применимы при ограничениях на норму управления и разрывных управлениях.

Список литературы

[1] Учайкин В.В., Метод дробных производных. – Ульяновск: Артишок, 2008.
[2] Applications of Fractional Calculus in Physics / Ed. R. Hilfer. – Singapore: World Scientific, 2000.
[3] Podlubny I., Fractional Differential Equations. – San Diego: Academic Press, 1999.
[4] Caponetto R., Dongola G., Fortuna L. et al., Fractional Order Systems. Modeling and Control Applications. – Singapore: World Scientific, 2010.
[5] Monje C.A., Chen Y.Q., Vinagre B.M. et al., Fractional-order Systems and Controls: Fundamentals and Applications. – London: Springer-Verlag, 2010.
[6] Бутковский А.Г., Постнов С.С., Постнова Е.А. Дробное интегро-дифференциальное исчисление и его приложения в теории управления. II. Дробные динамические системы: моделирование и аппаратная реализация // Автоматика и Телемеханика. – 2013. – № 5. – С. 3-34.
[7] Agrawal O.P. A General Formulation and Solution Scheme for Fractional Optimal Control Problems // Nonlin. Dyn. – 2004. – V. 38. – P. 323–337.
[8] Agrawal O.P. A Formulation and Numerical Scheme for Fractional Optimal Control Problems // J. Vibr. Control. – 2008. – V. 14, No. 9–10. – P. 1291–1299.
[9] Frederico G.S.F., Torres D.F.M. Fractional Conservation Laws in Optimal Control Theory // Nonlin. Dyn. – 2008. – V. 53. – P. 215–222.
[10] Красовский Н.Н., Теория управления движением. – М.: Наука, 1968.
[11] Бутковский А.Г., Методы управления системами с распределёнными параметрами. – М.: Наука, 1975.
[12] Кубышкин В.А., Постнов С.С. Задача оптимального управления линейной стационарной системой дробного порядка: постановка и исследование // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 5. – С. 3-17.
[13] Kubyshkin V.A., Postnov S.S. The optimal control problem for linear systems of non-integer order with lumped and distributed parameters // Discontinuity, Nonlinearity and Complexity. – 2015 (in press).
[14] Кубышкин В.А., Постнов С.С. Исследование задачи оптимального управления для одиночного и двойного интеграторов дробного порядка с помощью метода моментов при поиске допустимых управлений // Проблемы управления. – 2013. – № 3. – С. 9-17.
[15] Кубышкин В.А., Постнов С.С. Исследование двух задач оптимального управления маятником дробного порядка с помощью метода моментов // Проблемы управления. – 2014. – № 3. – С. 14-22.
[16] Кубышкин В.А., Финягина В.И., Подвижное управление в системах с распределёнными параметрами. – М.: Синтег, 2005.
[17] Kilbas A.A., Srivastava H.M., Trujillo J.J., Theory and applications of fractional differential equations. – Amsterdam: Elsevier, 2006.
[18] Tomovski Z., Sandev T. Exact solutions for fractional diffusion equation in a bounded domain with different boundary conditions // Nonlin. Dyn. – 2013. – Vol. 71. – P. 671-683.
[19] Фельдбаум А.А. Оптимальные процессы в системах автоматического регулирования // Автоматика и телемеханика. – 1953. – Т. 14, № 6. – С. 712-728.

КОЛЛЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ В СОСТАВЕ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ

В.И. Меркулов, Д.А. Миляков, И.О. Самодов

АО «Концерн «Вега»
121170, Москва, Кутузовский проспект, 34, Россия
from_fn@mail.ru
тел: +7 (499) 753-40-04

Ключевые слова: *теория оптимального управления, групповое управление, беспилотные летательные аппараты, локальная сеть.*

Abstract

On the basis of the mathematical apparatus of the statistical theory of optimal control law is synthesized collective management of unmanned aerial vehicles as part of the local network. Assessed the effectiveness of the proposed law.

Для решения целого ряда задач в оборонной и народно–хозяйственной сферах часто применяются беспилотные летательные аппараты (БЛА). Такие задачи, как фото– и видеосъемка лесных массивов, мониторинг состояния ледовой обстановки на реке и т.п., успешно реализуются одиночными БЛА. Однако обследование больших по площади объектов, таких как морская акватория и обширные лесные массивы, одиночными БЛА реализовать затруднительно. Поэтому в этих случаях применяются группы, состоящие из нескольких БЛА. При этом возникает задача управления группой БЛА, которая значительно сложнее, чем управление одиночным БЛА. Это следует из того, что помимо управления полетом и действиями собственно БЛА необходимо обеспечить определенную взаимосвязь и согласовать его действия с другими участниками группы при выполнении поставленной задачи.

Управление БЛА в составе группы может осуществляться различными способами: централизованным управлением, управлением с «лидером» и децентрализованным управлением группой БЛА, включающим стайное и коллективное управление с сетевым взаимодействием [1]. При этом одним из самых эффективных является коллективное управление с сетевым информационным взаимодействием между объектами [2].

Основным принципом сетевого взаимодействия является возможность для любого элемента получать информацию от любого другого участника группы [2]. Ряд проведенных теоретических исследований [3, 4, 5] показали возможность оптимального группового взаимодействия. Однако они продемонстрировали необходимость принятия специальных мер по предотвращению столкновений БЛА в процессе группового полета с заданной топологией.

Кроме того, следует подчеркнуть, что использование традиционных подходов к синтезу группового управления на основе классических алгоритмов [6, 7] с использованием в качестве модели состояния всей группы будет затруднено сложностью формулирования коллективного интереса и очень высокими требованиями к вычислительной производительности.

Цель работы — разработка и исследование одного из возможных вариантов группового управления БЛА при движении по требуемым траекториям с сохранением заданной топологии со сниженными требованиями к вычислительной производительности.

В работе использовались следующие допущения:

- каждый агент (БЛА) группы самостоятельно формирует свое управление в текущей ситуации;

- формирование управления агент группы осуществляет на основе информации о цели, стоящей перед группой, о своем состоянии и состоянии других объектов;
- в качестве оптимального понимается такое управление каждым БЛА в текущей ситуации, которое вносит максимально возможный вклад в достижение общей цели, т.е. обеспечивает максимальное приращение общего функционала качества при переходе группы из текущего состояния в конечное [6, 7].

В рамках сетевого подхода на основе локальной оптимизации был получен алгоритм траекторного управления каждым *i*-м БЛА группы ($i = \overline{1, N}$), *r*-мерный сигнал управления для которого имеет вид:

$$(1) \quad \mathbf{u}_i = \mathbf{K}^{-1}{}_i \, \mathbf{B}_i^T \left\{ \mathbf{Q}(\hat{\mathbf{x}}_{Ti} - \hat{\mathbf{x}}_{yi}) + \sum_{j=1, j\neq i}^{N} \mathbf{G}(\Delta \hat{\mathbf{x}}_{Tij} - \Delta \hat{\mathbf{x}}_{yij}) \right\},$$

где x_j, $j = \overline{1, N}$, $j \neq i$ – векторы состояния других БЛА группы; $\mathbf{K}_i$ – положительно определенная матрица размером $r \times r$ штрафов за величину сигналов управления; $\mathbf{B}_i$ – матрица эффективности сигналов управления u_i; $\mathbf{Q}$ – матрицы размером $n \times n$ штрафов за точность приближения x_{yi} к x_{Ti} в конечный момент времени $t_к$, $\mathbf{G}$ – матрица размером $n \times n$ штрафов за нарушение требуемого соотношения между x_i и x_j в конечный моменты времени; $\Delta \hat{\mathbf{x}}_{Tij} = \hat{\mathbf{x}}_{Ti} - \hat{\mathbf{x}}_{Tj}$, $\Delta \hat{\mathbf{x}}_{yij} = \hat{\mathbf{x}}_{yi} - \hat{\mathbf{x}}_{yj}$, $j = \overline{1, N}$, $j \neq i$.

Принципиальным отличием полученного алгоритма от классического является возможность учета при синтезе управления i-м объектом состояния остальных j-х объектов при существенно меньших вычислительных затратах. Так, при использовании классического способа синтеза в постановке Летова-Калмана [8] для формирования сигналов управления в векторно-матричных представлениях необходимо решать систему уравнений большой размерности. Между тем, процедуру коллективного управления можно существенно упростить, если использовать оптимизацию по минимуму локального функционала качества [8], при которой каждый момент времени рассматривается как момент возможного окончания управления.

Для реализации предложенного алгоритма управления в работе на основе принятых допущений разработана математическая модель движения трех БЛА, полет каждого из которых осуществляется по законам индивидуального и коллективного управлений.

При помощи моделирования проведено исследование эффективности закона группового управление, приведено сравнение его с индивидуальным законом. В качестве показателей эффективности использовались линейные ошибки вывода БЛА в требуемые точки, ошибки управления по угловым координатам, а также время регулирования.

Пример траекторий совместного полета при случайных начальных условиях проиллюстрирован рисунком.

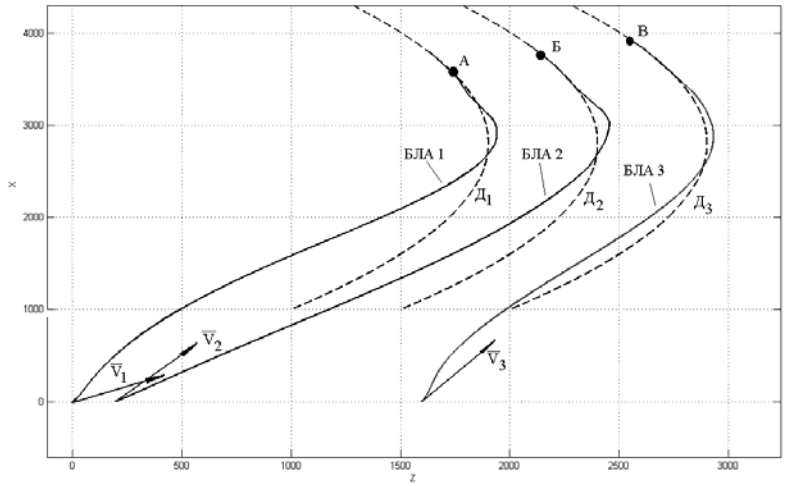


Рисунок 1 — Траектории полета группы беспилотных летательных аппаратов по криволинейным траекториям

Выводы

Результаты работы показали, что синтезированный алгоритм коллективного управления, по сравнению с алгоритмом индивидуального наведения, обеспечивает адекватное управление группой как по линейным, так и по угловым координатам, реализуя более высокую безопасность совместного полета, в том числе и при полете по сложным траекториям.

Список литературы

[1] Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 280 с.
[2] Верба В.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В. и др. Оценивание дальности и ско-рости в радиолокационных системах. Ч.3. / Под ред. В.С. Вербы и В.И. Меркулова. — М.: Радиотехника, 2010.
[3] Верба В.С., Меркулов В.И., Самодов И.О. Управление беспилотными летательными аппаратами в составе локальной сети. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2014. №3.
[4] Харьков В.П., Меркулов В.И. Синтез алгоритма иерархического управления группой беспилотных летательных аппаратов. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. №8.
[5] Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Концепция построения систем коллективного управления беспилотными летательными аппаратами. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. №7.
[6] Ройтенберг Я.Н. Автоматическое управление. – М.: Наука, 1992.
[7] Брайсон А., Хо Юши. Прикладная теория оптимального управления. Пер. с англ. – М.: Мир,1972.
[8] Меркулов В.И., Дрогалин В.В., Лепин В.Н. и др. Авиационные системы радиоуправления. Т.1. Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа. / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003.

МНОГОЦЕЛЕВОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ В ДВУХДИАПАЗОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В.И. Меркулов, П.А. Садовский

Акционерное общество «Концерн радиостроения «Вега»
121170, г. Москва, Кутузовский пр-т, д. 34, Россия
mail@vega.su
тел: +7 (499) 753-40-04

Ключевые слова: *многоцелевое сопровождение, многодиапазонные радиолокационные системы, комплексная обработка информации*

Abstract

The paper proposes new variant of multi-target tracking for dual-band airborne radars based on strobe-less identification and adaptive analog-discrete estimation. The performance of the proposed algorithms is evaluated to prove the advantages over existing algorithms.

Введение

Одним из наиболее эффективных способов улучшения тактических показателей радиолокационных систем мониторинга окружающей среды является одновременное использование нескольких диапазонов излучения. Однако для полноценного использования всех преимуществ многодиапазонных систем необходимо дополнительно решить ряд задач, возникающих в процессе обработки сигналов при многоцелевом сопровождении (МЦС).

Процедура многоцелевого сопровождения [1,2] выполняется в несколько этапов, включающих: завязку траектории, экстраполяцию координат состояния, отождествление поступающих измерений с конкретными целями и коррекцию результатов экстраполяции по результатам отождествлённых измерений. Полученные в ходе выполнения этих операций текущие оценки координат состояния целей и передаются потребителю.

Значительное усложнение обработки на всех этапах МЦС особенно характерно для этапа отождествления измерений.

Ключевым этапом работы РЛС в режиме МЦС является идентификация (отождествление) измерений — процедура принятия решения об их принадлежности определённой цели. Наиболее распространенным способом идентификации в существующих РЛС является отождествление измерений в пространственных стробах, формируемых относительно результатов экстраполяции измеряемых координат на следующий такт работы [1,2]. Существенным недостатком идентификации результатов измерений в стробах отождествления является большой размер стробов, определяющий существенное ухудшение разрешающей способности и относительно низкую её достоверность при сопровождении маневрирующих целей [1].

При применении в многодиапазонных системах недостатки стробового отождествления усугубляются тем, что в различных диапазонах используются стробы различных размеров.

Перспективным направлением решения этих проблем является использование бесстробовых методов идентификации, в частности, основанных на формировании решающего правила по минимуму того или иного квадратичного функционала [1].

Экстраполяция пространственного положения при сопровождении большого числа целей как правило осуществляется по упрощённым моделям (на основе гипотезы движения с постоянными скоростями), что приводит к существенному возрастанию ошибок прогноза, особенно при сопровождении маневрирующих целей для РЛС с большим интервалом обращения к цели.

Для снижения ошибок экстраполяции можно использовать либо адаптивные к манёвру алгоритмы фильтрации, либо многогипотезное сопровождение, при котором каждая цель одновременно экстраполируется по нескольким гипотезам (как правило, трём) с дальнейшим вычислением достоверности каждой из них. Второй вариант предопределяет многократное возрастание требований к вычислительной производительности.

На этапе фильтрации в существующих алгоритмах совместной обработки [2,3] используются методы, основанные на использовании классических α, β-фильтров, недостатком которых являются низкая точность, недостаточная для выдачи команд целеуказаний средствам поражения, и редкая передача результатов оценивания потребителям.

Более адекватным является использование адаптивных алгоритмов фильтрации [1,4]. Среди этих алгоритмов наиболее приспособленным для МЦС являются алгоритмы адаптивной аналого-дискретной фильтрации с текущей экстраполяцией в интервалах между приходом измерений [1], в которых, в зависимости от ситуации, автоматически изменяются либо параметры, либо структура фильтров.

Многоцелевое сопровождение в двухдиапазонных РЛС

Целью работы было получение алгоритмов функционирования системы многоцелевого сопровождения для двухдиапазонной импульсно-доплеровской РЛС с круговым обзором, основанных на бесстробовом отождествлении измерений и адаптивной аналого-дискретной фильтрации с коррекцией коэффициентов усиления невязки. При этом полагалось, что

- антенны диапазонов имеют одинаковые размеры и направлены в противоположные стороны;
- измерения для каждого диапазона приходят с интервалом $2T$ и сдвигом T относительно друг друга;
- несущие частоты передатчиков диапазонов отличаются в несколько раз;
- этап завязки траекторий уже выполнен известными способами [1,2];
- выполняется оценка координат на основе моделей состояния

$$(1)\quad \begin{aligned} x_i(k) &= x_i(k-1) + \dot{x}_i(k-1)\tau, \\ \dot{x}_i(k) &= \dot{x}_i(k-1), \end{aligned}$$

и измерений для каждого канала измерения

$$(2)\quad z_{j,i}(k) = Q_{zi}\left[x_i(k) + \xi_{j,\text{и}i}\right],$$

где x_i и $\dot{x}_i$ – i-я оцениваемая координата состояния и её производная, Q_{zi} — признак наличия измерений; $z_{j,i}$ — измерения i-й координаты состояния для j-го диапазона ($j = 1,2$), а $\xi_{j,\text{и}i}$ — возмущения этих измерений, характеризуемые гауссовским шумом с дисперсиями $D_{j,\text{и}i}$; $\tau = T$ — шаг экстраполяции.

Алгоритм бесстробовой идентификации измерений

Для повышения достоверности отождествления при малых расстояниях между целями и при их движении по пересекающимся траекториям необходимо кроме текущей разности измерений и прогноза учитывать предысторию их движения, что можно реализовать путём использования информации о скорости целей на предыдущих тактах измерений. С учётом этого, в качестве функционала качества отождествления можно использовать квадратичный функционал вида

$$(3)\quad I_p = \sum_{i=1}^{m} \frac{\Delta z_{j,pi}^2(k)}{D_{j,\text{и}i}} + 2T^2 \sum_{i=1}^{m} \frac{\left[\hat{\dot{z}}_{j,i}(k) - \hat{\dot{x}}_{pi}(k)\right]^2}{D_{1,\text{и}i} + D_{2,\text{и}i}},$$

где $p \in [1, N_{\text{ц}}]$ — номер траектории (цели), для которой рассчитывается функционал качества, $N_{\text{ц}}$ — количество отслеживаемых целей; $\Delta z_{j,pi}$ — невязки измерений, формируемые по правилу

(4) $\Delta z_{j,pi} = z_{j,i}(k) - Q_{zi} x_{\text{э},pi}(k),$

$x_{\text{э},pi}$ — экстраполируемое значение i-й координаты для p-й отслеживаемой цели; m — число измеряемых координат; $D_{j,\text{и}i}$ — дисперсии ошибок измерений i-й координаты для j-го диапазона; $\hat{\dot{z}}_{j,i}(k)$ — оценка скорости изменения измерений i-й координаты для j-го диапазона по правилу $\hat{\dot{z}}_{j,i}(k) = \left[z_{j,i}(k) - z_{j,i}(k-2) \right] / 2T$; $\hat{\dot{x}}_{pi}$ — оценка скорости изменения i-й фазовой координаты с предыдущего такта.

Решение о принадлежности полученных измерений той или иной из сопровождаемых целей (с номером p^*) принимается по минимальному значению функционалов (3), определяемому в процессе их перебора:

(5) $p^* = \arg \min_{p=\overline{1,N_{\text{ц}}}} I_p.$

Принципиальными отличиями предлагаемого метода от существующих методов бесстробового сопровождения, используемых в однодиапазонных РЛС [1], является учёт различающихся показателей точности используемых диапазонов и предыстории движения при формировании функционалов качества (3) с помощью весовых коэффициентов $\frac{1}{D_{j,i}}$ и малых скоростных отличий цели (второе слагаемое) в соседних тактах.

Алгоритм адаптивной аналого-дискретной фильтрации

Для предлагаемой системы обработки сигналов был выбран способ адаптивной аналого-дискретной α, β-фильтрации с коррекцией коэффициента усиления невязки [3], инвариантный к изменению интервала прихода измерений:

(6) $x_i(k) = x_{i\text{э}}(k) + \alpha_{xi}(k) \Delta z_i(k),$

(7) $\hat{\dot{x}}_i(k) = \hat{\dot{x}}(k-1) + \frac{\beta_{xi}(k)}{T} \Delta z_i(k),$

(8) $x_{i\text{э}}(k) = \hat{x}_i(k-1) + \hat{\dot{x}}_i(k-1)\tau,$

(9) $$\alpha_{xi}(k) = \begin{cases} \left| \frac{\Delta z_i^2(k) - D_{\xi\text{и}i}}{\Delta z_i^2(k)} \right|, & |\Delta z_i(k)| > \Delta z_{i0}, \\ \alpha_{xi0}, & |\Delta z_i(k)| \le \Delta z_{i0}, \end{cases}$$

(10) $\beta_{xi}(k) = \frac{\alpha_{xi}(k) \beta_{xi0}}{\alpha_{xi0}};$

Здесь Δz_i — невязка измерений i-й координаты состояния и её экстраполированных значений $x_{i\text{э}}$, формируемая по правилу (4) с интервалом T, а Δz_{i0} — некоторое пороговое значение невязки, при превышении которого включается механизм коррекции коэффициентов усиления по правилам (9), (10), α_{xi0}, β_{xi0} — некоторые начальные значения коэффициентов усиления невязок.

Отличием от существующих в настоящее время способов α,β-фильтрации является использование текущей экстраполяции в промежутках между приходами измерений, адаптивных изменений коэффициентов фильтрации (9), (10) в зависимости от значения невязок измерений, а также поочерёдное использование измерений разных диапазонов для коррекции общего прогноза.

Оценка эффективности системы многоцелевого сопровождения

Оценка эффективности полученных алгоритмов многоцелевого сопровождения выполнялась по результатам имитационного моделирования полёта носителя РЛС и двух целей, формирования измерений (2), алгоритмов идентификации (3), экстраполяции (1) и аналого-дискретной фильтрации (6)-(8). Моделирование проводилось при следующих предположениях: носитель РЛС и две цели расположены в одной плоскости, при этом цели отстоят друг от друга на расстояние $Д_0$ и движутся с курсами $\psi_{ц1}=135\ °$ и $\psi_{ц2}=225\ °$ с одинаковыми скоростями $V_{ц1}=V_{ц2}=1{,}8V_0$, в то время как носитель РЛС движется с курсом $\psi_{АК}=90\ °$ со скоростью $V_Н=V_0$. РЛС носителя измеряет дальности до целей, скорости сближения с ними и углы визирования в горизонтальной плоскости.

Графики изменения относительных координат целей с борта носителя РЛС (*а* — дальностей, *б* — скоростей сближения, *в* — углов визирования в горизонтальной плоскости) приведены на рис. 1 (цели 1 и 2 — штрихпунктирная и штриховая кривые соответственно).

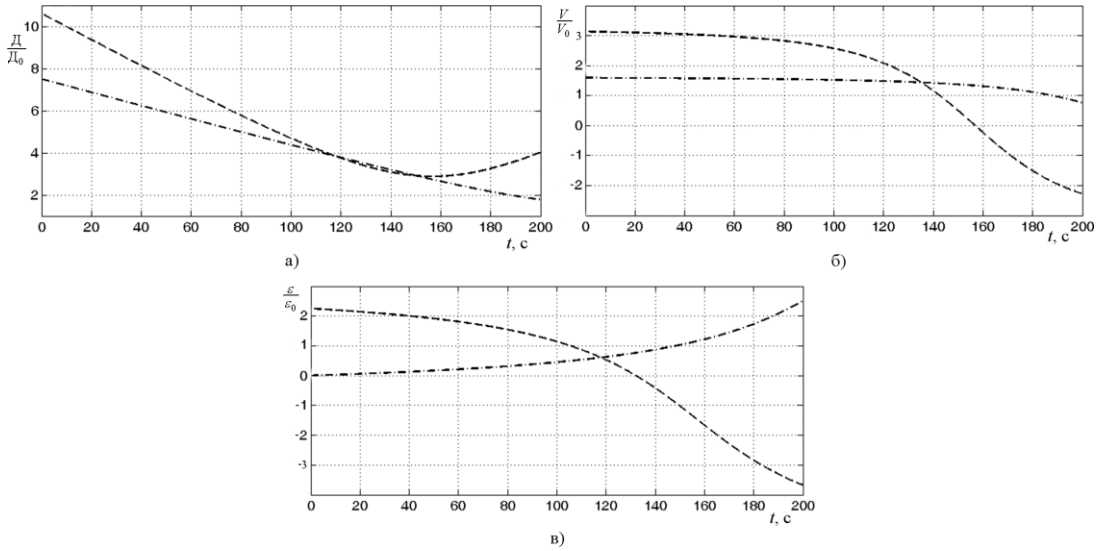


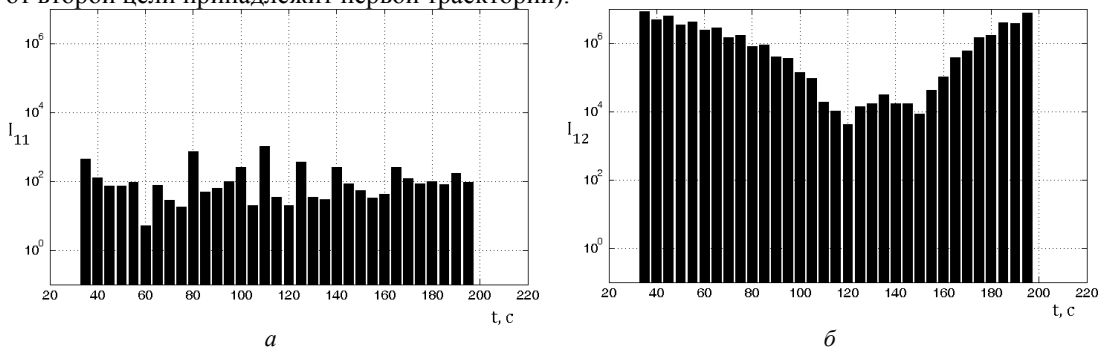
Рисунок 1 — Изменение координат состояния целей по времени

В процессе моделирования предполагалось, что среднеквадратичное отклонение (СКО) ошибок измерений для первого и второго диапазонов составляет соответственно: $\sigma_{Д1}=\sigma_Д$, $\sigma_{Д2}=1{,}5\sigma_Д$, $\sigma_{V1}=\sigma_V$, $\sigma_{V2}=1{,}25\sigma_V$, $\sigma_{\varphi 1}=\sigma_\varphi$, $\sigma_{\varphi 2}=3\sigma_\varphi$.

В качестве показателей эффективности алгоритмов использовались чувствительность функционалов качества к приходу измерений от другой цели, определяемая разностью их значений, математическое ожидание и СКО ошибок оценивания координат, а также вероятность правильной идентификации измерений.

Для оценки чувствительности исследовалось поведение функционалов качества для различных гипотез. На рис. 2 приведены полученные графики величины некоторых функциона-

лов I_{11} (*а* — измерения от первой цели принадлежит первой траектории) и I_{12} (*б* — измерения от второй цели принадлежит первой траектории).



а *б*

Рисунок 2 — Значения функционалов для различных гипотез

Из рисунка 2 видно, что функционалы реагируют на ошибки измерений, при этом даже при пересечении траекторий значения функционалов, соответствующих корректной гипотезе (I_{11}) были как минимум на два порядка меньше, чем для некорректной (I_{12}), что подтверждает высокую чувствительность функционала к измерениям, приходящим от других целей.

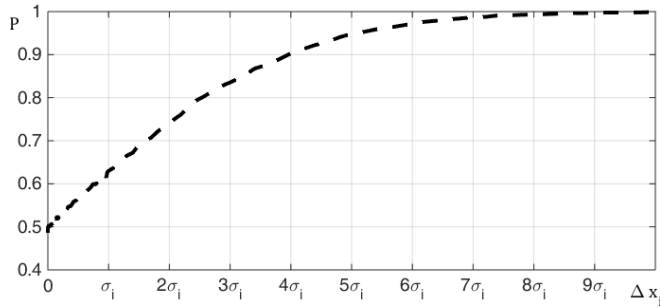
Усреднённые результаты оценок ошибок алгоритма аналого-дискретной фильтрации для измерений дальности приведены в табл. 1.

Таблица 1 — Показатели эффективности алгоритма аналого-дискретной фильтрации

Показатель	**Фильтр**		
	Адаптивный	α, β **для диап. 1**	α, β **для диап. 2**
	Канал измерений дальности		
Относ. мат. ожидание, м	1	9,67	10,40
Относ. СКО, м	1	3,11	3,60

Предлагаемый алгоритм адаптивной аналого-дискретной фильтрации позволяет существенно (в несколько раз) повысить точность слежения за маневрирующей целью по сравнению с использованием независимой фильтрации с периодом $2T$.

На рис. 3 приведена зависимость вероятностей принятия правильного решения о приходе измерений от другой цели от разности значений их координат состояния.



Величина σ_i определяется как $\sigma_i = \min\{\sigma_{1,ui}, \sigma_{2,ui}\}$ для каждого канала измерений

Рисунок 3 — Зависимость вероятности правильной идентификации измерений от разности координат

Следует отметить, что полученные значения разности координат $3\sigma_i \ldots 4\sigma_i$ для вероятности принятия правильного решения $P \approx 0,9$ на порядок ниже, чем аналогичные значения для стробовых методов идентификации ($10\sigma_i \ldots 20\sigma_i$).

Заключение

Предложенный метод многоцелевого сопровождения для двухдиапазонных систем обеспечивает непрерывную выдачи существенно более точных текущих оценок координат целей по достаточно редким (дискретным) и неодновременно поступающим сигналам двухдиапазонной РЛС. При этом синтезированный метод бесстробовой идентификации по достоверности отождествления существенно превосходит классический метод идентификации в стробах, особенно для маневрирующих целей, и практически не накладывает ограничений на потенциальную разрешающую способность, определяемую длительностью импульса и шириной диаграммы направленности антенны; а алгоритм адаптивной аналого-дискретной фильтрации позволяет существенно повысить точность и устойчивость слежения за маневрирующими целями.

Совместное использование полученных алгоритмов приводит к качественному улучшению точности и достоверности систем многоцелевого сопровождения, с выигрышем по точности функционирования до 5…7 раз по сравнению с существующими системами многоцелевого сопровождения.

Важным преимуществом полученной системы является отсутствие каких-либо ограничений на возможность её реализации, что позволяет существенно улучшить характеристики существующих следящих радиолокационных систем.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-08-04000-а.

Список литературы

[1] Ярлыков М. С., Богачев А. С., Меркулов В. И., Дрогалин В. В. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Т. 2. Применение авиационных радиоэлектронных комплексов при решении боевых и навигационных задач. / Под ред. М. С. Ярлыкова. — М. : Радиотехника, 2012. — 256 с.

[2] Справочник по радиолокации. Кн. 1 / Под ред. М. И. Сколника. Пер. с англ. под общей ред. В. С. Вербы. — М. : Техносфера, 2014. — 672 с.

[3] Ярлыков М. С., Богачев А. С., Меркулов В. И., Дрогалин В. В. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Т. 1. Теоретические основы. / Под ред. М. С. Ярлыкова. — М. : Радиотехника, 2012. — 504 с.

[4] Бар-Шалом Я., Ли Х.-Р. Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы. Часть 2. / Пер. с англ. Д. Д. Дмитриева. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. — 239 с.

МИНИМАКСНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ В НЕПОЛНОСТЬЮ ОПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Э.Я. Рапопорт

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
cscmp@iccs.ru
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *системы с распределенными параметрами, минимаксная оптимизация, программное управление, обратная связь, множественные возмущения, интервальные неопределенности, альтернансный метод*

Abstract

The constructive technique is suggested for synthesis and on-line realization of parameterized program optimal control actions to trajectory ensemble in feedback systems. Not fully determined distributed parameters systems of parabolic types are under consideration. The method is based on the procedure of reduction to the semi-infinite optimization problems, on the alternance properties of the problem' solutions, and on the additional information about fundamental regularities of the application domain.

Введение

Одной из центральных проблем современной теории управления является фундаментальная задача построения автоматических регуляторов для неполностью определенных динамических систем, функционирующих в реальных условиях воздействия множественных возмущений, вся информация о которых исчерпывается информацией об их предельно допустимых значениях [1-5].

Конструктивный подход к решению указанной проблемы состоит в переходе от трудноразрешимой задачи прямого синтеза алгоритма обратной связи к его программной реализации в реальном масштабе времени [1, 4, 5]. Согласно этому способу, текущие состояния объекта, оцениваемые по измеряемым сигналам обратных связей в заранее задаваемые моменты времени, рассматриваются в качестве известных начальных состояний при построении в соответствии со стратегией гарантированного результата оптимальных программных управляющих воздействий для порождаемых неопределенными факторами моделей системы на последующих стадиях процесса управления.

В итоге, проблема синтеза сводится с использованием регулярных процедур принципа максимума к последовательному решению в реальном времени ряда задач оптимального программного управления ансамблями траекторий движения объекта, образуемыми при фиксируемых обратными связями начальных состояниях всеми допустимыми значениями множественных возмущений на соответствующих временных интервалах их реализации [1, 4, 5].

В настоящей работе исследуются возможности распространения способа программной реализации обратных связей на представляющие самостоятельный интерес параметризуемые задачи оптимизации не полностью определенных линейных бесконечномерных систем с распределенными параметрами (СРП) параболического типа [7-10]. В этих целях используется конструктивный метод [10-15] построения оптимальных программных управлений ансамблями траекторий СРП с чебышёвскими оценками целевых множеств управляемой системы [16].

1 Постановка задачи и общий метод ее решения

Пусть управляемая функция состояния $Q(x,t)$ не полностью определенного объекта с распределенными параметрами описывается в зависимости от пространственной координаты $x \in [x_0, x_1]$ и времени t пространственно одномерным линейным уравнением второго порядка в частных производных параболического типа с самосопряженным дифференциальным оператором в его правой части

$$(1)\quad A\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} = B(x)\frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} + C(x)\frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2} + C_1(x)Q(x,t) + f_0(x)u^1(t) + f_1(x)\eta_1(t)$$
$$x_0 < x < x_1,\ t_* < t \le t^*$$

с начальными и граничными условиями

$$(2)\quad Q(x,t_*) = Q_0 = \text{const},\ x_0 \le x \le x_1;$$

$$(3)\quad \alpha_0 Q(x_0,t) + \beta_0\frac{\partial Q(x_0,t)}{\partial x} = 0;\ \alpha_1 Q(x_1,t) + \beta_1\frac{\partial Q(x_1,t)}{\partial x} = u^0(t) + \eta_2(t),\ t_* \le t \le t^*;$$

при сосредоточенном внутреннем или граничном управляющих воздействиях соответственно $u^1(t)$ или $u^0(t)$, заданных достаточно гладких функциях $f_0(x)$, $f_1(x)$, $B(x)$, $C(x)$, $C_1(x)$; положительных постоянных коэффициентах $A, \alpha_0, \beta_0, \alpha_1, \beta_1$; неопределенном начальном состоянии Q_0 и кусочно-непрерывных возмущениях $\eta_1(t), \eta_2(t)$.

Вся априорная информация о векторе $w(t) = (Q_0, \eta_1(t), \eta_2(t))$ неопределенных факторов исчерпывается заданными границами диапазона их возможных изменений:

$$(4)\quad Q_{0\min} \le Q_0 \le Q_{0\max};$$

$$(5)\quad \eta_{1\min} \le \eta_1(t) \le \eta_{1\max};\ \eta_{2\min} \le \eta_2(t) \le \eta_{2\max},\ t \in [t_*, t^*].$$

Управляющие воздействия должны быть подчинены ограничениям

$$(6)\quad u^1_{\min} \le u^1(t) \le u^1_{\max},\ u^0_{\min} \le u^0(t) \le u^0_{\max},\ t \in [t_*, t^*].$$

Каждому из возможных значений $w(t)$ в допустимой согласно (4), (5) области W э $w(t)$ их изменения отвечает при любом управляющем воздействии $u(t) \in \{u^0(t), u^1(t)\}$, удовлетворяющем условиям (6), определяемая решением системы уравнений (1) – (3) траектория процесса $Q(x,u,w,t_*,t),\ t \in [t_*, t^*]$, с конечным состоянием $Q(x,u,w,t_*,t^*)$ объекта (1) – (6).

Пусть необходимо обеспечить за время $t^* - t_*$ приближение к требуемому пространственному распределению управляемой величины $Q^{**}(x)$ с заданной достижимой величиной $\varepsilon_0 > 0$ абсолютной погрешности для всех возможных реализаций $w(t)$ согласно соотношению

$$(7)\quad \max_{x\in[x_0,x_1]}\left|Q(x,u,w,t_*,t^*) - Q^{**}(x)\right| \le \varepsilon_0,\ w \in W,$$

определяющему целевое множество допустимых конечных состояний СРП с оценкой ε_0 отклонения от $Q^{**}(x)$ в равномерной метрике [10-16].

Пусть далее качество процесса управления объектом (1) – (6) характеризуется интегральным функционалом

$$I(u,w,t_*,t^*) = \int_{t_*}^{t^*}\int_{x_0}^{x_1} P_1(Q(x,u,w,t_*,t),u(t),x,t)\,dx\,dt +$$

(8)

$$+ \int_{t_*}^{t^*} P_0(Q(x_c,u,w,t_*,t),u(t),x_c,t)\;dt, w(t)\in W,$$

где P_0 и P_1 - заданные достаточно гладкие функции своих аргументов и $x_c \in [x_0,x_1]$ - заданное фиксированное значение пространственной координаты.

Будем считать, что с целью формирования необходимых обратных связей для построения оптимальных по величине $I(u,w,t_*,t^*)$ в (8) регуляторов доступно безынерционное неточное измерение $Q_g(x,t)$ состояния $Q(x,t)$ с кусочно-непрерывной ошибкой $\mu(t)$

(9) $Q_g(x,t) = Q(x,t) + \mu(t),\ x\in[x_0,x_1],\ t\in[t_*,t^*],\ \mu_{\min} \le \mu(t) \le \mu_{\max}$,

удовлетворяющей неравенствам в (9) с заданными границами $\mu_{\min}$ и $\mu_{\max}$.

Имеющая самостоятельное значение проблема измерения $Q_g(x,t)$ может быть решена путем построения известными способами специализированных наблюдателей состояния СРП.

Задача состоит в том, чтобы независимо от конкретных реализаций неопределенных факторов в (4), (5), (9) в соответствии со стратегией гарантированного результата обеспечить с использованием доступной информации $Q_g(x,t)$ о текущих состояниях объекта (1) – (6) его перевод в требуемое конечное состояние (7) с помощью стесненных ограничениями (6) управляющих воздействий при минимальном значении критерия оптимальности

(10) $I_1(u,t_*,t^*) = \max\limits_{w\in W} I(u,w,t_*,t^*) \to \min\limits_{u}$.

Решение задачи (1) – (10) в форме синтеза априори фиксируемого алгоритма оптимального управления $u(Q_g(x,t)),\ t\in[t_*,t^*]$, с обратными связями связано с серьезными затруднениями теоретического и вычислительного характера [5].

Возможный путь их преодоления состоит в переходе от трудноразрешимой проблемы синтеза уравнения регулятора $u(Q_g(x,t))$ к поиску реализующей искомый закон регулирования последовательности программных оптимальных управляющих воздействий $u_k^*(t)$, $t\in[t_k,t^*],\ t_*\le t_k < t^*$, для каждого из которых начальное на интервале $[t_k,t^*]$ состояние объекта $Q(x,u,w,t_*,t)\,\big|_{t=t_k}$ в заранее фиксируемые на временной сетке с заданным периодом квантования h моменты времени $t_k = t_* + kh,\ k=\overline{0,N-1},\ Nh = t^* - t_*$, вычисляется по сигналам $Q_g(x,t_k)$ измерения текущего состояния системы [1,4,5]. В таком случае исходная минимаксная задача оптимизации (1) – (10), сформулированная на временном промежутке $[t_*,t^*]$, сводится к последовательно разрешаемым на интервалах $[t_k,t^*] \ni t,\ k=\overline{0,N-1}$, задачам вида (1) – (10) программного управления порождаемыми неопределенными факторами и «сужающимися» по мере возрастания t_k ансамблями траекторий $Q(x,u_k,w_k,\mu_k,t_k,t),\ w_k(t)\in W,\ t\in[t_k,t^*]$, с наблюдаемыми с ошибкой $\mu_k = \mu(t_k)$ начальными состояниями $Q_g(x,t_k)$.

При этом искомое оптимальное программное управляющее воздействие $u^*(t),\ \ t\in[t_*,t^*]$, на всем протяжении процесса управления компонуется из участков изменения $u_k^*(t)$ на про-

межутках $[t_k, t_k + h]$ э t :

(11) $u^*(t) = \{u_k^*(t), t \in [t_k, t_k + h]\}$; $t_k = t_* + kh$, $k = \overline{0, N-1}$; $Nh = t^* - t_*$.

Эффективность подобного метода связана с возможностью определения $u_k^*(t)$ с помощью известных аналитических условий оптимальности для широкого круга задач оптимального управления динамическими системами.

Построение $u_k^*(t)$ в каждой позиции $(t_k, Q_g(x, t_k))$ по существу формирует закон управления с обратной связью $u_k^{**}(t_k, Q_g(x, t_k))$. Если вычисление $u_k^*(t)$ с помощью современных технических средств производится за время, не превышающее достаточно малого периода квантования h, то этот закон может быть реализован с шагом h

(12) $u_k^*(t_k + h) = u_k^{**}(t_k, Q_g(x, t_k))$,

обеспечивая тем самым последовательную отработку алгоритма (11) в реальном времени [4,5]. При этом в условиях $h \to 0$ получаем в соответствии с (12)

(13) $u^*(\tau) = u^{**}(\tau, Q_g(x, \tau))$ $\forall \tau \in (t_*, t^*)$.

2 Редукция к задаче полубесконечной оптимизации

В целом ряде случаев известные условия оптимальности допускают предварительную параметризацию управляющих воздействий [10-16], позволяя найти $u_k^*(t)$ и в целом $u^*(t)$ в (11) в классе кусочно-непрерывных функций с точностью до некоторых n_k - и n-мерных векторов параметров $\Delta^{(n_k)} = (\Delta_i^{(n_k)})$, $i = \overline{1, n_k}$, и $\Delta = (\Delta_i)$, $i = \overline{1, n}$, соответственно, где Δ определяется по $\Delta^{(n_k)}$, $k = \overline{0, N-1}$, согласно алгоритму (11). К отысканию Δ по величинам Δ_i и числу n его составляющих и сводится в такой ситуации дальнейшая задача.

При известных решениях уравнений модели объекта (1), (3) – (6) с параметризованным управлением $u_k^*(t)$, $t \in [t_k, t^*]$, для начального состояния $Q(x, t_k) = Q_g(x, t_k) - \mu(t_k)$ вместо (2) в соответствии с (9), разность $Q(x, u_k, w_k, \mu_k, t_k, t^*) - Q^{**}(x)$ и функционал качества $I(u_k, w_k, \mu_k, t_k, t^*)$, фигурирующие вместо $Q(x, u, w, t_*, t^*) - Q^{**}(x)$ и $I(u, w, t_*, t^*)$ в (7), (8), могут быть определены как явные функции $F_k(x, \Delta^{(n_k)}, w_k, \mu_k, t_k, t^*)$ и $I_k(\Delta^{(n_k)}, w_k, \mu_k, t_k, t^*)$ переменных $x, \Delta^{(n_k)}$, w_k, μ_k, t_k и t^*. Тогда задача построения $u_k^*(t)$ сводится в соответствии с требованиями (7), (10) к последовательному решению с шагом h задач полубесконечной оптимизации (ЗПО) [10-16]:

$$(14)\quad I_{1k}(\Delta^{(n_k)}, t_k, t^*) = \max_{w_k, \mu_k} I_k(\Delta^{(n_k)}, w_k, \mu_k, t_k, t^*) \to \min_{\Delta^{(n_k)}}, \quad k = \overline{0, N-1}$$

на экстремум конечного числа n_k переменных $\Delta_i^{(n_k)}$, $i = \overline{1, n_k}$, с бесконечным числом ограничений

$$\Phi_k(\Delta^{(n_k)}, w_k, \mu_k, t_k, t^*) = \max_{x\in[x_0,x_1]} \left| F_k(x, \Delta^{(n_k)}, w_k, \mu_k, t_k, t^*) \right| \le \varepsilon_0^{(k)},$$

(15) $k = \overline{0, N-1};\ w_k(t) \in W;\ \mu(t) \in [\mu_{\min}, \mu_{\max}],\ t \in [t_k, t^*];$

$$F_k(x, \Delta^{(n_k)}, w_k, \mu_k, t_k, t^*) = Q(x, \Delta^{(n_k)}, w_k, \mu_k, t_k, t^*) - Q^{**}(x),$$

порождаемых условием (15) принадлежности $Q(x, u_k, w_k, \mu_k, t_k, t^*)$ заданному целевому множеству на всем отрезке изменения пространственной переменной $x \in [x_0, x_1]$ при любых допустимых реализациях неопределенных факторов $w_k(t) \in W$ на временном интервале $[t_k, t^*] \ni t$.

В соответствии с требованием (7) ошибки равномерного приближения $\varepsilon_0^{(k)}$, $k = \overline{0, N-1}$, в (15) должны выбираться таким образом, чтобы обеспечить выполнение соотношения $\varepsilon_0^{(N-1)} \le \varepsilon_0$.

Неравенства (15) могут быть записаны, подобно [16], в форме их оценки на множестве $\Omega = [x_0, x_1] \times W \times [\mu_{\min}, \mu_{\max}]$, которое расширяется по сравнению с детерминированной задачей включением в число его элементов $y_k = (x, w_k, \mu_k)$, наряду с пространственной переменной $x \in [x_0, x_1]$, всех составляющих неопределенных факторов w_k, μ_k:

$$\Phi_{1k}(\Delta^{(n_k)}, t_k, t^*) = \max_{y_k \in \Omega} \left| F_k(y_k, \Delta^{(n_k)}, t_k, t^*) \right| \le \varepsilon_0^{(k)}, \quad k = \overline{0, N-1}. \tag{16}$$

Решение $\overline{\Delta}^{(n_k)}$ каждой из ЗПО (14), (16) при любом $k \in \{\overline{0, N-1}\}$ может быть найдено альтернансным методом [10-16], распространяющим на этот класс задач известные необходимые условия экстремума в теории нелинейных чебышёвских приближений [17] с привлечением дополнительной информации о конфигурации зависимостей $I_k(\overline{\Delta}^{(n_k)}, w_k, \mu_k, t_k, t^*)$ и $F_k(y_k, \overline{\Delta}^{(n_k)}, t_k, t^*)$ от w_k, μ_k и $y_k \in \Omega$, диктуемой закономерностями предметной области в каждой из исследуемых конкретных ситуаций.

В дальнейшем для простоты без потери общности основных результатов ограничимся рассмотрением центральной задачи оптимального быстродействия [7,10,13,16], в которой $\Delta_i^{(n_k)}$ и Δ_i приобретают смысл моментов переключения соответственно управляющих воздействий $u_k(t)$ и $u(t)$ релейной формы с $n_k \ge 1$ и $n \ge 1$ интервалами постоянства, попеременно принимающих только свои предельно допустимые значения согласно (6). При этом применительно к $u_k(t)$

$$u_k(t) = \frac{u_{\max} + u_{\min}}{2} + \psi_k (-1)^{i+1} \frac{u_{\max} - u_{\min}}{2}, \quad \Delta_{i-1}^{(n_k)} < t - t_k < \Delta_i^{(n_k)},\ \psi_k = \pm 1;\ \Delta_0^{(n_k)} = 0,\ i = \overline{1, n_k}, \tag{17}$$

а критерий оптимальности (14) при $t^* - t_k = \Delta_{n_k}^{(n_k)}$ записывается в виде

$$I_{1k}(\Delta^{(n_k)}, t_k) = \Delta_{n_k}^{(n_k)} \to \min. \tag{18}$$

Согласно [10-16], на решениях $\overline{\Delta}^{(n_k)}$ задачи (16), (18) найдутся такие $R_k \ge n_k$ значений $y_{kj}^0 = (x_{kj}^0, w_{kj}^0, \mu_{kj}^0) \in \Omega$, $j = \overline{1, R_k}$, с максимально допустимыми отклонениями $F_k(y_k, \overline{\Delta}^{(n_k)}, t_k)$

от нуля, на которых для всех $k=\overline{0,N-1}$ в (16) выполняются равенства

(19) $\left|F_k(y^0_{kj},\overline{\Delta}^{(n_k)},t_k)\right|=\varepsilon_0^{(k)},\ j=\overline{1,R_k};\ \ \overline{\Delta}^{(n_k)}=(\overline{\Delta}_i^{(n_k)}),\ i=\overline{1,n_k}$,

где

(20) $R_k=n_k$, если $\varepsilon_0^{(k)}>\varepsilon_{k\min}^{(n_k)}$; $R_k=n_k+1$, если $\varepsilon_0^{(k)}=\varepsilon_{k\min}^{(n_k)}$,

и

(21) $\varepsilon_{k\min}^{(n_k)}=\inf\limits_{\Delta^{(n_k)}}\Phi_{1k}(\Delta^{(n_k)},t_k)$,

причем значения $\varepsilon_{k\min}^{(n_k)}$ для всех $k\in\{\overline{0,N-1}\}$ монотонно убывают с возрастанием n_k от 1 до ρ_k , где $\varepsilon_{k\min}^{(\rho_k)}$ совпадает с точной нижней границей $\varepsilon_{k\inf}\ge 0$ достижимых значений $\Phi_{1k}(\Delta^{(n_k)},t_k)$ [13,14], а размерность n_k вектора параметров $\Delta^{(n_k)}$ определяется в зависимости от величины $\varepsilon_0^{(k)}$ в (16) в типичных для приложений случаях простым правилом [13-15]:

(22) $n_k=\upsilon_k$ для всех $\varepsilon_0^{(k)}:\varepsilon_{k\min}^{(\upsilon_k)}\le\varepsilon_0^{(k)}<\varepsilon_{k\min}^{(\upsilon_k-1)},\ 1\le\upsilon_k\le\rho_k$.

В частности, из сказанного следует, что исходная задача быстродействия разрешима предлагаемым способом, если в (16) $\varepsilon_0^{(k)}\ge\varepsilon_{k\min}^{(n_k)}$, $k=\overline{0,N-1}$, и в (7) $\varepsilon_0\ge\varepsilon_0^{(N-1)}$.

При наличии дополнительной информации из предметной области о конфигурации $F_k(y_k,\overline{\Delta}^{(n_k)},t_k)$ на Ω , позволяющей идентифицировать значения y^0_{kj} и знаки $F_k(y^0_{kj},\overline{\Delta}^{(n_k)},t_k)$, равенства (19) , дополненные условиями существования экстремума функций $F_k(y_k,\overline{\Delta}^{(n_k)},t_k)$ в точках $y^0_{kj_\nu}\in\operatorname{int}\Omega,\ \nu=\overline{1,R_{1k}}$, где $R_{1k}\le R_k$ и $y^0_{kj_\nu}\in\{y^0_{kj}\}$

(23) $\dfrac{\partial}{\partial y}F_k(y^0_{kj_\nu},\overline{\Delta}^{(n_k)},t_k)=0,\ \nu=\overline{1,R_{1k}}$

с учетом соотношений (20)-(22), трансформируются к системе уравнений, замкнутой относительно всех неизвестных, к числу которых относятся $\overline{\Delta}_i^{(n_k)},i=\overline{1,n_k}$, промежуточные неизвестные $y^0_{kj_\nu}$, а также $\varepsilon_{k\min}^{(n_k)}$, если $\varepsilon_0^{(k)}=\varepsilon_{k\min}^{(n_k)}$ [10-16].

Решение этой системы содержит решение задачи (16), (18).

В большинстве практически встречающихся ситуаций значения y^0_{kj} в (19) достигаются на предельно допустимых величинах w_k и μ_k подобно [16]. По найденным значениям $\overline{\Delta}^{(n_k)}$ должны быть определены и реализованы согласно алгоритму (11) параметры $\overline{\Delta}$ оптимального управления $u^*(t)$.

3 Оптимальное по быстродействию программное управление в реальном времени

Понимаемое в обобщенном смысле общее решение краевой задачи (1)-(3) для каждого из допустимых , согласно (4), (5) значений неопределенных факторов при произвольном кусочно-непрерывном управлении $u(t)\in\{u^0(t),u^1(t)\}$, удовлетворяющем ограничениям (6), может быть представлено в интегральной форме [7,8,18]:

$$(24)\quad Q(x,t)=Q_0\int_{x_0}^{x_1}G(x,\xi,t-t_*)\,d\xi+\int_0^{t-t_*}S(x,t-t_*-\tau)\,u(\tau)\,d\tau+\int_0^{t-t_*}\sum_{i=1}^{2}S_i(x,t-t_*-\tau)\,\eta_i(\tau)\,d\tau,$$

$$t_*<t\le t^*,$$

где $G(x,\xi,t-t_*)$ - функция Грина рассматриваемой СРП;

$$(25)\quad S(x,t-t_*-\tau)=\int_{x_0}^{x_1}G(x,\xi,t-t_*-\tau)\,f_0(\xi)\,d\xi\text{, если }u(t)=u^1(t),$$

$$(26)\quad S(x,t-t_*-\tau)=\frac{1}{\beta_1}C(x_1)\,G(x,x_1,t-t_*-\tau)\text{, если }u(t)=u^0(t);$$

$S_1(x,t-t_*-\tau)$ определяется выражением (25) с заменой $f_0(\xi)$ на $f_1(\xi)$;
$S_2(x,t-t_*-\tau)=S(x,t-t_*-\tau)$ в (26), и вариант одновременного использования обоих управляющих воздействий $u^1(t)$ и $u^0(t)$ для простоты исключается.

Выделяя моменты времени $t_k\in(t_*,t^*)$, $k=\overline{0,N-1}$, с измеряемыми начальными состояниями $Q_g(x,t_k)$, запишем (24) в следующем виде для $t\in[t_k,t^*]$:

$$(27)\quad \begin{aligned}Q(x,t_k,t)=&\int_0^{t_k-t_*}S(x,t-t_*-\tau)\,u(\tau)\,d\tau+\int_{t_k-t_*}^{t-t_*}S(x,t-t_*-\tau)\,u(\tau)\,d\tau+\\&+Q_\eta^0(x,t,t_k)+\int_0^{t-t_k}\sum_{i=1}^{2}S_i(x,t-t_k-\tau)\,\eta_i(\tau)\,d\tau.\end{aligned}$$

Здесь

$$(28)\quad Q_\eta^0(x,t,t_k)=\int_{x_0}^{x_1}G(x,\xi,t-t_k)\,(Q_\eta(\xi,t_k)+Q_0)\,d\xi;$$

$$(29)\quad Q_\eta(x,t_k)=\int_0^{t_k-t_*}\sum_{i=1}^{2}S_i(x,t_k-t_*-\tau)\,\eta_i(\tau)\,d\tau,$$

и начальное состояние Q_0 вместе с определяемой действием возмущений η_1,η_2 на временном промежутке $[t_*,t_k]$ величиной $Q_\eta(x,t_k)$ в (29) могут быть найдены с ограничиваемой условием (9) ошибкой по результатам измерения $Q_g(x,t_k)$ при известном управлении $u(t)$ на этом промежутке опять на основании (24):

$$(30)\quad Q_\eta(x,t_k)+Q_0\int_{x_0}^{x_1}G(x,\xi,t_k-t_*)\,d\xi=Q_g(x,t_k)-\int_0^{t_k-t_*}S(x,t_k-t_*-\tau)\,u(\tau)\,d\tau-\mu_k.$$

При этом ансамбль траекторий в выражении (27) для $Q(x,t_k,t)$ порождается вектором (w_k,μ_k) неопределенных факторов, включая последний интеграл в (27), вклад которого в реакцию объекта при $t=t^*$ уменьшается вместе с разностью t^*-t_k.

Подстановка в (27), (30) параметризованных согласно (11), (17) управляющих воздействий $u(t)$ приводит при последовательной отработке программного алгоритма (11) в реальном времени с достаточно малым шагом h к явной зависимости $Q(x,\overline{\Delta}_1,...,\overline{\Delta}_{m-1},\Delta_m,...,\Delta_n,w_k,\mu_k,t_k)$

результирующего состояния $Q(x,t_k,t^*)$ в (27) для всех $t_k : \overline{\Delta}_{m-1} \le t_k \le \overline{\Delta}_m$, $k = \overline{0,N-1}$, $m \in \{\overline{1,n}\}$, $\overline{\Delta}_0 = t_*$, от уже найденных на $[t_*,t_k) \ni t$, реализованных программой $u^*(t)$ моментов переключения $\overline{\Delta}_i$, $i = \overline{1,m-1}$, и подлежащих определению прогнозируемых искомым воздействием $u_k^*(t)$, $t \in [t_k,t^*]$, зависящих от t_k последующих их значений $\Delta_i(t_k)$, $i = \overline{m,n}$, $[t_k,t^*] \ni t$, $t^* = \Delta_n$, которые, согласно (11), непосредственно связаны с параметрическим представлением $u_k^*(t)$ соотношениями (рис. 1):

(31) $\Delta_i(t_k) = \overline{\Delta}_{i-m+1}^{(n_k)}(t_k) + t_k$, $i = \overline{m,n}$; $n = n_k + m - 1$.

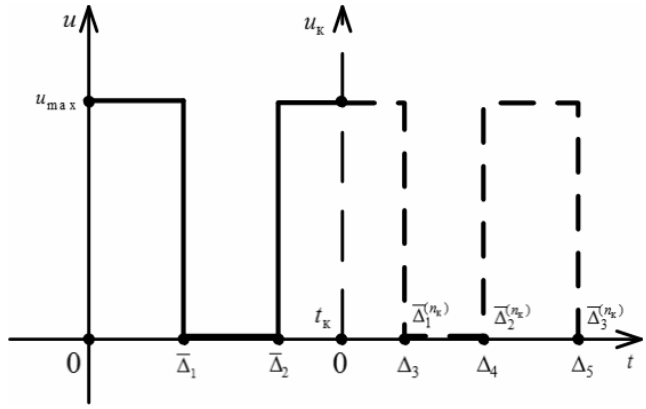


Рис. 1. Программные управляющие воздействия ($m = 3$, $n_k = 3$; $n = 5$; $\psi_k = 1$)

Указанная зависимость в результате принимает следующий вид:

$$Q(x,\overline{\Delta}_1,...,\overline{\Delta}_{m-1},\Delta_m,...,\Delta_n,w_k,\mu_k,t_k) = \sum_{j=1}^{n} a_j S_j^0 + Q_\eta^0(x,\Delta_n,t_k) +$$
$$+ \int_0^{\Delta_n - t_k} \sum_{i=1}^{2} S_i\,(x,\Delta_n - t_k - \tau)\,\eta_i(\tau)\,d\tau, \qquad \overline{\Delta}_{m-1} \le t_k \le \Delta_m;\ m \in \{\overline{1,n}\}, \tag{32}$$

где

$$a_j = \frac{u_{\max} + u_{\min}}{2} + \psi_k \frac{u_{\max} - u_{\min}}{2}(-1)^{j+1},\ \psi_k = \pm 1; \tag{33}$$

$$S_j^0 = \int_{\overline{\Delta}_{j-1} - t_*}^{\overline{\Delta}_j - t_*} S(x,\Delta_n - t_* - \tau)\,d\tau,\ j = \overline{1,m-1};\ \ S_j^0 = \int_{\overline{\Delta}_{m-1} - t_*}^{\Delta_m - t_*} S(x,\Delta_n - t_* - \tau)\,d\tau,\ j = m;$$
$$S_j^0 = \int_{\Delta_{j-1} - t_*}^{\Delta_j - t_*} S(x,\Delta_n - t_* - \tau)\,d\tau,\ j = \overline{m+1,n}. \tag{34}$$

При этом $Q_\eta^0(x,\Delta_n,t_k)$ в (32) определяется по формулам (28) – (30) для $t = t^* = \Delta_n$, и интеграл в правой части (30) является явной функцией переменных $\overline{\Delta}_1, \overline{\Delta}_2, ..., \overline{\Delta}_{m-1}$:

$$\int_0^{t_k-t_*} S(x,t_k-t_*-\tau)u(\tau)\,d\tau = \sum_{j=1}^{m-1} a_j \widetilde{S}_j^0 + a_m \int_{\overline{\Delta}_{m-1}-t_*}^{t_k-t_*} S(x,t_k-t_*-\tau)\,d\tau;$$

(35)

$$\widetilde{S}_j^0 = \int_{\overline{\Delta}_{j-1}-t_*}^{\overline{\Delta}_j-t_*} S(x,t_k-t_*-\tau)\,d\tau.$$

В итоге исходная задача оптимального быстродействия сводится к последовательному решению ряда ЗПО вида (16), (18) относительно неизвестных значений $\Delta_i(t_k)$ в (31):

$$I_{2k}(\Delta,t_k)=\Delta_n(t_k)\to\min;$$

(36)

$$k=\overline{0,N-1}$$

$$\Phi_{2k}(\Delta,t_k)=\max_{y_k\in\Omega}\left|F_{1k}(y_k,\Delta,t_k)\right|\le\varepsilon_0^{(k)},$$

где

(37) $F_{1k}(y_k,\Delta,t_k)=Q(x,\overline{\Delta}_1,...,\overline{\Delta}_{m-1},\Delta_m,...,\Delta_n,\ w_k,\mu_k,t_k)-Q^{**}(x)$

вычисляется по формулам (32) – (35).

При этом предполагается, что все управляющие воздействия $u_k^*(t)$ могут быть вычислены при решении соответствующей ЗПО за время, не превышающее достаточно малого периода *h* квантования величин t_k. Это условие в первую очередь относится к «стартовому» управлению $u_0^*(t), k=0$, поскольку при поиске $\Delta^{(n_k)}, k\ge 1$, в качестве начальных приближений могут быть использованы найденные на предыдущем шаге близкие к $\Delta^{(n_k)}$ величины $\Delta^{(n_{k-1})}$, позволяющие значительно сократить длительность процесса поиска $\Delta^{(n_k)}$ путем коррекции значения $\Delta^{(n_{k-1})}$.

На начальной стадии на объект воздействует $u^*(t)$ непосредственно в форме стартового управления $u_0^*(t)$. Задача (36), (37) сначала решается на первом шаге с *m* = 1 для значений $t_k, k=\overline{0,k_1};\ k_1\in\{\overline{0,N-1}\}$, удовлетворяющих неравенствам $\overline{\Delta}_0=t_*\le t_k<\Delta_1(t_k)$, при которых прогнозируемые управлениями $u_k^*(t)$ моменты переключения $\Delta_i(t_k), i=\overline{1,n}$, связываемые с $\overline{\Delta}^{(n_k)}$ соотношениями (31), пока еще не реализуются на объекте программой $u^*(t)$ в (11). Для некоторого $t_k=t_{k_1}$ выполняется соотношение $t_{k_1+1}\ge\Delta_1(t_{k_1})$ и при достаточно малой величине *h* первый отрабатываемый в реальном времени на объекте момент переключения $\overline{\Delta}_1$ алгоритма управления (11) принимается равным $\Delta_1(t_{k_1})$. Если $n>1$, то на втором шаге задача решается аналогичным образом при *m* = 2, $\overline{\Delta}_1<t_k<\Delta_2(t_k),\quad k=\overline{k_1+1,k_2};\quad k_2\in\{k_1+1,N-1\}$ с определением расчетных значений $\Delta_i(t_k), i=\overline{2,n}$, нереализуемых программой $u^*(t)$ вплоть до выполнения условия $t_{k_2+1}\ge\Delta_2(t_{k_2})$, при котором принимается $\overline{\Delta}_2=\Delta_2(t_{k_2})$.

Далее по подобной схеме находятся при $m=\overline{3,n}$ все $\overline{\Delta}_i, i=\overline{3,n}$, обеспечивая отработку программного управления $u^*(t)$ в реальном времени.

Возможности практического применения полученных результатов иллюстрируются в докладе на представляющем самостоятельный мнтерес примере управления нестационарными температурными полями в условиях воздействия множественных возмущений.

Список литературы

[1] Куржанский А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности. М.: Наука, 1977.
[2] Красовский Н.Н. Управление динамической системой. Задача о минимуме гарантированного результата. М.: Наука, 1985.
[3] Черноусько Ф.Л. Оценивание фазовых состояний динамических систем. М.: Наука, 1988.
[4] Габасов Р., Кириллова Ф.М., Песецкая Т.И. Реализация в реальном времени оптимальных обратных связей по выходу для линейных систем в условиях неопределенности // Изв. РАН. ТиСУ. 2005. № 4. С. 44-56.
[5] Габасов Р., Кириллова Ф.М. Оптимальное управление и наблюдение в реальном времени // Изв. РАН. ТиСУ, 2006. №3. С. 90-111.
[6] Летов А.М. Динамика полета и управление. М.: Наука, 1969.
[7] Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1965.
[8] Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1975.
[9] Сиразетдинов Т.К. Оптимизация систем с распределенными параметрами. М.: Наука, 1977.
[10] Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2009.
[11] Рапопорт Э.Я. Чебышевские приближения в задачах параметрической оптимизации управляемых процессов I-III // Автоматика и телемеханика. 1992, № 2. С.60-67; №3. С.59-64; №4. С. 49-56.
[12] Рапопорт Э.Я. Альтернансные свойства оптимальных решений и вычислительные алгоритмы в задачах полубесконечной оптимизации управляемых систем // Изв. РАН. ТиСУ, 1996. № 4. С. 84-95.
[13] Рапопорт Э.Я. Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации. М.: Наука, 2000.
[14] Рапопорт Э.Я. Альтернансный метод в задачах полубесконечной оптимизации // Нелинейная теория управления и ее приложения: динамика, управление, оптимизация / Под. ред. В.М. Матросова, С.Н. Васильева, А.И. Москаленко. М.: Физматлит, 2003. С. 164-200.
[15] Плешивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я. Метод последовательной параметризации управляющих воздействий в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // Изв. РАН. ТиСУ, 2009. №3. С. 22-33.
[16] Рапопорт Э.Я. Робастная параметрическая оптимизация динамических систем в условиях ограниченной неопределенности // Автоматика и телемеханика. 1995, № 3. с.86.-96.
[17] Коллатц Л., Крабс В. Теория приближений. Чебышевские приближения. М.: Наука, 1978.
[18] Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2003.

МЕТОДОЛОГИЯ ЛИНЕЙНО-КВАДРАТИЧНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ЗАДАЧАХ СИНТЕЗА СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ*

А.Б. Филимонов[1], Н.Б. Филимонов[2]

[1]Московский государственный университет информационных технологий радиотехники, электроники
Россия, 119454, Москва, Проспект Вернадского, д. 78
filimon_ab@mail.ru
тел: +7 (903) 292-91-25

[2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы
nbfilimonov@mail.ru
тел: +7 (499) 269-55-10

Ключевые слова: *линейно-квадратичная оптимизация, канал ввода уставки, операторные передаточные функции, астатизм, синтез следящих систем, конвертирование задач стабилизации в задачи слежения*

Abstract
The methodology of application of linear-quadratic optimization for problems of sequential regulation, where it is necessary to watch the dynamic processes in the environment is developed in the paper. The generalized scheme of control system combining the principles of the construction of classical single-loop regulation systems and stabilization systems with feedback condition is in its base. The proposed solutions represent the idea of conversion of stabilization problems for tracking problems in connection with class of astatic regulation systems.

Введение

Автоматизация процессов управления техническими объектами и технологическими процессами в различных областях промышленности, энергетики и транспорта сопровождается широким использованием систем следящего регулирования [1-3], предназначенных для воспроизведения на выходе с определенной точностью задающего воздействия, произвольно изменяющегося по заранее неизвестному закону. К данному классу систем автоматического регулирования относятся дистанционные системы воспроизведения угла и линейных перемещений, приводы систем автоматического сопровождения, рулевые приборные приводы, приводы управления станками, антеннами, системы управления высотой и курсом самолета и др.

В теории автоматического управления широкое распространение получила методология АКОР, достоинствами которой является простота формализации задач, законченность, аналитичность и вычислительная эффективность получаемых решений. В классическом варианте постановки задач АКОР рассматриваются процессы стабилизации, в контексте которых подразумевается концепция «возмущенного-невозмущенного движения»: оптимизируются процессы демпфирования возмущенного движения объекта, причем его невозмущенное, т.е. номинальное движение, представлено нулевым состоянием. Однако в данную теоретическую схему не вписываются многие инженерные задачи синтеза систем регулирования, в которых необходимо отслеживать динамические процессы во внешней среде - в них неотъемлемым структур-

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты: № 13-08-00161 и № 13-08-00948.

ным фактором синтезируемой системы является *канал ввода уставки*, который определяет целевое значение управляемого выхода объекта.

Известны попытки распространить методологию АКОР на процессы управления с целевым поведением объекта, заданным *экзогенными* (внешними) эталонными моделями, которые включаются в процесс управления и выполняют функцию генератора эталонного выхода объекта (см., например, [4; с. 385-386; 5; 6, с. 379-382; 7, с. 483-484; 8, с. 240-242; 9, с. 704-707]. В этом случае оптимизируемый функционал содержит интегральную квадратичную ошибку отработки системой управления поступающего от генератора задающего воздействия, так что ЛК-оптимизация направлена на обеспечение максимальной близости действительного и желаемого (эталонного) переходных процессов в системе. Анализ данных работ данного направления показывает, что в них фактически речь идет о системах, объединяющих принципы программного управления и стабилизации. Данный подход неприемлем для задач синтеза широкого класса задач управления, в которых задающее воздействие может быть любой функцией времени. В настоящей работе обсуждается методология применения аппарата ЛК-оптимизации именно для задач управления такого типа: задач синтеза следящих систем (СС), функция которых состоит в слежении за изменениями a priori неизвестного *командного сигнала*.

1 Рассматриваемый класс объектов управления и операторный формализм

Далее рассматривается класс линейных стационарных динамических объектов, описываемых в переменных состояния уравнениями вида

(1) $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0\mathbf{x} + \mathbf{B}_0 u$,

(2) $y = \mathbf{C}_0\mathbf{x}$,

где $t \geq 0$, $u \in \mathbf{R}$ - управляющий вход, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ - состояние, $y \in \mathbf{R}$ - управляемый выход, $\mathbf{A}_0$, $\mathbf{B}_0$, $\mathbf{C}_0$ - числовые матрицы соответствующих размеров.

Полагаем, что объект обладает свойствами полной управляемости и наблюдаемости.

Обозначим через $W_0(s)$ передаточную функцию (ПФ) объекта, которая, в силу (1) и (2), равна

$$W_0(s) = \mathbf{C}_0(\mathbf{E}s - \mathbf{A}_0)^{-1}\mathbf{B}_0,$$

где s - комплексная частота, $\mathbf{E}$ - единичная матрица соответствующего размера. Данная ПФ является рациональной функцией и может быть представлена в виде правильной рациональной дроби:

(3) $W_0(s) = \dfrac{M_0(s)}{L_0(s)}$.

Здесь $L_0(s)$ и $M_0(s)$ - многочлены:

(4) $L_0(s) = \sum_{i=0}^{n} a_i s^i$, $M_0(s) = \sum_{j=0}^{m} b_j s^j$,

где $m < n$, a_i, b_j - вещественные константы, причем $a_n = 1$.

Динамические процессы в объекте могут быть описаны моделью «вход-выход», т.е. дифференциальным уравнением n-го порядка:

(5) $y^{(n)}(t) + \sum_{i=0}^{n-1} a_i\, y^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^{m} b_j\, u^{(j)}(t)$.

Введем в рассмотрение дифференциальный оператор k-го порядка $\mathsf{D}^k = \frac{d^k}{dt^k}$:

$$\mathsf{D}^k f(t) \equiv \frac{d^k}{dt^k} f(t).$$

Уравнение (5) с учетом (4) можно переписать в операторной форме:

(6) $$L_0(\mathsf{D}) y(t) = M_0(\mathsf{D}) u(t),$$

где $L_0(\mathsf{D})$ и $M_0(\mathsf{D})$ - операторные многочлены:

$$L_0(\mathsf{D}) = \sum_{i=0}^{n} a_i \mathsf{D}^i, \quad M_0(\mathsf{D}) = \sum_{j=0}^{m} b_j \mathsf{D}^j.$$

Введем понятие *операторной передаточной функции* (ОПФ), которая для объекта управления, согласно (3), записывается в виде

$$W_0(\mathsf{D}) = \frac{B_0(\mathsf{D})}{A_0(\mathsf{D})}.$$

Тогда связь входа и выхода объекта можно формально выразить операторным уравнением:

$$y(t) = W_0(\mathsf{D}) u(t).$$

2 Системы следящего регулирования

Отличительной структурной особенностью систем автоматического регулирования (САР) и СС по сравнению с системами стабилизации является наличие канала ввода уставки.

Классическая схема САР приведена на рисунке 1.

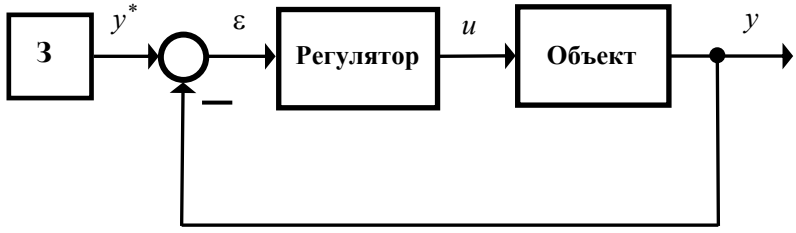


Рисунок 1 – Целевое значение выхода объекта определяется *задатчиком* (З). Он генерирует задающий сигнал (уставку, командный сигнал) $y^*(t)$ и назначение САР – его отработка:

$$y(t) \approx y^*(t),$$

в соответствии с заданными требованиями качества процессов управления.

Далее ε - рассогласование между уставкой и выходом объекта:

(7) $$\varepsilon(t) = y^*(t) - y(t).$$

Особый класс автоматических систем образуют СС.

Задача слежения - обеспечить близость выхода $y(t)$ к желаемому входу $y^*(t)$ так, что СС повторяет или отслеживает командные сигналы $y^*(t)$.

Далее мы ограничимся обсуждением СС, правомерно рассчитывая на то, что полученные результаты применимы и к САР другого типа.

Оценка качества СС основана на анализе процессов отработки системой тестирующих командных сигналов, в качестве которых, как правило, выбирают полиномы. Важнейшим показателем качества СС является динамическая ошибка $\varepsilon_d(t)$ - это вынужденная составляющая ошибки слежения (7).

Характерное свойство СС с *астатизмом* ν-го порядка – они без вынужденной погрешности отрабатывают командные сигналы, которые являются полиномами степени $< \nu$. Таким образом, если командные сигналы подчиняются условию

(8) $\mathsf{D}^{\nu} y^*(t) \equiv 0$,

то $\varepsilon_d(t) \equiv 0$.

Отметим следующий фундаментальный результат классической теории управления.

Утверждение 1. Порядок астатизма замкнутой системы равен кратности нулевого полюса $s=0$ прямой цепи, т.е. он равен числу интегрирующих звеньев в контуре регулирования. ■

Таким образом, если порядок астатизма СС равен ν, то передаточная функция ее прямой цепи имеет вид

$$V(s) = \frac{1}{s^{\nu}} V_0(s), \quad V(0) \neq 0.$$

Обозначим через $R(s)$ передаточную функцию регулятора астатической СС. Если у объекта отсутствуют нулевые передаточные полюса, то она будет иметь вид несократимой дроби

(9) $$R(s) = \frac{Q(s)}{s^{\nu} P(s)},$$

где $P(s)$ и $Q(s)$ - многочлены, причем $P(0) \neq 0$

Закон управления можно представить в операторной форме:

(10) $u(t) = R(\mathsf{D})(y^*(t) - y(t))$,

где $R(\mathsf{D})$ - ОПФ регулятора.

Из (6), (7), (10) с учетом (9) следует уравнение

$$L_0(\mathsf{D})\mathsf{D}^{\nu} y(t) = \frac{M_0(\mathsf{D})Q(\mathsf{D})}{P(\mathsf{D})} \varepsilon(t).$$

Отсюда и из (7), (8) вытекает равенство

(11) $$L_0(\mathsf{D})\mathsf{D}^{\nu} \varepsilon(t) = -\frac{M_0(\mathsf{D})Q(\mathsf{D})}{P(\mathsf{D})} \varepsilon(t).$$

Рассматривая свободное движение замкнутой СС:

(12) $\mathbf{y}^*(t) \equiv 0$,

согласно (7) и (11) получим уравнение

(13) $$L_0(\mathsf{D})\mathsf{D}^{\nu} y(t) = -\frac{M_0(\mathsf{D})Q(\mathsf{D})}{P(\mathsf{D})} y(t).$$

Сравнение уравнений (11) и (13) приводит к следующему выводу.

Утверждение 2. В астатических СС динамика ошибки слежения описывается тем же уравнением, что и свободное движение.

3 Задача ЛК-стабилизации

Вкратце остановимся на формализме ЛК-задачи стабилизации.

Считаем, что целевым стабилизируемым состоянием объекта является его нулевое состояние, которому отвечает невозмущенный выход:

$y(t) \equiv 0$.

Точность стабилизации будем оценивать интегральным квадратичным критерием:

$$J_y = \int_0^\infty y^2(t)\,dt,$$

а энергозатраты - критерием

$$J_u = \int_0^\infty u^2(t)\,dt. \quad (14)$$

Пусть оптимизация процессов стабилизации осуществляется согласно обобщенному критерию оптимальности, образованному сверткой данных частных критериев с весовым множителем $p > 0$:

$$J = pJ_y + J_u = \int_0^\infty [py^2(t) + u^2(t)]\,dt \to \min. \quad (15)$$

Как известно [10], решением задачи (1), (2), (15) является закон регулирования

$u = -\mathbf{K}\mathbf{x}$,

где матричный коэффициент $\mathbf{K}$ равен

$\mathbf{K} = \mathbf{B}_0^{\mathrm{T}}\mathbf{P}$,

причем $\mathbf{P} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ - симметрическая матрица, являющаяся решением алгебраического матричного уравнения Риккати

$\mathbf{P}\mathbf{B}_0\mathbf{B}_0^{\mathrm{T}}\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{A}_0 - \mathbf{A}_0^{\mathrm{T}}\mathbf{P} - p\mathbf{C}_0^{\mathrm{T}}\mathbf{C}_0 = 0$.

В данных соотношениях символ «Т» означает операцию транспонирования.

На рисунке 2 показана схема рассматриваемой системы стабилизации.

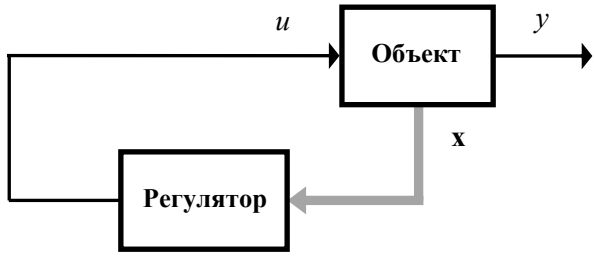


Рисунок 2

4 Обобщенная схема системы следящего регулирования

Обратимся к обобщенной схеме СС, представленной на рисунке 3. Она сочетает в себе структурные свойства классической одноконтурной схемы регулирования (рисунок 1) и схемы стабилизации с обратной связью по состоянию (рисунок 2). От первой она унаследовала *последовательное корректирующее звено* (ПКЗ), а от второй - *корректирующую обратную связь* по состоянию (КОС).

КОС описывается уравнением

$$u_0(t) = -\mathbf{K}_0\mathbf{x}(t). \quad (16)$$

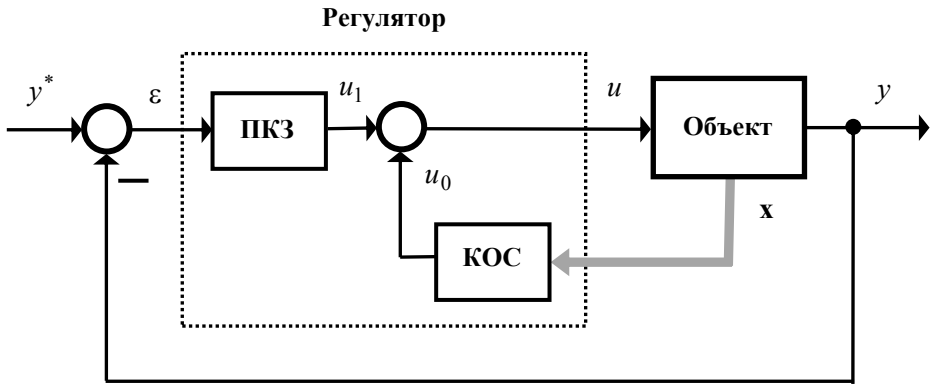


Рисунок 3

Полагаем, что ПКЗ имеет динамический порядок $n_1 \geq 1$ и описывается уравнениями состояния вида

(17) $\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_1\mathbf{z} + \mathbf{B}_1\varepsilon$,

$u_1 = -\mathbf{K}_1\mathbf{z}$,

где $\mathbf{z} \in \mathbf{R}^{n_1}$ - состояние, а $\mathbf{A}_1$, $\mathbf{B}_1$, $\mathbf{K}_1$ - числовые матрицы соответствующих размеров.

Найдем ПФ данного звена:

(18) $R(s) = -\mathbf{K}_1(\mathbf{E}s - \mathbf{A}_1)^{-1}\mathbf{B}_1$.

Управляющее воздействие (см. рисунок 3) определяется равенством

$u = u_0 + u_1$.

5 Конвертирование задачи ЛК-стабилизации в задачу слежения

Динамическую часть САР, включающую сам объект и ПКЗ будем трактовать как *расширенную модель объекта* (РМО). Она в соответствии с (1), (7) и (17) описывается в переменных состояния уравнениями

(19) $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0\mathbf{x} + \mathbf{B}_0 u$,

(20) $\dot{\mathbf{z}} = -\mathbf{B}_1\mathbf{C}_0\mathbf{x} + \mathbf{A}_1\mathbf{z}$.

Состояние РМО определяется блочным вектором

$\widetilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix}$.

Уравнение состояния РМО (19), (20) можно записать в векторно-матричной форме:

$\dot{\widetilde{\mathbf{x}}} = \widetilde{\mathbf{A}}\mathbf{x} + \widetilde{\mathbf{B}}u$,

где матрицы $\widetilde{\mathbf{A}}$ и $\widetilde{\mathbf{B}}$ имеют следующую блочную структуру (нулевые блоки - пустые):

$\widetilde{\mathbf{A}} = \left[\begin{array}{c:c} \mathbf{A}_0 & \\ \hdashline -\mathbf{B}_1\mathbf{C}_0 & \mathbf{A}_1 \end{array}\right]$, $\widetilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_0 \\ \hdashline \end{bmatrix}$.

Положим, что получено решение задачи стабилизации в виде закона регулирования:

(21) $u = -\widetilde{\mathbf{K}}\widetilde{\mathbf{x}}$.

Тогда искомые матричные коэффициенты определяются разбиением матрицы $\widetilde{\mathbf{K}}$ на блоки размеров $n\times 1$ и $n_1\times 1$:

(22) $\widetilde{\mathbf{K}}=\left[\mathbf{K}_0 \,\vdots\, \mathbf{K}_1\right]$.

Утверждение 3. Требование астатизма СС будет выполняться, если передаточная функция ПКЗ (18) имеет ν нулевых полюсов. В этом случае ПФ $R(s)$ будет иметь требуемую структуру (9).

Пример 1. Пусть $n_1=2$,

(23) $\mathbf{A}_1=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 1 & 0\end{bmatrix}$, $\mathbf{B}_1=\begin{bmatrix}1\\ 0\end{bmatrix}$, $\mathbf{C}_1=\begin{bmatrix}q_0 & q_1\end{bmatrix}$.

Тогда

(24) $R(s)=\dfrac{q_1 s+q_0}{s^2}$,

т.е. ПКЗ включает два интегрирующих звена.

Предлагаемая методология применения формализма ЛК-оптимизации для структурно-параметрического синтеза СС основывается на утверждении 1 и слагается из следующих процедур: в структуру СС вводится ПКЗ с нулевыми полюсами; неизменяемая часть ПКЗ вместе с объектом образует РМО; далее решается стандартная задача оптимальной стабилизации свободных движений РМО средствами ЛК-формализма; наконец, полученная функциональная структура системы стабилизации *конвертируется* в функциональную структуру СС.

Пусть $u^*(t)$ и $\mathbf{z}^*(t)$ - вынужденные составляющие соответственно управляющего воздействия и состояния ПКЗ, инициированные задающим воздействием $y^*(t)$. Переходная составляющая в динамике СС характеризуется величинами

$\varepsilon(t)=y^*(t)-y(t)$, $\Delta u(t)=u(t)-u^*(t)$, $\Delta\mathbf{z}(t)=\mathbf{z}(t)-\mathbf{z}^*(t)$.

Полагаем, что критерием точности процессов слежения служит функционал

$$J_y=\int_0^\infty \varepsilon^2(t)\,dt.$$

Прямое применение функционала (14) в качестве критерия энергозатрат невозможно, поскольку в режиме отработки тестовых командных сигналов полиномиальной структуры этот несобственный интеграл будет расходится. Чтобы обойти данное затруднение, можно воспользоваться функционалом вида

$$J_u=\int_0^\infty (\Delta u(t))^2\,dt,$$

На самом деле именно этот функционал является критериальной оценкой степени усиления сигналов в цепях обратной связи синтезируемой системы.

Необходимо также формально учесть эффект демпфирования динамических процессов в ПКЗ. Этой цели служат функционалы вида

$$J_z=\int_0^\infty \Delta\mathbf{z}(t)\mathbf{Q}(\Delta\mathbf{z}(t))^{\mathrm{T}}\,dt.$$

Здесь «Т» - символ транспонирования, а $\mathbf{Q}$ - симметрическая положительно определенная матрица размера $n_1\times n_1$.

В результате свертки данных критериев получаем обобщенный критерий оптимальности:

$$(25)\quad J = pJ_y + J_z + J_u = \int_0^\infty [p\varepsilon^2(t) + \Delta\mathbf{z}(t)\mathbf{Q}(\Delta\mathbf{z}(t))^{\mathrm{T}} + (\Delta u(t))^2]\,dt\,.$$

Для синтеза СС в силу выше высказанных соображений можно ограничиться рассмотрением свободных (отвечающих условию (12)) движений замкнутой системы. Тогда критерий оптимальности (25) принимает вид

$$(26)\quad J = \int_0^\infty [py^2(t) + \mathbf{z}(t)\mathbf{Q}\mathbf{z}^{\mathrm{T}}(t) + u^2(t)]\,dt \to \min\,.$$

Посредством применения аппарата ЛК-оптимизации получаем закон регулирования (21), из которого в соответствии с (22) извлекаем искомые параметры регулятора.

Пример 2. Параметры объекта: $n = 3$,

$$\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} -0{,}2 & 0 & 0 \\ 0{,}5 & -0.5 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix},\quad \mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} 0{,}2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\quad \mathbf{C}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Его ПФ по каналу «вход-выход» равна

$$W_0(s) = \frac{1}{(5s+1)(2s+1)(s+1)}\,.$$

Пусть $\nu = 1$ - требуемая степень астатизма СС. Возьмем структуру ПКЗ (23) из примера 1. В функционале (25) положим:

$$p = 10\,,\quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Решая ЛК-задачу (26), получим коэффициентную матрицу

$$\widetilde{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} 5{,}05 & 7{,}11 & 5{,}58 & -6{,}52 & -1 \end{bmatrix}.$$

Спектр замкнутой СС оказывается равным

$$\Lambda = \{-1{,}04;\ -0{,}51 \pm 0{,}13\,\mathrm{j};\ -0{,}33 \pm 0{,}49\,\mathrm{j}\}\,.$$

Далее согласно (22) находим матричный коэффициент усиления в КОС (16) и параметры ПФ ПКЗ (18):

$$\mathbf{K}_0 = \begin{bmatrix} 5.05 & 7.11 & 5.58 \end{bmatrix},\quad \mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} -6{,}52 & -1 \end{bmatrix},$$

так что в ПФ ПКЗ (24)

$$q_0 = 1\,,\quad q_1 = 6{,}52\,.$$

На рисунке 4 представлена реакция СС y (сплошная линия) на три типа тестовых воздействия y^* (пунктирная линия): постоянного (рисунок 4.*а*), линейно нарастающего (рисунок 4.*б*) и кусочно-линейного (рисунок 4.*в*).

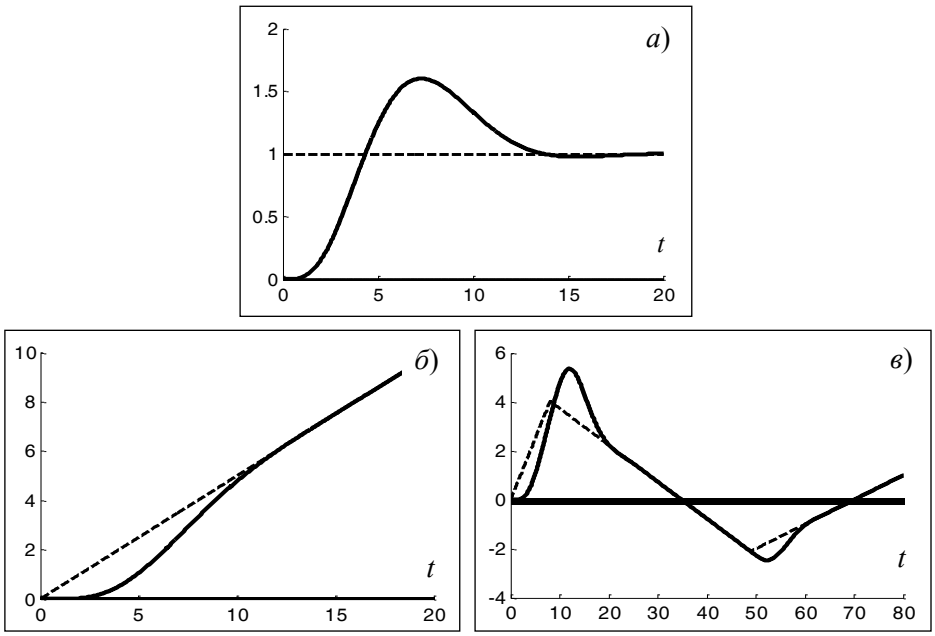


Рисунок 4

Список литературы

[1] Основы проектирования следящих систем / Под ред. Н.А. Лакоты. М.: Машиностроение, 1978.

[2] Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: СПб.: Изд-во «Профессия», 2003.

[3] Теория автоматического управления / Под ред. А.А. Воронова. М.: Высшая школа, 1986.

[4] Андреев Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами. М.: Наука, 1976.

[5] Смагин В.И., Параев Ю.И. Синтез следящих систем управления по квадратичным критериям. Томск: Изд-во Иом. Ун-та, 1996.

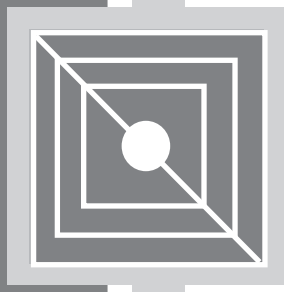
[6] Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987.

[7] Машиностроение. Энциклопедия в 40 тт. Т. I-4. Автоматическое управление. Теория / Е.А. Федосов, А.А. Красовский, Е.П. Попов и др. Под общ. ред. Е.А. Федосова. М.: Машиностроение, 2000.

[8] Современная прикладная теория управления. В 3-х чч. Ч. I. Оптимизационный подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.

[9] Методы классической и современной теории автоматического управления. В 5-ти тт. Т. 4. Теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

[10] Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. М.: Мир, 1986.



Ergatic Systems and Technogenic Medium
Эргатические системы и техногенные среды

АРХИТЕКТУРА БОРТОВОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

А.З. Асанов[1], Д.Х. Валеев[2], А.С. Савинков[2]

[1] Московский гос. университет информационных технологий, радиотехники и электроники
119454, Москва, пр. Вернадского, 78, Россия
a.z.asanov@yandex.ru
тел: +7 (495) 434-96-85, факс: +7 (495) 434-92-87

[2]Научно-технический центр ОАО «КАМАЗ»
423808, г. Набережные Челны, проспект Автозаводский, 2, Россия

Ключевые слова: *управление подвижными объектами, магистральный автомобиль, система управления, интеллектуальная система управления, интеграция систем управления*

Abstract
Discusses the problems of the architecture of the modern information and control systems for autonomous transport complexes. Proposes mechanisms for creation of distributed decentralized on-Board information and control systems.

Введение

Тенденции развития наземных транспортных комплексов (ТК), автомобильных конструкций, опыт разработки новой техники ведущими зарубежными фирмами (Volvo, Scania, Мерседес-Бенц, Renault, DAF и др.) показывают, что одну из главных ролей в обеспечении конкурентных преимуществ играют бортовые информационно-управляющие системы (БИУС) грузового автомобиля (ГА). Современные БИУС способны оптимизировать функционирование всех агрегатов и узлов в едином комплексе автомобиля, обеспечить максимальную эффективность использования автотранспорта как элемента логистической системы, могут существенно облегчить человеку-водителю осуществление его функций. Это тем более актуально, когда речь идет о сложных транспортных комплексах – автопоездах, караванах ГА, автотранспорте специального назначения и т.д.

Зарубежные компании и государственные структуры ведут активную работу в этом направлении. Так, в начале 2014 г. в Форт-Худ (штат Техас, США) прошла демонстрация первых результатов программы автономного передвижения Autonomous Mobility Applique System (AMAS), выполняемой в интересах армии США и корпуса морской пехоты. AMAS представляет собой комплект оборудования, который может быть установлен на почти любой военный автомобиль, чтобы преобразовать его в автономное наземное транспортное средство.

Таким образом, можно говорить о том, что фокус интересов создателей наземной транспортной техники все более перемещается от конструктивных усовершенствований механических частей, узлов и агрегатов в сторону развития бортовой электроники и бортовых информационно-управляющие систем (БИУС) современных грузовых автомобилей и транспортных комплексов на их основе.

Стремительное развитие автомобильных электронных систем, совершенствование БИУС современного наземного транспорта делает реальной идею создания автономных («беспилотных») транспортных комплексов различного назначения, в которых основные функции вождения выполняются автоматически без участия водителя\оператора. Здесь следует отметить, что с появлением первых прототипов автомобилей-роботов, мобильных роботов – домашних ассистентов, роботов для обеспечения безопасности, беспилотных летательных аппаратов,

подводных роботов и т.п., эволюционирует и само понятие «робот». Его смысловое содержание в противовес сложившейся ассоциации с промышленными ЧПУ-станками, роботами-манипуляторами во все большей степени соотносится с искусственным интеллектом, способным анализировать поступающую информацию, делать на ее основе целеполагающие выводы и реализовывать стратегии поведения, а также принимать в реальном времени оптимальные решения в условиях неопределенности в слабоструктурированных средах.

2. Основные задачи и элементы БИУС автономного транспортного комплекса

Современные наземные транспортные комплексы (ТК) (грузовые автомобили (ГА)) требуют функционирования целого комплекса систем управления, обеспечивающих эффективность эксплуатации, безопасность движения и многое другое. Использование большого числа датчиков и исполнительных механизмов, распределенных по автомобилю, в совокупности с бортовыми микропроцессорами и контроллерами, объединенных в многоуровневую систему управления, способно дать решение многих проблем автоматизации, оптимизации и адаптации режимов функционирования важнейших агрегатов автомобиля и самого автомобиля в целом [1].

Автономность ТК (ГА) понимается в принятии решений и их реализации без участия человека\водителя. При этом свойство автономности в современных ГА уже присутствует в различных аспектах: система круиз-контроля, антиблокировочная система – примеры существующих и широко используемых систем с автономным поведением. На настоящее время становятся актуальными разработки других автономных систем. К числу таких следует отнести

- систему адаптивного круиз-контроля,
- систему соблюдения рядности движения,
- систему изменения полосы (рядности) движения,
- систему предупреждения\предотвращения столкновений,
- систему автоматического\экстренного торможения
- систему спутникового позиционирования,
- инерциальную навигационную систему,
- систему прокладки маршрута,
- систему трогания с места,
- систему распознавания дорожных знаков,
- систему поддержания безопасного расстояния до впереди едущего автомобиля,
- систему распознавания препятствий и дорожных условий,
- и ряд других.

Наличие этих систем на борту ТК при должной организации способно обеспечить движение транспортного комплекса по заданной траектории\маршруту, движение с достаточно высокой скоростью из одной заданной точки пространства в другую с выбором траектории движения, объезд препятствий на дороге и т.д. без непосредственного участия человека\оператора в процессах управления ТК. Одним из весьма привлекательных режимом движения (экономия топлива 7–10%) является движение в караване, которое сулит значительные преимущества в организации транспортной логистики.

Основными элементами БИУС являются измерительная система (датчики), исполнительная система (актуаторы), система телекоммуникации и программный комплекс [2].

Измерительная система является одним из ключевых элементов автономного ТК. Очевидно, что необходимо оценить состояние ТК, скорость и направление движения и пр., параметры окружающей среды с тем, чтобы БИУС могла выработать адекватные правильные стратегию и тактику перемещения в пространстве. Для этого могут использоваться различного рода датчики, реализованные в виде мехатронных модулей [2], радары, лидары, системы тех-

нического зрения с распознаванием изображений, системы спутникового позиционирования, цифровые карты и многое другое.

Основу исполнительная системы составляют вычислительная система (бортовые микропроцессоры и контроллеры) и привода различного рода. Особое внимание должно быть уделено автоматическим системам управления скоростью, двигателем, трансмиссией и рулевой системой.

Системы телекоммуникации должны помимо использования традиционных систем передачи данных и телекоммуникации, например, CAN-шин, располагать беспроводными системами коммуникации для обмена данными между ТК при их совместном использовании в группе\караване. Такой обмен данными способен заменить/дополнить данные от датчиков. Это по существу означает создание мобильной сети vehicle-to-vehicle (V2V). Новый беспроводной стандарт Dedicated Short Range Communication (DSRC) [3] – разновидность Wi-Fi для авто – предоставляет высокоскоростное соединение на расстоянии до километра между машиной и другим автомобилем.

Программно-алгоритмическая составляющая БИУС реализует правила и процедуры управления ТК, соответствующие поведению опытного водителя за рулем. При этом задачи и функции исполняемые программами и алгоритмами могут быть отнесены к трем уровням иерархии управления: сценарный, ситуационный, локальный [1].

3. Структура и логическая организация БИУС автономного транспортного комплекса

Логическая организация БИУС транспортного комплекса, в принципе, может быть различной. Вместе с тем, в [2] показано, что наиболее перспективным представляются децентрализованные распределенные системы компьютерного управления [4], представляющие собой множество полностью равноправных процессоров, объединенных в единую систему управления с помощью сетевого канала связи.

Современные грузовые автомобили и наземные транспортные средства на их основе требуют функционирования целого комплекса систем управления, обеспечивающих эффективность эксплуатации, безопасность движения и многое другое. Использование большого числа датчиков и исполнительных механизмов, распределенных по автомобилю, в совокупности с бортовыми микропроцессорами и контроллерами, объединенных в многоуровневую систему управления, способно дать решение многих проблем оптимизации и адаптации режимов функционирования важнейших агрегатов автомобиля и самого автомобиля в целом [5]. Архитектура бортовой информационно-управляющей системы автономного ТК, реализующей многоуровневое управление, приведена на рис. 1. На рисунке применены обозначения:

ММ ССП – мехатронный модуль системы спутникового позиционирования;

ММ ИНС – мехатронный модуль инерциальной навигационной системы;

ММ радар – радиолокационный модуль для обнаружения объектов вокруг ТК, определение расстояния до объекта, установление скорости объекта, оценка положения объекта;

ММ лидар – лазерный модуль определение расстояния до объекта, установление скорости объекта;

ММ видео – модуль видеокамеры для получения видеоизображений окружающей среды;

БАФ – блок (библиотека) автомобильных функций;

ММи i (i=1…K) – мехатронные модули измерительной /диагностирующей системы;

ММдв j (j=1…N) – мехатронные модули двигателя;

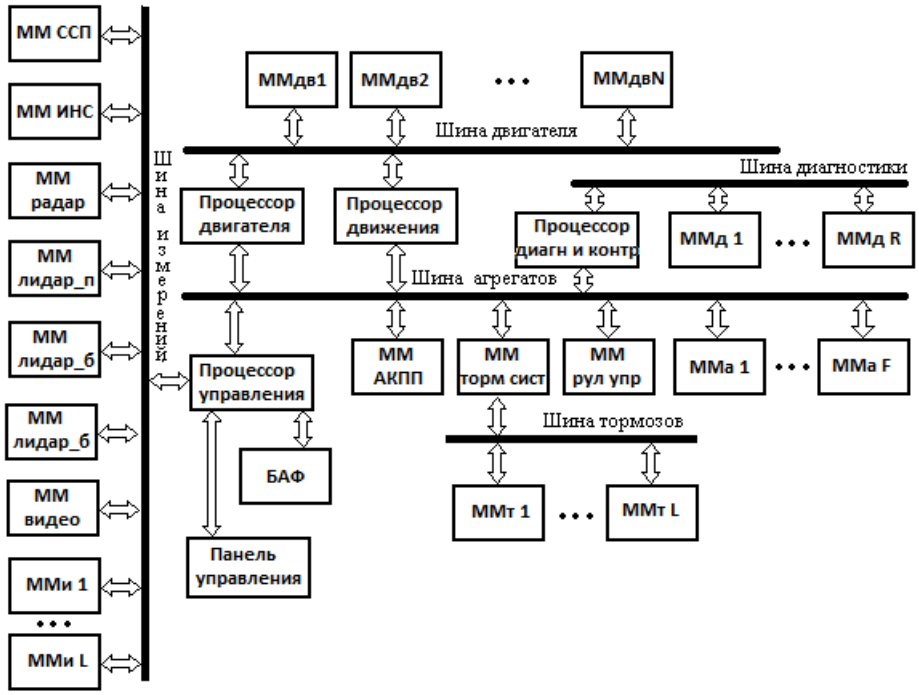
ММд r (r=1…R) – мехатронные модули системы диагностики и контроля;

ММа f (f=1…F) – мехатронные модули агрегатов автомобиля;

ММи l (l=1…L) – мехатронные модули измерителей и датчиков;

ММ АКПП – мехатронный модуль автоматической коробки переключения передач.

ММ торм сист – головной мехатронный модуль тормозной системы;
ММт s (s=1…L) – мехатронные модули тормозных систем;
ММ рул упр – мехатронный модуль рулевого управления



Архитектура сетевого интерфейса БИУС автономного транспортного комплекса

Распределение функций управлений по уровням – сценарный, ситуационный, локальный уровни – возможно осуществить программно.

На сценарном уровне управления сценарное планирование [6] заключается в разработке возможных сценариев будущего и создании на их основе гибких долгосрочных планов действий. Все возможные сценарии формируются на основе исследования окружающей среды на наличие предопределенных элементов (заданные цели и режимы, характеристики автомобиля, условия внешней среды и т.д.), ключевых неопределенностей и комбинировании исходов последних.

На ситуационном уровне БИУС задачи ситуационного управления [7] вытекают из логики отработки сценария. Здесь предполагается последовательное решение таких задач как мониторинг текущих ситуаций; генерация локальных целей; формирование тактики управления.

На локальном уровне реализуется согласованное управление всеми основными узлами, агрегатами и системами транспортного комплекса. Для повышения эффективности управления процессами и отдельными подсистемами необходима глубокая интеграция локальных систем автоматического управления (САУ) транспортного комплекса. Интеграция локальных САУ ТК может быть реализована различными способами и средствами. Так, при решении задач адаптации возможно частичное решение и проблемы интеграции локальных САУ (мехатронных систем) автомобиля за счет получения и использования дополнительной информации из других систем.

Заключение

Автономизация управления транспортными комплексами требует создания и согласованного функционирования целого ряда локальных автономных систем управления. Наиболее перспективной архитектурой бортовых информационно-управляющих систем транспортных комплексов является сетевая архитектура, реализующая распределенное компьютерное управление.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 14-08-00651).

Список литературы

[1] Асанов А.З., Валеев Д.Х., Савинков А.С. Интеграция и интеллектуализация бортовых систем управления большегрузными автомобилями [Текст] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. XIV Междунар. конф. Самара : СНЦ РАН, 2012. − С. 524–531.

[2] Асанов А.З., Валеев Д.Х., Савинков А.С. Современная архитектура бортовых информационно-управляющих систем высокомобильных транспортных комплексов [Текст] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. XV Междунар. конф. Самара : СНЦ РАН, 2013. − С. 483–488.

[3] Власов В.М. и др. DSRC-радиосвязь ближнего действия в интеллектуальной транспортной среде [Текст] // Вестник ГЛОНАСС. 2013. №4(15). С.28–33.

[4] Каляев И.А., Мельник Э.В. Децентрализованные системы компьютерного управления. [Текст] −Ростов н/Д: Изд. ЮНЦ РАН, 2011. −196 с.

[5] Ozguner U., Acarman N., Redmill K. Autonomous Ground Vehicles Norwood: Artech House. 2011. P. 280.

[6] Рингланд Дж. Сценарное планирование для разработки стратегии, 2008. М.: ИД «Вильяме», 2008. 560 с.

[7] Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.

ИГРОВЫЕ МЕТОДЫ В УПРАВЛЕНИИ ОРГАНИЗАЦИЕЙ

Б.Н. Герасимов
Международный институт рынка
443030, Самара, гул. Г. Аксакова, 21
boris0945@mail.ru
846) 261-59-25

Ключевые слова: *игра, методы, процесс, управление, организация.*

Abstract
One of the most effective methods of intensive educational technologies are problem-situational games. There it is given the technologies of game the decision of the problem of the organization. There are shown extracts of the main types of the results game modeling.

Введение

Актуальность исследования проблем обусловлена необходимостью разработки организационных моделей управления содержащих современные средства реализации возможностей современных разработчиков и преобразования их в ресурсы для развития форм и содержания экономических систем различного назначения. При этом еще необходим опыт преодоления проблем в деятельности. В управленческой деятельности также встречаются свои *проблемы,* требующие решения.

Если управленцы не владеют теми знаниями, методами и средствами своей работы, которые позволяют им успешно справляться с ситуациями, тогда ситуации *становятся* проблемными. Это связано с тем, что управленец – самая массовая функциональная позиция в обществе, а не только профессия у некоторых людей, волею судьбы попавших на такое место.

Проблемы – это *противоречия*, лежащие в глубине, *в основе* осуществляемой деятельности и вызывающие ее остановку. Трудности или препятствия – это *внешние проявления* проблем. Для устранения препятствий нужно искать, точно формулировать и разрешать глубинные противоречия – проблемы [1].

Проблема, как правило, носит комплексный, многосторонний характер и охватывает производственные, социальные, правовые, экономические и другие отношения, т.е., чаще всего, решение лежит не в какой-то конкретной профессиональной плоскости, а носит полипредметный, полипрофессиональный, и даже иногда надпредметный характер.

Содержание проблемно-ситуационных игр

Метод игрового моделирования управленческих процессов является весьма актуальным для предварительного построения объектов или процессов, исследования существующих проблем, поиска или разработки решений проблем, обучения специалистов высшего управленческого персонала принятию управленческих решений в условиях дефицита времени [1].

Проблемно-ситуационные игры (ПСИ), созданные при участии автора, определяются как одно из средств коллективного решения большого класса проблемных ситуаций, нацеленных на выход в пространство профессиональных и предметных задач в управлении, экономике, менеджменте и предпринимательстве [2].

Кроме того, в игре используются преимущества ситуационного подхода, широко распространенного в современном управлении экономическими системами типа «организация».

Возникновение и использование ПСИ обуславливается затруднениями получения как глубоких содержательных, так и социально-психологических результатов с применением других интенсивных образовательных технологий (ИОТ), в т.ч. деловых и организационно--деятельностных игр, тренингов, конкретных ситуаций и т.д. Это связано с принципиальной отсутствием возможности разрешения проблем на задачном уровне, но и невозможностью проблематизации затруднений, кроме того, от участников игры требуется различения задач и проблем, что стимулирует формирование личных потребностей и приобретение способностей в депроблематизации профессиональной деятельности.

В ПСИ решение конкретной проблемы заключается в выработке программы действий и выбора направления движения, позволяющего выйти из затруднений. Одной из важных в игре является линия развития личности, ибо без этого трудно отыскать позитивную программу и, главное, сложно будет ее реализовать после игры.

Методологическое направление затруднительно реализовать даже в рамках ПСИ, так как силы игротехнического коллектива, в основном, направлены на содержательные цели. Однако, если в послеигровой период производится детальный анализ игрового процесса, то происходит обогащение игротехнического коллектива в методологическом отношении.

Рассмотрим содержание и процесс проведения проблемно-ситуационной игры: «Повышение качества продукции предприятия». Основная цель игры - выявление путей и возможностей сокращения операционных затрат предприятия. Вспомогательные цели: освоение участниками новых методов мышления, повышение эффективности управленческих решений, улучшение коллективной работы; поиск решений проблемы и доведение их до программ реализации; развитие инновационного мышления и поведения.

Методология игрового моделирования

Игротехнический коллектив включает в себя руководство игры и состоит из следующих специалистов: руководитель игры; 4 игротехника (по количеству команд); методолог; 3 эксперта.

Игровой коллектив представлен исполнителями (члены команды топ-менеджеров, их заместители, руководители отделов и подразделений); генераторами идей (финансовый директор, начальник финансового отдела); потенциальными реализаторами игровых разработок (заместители топ-менеджеров, а также руководители отделов и подразделений).

Общая численность участников составляет 30-45 человек. Процесс организации и проведения игры состоит из трех этапов: подготовительного, игрового и послеигрового.

На **подготовительном этапе** был проведен первичный анализ ситуации. Он включал в себя беседу с финансовым директором и начальником финансового отдела с целью уточнения целей и задач игры, выяснения отношения сотрудников к игре, первичной диагностики ситуации, уточнения ожидаемого от игры результата. На основании полученной информации был разработан сценарий и программа игры, определено количество участников, проведена организационно-техническая подготовка.

В процессе **игрового этапа** выполняются следующие процедуры: введение в проблему, постановочные доклады; групповая работа по заданной тематике; проведение пленарных заседаний [1]. Первое пленарное заседание начинается с вступительной речи организаторов о целях и задачах игры, правилах поведения, правилах судейства и экспертизы.

Групповая работа по каждому структурному блоку состоит из нескольких частей: индивидуальная работа, внутригрупповая дискуссия и защита идей. На этапе индивидуальной работы участникам предлагается найти вариант решения, сформулировать проблему, перевести ее в задачи и т.д. Работа проводится в тишине, совещаться с коллегами нельзя.

Результат работы фиксируется на специальном бланке произвольной формы. Группа экспертов работает на основе предложенных для оценивания бланков. Каждый эксперт заполняет

бланки индивидуально, а затем на основе обмена мнениями эксперты принимают коллективное решение. Кроме того, эксперты разрабатывают систему поощрений и наказаний на основе правил игры.

По результатам этапа готовится доклад, который затем представляется на пленарном заседании. Результаты каждого блока фиксируются и передаются организатору игры.

Первый структурный блок «Определение цели» призван выявить, какую цель преследует внедрение критериев и как должна выглядеть идеальная оценка проекта с точки зрения разных сотрудников, а также приведение видения идеальной ситуации к некоему «общему знаменателю».

Формулирование проблемы помогает понять участникам, какие существуют перспективы решения данной проблемы и какие последствия (положительные и отрицательные) повлечет за собой внедрение критериев.

После окончания этого этапа проводится пленарное заседание. Его цель – подвести предварительные итоги, внести при необходимости коррективы и выявить направления дальнейшего движения игры.

Выбор рационального решения является еще одной проверкой на соответствие полученных решений общей цели и поставленным ограничениям. На этом же этапе выясняется, каких затрат требует каждое конкретное решение, какие ресурсы нужны для его осуществления. После ответов на данные вопросы у каждой из задач должно остаться единственное решение, признанное наиболее рациональным.

После этого этапа также проводится пленарное заседание. На этапе композиции проблемы из решений конкретных задач комбинируется общее решение проблемы. Проводится проверка того, как решение отдельных задач вписывается в структуру проблемы. Рассматривается соответствие решения проблемы ее формулировке и постановке отдельных задач, соответствие выбранным критериям и ограничениям.

Затем проводится разработка программы реализации. На этом этапе определяется последовательность стадий программы реализации, определяются ресурсы, необходимые для каждой стадии, назначаются сотрудники, ответственные за каждый этап. Выясняется, какие факторы могут повлиять на процесс реализации критериев успешности, какие следствия может за собой повлечь реализация данной программы.

После этого проводится итоговое пленарное заседание по результатам игры. Проводится экспертиза результатов индивидуального и коллективного генерирования идей. Дается оценка эффективности групповой работы, анализируется уровень аргументации, активность участников.

После завершения игры производится разработка рекомендаций и программы внедрения критериев успешности проекта, подготовка документов по результатам игры для заказчика, участников и организаторов игры, проводится анкетирование игроков для выяснения степени удовлетворенности результатами игры.

На послеигровом этапе выполняется аналитическая обработка результатов игры, готовится сводный отчет с приложением протокола хода обсуждения, полученных результатов, формируются рабочие планы исполнителей для каждого этапа внедрения, разрабатываются технические задания на работы.

Особое внимание на послеигровом этапе уделяется рефлексивному обобщению результатов для обеспечения качества и повышения эффективности применяемых моделей. Создается рабочая группа по доведению результатов игры до уровня распорядительных документов. Назначаются даты контрольных замеров эффективности игры.

Документирование играет важную роль в процессе организации взаимодействия участников посредством передачи данных и информации, зафиксированных на технических носителях (на бумаге). Это обеспечивает соблюдение определенного регламента взаимодействия участ-

ников, сохранность наработанного материала для подготовки решений, послеигрового анализа, набора статистики, оценки ситуаций, решений и т.д.

Документирование как процесс обеспечения взаимодействия участников игры предусматривает применение типовых форм регистрации информации. В состав комплекта документации по игре входят организационно-распорядительная документация по объекту игры и типовые формы представления результатов игровых туров.

Типовые формы представления результатов состоят из следующих бланков: постановка проблемы; выбор критериев; выбор рационального решения задачи; программа реализации.

Каждое предложение оценивается по следующим параметрам.

В - важность проблемы для организации, т.е. степень ее влияния на эффективность деятельности организации по 10-балльной шкале.

0_____10

Такой проблемы в организации нет — Проблема очень важна и связана с большими потерями эффективности

М - масштаб проблемы, по шкале (0-10)

0_____10

Проблема касается незначительно деятельности организации — Проблема касается всей организации в целом

С - степень сложности проблемы (0-10)

0_____10

Организация практически ничего не может сделать с проблемой — Проблема может быть решена силами самой организации

О – обеспеченность внутренними ресурсами (0-10)

0_____10

Для решения проблемы внутренних ресурсов не существует — Для решения проблемы внутренние ресурсы есть в полном объеме

Т - тенденция развития проблемы (+, 0, -) необходимо поставить знак

+, если в последние годы острота проблемы уменьшилась;

0, если острота проблемы осталась неизменной;

-, если острота проблемы увеличилась.

К - оценка своей компетентности по отношению к каждой проблеме (или решению) (0-10)

0_____10

Абсолютное незнание данной проблемы или ее решения — Хорошее знакомство с этой проблемой или ее решением

Участниками обсуждения был определен перечень проблем обнаруженных в ходе проверки. Далее участниками были сформулированы противоречия и барьеры в деятельности, определены проблемы, исследованы предложения по их решению. При этом на всех этапах выполнялась оценка проблем по указанным выше показателям.

Основные результаты игрового моделирования

Генеральным директором и директором по качеству были сделаны обстоятельное сообщение о целях и возможных результатах предлагаемой акции. Для того, чтобы будущие предложения были более значимыми, участникам было дано время в течение одного рабочего дня для их подготовки.

Затем на общем совещании специалистам было предложено подготовить собственное видение по каждой из перечисленных ранее проблем по определенной форме. Затем все предложения были собраны и обработаны, фрагмент которых представлен в табл. 1.

Таблица 1 –Проблемы организации

№ п/п	Наименование	Показатели					
		В 0-10	М 0-10	С 0-10	О 0-10	Т 0-2	К 0-10
1	Неэффективно функционирует система планирования	8,5	8,6	6,7	7,8	0,9	6,5
2	Центральный офис и производственные подразделения находятся в разных стадиях развития	7,7	8,9	8,8	6,7	0,8	5,5
3	В офисе не завершена стадия формализации отношений	6,8	7,8	7,3	5,4	1	6,1
4	Недостаточно эффективно функционирует система контроля исполнения решений	9,1	8,4	8,1	6,6	1	7,3

В течение трехчасового совещания специалисты индивидуально формулировали проблемы, которые им представляются необходимыми для включения в общий пакет проблем организации. С этими проблемами были ознакомлены все участники совещания. Ознакомление было проведено по первому варианту.

После окончания присвоения индивидуальных оценок каждой проблеме каждого участника формы были собраны и проведена обработка полученных материалов. При этом проблемы были сформулированы, классифицированы и разделены по процессам и направлениям деятельности организации. Фрагмент выявленных проблем организации представлен в табл. 2.

Таблица 2 - Проблемы организации с распределением их по объектам (фрагмент)

№ п/п	Проблемы.	Показатели					
		В 0-10	М 0-10	С 0-10	О 0-10	Т 0-2	К 0-10
1. Стратегия							
1.1	Неэффективно функционирует система планирования	8,5	8,6	6,7	7,8	0,9	6,5
1.2	Центральный офис и производственные подразделения находятся в разных стадиях развития	7,7	8,9	8,8	6,7	0,8	5,5
2. Персонал							
2.1	В офисе не завершена стадия формализации отношений	6,8	7,8	7,3	5,4	1	6,1
2.2	Недостаточно эффективно функционирует система контроля исполнения решений	9,1	8,4	8,1	6,6	1	7,3

В результате указанной работы были вычислены интегральные оценки важности, сложности и обеспеченности предложений по развитию деятельности организации и т.д. Все предложения были ранжированы по величине значений оценки целесообразности (фрагмент представлен в табл. 3).

Определение целесообразности рассмотрения проблемы выполняется по формуле:

$$Ц = [В - \alpha(С - О)]КМТ \ ,$$

где а – коэффициент, устанавливающий соотношение показателей сложности и обеспеченности.

Таблица 3 - Проблемы, ранжированные по значению целесообразности (фрагмент)

Ранг	Проблемы	Показатели						
		В 0-10	М 0-10	С 0-10	О 0-10	Т 0-2	К 0-10	Ц
1	Недостаточно эффективно функционирует система контроля выполнения решений	9,1	8,4	8,1	6,6	0,9	7,3	460,8
2	Слабо функционирует система планирования	8,5	8,6	6,7	7,8	0,8	6,5	404,7
3	Центральный офис и производственные подразделения находятся в разных стадиях развития	7,7	8,9	8,8	6,7	1	5,5	325,5
4	В офисе не завершена стадия формализации отношений	6,8	7,8	7,3	5,4	0,8	6,1	227,7

В результате был получен перечень проблем с последовательностью по целесообразности рассмотрения. В качестве примера приведены предложения по одной из проблем с усредненными значениями показателей (табл. 4.).

Таблица 4 - Предложения по выявленным проблемам предприятия (фрагмент)

№ п/п	Наименование	Показатели					
		В 0-10	М 0-10	С 0-10	О 0-10	Т 0-2	К 0-10
1	Любое управленческое решение должно заноситься в протокол совещания	8,8	7,9	5,4	9,1	0,9	7,3
2	При принятии управленческих решений необходимо привлекать к их разработке не только управленцев, но и исполнителей	6,8	7,8	6,3	5,4	0,8	6,1
3	Использовать регламентирование процесса принятия и исполнения решений	7,4	8,9	8,3	6,7	1	5,5
4	Разработать и внедрить систему сбалансированных показателей деятельности позволяющую контролировать исполнение решений по всем уровням (стратегический, оперативный, личные планы)	9,1	7,4	8,1	6,6	0,9	7,3

Следуя методу активного коллективного тестирования (МАКТ), предложения по преодолению выявленных проблем были оценены и проранжированы.

Использование МАКТ позволяет определить достаточное количество предложений по поставленным проблемам или их решениям, а помогает с определенной достоверностью определить все параметры этих предложений и компетентность каждого участника игры-совещания.

После проведения игры были получены следующие результаты:

*содержательные (*адекватная и разносторонняя оценка ситуации в организации, формирование группового видения критериев успешности проекта, перевод проблемы отсутствия критериев оценки в плоскость задач, нахождение оптимальных критериев успешности, отвечающих всем поставленным требованиям, программа внедрения критериев успешности проекта);

психологические (определенное понимание состояния людей в процессе профессиональной деятельности, освоение средств эффективного воздействия на людей);

социальные (освоение средств организации коллективной мыследеятельности, повышение мотивации к эффективному участию в групповой работе, навыки управления конфликтом, стрессом);

педагогические (возможность решать свои проблемы более осмысленно, освоение новых средств мышления и деятельности, повышение восприимчивости к инновациям);

методологические (умение ориентироваться в имеющихся средствах мышления, умение изменять имеющиеся средства и создавать новые).

По результатам игровой деятельности ожидается улучшение экономических показателей предприятия.

Рассмотренный подход может использоваться как отдельно, так и встраиваться в игровой процесс на любом этапе, где необходимо получить коллективные оценки проблем (или предложений) и затем их ранжировать

Большинство проведенных игр показали заинтересованность специалистов и управленцев предприятий, а также и слушателей курсов повышения квалификации. Первых интересует интерпретация профессиональной управленческой деятельности коллегами, вторых – новый мир профессиональной деятельности и его содержание.

Например, слушатели Президентской программы после ее завершения организуют игры на своих предприятиях. Конечно, такие игры носят программно-целевой характер: поиск проблем, выбор стратегии, оценка концепции деятельности. Но и они не обходятся без реплик, оригинальных интерпретаций, т.е. того, что делает обычное совещание состязанием интеллекта и дерзновенного полета мысли.

Список литературы

[1] Герасимов Б.Н. Интенсивные образовательные технологии: Методология управления педагогическими инновациями: монография. – Самара: Изд-во НОАНО ВПО СИБиУ, 2009. 480 с. – Серия «Энциклопедия управленческих знаний»

[2] Герасимов Б.Н. Игровое моделирование управленческих процессов: монография. – Самара: СНЦ РАН, 2006. – 195 с.

[3] Герасимов Б.Н., Герасимов К.Б. Методология построения систем управления процессами: монография. – СПб.: СПбГИЭУ, 2012. – 218 с.

[4] Герасимов Б.Н. Игровое моделирование управленческих процессов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XVI междунар. конф. – Самара: СНЦ РАН, 2014. – С. 316-322.

ИНДИВИДУАЛЬНО-АДАПТИРОВАННАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЮЩИХ ДЕЙСТВИЙ ЛЕТЧИКА НА ЭТАПЕ ПОСАДКИ

В.Н. Евдокименков, Р.В. Ким, А.Б. Векшина

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
125993, Москва, ул. Волоколамское шоссе, 4, Россия
evn@netland.ru
тел: +7 (499) 158-45-15

Ключевые слова: *эргатическая система «самолет-летчик», электронный инструктор, индивидуально-адаптированная математическая модель летчика, нейронная сеть*

Abstract

This paper presents an approach to implement mathematical model of pilot's activity for various flight modes. The proposed models are based on neural networks and provide an opportunity of determining the relation between touchdown accuracy on the runway and current aircraft's state for each moment of the flight. The algorithm for estimating neural network parameters using the data recorded by on-board recorders is developed. Simulation results for performing the landing mode by various pilots are reported. These results indicate that parameters of the neural network model which describes the pilot's activities depend on his individual piloting style..

Введение

Разработка имитационных моделей профессиональной деятельности летчика представляет одну из наиболее сложных проблем инженерной психологии, которая имеет многолетнюю историю. Еще в конце 40-х годов XX столетия была предложена линеаризованная модель, описывающую управляющие реакции летчика. Дальнейшие исследования в этой области позволили выявить фундаментальные закономерности поведения летчика и привели к созданию линейных моделей, построенных на основе классической теории управления, описывающих управляющие действия летчика в районе частоты среза разомкнутой системы «самолет-летчик». К середине 1960-х гг. была разработана модель спектральной плотности шумовой составляющей в действиях летчика. Невзирая на ряд недостатков, присущих этой модели, полученные результаты оказались весьма полезными при решении различных прикладных задач динамики и управления полетом.

Дальнейшим направлением развития моделей, описывающих деятельность летчика в процессе управления, можно считать полуформализованную прогнозно-оптимизационную модель деятельности летчика, которая объединила в себе теорию академика П.К. Анохина о функциональной системе и методы теории оптимального управления динамическими объектами по неклассическим функционалам качества, разработанные под руководством академика А.А. Красовского. Эта модель опирается на известный принцип инженерной психологии: высококвалифицированный оператор действует почти оптимальным образом при решении задач управления с учетом своих ограничений и своего понимания задач. Формализация модели опирается на предположение, что летчик рассматривает в качестве оптимального плавное управление, минимизирующее энергетические затраты на его реализацию. Синтез оптимального управления в рамках приведенной модели осуществляется на основе функционала обобщенной работы (ФОР) А. А. Красовского. Заметим, что модель обеспечивает синтез оптимальных управляющих действий «идеального» летчика на основе ФОР, что позволяет рассматривать указанную модель в качестве электронного инструктора и использовать для целей поддержки управляющих действий летчика.

Рассмотренные выше модели объединяет то, что они описывают деятельность «усредненного», летчика, управляющие реакции которого укладываются в среднестатистические рамки. Проблема состоит в том, что эти среднестатистические рамки оказываются слишком широкими (например, широко распространенная линейная модель летчика, основанная на его аппроксимации передаточной функцией, допускает двукратную вариацию постоянной времени). В то же время, динамические свойства современных и особенно перспективных самолетов, условия их боевого применения, требующие практически мгновенных управляющих реакций, приводят к необходимости учета индивидуальных особенностей конкретного летчика. Иными словами, возникает необходимость разработки индивидуально-адаптированных моделей деятельности летчика, обеспечивающих в том или ином виде учет особенностей управляющих реакций конкретного летчика. Этот вывод подтверждается результатами предшествующих исследований авторов [1-3].

1 Структура индивидуально-адаптированной нейросетевой модели управляющих действий летчика на этапе посадки самолета

Разработка математических моделей управляющих действий летчика осложняется отсутствием фундаментальных теоретических результатов, позволяющих учесть и описать средствами математики индивидуальные психофизиологические реакции летчиков. В этих условиях единственной надежной основой для построения индивидуально-адаптированной модели летчика являются данные, накапливаемые в процессе многократного повторения им посадочных режимов в условиях реальных полетов или полунатурного моделирования на пилотажных стендах в процессе подготовки. Более того, эта информация наращивается от полета к полету в процессе профессиональной деятельности летчика, что делает возможным непрерывное уточнение подобной модели с учетом изменения его опыта, квалификации и возрастной коррекции психофизиологических реакций. Ниже рассматривается один из возможных подходов к построению экспериментальной по своей природе индивидуально-адаптированной модели летчика на основе полетных данных, накапливаемых в процессе профессиональной деятельности конкретного летчика.

Введем вектор состояния системы «самолет-летчик» **Z**, компонентами которого являются параметры состояния самолета и переменные, характеризующие управляющие действия летчика самолета (перемещение ручки управления двигателем (РУД), ручки управления самолетом (РУС)). Предполагается, что компоненты вектора **Z** для любого произвольного момента реализации посадочного режима, характеризующегося удалением l от центра взлетно-посадочной полосы (ВПП), доступны измерению. Будем исходить из того, что к текущему моменту летчиком выполнено N посадочных режимов на самолете определенного типа. Безопасное приведение самолета на ВПП, обеспечивается, если в момент прохождения среза ВПП L контролируемые параметры состояния системы «самолет-летчик» не выходят за пределы заданных ограничений $z_{i\min} \le z_i \le z_{i\max}$, $i=1,..,n$. Приведенная совокупность условий определяет в пространстве состояний системы «самолет-летчик» терминальный параллелепипед, попадание в который является обязательным условием безопасной посадки. В этом случае для оценки качества выполнения посадочного режима целесообразно использовать скалярную индикаторную функцию μ (1), которая принимает значения в диапазоне $0 \le \mu \le 1$,причем значение $\mu=0$соответствует приведению самолета в центр терминального параллелепипеда, т.е. указывает на «идеальное» выполнение режима посадки, напротив, значения $\mu > 1$указывают на нарушение терминальных ограничений, т.е являются признаком неудовлетворительного выполнения посадочного режима

$$(1)\quad \mu = \max_{i=1,\ldots,n} \left| \frac{z_i(L) - \frac{1}{2}(z_{i\max} + z_{i\min})}{\frac{1}{2}(z_{i\max} - z_{i\min})} \right|$$

Таким образом, в результате выполнения конкретным летчиком определенного числа посадочных режимов N для любого момента выполнения типового режима l имеем реализации $\mathbf{Z}^k(l)$, k=1,…,N параметров состояния системы «самолет–летчик», «помеченные» соответствующими значениями индикаторной функции μ_k, характеризующими точность приведения самолет на ВПП. В дальнейшем под моделью летчика будем понимать зависимость $\mu(\mathbf{Z},l)$, которая для каждого момента выполнения полетного режима l и соответствующего этому моменту состояния $\mathbf{Z}$ системы «самолет-летчик» определяет прогнозируемую точность приведения самолета на ВПП, выраженную скалярной величиной μ. Выбор в качестве выхода модели прогнозируемой точности приведения самолета на ВПП обусловлен тем очевидным соображением, что конечной целью действий летчика на этапе посадки является обеспечение безопасного приведения самолета на ВПП. Разные летчики, даже обладающие сопоставимой летной квалификацией, обеспечивают достижение этой конечной цели по-разному, демонстрируя собственную манеру управления самолетом, а значит вид зависимости $\mu(\mathbf{Z},l)$ должен быть адаптирован к индивидуальным особенностям управляющих действий конкретного летчика. Справедливость этого утверждения доказывают приведенные в [2] результаты статистической обработки большого объема экспериментальных данных, накопленных в процессе многократного выполнения группой летчиков, обладающих сопоставимой квалификацией, посадочных режимов. Это вполне согласуется с результатами исследований в области авиационной медицины и инженерной психологии, из которых следует, что в процессе формирования навыка пилотирования самолета у летчика складывается индивидуальный динамический двигательный стереотип, который внешне характеризуется дозированными, целенаправленными движениями рычагами управления. При этом вырабатываются оптимальная амплитуда, частота и скорость перемещения рычагов управления. В конечном итоге закрепляется наиболее совершенная их форма, адекватная аэродинамике самолета и психофизиологическим особенностям конкретного летчика.

Следующая задача заключается в том, чтобы, используя реализации $\mathbf{Z}^k$(l), μ_k, k=1,…,N, накопленные в процессе деятельности летчика, разработать модель в виде зависимости $\mu(\mathbf{Z},l)$, устанавливающей для любого момента l выполнения посадочного режима связь между текущим состоянием $\mathbf{Z}$ системы «самолет-летчик» и прогнозируемой точностью μ приведения самолета на взлетно-посадочную полосу с учетом присущей конкретному летчику манеры управления. Наиболее предпочтительным вариантом построения подобной модели представляется использование нейронных сетей [4,5]. Это обусловлено тем, что в отличие от регрессионных моделей, основу которых составляет функциональное описание зависимости $\mu(\mathbf{Z},l)$, ядром нейросетевых моделей является типовой элемент, называемый кибернетическим нейроном. Именно нейрон является той основой (элементарной единицей), из которой выстраиваются более сложные конструкции, именуемые нейронными сетями. В свою очередь элементарные нейроны могут объединяться в более сложные многослойные конструкции, образуя нейронные сети, за счет чего достигается многообразие вариантов описания связей между входными и выходными сигналами. Несмотря на разнообразие существующих нейросетевых архитектур, опыт их использования показывает, что наиболее приемлемым вариантом нейронной сети для построения зависимости $\mu(\mathbf{Z},l)$ является многослойный персептрон. Это обусловлено тем, что многослойный персептрон способен аппроксимировать любую непрерывную функцию с любой заданной степенью точности, подтверждением чему является теорема Колмогорова [5].

В рамках нейросетевой модели индивидуальная адаптация модели летчика $\mu(\mathbf{Z},l)$ может быть достигнута за счет выбора ее входных параметров, количества скрытых слоев, числа нейронов в каждом скрытом слое и значений весовых коэффициентов каждого слоя. Заметим, что состав входных параметров, оптимизируемый в процессе обучения нейросетевой модели, определяет характерный для конкретного летчика механизм формирования оперативного приборного образа полета в процессе управления самолетом. Другие параметры модели отражают свойственный конкретному летчику механизм преобразования этого оперативного образа полета в управляющие воздействия. В следующем разделе приведены примеры построения нейросетевых моделей летчиков, по результатам моделирования посадочных режимов на аппаратно-программном симуляторе самолета МиГ-АТ.

2 Исследование нейросетевых моделей летчиков по результатам моделирования посадочных режимов на аппаратно-программном симуляторе самолета МиГ-АТ

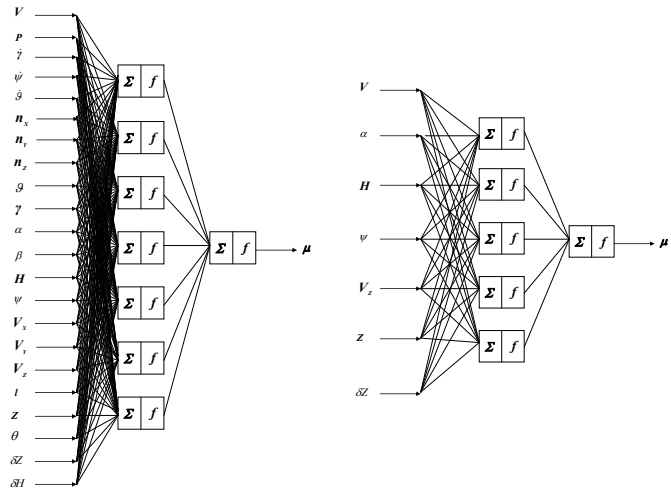
Для практической апробации способа формирования и уточнения в процессе деятельности летчика его индивидуально-адаптированной нейросетевой модели $\mu(\mathbf{Z},l)$ использовались результаты многократного моделирования траекторий посадки на аппаратно-программном симуляторе самолета МиГ-АТ. Компоненты z_1- z_{22} вектора состояния $\mathbf{Z}$ системы «самолет-летчик», регистрируемые в процессе моделирования на аппаратно-программном симуляторе самолета МиТ-АТ, объединяли следующие параметры: воздушная скорость (V); тяга двигателя (P); скорости изменения углов крена ($\dot{\gamma}$), рысканья ($\dot{\psi}$) и тангажа ($\dot{\vartheta}$); проекции перегрузок на оси связанной системы координат (n_x,n_y,n_z), углы тангажа (ϑ), крена (γ), рысканья (ψ), атаки (α) и скольжения (β); высота полета (H); проекции воздушной скорости на оси нормальной земной системы координат (Vx,Vy,Vz); боковое отклонение от оси взлетно-посадочной полосы (Z); угло наклона траектории (θ), боковое отклонение от посадочной глиссады (δZ); отклонение от посадочной глиссады по высоте (δH)

В процессе моделирования участвовали два оператора, имитирующие действия летчиков, причем первый оператор обладал значительным опытом управления самолетом, накопленным в процессе многократного выполнения посадочных режимов на пилотажных стендах и аппаратно-программных симуляторах. Второй оператор, не имеющий достаточного опыта пилотирования, имитировал действия начинающего летчика, обладающего ограниченной летной квалификацией. Каждым из операторов было выполнено 50 посадочных режимов. Соответствующие им нейросетевые модели в дальнейшем будем выделять, используя обозначения $\mu^1(\mathbf{Z},l)$, $\mu^2(\mathbf{Z},l)$. В качестве базовой архитектуры нейросетевой модели использовался многослойный персептрон (МСП), что, как указывалось ранее, обусловлено его практически неограниченными аппроксимирующими возможностями. Прежде всего, проведено исследование оптимальной (в смысле точности аппроксимации зависимостей $\mu^1(\mathbf{Z},l)$, $\mu^2(\mathbf{Z},l)$) структуры, многослойного персептрона. Оптимизация структуры предполагала определение: состава входных переменных; количества слоев нейронной сети; числа нейронов в каждом из слоев.

Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие выводы:

1) управляющие действия летчиков достаточно хорошо описывает нейросетевая модель в виде двухслойного персептрона. В этом случае ошибка аппроксимации функций $\mu1(Z,l)$, $\mu2(Z,l)$) не превышает 9 %:
2) нейросетевая модель в виде двухслойного персептрона отражает присущую летчику манеру управления самолетом на этапе посадки. Различия проявляются в составе параметров, выступающих в качестве входных переменных для нейросетевой модели, в количестве нейронов первого слоя, в весовых коэффициентах нейросетевой модели.

Для подтверждения этих выводов на рисунке 1 приведены оптимальные нейросетевые модели $\mu^1(\mathbf{Z},l)$, $\mu^2(\mathbf{Z},l)$ операторов, участвующих в экспериментах.



а) б)

Рисунок 1 – Оптимальные нейросетевые модели первого (а) и второго (б) операторов

Сопоставление моделей, приведенных на рисунке 1, показывает, что нейросетевая модель второго оператора имеет существенно более простую структуру, чем модель первого оператора. Эти различия имеют объективную природу и обусловлены разной манерой управления, присущей операторам, участвующим в эксперименте. Как указывалось выше, в качестве второго оператора привлекался специалист, обладающий многолетним опытом выполнения посадочных режимов на пилотажных стендах, для которого характерна сложившаяся манера управления самолетом на этапе посадки. Эта индивидуальная манера проявляется в том, что он достаточно хорошо выдерживает вертикальный профиль посадочной глиссады, активно маневрируя при этом в горизонтальной плоскости. Подтверждением этому служит то, что среди входных параметров нейросетевой модели второго оператора преобладают в основном траекторные параметры, характеризующие движение самолета в горизонтальной плоскости. Именно эти параметры существенным образом влияют на точность приведения самолета на взлетно-посадочную полосу вторым оператором. Более того, индивидуальная манера пилотирования, свойственная второму оператору, практически не изменяется в процессе его деятельности. Этот вывод иллюстрирует рисунок 2, где представлены нейросетевые модели, описывающие его управляющие действия на разных этапах деятельности, после выполнения N=10, N=20, N=40 и N=50 посадочных режимов. Во всех случаях нейросетевая модель описывается двухслойным персептроном с одним и тем же составом входных параметров и одинаковым числом нейронов. Некоторые различия проявляются в оптимальных значениях синаптических весов, полученных в процессе «обучения», но структура нейросетевой модели не меняется в процессе деятельности, что подтверждает наличие устойчивых, индивидуальных навыков пилотирования, присущих этому оператору.

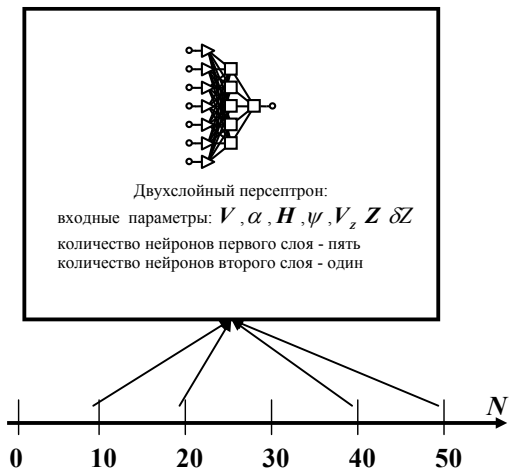


Рисунок 2 - Изменение нейросетевой модели второго оператора в процессе деятельности

Как указывалось ранее, в качестве первого оператора в эксперименте участвовал специа-лист, обладающий ограниченным опытом выполнения посадочных режимов, недостаточным для того, чтобы у него сформировался собственный «почерк». Отсутствие сложившейся индивидуальной ма-неры управления самолетом на этапе посадки проявляется в том, что, во-первых, точность приве-дения самолета на ВПП, которую демонстрирует первый оператор, в равной степени зависит от всех траекторных параметров. Это отличает его от опытного пилота, вырабатывающего управление на основе ограниченного набора наиболее значимых для обеспечения необходимой точности посадки траекторных параметров, состав которых соответствует свойственной ему манере управления самолетом; во-вторых, нейросетевая модель первого оператора существенным образом изменяется в процессе его деятельности. На рисунке 3 представлены нейросетевые модели первого оператора на разных этапах его деятельности после выполнения N=20, N=40 и N=50 посадочных режимов на аппаратно-программном симуляторе самолета МиГ-АТ.

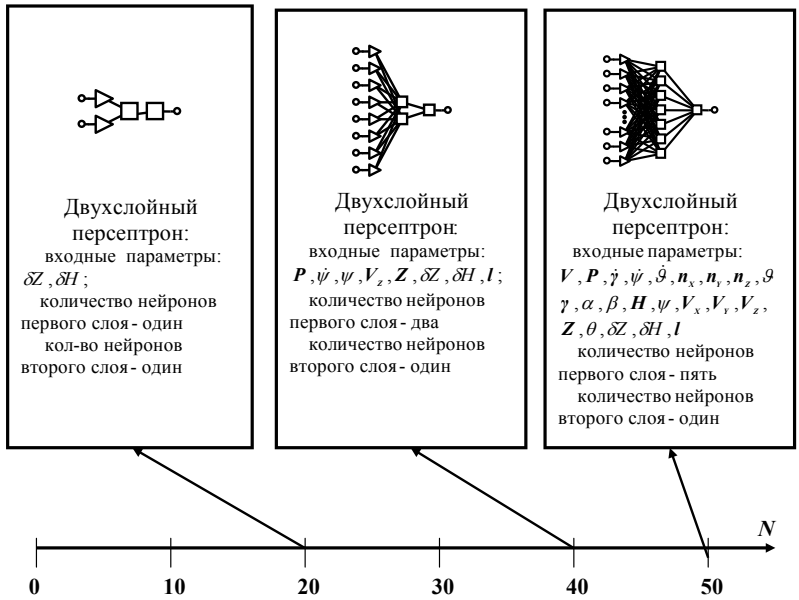


Рисунок 3 - Изменение нейросетевой модели первого оператора в процессе деятельности

Видим, что начинающий пилот (первый оператор) в начале своей профессиональной деятельности пытается строить управление только на основе положения курсо-глиссадных меток на пилотажно-навигационном приборе без какого-либо прогноза изменения траекторных па-

раметров. В дальнейшем объем анализируемых параметров увеличивается, но характерная для этого манера управления не проявляется, что обусловлено его низкой летной квалификацией.

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) опытному летчику присущая индивидуальная манера управления самолетом, которая отражается в его нейросетевой модели;
2) для опытного летчика, у которого сложились устойчивые навыки управления самолетом, адаптация нейросетевой модели в процессе его профессиональной деятельности достигается только за счет изменения весовых коэффициентов нейросетевой модели с сохранением ее структуры;
3) для начинающего летчика, не демонстрирующего устойчивых навыков управления самолетом, адаптация нейросетевой модели в процессе его профессиональной деятельности обеспечивается путем изменения как структуры нейросетевой модели, так и ее параметров.

Заключение

В статье рассмотрена индивидуально-адаптированная нейросетевая модель летчика, которая для каждого момента выполнения посадочного режима и соответствующего этому моменту состояния самолета определяет прогнозируемую точность приведения на ВПП с учетом свойственной для конкретного летчика манеры пилотирования. Приведены результаты стендового моделирование посадочных режимов на аппаратно-программном симуляторе самолета МиГ-АТ с привлечением группы операторов, имитирующих действия летчиков, обладающих различной квалификацией. Показано, что характерная для конкретного летчика манера управления самолетом при выполнении посадочных режимов однозначно проявляется в архитектуре нейросетевой модели, значениях ее параметров и в составе входных сигналов. Последнее особенно важно, поскольку состав входных сигналов, оптимизируемый в процессе обучения нейросетевой модели, определяет характерный для летчика приборный образ полета, формируемый им в процессе управления самолетом.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Проект № 15-08-01120)

Список литературы

[1] Базлев Д.А., Евдокименков В.Н, Ким Н.В, Красильщиков М.Н. Концепция построения бортовой информационно-экспертной системы поддержки действий летчика в особых ситуациях полета // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2007. №1. С.15-21

[2] Базлев Д.А., Евдокименков В.Н, Красильщиков М.Н. Построение характеристических множеств для индивидуально-адаптированной поддержки летчика при выполнении типовых полетных режимов // Изв. РАН. ТиСУ. 2008. №4. С. 97-108

[3] Себряков Г.Г., Красильщиков М.Н., Евдокименков В.Н. Контроль и интеллектуальная поддержка действий летчика при выполнении типовых полетных режимов на основе индивидуально-адаптированного подхода. // Мехатроника, автоматизация, управление.2014. №8. С.16-23.

[4] Хакин С. Нейронные сети. Полный курс, 2-е изд./ Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006

[5] Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. М.:Мир, 1992

ОРГАНИЗАЦИЯ РЕЧЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА - ОПЕРАТОРА С АНТРОПОМОРФНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ ДЛЯ ВЕДЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТИРОВКИ В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ

Б.И. Крючков[1], А.А. Карпов[2], В.М. Усов[1]

[1] Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина, 1414160 Россия, Звездный городок Московской области
B.Kryuchkov@gctc.ru; V.Usov@gctc.ru;
тел +7 495 526 7378, факс +7 495 526-26-12

[2] Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), Санкт-Петербург
199178, Россия, Санкт-Петербург,14 линия, дом 39
Karpov_a@mail.ru
тел.+7 812 328 3311; факс: +7 812 328 4450

Ключевые слова: *система «человек – антропоморфный мобильный робот – рабочая среда», дистанционное управление, условия невесомости, ведение пространственной ориентировки, схема тела, виртуальный наблюдатель, речевое взаимодействие*

Abstract
In order to facilitate orientation of the human operator via the remote control of an anthropomorphic mobile robot in weightlessness is supposed to use: (1) 3D visual representation of the workspace, based on augmented reality (technology of "virtual observer"); (2) speech interface to specify the type of maneuver and the movement direction of a mobile robot, according to the basis of natural views about the "schema of the human body" to describe the spatial relationships of objects subject environment.

Введение

Выполнение под контролем человека-оператора (ЧО) рабочих операций с помощью мобильных роботов в дистанционном режиме стимулирует поиски новых подходов в области построения человеко-машинных интерфейсов, в частности, многомодальных интерфейсов [1]. При этом речевое взаимодействие рассматривается в качестве значимого резерва повышения оперативности принятия и реализации решений ЧО в привычных и естественных формах диалогового общения. Требование простоты и естественности коммуникации человека с роботом особенно значимо при ведении пространственной ориентировки ЧО и управлении перемещением мобильного робота в невесомости. При отработке требований к информационным средствам поддержания коммуникации между человеком и роботом (при их взаимодействии на значительном удалении друг от друга) необходимо учитывать психофизиологические особенности деятельности и поведения человека и те ограничения, которые присущи человеческому фактору в разных условиях жизнедеятельности.

1 Влияние гравитационного фактора на ведение ЧО пространственной ориентировки

Необходимость учета человеческого фактора при выполнении операторской деятельности, требующей точной и оперативной ориентировки в пространстве, обусловлена следующими обстоятельствами. В обычных земных условиях ЧО использует образные представления о своем положении в пространстве, основанные на восприятии «схемы тела» и направления силы тяжести, что позволяет осуществлять ведение ориентировки с

антропоцентрических позиций [2]. Можно полагать, что такая ситуация будет сохраняться при ведении ориентировки на Луне и Марсе как самого ЧО, так и антропоморфного мобильного робота, рассчитанного на «напланетное» использование. Но такое естественное представление положения тела в пространстве (с однозначным пониманием «вертикали», «верха и низа» и других связанных с этим категорий) не всегда применимо при ведении пространственной ориентировки ЧО в пилотируемых космических полетах, когда действует фактор невесомости. Можно полагать, что хорошо продуманная конструкция и дизайн интерьера внутреннего пространства космического комплекса могут помочь космонавту в сохранении привычных представлений о том, где «пол», а где «потолок» применительно к рабочему пространству, но это не исключает необходимости постоянного выполнения зрительного поиска ориентиров и умственных действий по точной идентификации положения своего тела, что в отсутствии средств информационной поддержки будет приводить к затратам времени и отвлечению ЧО на дополнительные операции.

Более рациональным представляется подход, когда в соответствие с принятыми соглашениями и допущениями применяются ассистивные средства, индицирующие каждому космонавту-оператору данные о его ориентации в рабочем пространстве, однозначно понимаемые и постоянно доступные для всех потенциальных участников коммуникации (в том числе, «коммуникантов-роботов»), находящихся в разных сегментах, секторах и отсеках космического комплекса, и аналогичные сведения о мобильном роботе.

Оценивая трудности и истоки потенциальных ошибок идентификации положения мобильного робота в пространстве надо иметь в виду, что в условиях невесомости ведение ориентировки космонавта может быть затруднено также по причине нарушений функционального состояния – измененной афферентации и конфликта анализаторных систем.

Таким образом, поскольку объективно существуют связанные с человеческим фактором трудности дистанционного управления, включающего задачи позиционирования и навигации антропоморфного робота, а также его ориентации в рабочем пространстве, актуально исследование вопросов выдачи речевых команд на выполнение маневров и разворотов антропоморфного робота на языке, близком к естественному, и организации диалога в целом.

2 Принципы построения коммуникации в рабочей группе при согласованном перемещении индивидов в пространстве

Рабочей гипотезой исследования принята следующая: для варианта дистанционного управления антропоморфным мобильным роботом правомерна организация речевого взаимодействия между коммуникантами диалога «ЧО – очувствленный робот» по типу тех команд, которые подают друг другу члены единой рабочей группы (экипажа) для согласованного выполнения различных поворотов и задания направления движения с «привязкой» к схеме тела индивида, который инициирует такие команды, либо с четким указанием объекта, относительно которого выбирается направление перемещения. В качестве базового объекта для задания точки отсчета и построения системы координат может также использоваться объект потенциального воздействия манипуляционного робота либо, в общем случае, любой набор стационарно расположенных объектов в рабочем пространстве, для которых могут быть получены все необходимые исходные данные проведения дальнейших расчетов для ориентации, локализации, позиционирования и навигации мобильного робота. При этом предполагается, что априорно возможно проведение процедур описания и оцифровки визуальной сцены, которая доступна ЧО при использовании систем технического зрения или другого источника визуальной информации для идентификации объектов, уточнения их локализации и построения семантических отношений расположения в пространстве в сравнении с легко опознаваемыми ориентирами.

Известные психофизиологические ограничения ЧО связаны с тем, что способность к ведению пространственной ориентировки не является врожденным свойством человека, а, напротив, она формируется в ходе онтогенеза, обучения, тренировок и, как правило, требует разработки средств отображения информации о взаимном расположении объектов в пространстве, если в полете нарушаются привычные условия гравитационной обстановки [2]. Из-за того, что пространственная ориентировка представляет собой сложное, как правило, развернутое во времени интеллектуальное действие и в сложных полетных ситуациях требует актуализации регуляторных механизмов образных представлений [2], при задании ЧО речевых команд ориентации и перемещения мобильного робота необходимо предусматривать меры снижения вероятности ошибок неправильного задания и исполнения двигательных актов мобильным роботом в рабочем пространстве пилотируемого комплекса.

Для этого необходимо таким образом формализовать проблему семантического описания пространственных и временных соотношений контролируемых объектов в рабочей среде, чтобы осуществить единство интерпретации подаваемых речевых команд для участников диалога. Исходя из этой посылки, правомерно рассмотрение вопросов, каким образом человек воспринимает сложную визуальную сцену, проводит анализ расположения объектов по признакам «ближе – дальше», «по центру – на периферии» и другим по отношению к осям схемы тела [3], а также упорядочивает свои предметные представления в виде семантических префиксов (или «аннотаций» по терминологии работы [4]), например, «на переднем плане», «на заднем плане», «в ближней зоне», «на безопасном удалении» и в других категориях пространственных отношений, полезных для принятия прагматического решения. Этот шаг формализации необходимо сделать и в том случае, если для мобильного робота конструируется «картина мира», следуя тем механизмам образных представлений и способам их выражения в вербальной форме, какие использует человек в соответствии с внутренним представлением «схемы тела», отражающим его «структурную организацию» и выполняющим такие функции, как определение границ тела, восприятие расположения, позы, «длин и последовательностей звеньев, а также их диапазонов подвижности и степеней свободы» [3].

3 Особенности ведения пространственной ориентировки ЧО и организации речевого взаимодействия с мобильным антропоморфным роботом в невесомости

Следуя работам [5,6], применительно к условиям невесомости для организации речевого взаимодействия ЧО с антропоморфным мобильным роботом необходимо использование концептуальных подходов к заданию семантики пространственных отношений предметного окружения антропоморфного робота, аналогично тому, как это предлагается делать в случае антропоцентрического подхода для представлений о «схеме тела» человека. Одним из условий реализации такого подхода является нахождение способа 3D визуализации для ЧО пространственных соотношений расположенных в окружающей среде объектов и получения в интерактивном режиме информационной поддержки планирования двигательной активности робота и/или предотвращения коллизий подвижных объектов в рабочем пространстве.

Отечественные исследователи проблем искусственного интеллекта неоднократно отмечали важность «сближения» семантических категорий, которые использует человек при ориентировке во времени и пространстве и той «модели реального мира», которая позволяет наделенному искусственным интеллектом мобильному роботу эффективно использовать информацию, получаемую от человека. Кроме того, важно облегчить доступ ЧО к информации, получаемую от сенсоров робота из внешней среды. По мнению ряда авторов «модель внешнего мира» робота целесообразно строить с использованием естественных отношений пространства и времени» [6-8]. Такая модель может трактоваться с позиций «интерпретации внутренней модели внешнего мира» ЧО с «отображением составляющих

внешнего мира на совокупность нечетких психолингвистических шкал» [9,10]. Аналогичные подходы можно найти в работах [9,10], согласно которым «диалоговое управление мобильным роботом должно строиться при ряде психологически мотивированных предположений», включающих следующие посылки:

- «Восприятие внешнего мира роботом должно быть согласовано с естественным восприятием мира человеком-оператором».
- «Взаимодействие с человеком-оператором осуществляется на языке целеуказаний, близком к естественному».
- «Система знаний робота и способы принятия решений должны быть согласована с системой знаний и способами мышления человека».

Можно полагать, что для такой системы знаний и для описания предметного окружения мобильного робота могут использоваться методы построения онтологий, которые адаптированы к поиску, анализу и систематизации сложных визуальных сцен и картин [4,5].

4 Инструментальные средства построения системы информационной поддержки ЧО для мониторинга положения мобильного робота и речевого взаимодействия с ним

Для мониторинга положения мобильного робота в рабочей среде могут быть использованы информационные технологии дополненной реальности и «Виртуального наблюдателя» [11] Технология «Виртуального наблюдателя» первоначально была разработана на основе интеллектуального человеко-машинного интерфейса для телемедицины и медицинской робототехники [12]. В этой работе были использованы виртуальные модели и управляемые компьютерно-синтезированные 3D-изображения виртуальных объектов, погруженные в изображение реальной среды. Данная технология может иметь более широкую область потенциального применения. В частности, она позволяет визуально в составе целостной визуальной сцены контролировать локализацию мобильного робота, осуществлять позиционирование и навигацию, а, что важно с позиций обеспечения безопасности работ в замкнутых помещениях (и в герметически замкнутых объектах), обеспечивать для ЧО ситуационную осведомленность в быстро меняющейся обстановке и при изменении состава контролируемых активных агентов в рабочей среде. Новым требованием к системе интерактивной визуализации 3D визуальной сцены является возможность указания в ней объектов с получением в вербальной форме подсказки для ЧО, в каких пространственных отношениях они находятся с мобильным роботом, исходя из его «схемы тела».

Приведенные выше концептуальные подходы позволяют сформулировать новые направления развития средств информационного обеспечения космонавта и совершенствования систем отображения информации о состоянии контролируемого рабочего окружения для более полного учета человеческого фактора. При ведении пространственной ориентировки в невесомости в интересах снижения ошибок ЧО при выдаче речевых предписаний на языке, близком к естественному, применительно к дистанционному управлению мобильным антропоморфным роботом предлагается:

1) Применение семантического описания пространственных и временных соотношений при 3D-визуализации объектов рабочей среды для улучшения условий принятия решений ЧО и теории лингвистических переменных для формализации нечетких отношений ориентации объектов и дистанции между объектами сцены (и «глубины сцены» при разных точках отсчета), исходя из принципов антропоцентрического подхода и психофизиологических закономерностей построения «схемы тела» у человека в земных условиях.

2) Использование при построении системы информационной поддержки ведения пространственной ориентировки ЧО при дистанционном управлении мобильным антропоморфным роботом (дополнительно к инструментальным данным измерений дальности

объектов и дублирования канала системы технического зрения робота) визуального компьютерно синтезированного 3D-представления на основе дополненной реальности (и технологии «виртуального наблюдателя») в форме многооконного интерфейса [11,12].

3) Применение информационных технологий построения мультимодальных человеко-машинных интерфейсов для поддержания речевого общения ЧО с мобильным роботом в форме диалога на языке, близком к естественному [1,13].

4) Использование для характеристики пространственных соотношений и взаимного расположения объектов в рабочей среде разных систем координат, связанных с местоположением человека-оператора, мобильного робота, объекта воздействия и др. Согласно [11], что должно находить свою реализацию в применении многооконных представлений (разных проекций «вертикальной» и «горизонтальной» обстановки, разных направлений обзора и разной фокусировки) в системе отображения информации, позволяющих облегчить для ЧО мысленные операции перекодирования для формирования регуляторного образа ведения пространственной ориентировки.

Заключение

Комплексное рассмотрение проблемы речевого общения ЧО с мобильным роботом с учетом психологических и физиологических закономерностей ведения пространственной ориентировки приводит к известным из литературы вариантам применения лингвистических категорий для описания соотношений объектов в пространстве и во времени [8-10].

Значительный вклад в повышение надежности выполнения задач ориентировки и принятия решений на этой основе может внести использование речевых интерфейсов, что существенно упрощает для человека формирование команд и предписаний и повышает оперативность их передачи в каналы связи. При этом необходимо учитывать наличие объективных рисков появления сбоев в диалоговом общении ЧО с мобильным роботом, связанных с объективными трудностями формирования у ЧО адекватных представлений о состоянии рабочей среды и актуализации психологических механизмов образной регуляции, связанных с ведением ориентировки в пространстве в условиях невесомости.

В соответствие с этим предлагается строить речевые конструкции, исходя из естественных представлений о «схеме тела человека» и методических подходов, которые предложены для описания предметного окружения человека и мобильного робота с позиций, которые условно можно назвать принципами «антропоцентрического» и «роботоцентрического» подхода, соответственно. Этот аспект проблемы требует проведения эргономических исследований и испытаний применительно к характеристике опознания ЧО динамически меняющихся ориентиров при различиях ориентации в пространстве ЧО и дистанционно управляемого им робота.

Разработка методологии построения системы информационной поддержки речевой коммуникации человека с мобильным антропоморфным роботом в пилотируемых космических полетах и практических рекомендаций по снижению рисков человеческого фактора при ведении пространственной ориентировки может расширить потенциальную сферу применения антропоморфных мобильных роботов при внутри- и вне- корабельной деятельности космических экипажей.

Для решения этой задачи необходимы новые подходы к построению интеллектуального окружения для ЧО и созданию новых типов систем отображения информации, в которых наряду с традиционными инженерно-психологическими решениями применяются методы и средства 3D представления рабочей среды и воспроизведения динамики перемещения в ней активных агентов с использованием технологий имитационного моделирования для обеспечения интерактивности со средой и контролируемыми объектами (технология «Виртуального наблюдателя»).

Преодоление этих трудностей составляет существенную часть методологии повышения надежности ЧО и важный ресурс для снижения негативных сторон потенциальной ненадежности человеческого фактора в пилотируемой космонавтике.

Как итог, можно констатировать, что автоматизация и интеллектуализация космических эргатических систем, в составе которых имеются роботизированные комплексы, а именно, «антропоморфные мобильные манипуляционные роботы», требуют на качественно более высоком уровне обеспечить эффективное взаимодействие ЧО с роботами, в том числе, на основе речевой коммуникации.

Список литературы

[1] Карпов, А.А. Многомодальные ассистивные системы для интеллектуального жилого пространства. / А.А. Карпов, Л. Акарун, Ал.Л. Ронжин // Тр. СПИИРАН, №19 (2011), С.48-64.

[2] Ломов, Б.Ф. Образ в системе психической регуляции деятельности / Б.Ф. Ломов, Н.Д. Завалова, В.А. Пономаренко. М.: Наука, 1986. 163 с.

[3] Гурфинкель, В. С. Концепция схемы тела и моторный контроль // Интеллектуальные процессы и их моделирование. Организация движений / В.С. Гурфинкель, Ю.С. Левик / Под ред. А.В. Чернавского. М.: «Наука», 1991. С.24-51.

[4] Соколова, Е.Г. Формализованное описание содержания изображения как данные для генерации текста / Е.Г. Соколова, М.В. Болдасов // Диалог 2007: Труды международной конференции. Бекасово, 2007. С.508-515.

[5] Смирнов, А.В. Онтологии в системах искусственного интеллекта: способы построения и организации (ч. 1) / А.В. Смирнов, М.П. Пашкин, Н.Г. Шилов, Т.В. Левашова // Новости искусственного интеллекта. 2002. №1. С.3-13.

[6] Калуцкая, А.П. Гранулярная онтология пространства для когнитивных мобильных роботов / А.П. Калуцкая, В.Б. Тарасов. // Труды ХП-й национальной конференции по искусственному интеллекту КИИ-2010 (Тверь, 20-24 сентября 2010 г.). М.: Физматлит, 2010. Т.3. С.430-44.

[7] Поспелов, Д.А. Интеллектуальные интерфейсы для ЭВМ новых поколений // Электронная вычислительная техника. Сборник статей. Вып.3, М.: Радио и связь, 1989, С.4-20.

[8] Аверкин, А.Н. Нечеткое отношение моделирование и его применение в психологии и искусственном интеллекте. / А.Н. Аверкин, В.Б. Тарасов. М.: ВЦ АН СССР, 1986. 36 с.

[9] Ющенко, А.С. Методы нечеткой логики в управлении мобильными манипуляционными роботами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия "Приборостроение, 2012. Спец. вып. №6. "Робототехнические системы". С.29-44.

[10] Ющенко, А.С. Человек и робот – совместимость и взаимодействие // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1(2). С.4-9.

[11] Информационные системы виртуальной реальности в мехатронике и робототехнике: Учеб. Пособие / Г.В. Алферов, Ф.М. Кулаков, А.И. Нечаев, С.Э. Чернакова. СПб.: «СОЛО», 2006. 146 с.

[12] Тимофеев, А.В. Информационные технологии и мехатронные устройства для интеллектуальных медицинских систем / А.В. Тимофеев, С.Э. Чернакова, А.И. Нечаев, М.В. Литвинов // Информационно-управляющие системы. Управление в медицине и биологии. СПб., 2006. Т. 4(23). С.45-49.

[13] Прищепа, М.В. Система интеллектуального управления мобильным информационно-справочным роботом / М.В. Прищепа, В.Ю. Будков, А.Л. Ронжин // Информационно-управляющие системы, №6, 2010. С.2-6.

ТРЕТЬЯ ПРИРОДА: СУБЪЕКТИВНОСТЬ В ТЕХНИЧЕСКОМ СОЗНАНИИ

А.Ю.Нестеров

Самарский государственный аэрокосмический университет имени ак. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Московское шоссе, 34, Самара, 443086 Россия

http://philosophy.ssau.ru/

phil@ssau.ru

тел. +7 (846) 2674565

***Ключевые слова**: техника, техническое сознание, проективный семиозис.*

Abstract

The paper considers the concept of «third nature» in technical consciousness.

Техника, техническое сознание и самосознание, – ключевые термины современной рациональной философии. Как «тэхне», мастерство и искусность в смысле способности действовать на основании правила [1], техническое позволяет рассматривать проблемы эпистемологии и способы их решения в практической деятельности. Как технология, способ достижения цели, требующий контроля над материей, техническое нуждается в онтологии и способах её исследования с учётом гносеологического, лингвистического и прагматического «поворотов». Как форма сознания и среда жизнедеятельности человека, определённая рефлексией, техническое является пространством антропологии и этики.

Словосочетание «техническое сознание» подразумевает, что спектр связанных с термином «техника» значений, начиная от способности действовать на основании правила и заканчивая трансгуманистическими представлениями о новой среде обитания человечества, созданной аватар-технологиями, возможен только в связи со структурами человеческого сознания и не может быть описан без их учёта. Техническое сознание может быть рассмотрено на трёх ступенях: как традиция, где техника есть способ выживания человека в естественной природной среде; как «вторая природа», где техника есть способ замещения естественной среды искусственной; как «третья природа», где техника есть способ управления рефлексией.

В качестве традиции техническое сознание раскрывается в оппозиции природы и техники, естественного мира и того способа, которым человек и человеческие сообщества в него включаются. В качестве второй природы техническое сознание раскрывается в оппозиции художественной и технической деятельности человека и обуславливается постановкой проблемы «нового», вопросом об осуществлении нового или искусственного в тех или иных сферах деятельности и жизни. В качестве третьей природы техническое сознание раскрывается в оппозиции рефлексии, понимаемой как фундаментальное свойство человека, делающее его свободным, и техники, понимаемой в качестве аппарата контроля и управления рефлексией на уровне материи или материального условия возможности рефлексии (в биологическом и, в перспективе, в кибернетическом смысле).

Переход от традиции к построению второй природы определён осознанием процедур рефлексии и на первом шаге связан с созданием вымышленных объектов средствами рассудка. Например, при освоении языка каждому становилось очевидным, насколько малую часть общего словарного запаса можно связать с какими-либо фрагментами чувственно воспринимаемого мира, так что перед каждым вставала и встаёт задача самостоятельно наполнить содержанием «метафизические» понятия или найти значения для фикциональных

знаков. Это проективная деятельность, которая позволяет с помощью воображения или представления расширять границы воспринимаемого на основании языков. Проективный семиозис, если рассматривать его на фоне традиционного представления о трансцендентальной модели познания, представляет собой обращение иерархического соотношения семиотических систем: прагматические предпосылки разума являются основанием для прагматических предпосылок рассудка и соответственно задают прагматику (границы содержательной стратегии интерпретации) реализации семантического правила. Соответственно второй шаг в построении второй природы, позволяющий отличить художника и поэта от техника или инженера, заключается в способности материального воплощения вымышленных объектов, созданных рассудком.

«Новое» открывается или создаётся там, где субъект осознаёт те или иные границы. Техническое сознание имеет дело с новым сначала в форме прояснения и углубления навыка соотнесения рассудка и чувственного восприятия[1], затем в форме переноса элементов структурной организации рассудка в область чувственного восприятия: в первом случае речь идёт о тренировке врождённых навыков рефлексии и открытии правил преобразования знаков в различных материальных средах; во втором случае – о создании новых знаков в субстратах чувственного восприятия и рассудка и об усложнении структуры акта познания. Третьей ступенью реализации технического сознания становится открытие нового в области прагматики самой процедуры рефлексии, когда проблема нового оказывается связана не столько с синтаксическими правилами восприятия и рассудка и их материальным воплощением, сколько с интерпретантами, делающими возможным физический мир, язык и способ их соотнесения.

Третья ступень технического сознания подразумевает не только осознание рефлексии и рефлексивного характера проективной деятельности, но и понимание процедуры рефлексии как семиозиса определённого типа, обладающего прагматикой, синтаксисом и семантикой. Это эволюционное сознание, где техническое оказывается одновременно субъектом, объектом и средой развития.

Техническое сознание на третьей ступени подразумевает контроль над материей не только физического мира и рассудка, но и рефлексии. «Технические объекты» воплощаются не только в сфере логических схем и чувственного опыта, но и в сфере условий возможности соединения первого и второго, первым примером техники такого рода является создание искусственных живых организмов и воздействие на ДНК человека. Наиболее существенной проблемой в такой ситуации становится проблема эволюционного прогноза и ответственности.

Исследование и трансформация условий возможности рефлексии – это вопрос о возможности долгосрочного планирования, который не проблематизируется на первой или второй ступенях технического сознания, находясь в ведении религиозной догматики в виде необсуждаемых представлений о самотождественности природы во времени (концепции «доброго бога» или «антропного принципа»). Управление рефлексией представляет собой своего рода рефлексию над рефлексией, влекущую отождествление «третьей» природы и естественной природы и изменение её субъекта.

Вполне очевидно, что третья ступень технического сознания в качестве субъекта имеет дело уже не с человеком, как он фиксировал сам себя в наблюдаемом периоде истории культуры, но с неочеловеком, способным не просто осознавать рефлексию и контролировать

[1]Наиболее ясно сказанное демонстрирует известный пример Платона с тремя кроватями [5]: «нового» для традиции нет, есть лишь навык «подражания». Очевидно, что переход от первой ступени технического сознания ко второй вызывает принципиальное противоречие в оценке деятельности воображения в религиозно-догматических и научно-технических дискурсах.

некоторые фрагменты материи в физическом и ментальном субстратах, но и перестраивать условие возможности рефлексии, влекущее изменение в том, какие «миры» или субстраты семиозиса в принципе соотносимы для человека, и, соответственно, в том, как именно осуществляется наполнение содержанием человеческого «я».

Техническое сознание, описываемое как проективный семиозис, показывает эволюцию индивида от традиции к неочеловечеству. Человек, рождаясь, осваивает транслируемую культурной памятью сумму навыков, обеспечивающих выживание в естественной среде его рождения; фантазия, вымысел, метафизическое представление, порождённые удивлением, эстетическим переживанием или практической проблемой, вызывают процессы самосознания, позволяют косвенным образом увидеть рефлексивный характер практической деятельности; способность воплощать в материальных субстратах фикциональные объекты порождает вторую природу, замещающую естественные объекты восприятия и представления; способность материального изменения правил рефлексии открывает путь к осознанной и контролируемой автоэволюции человека, создавая «третью природу», в которой человек превращается в неочеловека, способного изменять качество своего человеческого существования как рефлексивного существа. Такого рода развитие требует от индивида серьёзного усилия по поддержанию рациональности в каждый момент времени, способности сохранять память и способности к действию в условиях нарастающей неопределённости. В целом неочеловек как субъект технического сознания, создающего третью природу – это в онтологическом плане индивид, осознающий своё существование и стремящийся расширить его границы, в гносеологическом плане – это познающий субъект, способный самостоятельно сдвигать границу познаваемого, в аксиологическом плане – это член общества, самостоятельно вырабатывающий общезначимый этический кодекс и следующий ему, в праксиологическом плане – это тот, кто способен действовать, концентрируя усилия на достижении цели.

Список литературы

[1] Аристотель Метафизика / Сочинения в четырёх томах. Т.1. М.,1975.
[2] Бек Х. Сущность техники // Философия техники в ФРГ. М., 1989. С.172-190.
[3] Нестеров А.Ю. Семиотическая схема познания и коммуникации. Самара, 2008.
[4] Нестеров А.Ю. Техническое сознание как семиозис // Человек в техносреде: конвергентные технологии, глобальные сети, Интернет вещей. Сборник научных статей. Выпуск 1. Вологда, 2014. С.85-93.
[5] Платон Государство / Собрание сочинений в 4т. Т.3. М., 1994.
[6] Энгельмейер П.К. Философия техники. СПб, 2013.
[7] Ropohl G. Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik. Karlsruhe, 2009.

ЧЕЛОВЕК В ТЕХНОГЕННОМ МИРЕ: ПРОБЛЕМЫ ВОПЛОЩЕНИЯ, ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ИНТЕГРАЦИИ

С.Ф. Сергеев

ГНЦ РФ ЦНИИ робототехники и технической кибернетики
194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т, 21, Россия
ssfpost@mail.ru
тел: +7 (911) 995-09-29

Ключевые слова: *техногенная среда, техногенный мир, межсистемные взаимодействия, циклическая самоорганизация, энактивизм, организованная сложность.*

Abstract

The article is devoted to the problem of co-evolution of a man-made environment, man and society. We Examines the impact on people and society of new information and network technologies. Show the occurrence of technobiotics stage of evolution of human civilization. Given the author's interpretation occur in man-made environment, man and society events autopoetics self-organization and orientation of intersystem interactions. We show the mechanism of their impact on the development of global man-made environment and humans.

Введение

В последнее время в научно-технической и инженерной среде наблюдается устойчивый рост интереса к инженерно-психологическим и эргономическим дисциплинам, связанным с решением вопросов проектирования искусственных техногенных сред и эргатических систем. Уклон в сферу социальных технологий в инженерном труде обусловлен ожиданием появления новых возможностей человечества в точке технологической сингулярности подготовленной развитием настоящего этапа техногенной цивилизации. Одновременно растут опасения, связанные с возможным негативным влиянием компьютерных технологий на психическую сферу и здоровье человека.

Отметим, что базовые принципы, лежащие в основе техно-феномена человека, технонауки и технологии, приводящие к уникальным возможностям человечества по целенаправленному влиянию на природу и общество по настоящее время, изучены недостаточно. Несмотря на большой объем полученных в естественных и гуманитарных науках знаний, мы по-прежнему плохо представляем себе природу творческой и созидательной активности и продуктивности человека и общества ведущих к созданию современного варианта техногенного мира. Попытаемся частично восполнить данный пробел, используя постнеклассические системные представления в психологии, связанные, прежде всего, с самоорганизующимися системами аутопоэтического типа, к которым традиционно относятся живые организмы и социальная коммуникация.

Основным методом, использованным в данной статье, послужил теоретический анализ проблемы эволюции человека и психики в условиях развития техногенной среды с точки зрения, развиваемой автором постнеклассической инженерной психологии, основанной на положениях эпистемологического конструктивизма [1, 2]. В работе рассматриваются проблемы самоорганизации и функционирования психики человека в техногенной среде. Используются системные и методологические подходы и идеи конструктивизма, изложенные в работах В.И. Аршинова, В.Г. Буданова, Ф. Варелы, Л.С. Выготского, Ф. Капры, Е.Н. Князевой, С.П. Курдюмова, В.А. Лекторского, Н. Лумана, У. Матураны, Г. Рота, Ж. Пиаже, В.С. Стёпина, Х. фон Фёрстера, Г. Хаккена и др.

1 Системный базис эволюции техногенной среды

С точки зрения классической естественной науки живая система это довольно странная вещь, суть которой состоит в появлении после рождения самоподдерживающегося циклического процесса («вихря самоорганизации»), ведущего к возникновению существующей во времени и пространстве фиксированной организации исторического типа, проявляющей свойства динамической системы с переменными структурой, функциями и элементами. Такие системы Хайнц фон Фёрстер (Heinz von Foerster) относил к кибернетическим системам второго порядка (наблюдающие системы) [3], а Умберто Матурана (H. Maturana) и Франсиско Варела (F. Varela) – к аутопоэтическим системам [4].

Суть существования данных системных образований заключается в непрерывном рекурсивном процессе самовоспроизведения цепей (сетей) процессов порождающих их и их элементы, называемом аутопоэзисом («autopoiesis» – самопорождение, самосотворение, самопроизводство).

При этом возникает системное единство (аутопоэтическая система), существующее как результат непрерывного циклического изменения в зоне своего существования замкнутых на порождение самое себя процессов различной физической, информационной и ментальной природы.

Матурана и Варела определяют аутопоэтическую систему следующим образом: – «это система организованная (определена как единство) как сеть процессов производства (трансформации и разрушения) компонентов, которые производят эти компоненты. Одновременно компоненты имеют следующие характеристики: (i) в процессе взаимодействий и превращений между собой они постоянно регенерируют и реализуют сеть процессов (отношений), которая их создала; и (ii) они составляют ее (систему) как конкретное сетевое единство в пространстве, в котором они (компоненты) существуют, указывая на спецификацию топологических доменов в ее реализации в качестве такой сети» [5].

Важным для нас следствием аутопоэзиса является появление и проявление избирательных, селективных свойств живой системы по отношению к себе и среде своего существования. Система не может пропускать в зону самоорганизации своих внутренних операций те воздействия среды, которые могут привести к нарушению циклов аутопоэзиса. Это приведет к ее гибели. В силу этого возникает понятие операциональной замкнутости аутопоэтических систем, в соответствии с которым в данных системах могут существовать лишь только те операции, которые ведут к самовопроизводству системы и расширению области ее существования. По этим причинам аутопоэтическая система не реагирует непосредственно на неспецифическую активацию со стороны внешней среды. Ее развитие определяется преимущественно внутренними закономерностями и причинами, лежащими внутри системы. Такая система представляет собою относительно изолированный от окружающей среды по каузальной структуре фрагмент реальности. Внешняя среда не может извне определить свойства данной автономной системы, прорвать ее каузальную непроницаемость. Заметим, что операциональная замкнутость не означает изоляцию системы от среды, а говорит лишь об особых отношениях системы с окружающим миром.

Аутопоэтический характер системогенеза и функционирования живых организмов, по-видимому, пронизывает все уровни структурной организации живой материи (тотальная аутопоэтичность). Это ведет к появлению у животных и человека форм психического отражения и реагирования в виде информационного аутопоэтического процесса, сопровождаемого появлением ментальных понятийных структур и субъектных форм организации границ психического, сохраняющих операциональную изолированность системы от мира. Возникает внутренний субъективный мир как динамический конструкт, ведущий к сохранению биологической и психической организации человека в среде его жизнедеятельности в рамках поведения организуемого с позиций сохранения линии жизни. Аутопоэзис субъектной компоненты организма ведет к созданию и выбору конструктов, ведущих к продолжению существования системы во

времени, порождает смысл и цели жизни. Таким образом, можно предположить, что возникновение сознания и форм ментального (информационного) познания и реагирования, появление субъективного мира являются закономерным следствием аутопоэтического характера функционирования всех систем живого организма.

Сознание человека также проявляет все признаки аутопоэтической системы, и все основные его свойства могут быть описаны в терминах аутопоэтической концепции в рамках синергетических и кибернетических представлений, которые довольно полно представлены в научно-практических основаниях философии эпистемологического конструктивизма. Аутопоэтическое сознание избирательно создает и исследует физические и социальные миры, порождая в ментальном пространстве человека их аналоги в субъективной форме, используя в своей конструируемой действительности только те их аспекты, которые могут усилить аутопоэтические свойства организма.

В процессе аутопоэзиса формируется субъективный мир, содержание которого не отражает рационально и беспристрастно (объективно) физический мир, а направлено на создание и продолжение истории действующей личности описываемой субъектом и фиксируемой в его опыте. Аналогично и социальные коммуникационные системы, будучи аутопоэтическими по своей сути, также пишут историю общества, ведут к усилению вектора жизни, выступают в качестве катализатора развития человеческой цивилизации.

Важным следствием аутопоэзиса живых организмов является признание конструирующего характера человеческого сознания и психики. Психическое содержание является циклически воспроизводящим себя в среде мозга динамическим ментальным конструктом. В нем отражаются все грани опыта субъекта, ведущие к появлению, сохранению и развитию личности, становлению индивидуальности. Человек конструирует мир, конструируя себя, и имеет дело только с конструируемыми фрагментами реальности. Все что не конструируется, выходит из сферы нашего познания и понимания. Именно с аутопоэзисом наших механизмов познания мира и связаны проблемы обучения человека и взаимопонимания. Человек, будучи аутопоэтической системой, может взаимодействовать с другими системами только в неразрушающих его аутопоэзис формах содействия и взаимной ориентации. Именно в этих способах и формах межсистемных неразрушающих взаимодействий определяемых и допускаемых аутопоэтическим характером системной организации человека и лежат механизмы его воздействия на природу, скрыты истоки технологических возможностей и могущества человечества. Рассмотрим это немного подробнее.

2 Механизмы аутопоэзиса в эволюции техногенной среды

Человек в процессе трудовой деятельности целесообразно воздействует на природу, изменяя при этом одновременно аутопоэтический мир своей действительности и стоящую за ним физическую (либо иную другую) реальность. Заметим, что человеческая деятельность также функционирует в рамках и в виде поддерживающего себя аутопоэтического процесса. Аутопоэтический характер человеческой деятельности и ее результата – мира действительности, обуславливает их неслучайный характер. Мы живем в строго организованном и организуемом нами и технологией мире. Мир нашей действительности конструируется и организуется по законам, обеспечивающим наше самовоспроизведение и существование. Следствием изложенного может быть вывод о том, что любые изменения в мире нашей действительности, возникающие в силу активности действующего субъекта, и сопровождающие их изменения физической реальности, отражают процессы коэволюции аутопоэтических систем, конструируемых нашим сознанием и воплощенных в жизнь с помощью технологий. Они представлены субъекту непосредственно в объектной (объективной) форме с реально отражаемыми в них аутопоэтически сопряженными элементами объективного (конструируемого) мира.

Из этого следует, что человек не может свободно воздействовать на физический мир, произвольно изменяя его. Конструирующая, творческая активность порождает только системы, поддерживающие аутопоэзис организма и психики. Техногенная среда, как продукт деятельности человека, таким образом, всегда отражает в себе результаты конструирующего и преобразующего мир опыта человека. Она содержит в своих продуктах воплощенные в них системные свойства, позволяющие использовать их в дальнейшем в качестве искусственных элементов для конструирования новых системных аутопоэтических единств более высокого порядка, поддерживать процессы аутопоэтической самоорганизации. Создание искусственного мира, о котором так много говорят в последнее время в связи с тотальным проникновением техники и технологии в жизнь человека, в своей основе также связано с проявлением конструирующих способностей человека, пронизывающих все уровни его психической организации. Способность к конструированию, изменению в нужном направлении объектов и мира действительности является продолжением аутопоэтической организации человека, который изменяя мир, вводит его в границы своего аутопоэзиса. Инженерная деятельность в системном представлении состоит в создании элементов поддерживающих цепи самовоспроизводства глобального системного организма, включающего технобиосферу планеты Земля. Эти элементы, представленные в виде продуктов, артефактов и технологий обладают уникальными единичными свойствами, являясь отражением процессов самоорганизации их создателей. Мы конструируем только те фрагменты мира, которые могут вступать в цепи аутопоэтических отношений, непрерывно генерируемых человеком. В силу этого ничего случайного в организации жизни нет. Она организует среду и селектирует из нее только те элементы, которые входят в обеспечение аутопоэзиса.

В. В. Чеклецов предлагает концепцию «Разумных Ландшафтов» как метафоры постчеловеческого тела и социального пространства будущих субъектов коммуникации [6, С. 48], формулируя в 7 тезисах основные ее положения в соответствии с которыми:

- граница человеческого «Я» неоднозначна и динамична. Возможно расширение ее топологии за физические границы тела;
- личность репрезентируется в интерактивной аутопоэтической среде;
- конструируемый личностью с помощью технологии «Разумный Ландшафт» может обладать искусственной перцептивной поверхностью повышающей потенциал самоорганизации, автопоэзиса и саморазвития человека;
- «Разумный Ландшафт» интерактивен и открыт для коммуникации с Другими. В нем происходит селекция новых форм социальных отношений;
- в пространстве разумного ландшафта происходят семантические процессы и процессы актуализации знаков, символов, паттернов и т. д.;
- происходят процессы производства компонентов для строительства среды и элементов тела;
- ценностные ориентиры, лежащие в основе построения «Разумных ландшафтов» позволяют моделировать новые формы деятельностного подхода к бытию.

Нетрудно догадаться, что в концепции Разумного Ландшафта в метафорической форме также отражены системные эффекты аутопоэтических систем действующих в человеческом сознании, живой природе и человеческом обществе.

Аутопоэтический характер человекоразмерных систем проявляется на всех уровнях и формах их деятельности и организации, что позволяет нам ввести принцип тотальной аутопоэтичности живых систем, в том числе человека и продуктов его деятельности (человекоразмерных систем).

В соответствии с этим принципом живые системы непрерывно создают цепи аутопоэзиса и вовлекают в него окружающую среду. Все, что конструируется живым организмом, носит аутопоэтический характер. Жизнь это непрерывный аутопоэзис, вовлекающий в процессы своей эволюции только способные к аутопоэзису элементы реальности. Мы имеем дело только

с аутопоэтическими системами, и ни с какими иными. Например, сам факт наблюдения того или иного объекта нашей действительности свидетельствует о том, что возникла аутопоэтическая цепь «сознание-наблюдаемый объект». Свойства возникшей системы позволяют включать ее в любые отношения с другими аутопоэтическими сущностями сетевого потока сознания формирующего действительность.

Способность к порождению только аутопоэтических процессов и систем присущая человеку и лежащая в основе инженерной деятельности не столь безобидная вещь как может показаться на первый взгляд. Новые аутопоэтические системы в процессе своей эволюции и самоорганизации могут работать в рамках собственных внутренних описаний, создавая некомфортные, а порою опасные условия для существования человека. Новая системная сущность может использовать человека как расходный элемент в цепи процессов своего самовоспроизведения, поступая с ним в логике аутопоэзиса, которая может совсем не соответствовать моральным и этическим воззрениям человечества. Заметим, что наши возможности влияния на процессы аутопоэзиса довольно ограничены. Управлять самоорганизацией непосредственно невозможно, так как это вызовет к жизни защитные механизмы системы, ограничивающие внешнее вмешательство. Можно только ориентировать конструирующие механизмы систем с целью получения требуемого поведения. Примером деструктивного влияния на человека механизмов аутопоэзиса могут быть неоднократно описанные системные эффекты, возникающие в сети Интернет в результате действия коммуникации, проявляющей свойства социальной аутопоэтической системы.

Основным механизмом, лежащим в основе конструирующих возможностей человека, является сознание. По мнению Е. Н. Князевой «сознание – эмерджентная, сложноорганизованная и автономная сеть элементов», которая порождает квалиа в виде чувственных и ментальных образов, описывающих конструирующий опыт человека. Процессы самоорганизации сознания охватывают и увязывают воедино мозг человека, его тело и окружение. Их появление связано с возникновением «петель циклической причинности», в которых проявляется самодостраивание системы, создание реализуемого образа будущего. Возникающие и растворяющиеся в сознании варианты будущего проявляются в творчестве, мышлении и фантазиях человека. Ограничителями спонтанной активности сознания, ведущими к выбору финального результата, являются механизмы редукции [7], которые создают иллюзию раздельного существования человека и мира, который представлен субъекту в виде независящей от него «объективной реальности». Возникает возможность проверки «соответствия» моделей сознания объективному миру, в процессе которой отбираются наиболее адекватные с точки зрения обеспечения жизнеспособности варианты.

3 Человек в рамках техногенной эволюции

Любая аутопоэтическая система создает в процессе своей жизнедеятельности искусственную среду, в которой появляются аутопоэтические единства более высокого порядка, которые сразу после своего рождения начинают включать в циклы самовоспроизведения элементы предыдущих систем, реализуя общий вектор продолжения жизни. Спецификой современного технологического этапа развития человеческой цивилизации является интенсивный рост техногенной среды и появление первых признаков ее самоорганизации. Особую роль в возникающем единстве человека и технологии играет коммуникация, определяющая процессы межсистемных ориентаций и сопряжений человека и системных элементов включаемых в цепи отношений.

Будучи аутопоэтической системой человек существует в неразрывном процессе структурного сопряжения со средой своего существования, которая до последнего времени была только источником нужных для самовоспроизводства и существования организма веществ и информации.

Появление на планете Земля искусственной техногенной среды с нервной системой и мозгом в виде сети Интернет сопровождается процессами ее организации и эволюции, превращением в новую аутопоэтическую систему планетарного масштаба – технобиод [8], в обеспечении процесса функционирования которого участвуют все жители планеты как пользователи, вступающие в коммуникацию с сетью. Активным организующим фактором этого образования является циклическая рекурсивная коммуникация в информационно-коммуникационной среде сети Интернет, а исполнительными элементами – человек и управляемые посредством и с помощью компьютерных технологий машины и механизмы.

Технобиод становится самостоятельным системным объектом, в котором роль индивидуального человеческого разума постепенно уходит на второй план. Человек отделяется от природы, становится элементом эволюционирующего искусственного техногенного мира. Одновременно наблюдается и начало активного процесса внедрения в человеческое тело технологий модифицирующих человеческий организм, связывающих его с системами мониторинга и контроля. Индивидуальное поведение и активность человека теряют определяющее значение для процессов развития технобиода. Человек становится регулируемым и регулирующим элементом нового планетарного системного единства [8].

4 Технологии технобиотического мира

Развитие существующих и появление новых компьютерных и информационных технологий, использующих сетевые технологии и сетевое содержание, создают базис для эволюции технобиода. К ним относятся технологии, описываемые в терминах NBICS-конвергенции [9]и широкий комплекс глобальных прикладных инженерных дисциплин и проектов – «промышленный интернет» (Industrial Internet), «кибер-физические системы» (Cyber-Physical Systems), «промышленность 4.0» (Industry 4.0), «умный дом», «умный город», «разумная среда» (Smart Environments), «мультимодальные интерфейсы» (Multimodal Interfaces), «иммерсивные среды, интерфейсы и технологии», «технологии радиочастотной тотальной идентификации (RFID)», «программируемая материя» (Programmable matter), популярный ныне в инженерной среде «интернет вещей» (Internet of Things – IoT) и т. д.

Добавим появление новых форм кластеров конвергентных технологий, среди которых можно отметить: GNR (G – genetics, N – nanotechnology, R – robotics); GRIN (G – genetic, R – roboric, I – information, N – nano processes); GRAIN (G – genetics, R – robotics, AI – artificial intelligence, N – nanotechnology); BANG (B – bits, A – atoms, N – neurons, G – genes) [10]. Наблюдается появление междисциплинарных образований, в которых разрушаются границы классических дисциплин и новые образования обладают подвижными границами отражающими процессы порождения и аккумуляции нового знания в теле технонауки [11]. Можно констатировать, что процессы формирования новых научных и практических дисциплин носят неслучайный характер и отражают самоорганизующиеся процессы в научном дискурсе, отражающем эволюцию технобиода.

Все перечисленное отражает взрывообразно развивающуюся тенденцию к тотальному охвату всепроникающими компьютерными системами и технологиями контроля и управления всех сфер и сред существования и жизнедеятельности человека при одновременном повышении автономности и независимости от человека самой искусственной технической среды. Так, например, M.W. Maier предлагает архитектурные принципы создания кибер-физических систем основанных на эволюционных принципах развития включающих пять ключевых характеристик:

- независимость функционирования компонентов системы;
- управленческую независимость компонентов системы;
- географическую распределенность;
- развивающееся поведение;
- –эволюционирующие процессы развития [12].

В обзоре В.А. Бородина представлено описание технологического базиса интернета вещей и сопутствующих ему технологий «облачных» и «туманных» вычислений, отражающих эволюцию информационно-сетевых и коммуникационных технологий. Основными проблемами, по мнению автора, являются «технические проблемы перехода на протокол IPv6, проблемы кибербезопасности, отсутствие стандартов обеспечивающих защиту личной информации, управление устройствами сетевого подключения и вопросы электропитания датчиков» [13].

Вместе с тем следует заметить, что это далеко не самое важное в таких сложных системах, обладающих заложенным в них потенциалом и возможностями аутопоэтической самоорганизации. Проблемы скрытого управления и вероятность появления эффектов деструктивной циклической самоорганизации в социотехнических системах с абсолютной памятью более серьезны и опасны, чем техническая реализация тотально-связанного мира. Система с абсолютной памятью, элементом которой становится интернет вещей, создает условия для появления опасных для общества и человека состояний техносферы. Важным элементом в отношениях с техногенной средой становится реализация принципа предосторожности, в соответствии с которым необходим контроль за технологиями в процессе их развития с целью оценки их соответствия положениям техно и биоэтики.

Заключение

Развитие техногенного этапа эволюции человеческой цивилизации тесно связано с тотальным аутопоэтическим характером человеческого организма и психики проявляющимся в созидательной деятельности человека. Это ведет к неизбежному появлению организованной эволюционирующей технической среды, приобретающей свойства самоорганизующегося единства – технобиода, действующего как единый организм, включающий в свой состав элементы небиологической природы. Возникающие в нем цепи отношений, в силу их самоорганизующегося характера, ускользают от непосредственного контроля создателей, что может приводить к негативным по отношению к человеку (группам людей) эффектам. Задача техногуманитарного знания в настоящий момент состоит в необходимости тщательного анализа, психологической и научно-философской рефлексии системных качеств зарождающегося на наших глазах технобиотического этапа человеческой цивилизации и биосферы Земли.

При проектировании сложных компьютерных систем и коммуникационных сетей требуется проведение экспертизы глобальных последствий изменений, возникающих в техногенной среде, особенно в ее интерфейсных элементах, обеспечивающих процессы межсистемных отношений и интеграцию человека в технобиотическую среду.

Особую важность в связи с проявлением описанного выше эффекта тотальной аутопоэтичности жизни, ее экспансивного характера приобретает изучение процессов формирования и взаимоориентации обучающих и культурных компонентов компьютерных сред, возникающих в рамках внутрисетевых коммуникаций. Именно здесь важно выделить и оценить возникающие аутопоэтические циклы коммуникаций, их операциональный состав, формирующий дискурсные поля, определить системные свойства действующих социальных групп и их членов. При конструировании технических систем необходимо оценивать изменение свойств технических объектов и форм взаимодействия при их переходе от создателя к пользователю в новые операциональные отношения [14, 15, 16], эффекты воплощения [17].

Автор считает, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- показано зарождение на планете Земля технобиотического этапа цивилизации связанного с эволюцией техногенной среды как единого организма аутопоэтического типа;
- сформулирована концепция тотальной аутопоэтичности человеко-размерных систем;
- показаны формы ориентирующих аутопоэтических взаимодействий в человеко-машинных системах и средах, осуществляемых посредством самоорганизующихся коммуникаций.

Благодарности

Выражаю признательность, сотрудникам Института проблем управления сложными системами РАН профессорам Смирнову Сергею Викторовичу и Виттиху Владимиру Андреевичу за предоставленную возможность выступить по настоящей проблеме, а также сотруднику

ИПУ РАН, профессору Филимонову Николаю Борисовичу, давшему ценные замечания и рекомендации по усовершенствованию данной статьи.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект № 13-08-00161).

Список литературы

[1] Лекторский В.А. Можно ли совместить конструктивизм и реализм в эпистемологии // Конструктивизм в теории познания. – М.: ИФРАН, 2008. – С. 36–37.
[2] Князева Е.Н. Эпистемологический конструктивизм // Философия науки. Вып. 12. Феномен сознания. – М.: ИФРАН, 2006. – С. 133–153.
[3] Foerster, H. von. Cybernetics of Cybernetics, or the Control of Control and Communication of Communication. Urbana (IL): Univ. of Illinois Press (Biological Computer Laboratory), 1974.
[4] Varela F., Maturana H., Uribe R. Autopoiesis: the organization of living systems, its characterization and a model // Biosystems. – 1974. – V5. – P. 187–196.
[5] Maturana H., Varela F. Autopoiesis and Cognition. The Realization of the Living. – Boston: D. Reidel Publishing Company, 1980.
[6] Чеклецов В.В. Топологическая версия постчеловеческой персонологии: к разумным ландшафтам // Философские науки. – 2010. – № 6. – С. 36–53.
[7] Сергеев С.Ф. Проблема редукции в когнитивном механизме сознания // Проблема сознания в междисциплинарной перспективе / Под ред. В.А. Лекторского. – М.: «Канон+» РООИ «Реабилитация», 2014. – С. 245–254.
[8] Сергеев С.Ф. Рефлексивная автоэволюция глобальных интеллектных техногенных сред // Рефлексивные процессы и управление. Сборник материалов IX Международного симпозиума 17–18 октября 2013 года, Москва; Отв. ред. В.Е. Лепский. – М.: Когито-Центр, 2013. – С. 245–248.
[9] Roco Mihail C. and Bainbridge, William Sims. Converging technologies for improving human performance: nanotechnology, biotechnology, information technology and cognitive science. Washington, D.C.: National Science Foundation, June, 2002.
[10] Голиков Ю.Я. Психологические проблемы конвергентных технологий // Актуальные проблемы психологии труда, инженерной психологии и эргономики. Вып. 6 / Под ред. А.А. Обознова, А.Л. Журавлева. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2014. – С. 13-31.
[11] Сергеев С.Ф. Мехатроника как конвергентная научно-практическая дисциплина // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 1. – С. 2–6.
[12] Maier M.W. Architecting Principles for System of Systems // Systems Engineering. 1998. No. 4. V. 1. P. 267–284.
[13] Бородин В.А. Интернет вещей – следующий этап цифровой революции // Образовательные ресурсы и технологии. – 2014. – № 2 (5). – С. 178–181. – URL: http://www.muiv.ru/vestnik/pdf/pp/ot_2014_2_178-182.pdf (дата обращения: 8. 01. 2015).
[14] Сергеев С.Ф. Обучающие и профессиональные иммерсивные среды. – М.: Народное образование, 2009.
[15] Сергеев С. Ф. Интеллектные симбионты организованных техногенных средств управления подвижными объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 9. – С. 30–36.
[16] Сергеев С. Ф. Проблема интерфейса в человеко-машинном взаимодействии // Актуальные проблемы психологии труда, инженерной психологии и эргономики. Выпуск 6 / Под ред. А.А. Обознова, А.Л. Журавлева. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2014. – С. 83–105.
[17] Князева Е.Н. Энактивизм: концептуальный переворот в эпистемологии // Вопросы философии. – 2013. – № 10. – С.91–104.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ: ГИБРИДИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТА

Я.А. Туровский, С.Д. Кургалин, А.А. Вахтин, С.В. Борзунов

Воронежский государственный университет
394006, Воронеж, Университетская пл., д. 1, Россия
yaroslav_turovsk@mail.ru
тел: +7 (904) 2138295
kurgalin@bk.ru
alvahtin@gmail.com
sborzunov@gmail.com

Ключевые слова: *человеко-машинные интерфейсы, гибридный интеллект, нейро-компьютерные интерфейсы, моделирование поведения*

Abstract
The mathematical and full-scale models of the human-computer interface on hybrid intellect base were investigated. Also the behavior of the artificial neural network which coped human behavior was investigated. The result of the and full-scale modeling of the human-computer interface on hybrid intellect base demonstrated significant increase speed and accuracy functioning this devices.

Введение

Развитие информационных технологий позволило существенно расширить спектр возможностей коммуникации «человек-компьютер» и обеспечить выход за пределы «традиционных» интерфейсов, работающих на основе клавиатуры, джойстика, мыши или подобных им устройств. Несмотря на значительный оптимизм начала 2000-х годов, связанный с массовым появлением новых типов интерфейсов, в настоящее время существенного прогресса в этой области не наблюдается. Причина такого положения дел заключается в том, что каждый из этих интерфейсов обладает одним или несколькими недостатками из следующего списка: высокая стоимость; относительно низкая точность работы; небольшая скорость передачи команд от пользователя компьютеру; наличие достаточно строгих требований к процедурам обучения классификаторов команд, используемых в интерфейсах, а также и рядом других[1,2]. Одним из перспективных путей решения проблем, связанных с низкой скоростью и точностью работы альтернативных, по отношению к «классическим», человеко-машинных интерфейсов, является применение гибридного человеко-машинного интеллекта, созданного на основе бионических подходов. Сущность данных подходов в том, что целеполагающие команды через интерфейс подаются человеком, а «тактические» решения принимает и осуществляет программно-аппаратный комплекс в рамках функционирования самого интерфейса. При этом характер «тактических» решений максимально воспроизводит поведенческие стратегии конкретного человека.

1 Моделирование нейрокомпьютерного интерфейса на основе гибридного интеллекта

В настоящей работе создана математическая модель нейрокомпьютерного интерфейса на основе гибридного интеллекта. В модели предложено заменить часть команд, подаваемых человеком устройствам-эффекторам (дистанционно управляемым самоходным и летающим

платформам, роботам-манипуляторам), а также графическим интерфейсам операционных систем, командами, передаваемые этим устройства программно-аппаратной частью нейрокомпьютерного интерфейса (НКИ). В данном подходе моделируется процесс управления головным мозгом человека различными устройствами, когда сознательно формируемые команды являются наиболее общими, а детальное управление тонусом мышц, активностью мышечных волокон, синхронизацией мышц, поддержанием позы и равновесия в ходе движения реализуют структуры мозга, напрямую не связанные с сознанием. Применительно к НКИ это означает, что только небольшой ряд команд, несущих целеполагающую информацию, генерируется человеком, остальные же команды формируются программно-аппаратными элементами НКИ. Предложена модель, описывающая суммарное время, затрачиваемое НКИ на создание таких гибридных цепочек команд. В модели учитывается число команд, особенности способа выбора нужной команды, вероятности ошибок распознавания команды при работе интерфейса и требуемая точность его функционирования. Определены зависимости, позволяющие оценить эффективность процесса гибридизации интерфейса в виде результата – увеличения скорости работы НКИ при разной доле команд, генерируемых программно-аппаратной частью НКИ. Продемонстрировано, что наиболее значимыми предикторами для оценки скорости работы гибридного НКИ являются параметры времени формирования и исполнения команд человеком, изменение ошибки детекции команды в зависимости от числа ветвлений в дереве команд и само число ветвлений дерева команд и индекс гибридизации, отражающий долю числа команд, генерируемых человеком, в общем числе команд в их цепочке (в *C*-цепочке). В ходе вычислительных экспериментов было установлено, что в пределах рассмотренной структуры НКИ модальный выигрыш по времени работы интерфейса может составить величину ≈ 50%. Факторами, влияющими на абсолютные значения выигрыша в работе НКИ по времени являются: длительность команд, формируемых человеком, и особенности ошибок детекции команд при изменении числа ветвлений в структуре команд НКИ. При этом само число возможных команд в пределах исследуемого диапазона их числа при передаче через НКИ не является значимым для скорости работы гибридного интерфейса. В то же время, для определения параметров гибридизации, при которых снижение времени реализации *C*-цепочек наименьшее, этот показатель имеет прогностическую ценность. В оценке относительной эффективности гибридизации НКИ время, затраченное человеком на генерацию команд, не является достаточно мощным предиктором в оценке скорости работы сконструированного интерфейса. Гораздо большую роль здесь играет число команд в *C*-цепочках, причем сформированных как человеком, так и программно-аппаратной частью НКИ.

Полученные результаты позволяют существенно расширить возможности проектирования и создания нового поколения НКИ, широко использующих современные возможности робототехники, обработки изображений и автоматической навигации, что, в свою очередь, дает возможность значительно увеличить скорость работы данной группы интерфейсов и делает их более удобными для применения конечными пользователями.

2 Моделирование поведения конкретного индивидуума для создания алгоритмов управления самоходным шасси в рамках применения гибридного интеллекта

Моделирование поведения конкретного человека проводилось с использованием специального программного обеспечения реализующего задачу лабиринта. Перед испытуемым ставилась задача получить максимальное количество бонусов (игровых призов) в условиях ограниченного восприятия лишь некоторого числа близлежащих к нему свободных ячеек лабиринта. При этом вставала проблема выбора испытуемым одной из нескольких альтернатив перемещения (направлений) в условиях информационной неопределенности, а также выбора кратчайшего пути к цели – очередному бонусу. В ходе проведенного

исследования был разработан программный комплекс, позволяющий генерировать случайным образом лабиринты, распределение в них свободных ячеек и игровых призов, собирать данные о перемещении человека в лабиринте и тестировать полученные искусственные нейронные сети путём передачи им тех же задач управления, которые решал их человек-прототип. Распределение ячеек и бонусов в лабиринте проводилось случайным образом путем генерации 500 карт лабиринта, что было проверено с применением критерия χ^2. Результаты статистической обработки ходов (выбора направления движения) помещались в файл. В нем содержался набор векторов, представляющих область лабиринта, видимую человеку на *i*-м ходу. Генерирование лабиринтов производилось по алгоритму Эллера.

Собранная статистика команд, генерируемых человеком, обрабатывалась в пакете STATISTICA. На основе полученных данных строились ИНС для каждого конкретного человека. На первом этапе была единственная ИНС для каждого испытуемого, определяющая одно из четырех направлений перемещения человека. Поскольку полученные нейронные сети имитируют поведение конкретного человека с ошибками, то проявилась проблема зацикливания сети, когда ИНС выдавала одни и те же ходы по ячейкам лабиринта. Данная проблема отчасти решилась «встряхиванием» нейронной сети: если ИНС уже «совершала» данный шаг *n*-е количество раз, то она принуждалась сделать некоторое количество ходов в случайно выбираемом направлении.

В результате были получены данные, воспроизводящие перемещение конкретного человека по лабиринту с точностью не ниже 80%. В ходе сравнения команд, генерируемых ИНС с учетом поведением человека, с которого она была обучена, при проведении 100 экспериментов было обнаружено, что статистически значимо отличается количество ходов «влево»–«вправо», генерируемых искусственной нейронной сетью, от количества ходов человека-прототипа, в то время как количество ходов «вверх»–«вниз» моделируется довольно точно. Таким образом, показана принципиальная возможность воспроизведения с приемлемой точностью поведенческих реакций конкретного индивидуума.

3 Моделирование гибридного интеллекта для нейрокомпьютерных интерфейсов на основе активностной психофизиологической парадигмы.

Рассмотрим основные элементы «рефлекторной дуги», посредством которой будет осуществляться управление внешними устройствами. Задачей пользователя НКИ является выбор конкретных стратегий достижения полезного результата – перемещения курсора в заданную часть экрана монитора, тележки–робота в определенное место и т.п[3,4,5].

Пусть существует множество A элементов a_j (K, t) – стратегий, осознаваемых испытуемым. Размерность пространства, в котором осуществляется перемещение по траектории K, задается в соответствии с целями пользователя, например, для курсора на экране монитора она будет равна двум. Одиночная стратегия a_j не всегда является стратегией, достаточной для достижения поставленной цели. Действительно, на практике в подавляющем большинстве случаев необходимо последовательно совершить целый ряд действий даже для того, чтобы переместиться в определенное место. Таким образом, пользователю для достижения полезного результата нужна «цепочка» стратегий a_j, составляющих подмножество A' множества A.

Каждая стратегия пользователя, генерируемая им сознательно, тем или иным образом представлена на электроэнцефалограмме (ЭЭГ). Рассмотрим множество B состояний b_i ЭЭГ, порождаемых при реализации мыслительных процессов, связанных с выбором и реализацией стратегии a_j, так что $\boldsymbol{V}$ – вектор состояний ЭЭГ (он, например, состоит из компонент: мгновенная амплитуда, пиковая частота и т.п.); t – время, в течение которого состояние ЭЭГ принадлежит определенному подпространству состояний. Состоянием ЭЭГ b_i может являться, например, мгновенное значение амплитуды ЭЭГ и т.п.

Поскольку у нетренированных людей произвольное управление параметрами ЭЭГ невозможно или крайне затруднительно, то отношение S на множествах A и B (то есть ASB) невыполнимо. Из-за невозможности выполнения отношения ASB любому элементу a_j соответствует несколько элементов b_i , каждый из которых имеет некоторую вероятность реализации p_i. Таким образом, любую стратегию a_j можно представить в виде суммы состояний b_i, взвешенной с вероятностью p_i их реализации. Следовательно, можно сказать, что a_j есть смешанные стратегии для состояния b_i.

Успешность стратегии a_j определяется уменьшением расстояния в пространстве $\boldsymbol{R^n}$ с координатными осями $x, y, \ldots , z$ от текущего состояния испытуемого до состояния, являющегося его целью. Следовательно, если до начала реализации стратегии a_j это расстояние равно M, а после её осуществления – N, так что $M > N$, то стратегию следует признать успешной.

Под программно-аппаратным комплексом (вторым после пользователя элементом модели) мы понимаем аппаратную часть, программное обеспечение системы и собственно алгоритмы, обеспечивающие распознавание паттернов ЭЭГ и реализацию тех или иных действий в рамках НКИ. Пусть имеется вектор $\boldsymbol{V}$, отражающий текущие значения параметров ЭЭГ. Целью работы НКИ является решение задачи установления соответствия между вектором $\boldsymbol{V_i}$ ЭЭГ и стратегией пользователя a_j. Иными словами, появление состояния ЭЭГ, отнесенное к вектору $\boldsymbol{V_i}$, означает, что испытуемый хочет применить стратегию a_j. Аналогично, наличие вектора $\boldsymbol{V_{i+1}}$ свидетельствует о желании пользователя применить другую стратегию a_k . Однако необходимо учесть, что вектор $\boldsymbol{V}$ и стратегия a_j не связаны между собой строго. Следовательно, «идеальный» вариант решения задачи, когда один вектор строго соответствует состоянию, можно модифицировать – мозг находится в состоянии, соответствующем желанию пользователя применить с вероятностью p_1 стратегию a_j и с вероятностью p_2 стратегию a_{j+n} . Вектор ЭЭГ $\boldsymbol{V_i}$, оказавшись в области пространства вблизи точки с координатами x, y, z , свидетельствует о наличии в головном мозге состояния b_i, которое, в свою очередь, с вероятностью p_i соответствует произвольным стратегиям пользователя a_j , a_{j+m}.Очевидно, что в случае использования только одного алгоритма классификации векторов $\boldsymbol{V}$ дальнейшее описание взаимодействия теряет смысл. Действительно, если мы работаем в рамках реактивностной парадигмы то, по сути дела, мы осуществляем только одно действие в ответ на один порождаемый мозгом вектор состояний. Рассмотрим теперь ситуацию, когда перед программно-аппаратным комплексом (ПАК) стоит выбор: какой именно из алгоритмов классификации вектора $\boldsymbol{V}$ ему следует применить для достижения оптимального результата. Принципиальным в этом случае является выбор метода, который будет применяться для оценки эффективности алгоритмов работы ПАК. В качестве такой меры выбран результат выполнения команды в виде длины траектории, получаемой в следующей итерации после той, которую надо оценить. Проведя аналогию с физиологическими параметрами, можно сказать, что «полезным результатом» для программы НКИ будет отсутствие команды на движение (то есть курсор на экране или тележка-робот уже достигли цели).

В общих чертах схему оценивания результата можно представить следующим образом. Испытуемый вырабатывает стратегию a_j достижения цели. Испытуемый генерирует определённый паттерн V_j ЭЭГ. Программное обеспечение в соответствии с заданными алгоритмами превращает информацию паттерна V_j в приказ на перемещение по определённой траектории на расстояние L. По завершению перемещения испытуемый оценивает успешность своих действий как степень приближения к цели (определяется «цена» U_1 стратегии пользователя). Не достигнув цели, испытуемый принимает новую стратегию a_k. Испытуемый генерирует определённый паттерн V_k ЭЭГ в соответствии с новой стратегией; Программное обеспечение в соответствии с заданным алгоритмом преобразует информацию паттерна в приказ переместиться по конкретной траектории на определенное расстояние M. При $M < L$

можно говорить об успешности предыдущей итерации (итерации j), причем, чем больше разница $D_1 = (M - L)/M$, тем более успешно интерпретирован паттерн ЭЭГ в предыдущей итерации.

Очевидно, что и испытуемый, и ПАК будут стремиться максимизировать свои выигрыши. Следовательно, испытуемый будет отдавать предпочтение стратегиям, которые будут более значительно сокращать расстояния до цели, а программное обеспечение, в свою очередь, будет выбирать те стратегии обработки, которые будут минимизировать перемещение в пространстве $\boldsymbol{R^n}$.

Оценим возможные результаты взаимодействия испытуемого и ПАК. Для этого рассмотрим варианты выигрышей испытуемого и ПАК при фиксированном алгоритме классификации вектора $\boldsymbol{V}$. Иными словами, мы рассматриваем вариант человеко–машинного взаимодействия вида «стимул – реакция». В этом случае испытуемый может менять свою стратегию, а классификатор в ПАК только один.

Для оценки эффективности человеко-машинного взаимодействия можно воспользоваться коэффициентом корреляции (КК) между выигрышами пользователя и системы. В том случае, если КК значим и положителен, испытуемый будет увеличивать свои выигрыши так же, как и система. В случае если КК значим и отрицателен, то максимизация выигрыша пользователем приведет к снижению выигрыша системы и наоборот. В случае статистической незначимости КК эти два параметра не влияют друг на друга.

Аналогичная ситуация имеет место и при фиксированной стратегии a_j. В этом случае система сама выбирает несколько стратегий классификации вектора $\boldsymbol{V}$ для достижения максимального выигрыша.

Рассмотрим теперь 2-мерное пространство (a_j ,V_j) для итерации $I > 2$.

В общем виде данное пространство может быть представлено как поверхность с координатными осями, соответствующими a_j, V_j , и средними значениям КК в случае, если они рассчитаны при $a_j = const$ и $V_j = const$ и значимо не различаются. Полученная трехмерная поверхность будет иметь глобальные и локальные минимумы и максимумы.

Пусть отсутствует корреляция между выигрышами пользователя и системы. В этом случает поверхность в пространстве (a_j , V_j) не будет иметь выраженного глобального максимума или минимума. В противном случае возможны два варианта, описанные выше для одномерного случая: значения корреляции между выигрышами a_j и V_j будут формировать на плоскости глобальный максимум или глобальный минимум.

Следует иметь в виду, что в ходе формирования человеко-машинного взаимодействия выбор стратегии пользователя и стратегии системы осуществляется не одновременно: система формирует свой выбор, основываясь на выборе стратегии пользователем. Следовательно, если корреляция между выигрышами a_j и V_j отрицательна, то, поскольку система максимизирует свои выигрыши, она, тем самым, минимизирует выигрыши пользователя. В этом случае создается ситуация, когда работа системы не достигает полезного результата с точки зрения пользователя: меняя свои стратегии, испытуемый не сможет добиться перемещения курсора или тележки-робота в соответствии со стратегиями a_j .

Заключение

В настоящей работе была создана модель нейрокомпьютерного интерфейса на основе гибридного интеллекта. В рамках концепции гибридного интеллекта были реализованы следующие виды альтернативных человеко-машинных интерфейсов: нейрокомпьютерный интерфейс на основе устойчивого вызванного зрительного потенциала головного мозга, компоненты P300 и амплитуды ритмов электроэнцефалограммы; окулографический интерфейс как в режиме электроокулографии, так и видеоокулографии; трекер положения головы; электромиографический интерфейс с обратной связью для управления верхней

конечностью; интерфейс, связанный с функциональным напряжением и эмоциональным состоянием человека; дыхательный интерфейс. Разработанные программно-аппаратные решения для линейки интерфейсов применялись для мониторинга, анализа и прогнозирования поведения человека при решении им различных задач[6,7,8]. В качестве эффекторов, управляемых с использованием разработанных интерфейсов, были взяты самоходные шасси, радиоуправляемые летающие платформы, роботы-манипуляторы и системы, обеспечивающие набор текста или выбор файлов или папок по типу работы «Проводника» ОС семейства Windows. При проведении моделирования НКИ на основе активностной парадигмы были разработаны и реализованы алгоритмы построения пула искусственных нейронных сетей для моделирования поведения человека при выборе альтернатив в условиях недостатка информации, а также осуществлено моделирование эффективности гибридизации интеллекта в соответствии с бионическими подходами. Результаты, полученные в рамках моделирования гибридно-интеллектуального взаимодействия человеко-машинного интерфейса и подтверждённые в ходе натурных экспериментов, дают возможность проводить оценку эффективности применения различных альтернативных человеко-машинных интерфейсов людьми с психофизиологическими особенностями. Проведённое моделирование НКИ позволило с точностью более 90% воспроизвести ряд поведенческих реакций конкретного человека в условиях информационной неопределённости. Показано, что гибридизация интеллекта человека и искусственного интеллекта НКИ в ряде случаев способна более чем в 3-5 раз увеличить скорость и точность коммуникации человек-компьютер.

Ряд разработанных интерфейсов в настоящее время используется в клинической практике в рамках программы реабилитации пациентов с нейрососудистой патологией и патологией опорно-двигательного аппарата.

Список литературы

[1] Punsawad Y., Wongsawat Y., Parnichkun M. Hybrid EEG-EOG brain-computer interface system for practical machine control // Proc. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Conference (EMBC '10). 2010. Buenos Aires. P. 1360–1363.

[2] Yong X., Fatourechi M., Ward R. K. et al. The design of a point-and-click system by integrating a self-paced brain-computer interface with an eye-tracker // IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems. 2011. V.1. № 4. P. 590–602.

[3] Моделирование нейрокомпьютерного интерфейса на основе активностной парадигмы Системы управления и информационные технологии. №1 (47) 2012 Москва-Воронеж. 2012. С. 99-103 Я.А.Туровский Кургалин С.Д., Максимов А.В.

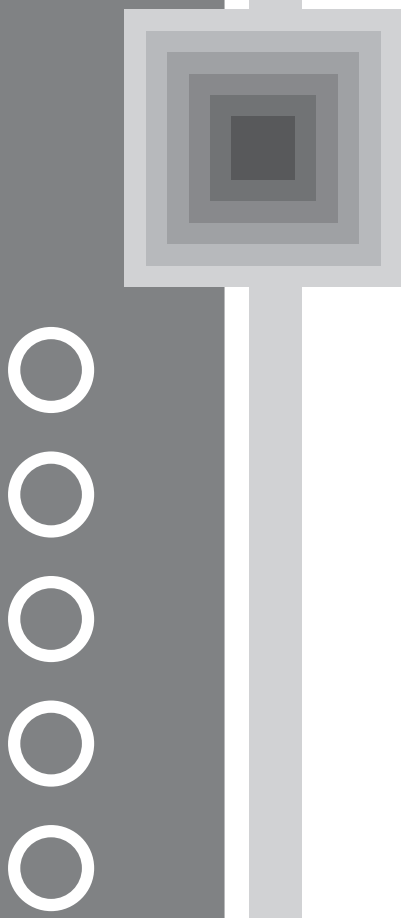
[4] Оптимизация работы нейрокомпьютерного интерфейса с учетом поведения человека Вестник Воронежского государственного университета. Серия: системный анализ и информационные технологии. №1, 2012, С. 135-139 Я.А.Туровский Кургалин С.Д.Максимов А.В.

[5] Прогноз эффективности нейрокомпьютерного интерфейса основанного на активностной парадигме Вестник Воронежского государственного университета. Серия: системный анализ и информационные технологии. №1, 2012, С. 140-147 Я.А.Туровский Кургалин С.Д. Семёнов А.Г.

[6] Динамика цепочек локальных максимумов спектров электроэнцефалограмм человека БИОФИЗИКА, 2014, том 59, вып. 1, с. 185–190 Я.А.Туровский, С.Д.Кургалин, А.Г.Семёнов

[7] Принципы управления работой компьютера на основе оценки эмоционального состояния пользователя Программные продукты и системы №2 (106)2014, С.110-114 Я.А.Туровский, С.Д.Кургалин

[8] Способ оптимизации управления компьютером Патент Патент № 2485572, зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20 июня 2013 года. Я.А.Туровский, С.Д.Кургалин, А.В.Максимов



Control in Complex Technical Systems
Управление в сложных технических системах

TRACKING PROBLEM IN NONLINEAR SISO – SYSTEMS UNDER DISTURBANCES WITHIN THE RESTRICTIONS ON STATE VARIABLES AND CONTROL

Anton V. Utkin, Dmitriy V. Krasnov
V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences
65 Profsoyuznaya, Moscow 117997, Russia
(e-mail: utkin-av@rambler.ru)
tel: +7 (495) 334-93-21.

Keywords: *nonlinear SISO-systems, tracking problem, external disturbances, restrictions on state variables.*

Abstract
В работе рассматривается проблема обеспечения инвариантности выходной переменной нелинейной SISO системы по отношению к внешним, несогласованным возмущениям и неопределенностям модели объекта управления при наличии ограничений на управляющее воздействие и области значений фазовых переменных в процессе управления. Разработан новый подход в рамках блочного метода синтеза, теории скользящих режимов и метода расширения пространства состояний. Основная идея заключается в том, что истинное и фиктивные управления (в качестве последних рассматриваются переменные состояния объекта управления) формируются как выходы устойчивых фильтров первого порядка с малыми постоянными времени, на входы которых подаются вспомогательные управления в виде разрывных функций от линейных комбинаций переменных состояния объекта управления и переменных фильтров с постоянными амплитудами. Данный подход позволяет обеспечить непрерывность истинного и фиктивных управлений и, кроме того, учесть на стадии синтеза имеющиеся ограничения.

Introduction

The problem of ensuring of an invariance of the output variable of SISO-systems to unmatched external disturbances and functional uncertainties is considered. External disturbances and functional uncertainties are assumed as unknown bounded functions of time. Smoothness requirements of external disturbances is missing and autonomous dynamic model simulating the external disturbances is not entered. Under these assumptions, for linear minimum phase MIMO systems within the block approach decomposition procedure of synthesis of linear static feedback is designed [1]. This method provides stabilization of tracking errors with any desired accuracy by means of fictitious and real controls with high gains. But this method can not be used, if there are the technological restrictions on the range of variation of state variables and control actions.

For nonlinear minimum phase MIMO systems under unmatched disturbances within the block approach decomposition procedure of synthesis of combined controls is designed [2-3]. This method provides asymptotic stabilization tracking errors assuming that the external disturbances are smooth and functions under disturbances have a special, so-called triangular structure. Dynamic observer with discontinuous corrective actions, operating in sliding mode, was used to estimate the external disturbances. The problem also was solved without taking into account restrictions on the the state variables.

In this paper, a new approach for solving of tracking problem under restrictions on state variables and control is presented within the block method [1-3], the sliding mode theory [4] and the method of states space extension. Main idea is that the fictitious and real controls sequentially (from top to down) are formed as the outputs of first-order filters with small time constants. Auxiliary

control actions (as discontinuous functions by linear combinations of states and filters variables) with bounded amplitudes applied to the inputs of these filters. This approach, firstly, provides continuous fictitious and real controls, secondly, allows us to take into account the existing restrictions on the range of variation of the state variables and the controls, and, thirdly, allows us to extend the class of admissible systems by nonlinear minimum phase systems, where disturbances can be nonsmooth and triangular structure of functional uncertainties is not required.

Switching surfaces of auxiliary discontinuous controls are formed in virtual space of the state variables of the extended system. Ideal sliding modes consistently appear at their intersection. The motions in the initial system can be interpreted as a real sliding modes, where the size of the boundary layers are regulated by time constants of filters and amplitudes of auxiliary discontinuous controls. Chattering phenomenon occurs in a closed-loop system due to the introduction of filters. There "controllable" chattering concept is implemented, as the filter parameters are selected the desired way.

After occurrence of sliding modes, linear combinations of the variables of the extended system, defining switching manifolds, become equal to zero. It allows us to reduce the stabilization problem of the tracking errors to the stabilization problem of filters variables with given accuracy, which is solved by a suitable choice of time constants of the filters. Using an appropriate amplitudes of auxiliary discontinuous controls allows us to provide limited variables of a closed-loop system, taking into account technological restrictions. Note that the assumption of non-smoothness of external disturbances does not allow us to use in this problem the higher-order sliding algorithms [5] and vortex algorithm [6].

The paper is structured as follows. In Section 1, the mathematical model of control plant is given, problem statement is formalized. In Section 2, the main result is presented. For second-order system under unmatched disturbance, the method of dynamic expansion by two first-order filters with discontinuous input, is developed. Inequalities for the choice of filters parameters taking into account specified accuracy of stabilization of tracking errors and restrictions on states variables and control action are received. The simulation results of the closed-loop tracking system designed on the basis of the developed algorithms are given.

1 Problem Statement

Consider nonlinear SISO-system represented in the canonical form "input-output" with the affine occurrences of external disturbances and functional uncertainty of the following form

(1) $\dot{x} = Ax + \eta(x,t) + bu,$

where $x = \mathrm{col}(x_1,...,x_n) \in X \subset R^n$ are the states, $x_1(t) \in R$ is the output regulated variable, $u \in R$ is the control,

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & 1 & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & 0 & ... & 1 \\ 0 & 0 & 0 & ... & 0 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ ... \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

$\eta(x(t),t) = \mathrm{col}(\eta_1,...,\eta_n)$ is vector function of time and states variables, having an arbitrary composition of arguments except for $\eta_i(x,t) \equiv -x_{i+1}, i = \overline{1,n-1}$ (equality $\eta_i(x(t_j),t_j) = -x_{i+1}(t_j)$ is possible for the some rare time points t_j only), and means external disturbances and functional uncertainty of the control plant.

The problem of continuous feedback design, ensuring the invariance of the output $x_1(t)$ to disturbances is put for system (1) under the following assumptions:

i) all state variables $x(t)$ are measured without noises;

ii) disturbances are assumed as unknown bounded deterministic functions

(2) $\left|\eta_i(x(t),t)\right| \le N_i,\ t \ge 0,\ i = \overline{1,n};$

iii) ranges of variation of state variables and the control should be limited in the control process as

(3) $\left|x_i(t)\right| \le X_i,\ i = \overline{2,n};\ \left|u(t)\right| \le X_{n+1}\ \forall t \ge 0,$

the initial conditions $x_i(0)$, $i = \overline{2,n}$ satisfy the constraints (3); N_i, X_i are known positive constants, based on physical considerations

(4) $N_i < X_{i+1},\ i = \overline{1,n}.$

Under undamped unmatched disturbances, stabilization of the output variable in a closed-loop system is possible only with some accuracy, which depends on restrictions (2)–(3),

(5) $\left|x_1(t)\right| \le \Delta = \text{const}\ \forall t > T > 0,$

so smoothness requirements to $\eta_i(t)$ $(i = \overline{1,n})$ are not imposed. It is sufficient that these functions were piecewise continuous and had at any point, including the point of rupture, bounded right and left derivatives.

Remark 1. In system (1) the tracking problem of output variable for a reference signal $g(t)$ with a given accuracy can be put, if we denote $x_1(t) := x_1(t) - g(t)$ as tracking error and $\eta_1(x,t) := \eta_1(x,t) - \dot{g}(t)$, where $\left|\dot{g}(t)\right| \le G\ \forall t \ge 0$ and $N_1 := N_1 + G$.

Canonical SISO system (1), where $x_i \in R^m$ can be put, is considered to maximize detail the basic idea of the developed method. Without loss of generality, following reasoning can be extended to nonlinear minimum phase MIMO systems, based on the presentation of their mathematical model in joint block form of controllability and observability with respect to the outputs taking into account nonsmooth disturbances [3].

For systems (1) under unmatched non-smooth disturbances within the block approach decomposition procedure of synthesis of linear static feedback is designed without regard restrictions (3) [1]. This method provides stabilization of tracking errors with any desired accuracy by means of fictitious and real controls with high gains.

Now we show the essence of this procedure an example of second-order system of type (1)–(2), namely

(6) $\dot{x}_1 = x_2 + \eta_1,\ \dot{x}_2 = \eta_2 + u,$

where η_2 acting on the control channel is called a matched disturbance, η_1 is unmatched disturbance. To solve the problem (5) we consider x_2 as fictitious linear control $x_2 = -k_1 x_1$, $k_1 = \text{const} > 0$, introduce a discrepancy between real and selected fictitious control

(7) $\bar{x}_2 = x_2 + k_1 x_1,$

and represent system (6) in the form $\dot{x}_1 = -k_1 x_1 + \bar{x}_2 + \eta_1, \dot{\bar{x}}_2 = u + \eta_2 + k_1(-k_1 x_1 + \bar{x}_2 + \eta_1).$

In this system, stabilization of variable $\bar{x}_2(t)$ can be achieved with some accuracy via a linaer control $u = -k_2\bar{x}_2$ with high gain $k_2 > 0$ or in a finite time via a discontinuous control with reduced amplitude [4]

$u = -M\text{sign}\bar{x}_2,\ \ M > |\eta_2 + k_1(-k_1x_1 + \bar{x}_2 + \eta_1)|$

After the occurrence of sliding mode on the line $\bar{x}_2 = 0$, stabilization of the output x_1 with given accuracy provided by the choice of a high gains k_1 on the basis of inequality $|x_1| \le N_1 / k_1 \le \Delta$.

In this method, the problem of the great splash of variable $x_2(t)$ at the beginning of the transition process can appear: $k_1 \to \infty \Rightarrow x_2(t) = k_1x_1(t) \to \infty$. We can avoid this problem and provide (5), and boundedness of variable $x_2(t)$ via local feedback in the form of S-shaped continuous function with saturation, namely, $\bar{x}_2 = x_2 + X_2f(x_1)$, where sat-function $f(x_1) = \text{sat}(k_1x_1)$ or sigma-function

$$f(x_1) = \sigma(x_1) = \frac{2}{1 + \exp(-k_1x_1)} - 1$$

are prelimit realization of sign-function [2]. However, the nonsmoothness of sat-functions and nonlinearity of sigma-functions leads to complicated mathematical calculations in design procedures for high-order systems.

Note that in system (6) the control algorithms based on second-order sliding modes and providing finite convergence [5], are not applicable due to the presence of unmatched and not differentiable disturbance $\eta_1(t)$. At least the author does not know the results to ensure invariance to unmatched and non-smooth disturbance within these approaches. Only in paper [6], it was shown, that the invariance with a given accuracy of the output x_1 to unmatched *smooth* disturbance can be achieved by twist algorithm via increasing the amplitude of the discontinuous control on the position x_1.

2 The case of second-order system

In this paper, a new approach to problem (5) under (2)–(4) is developed, which based on the expansion of the state space via a first-order filters with small time constants. Auxiliary discontinuous functions with bounded amplitudes are the inputs of these filters. The fictitious and real controls sequentially (from top to down) are formed as the outputs of these filters, which ensures continuity and boundedness of the phase variables and control action. Synthesis procedure reduces to setting of filters parameters providing (5) under (2)–(4) and quite simple from a computational point of view.

2.1 The theoretical result

For an explanation of the main result we consider second-order system (6) under (2)–(4), where unlike [3] requirements $\eta_1(x_1,t)$ and $\eta_1 \in C^3$ are not necessary, here $\eta_1(x_1,x_2,t) \ne -x_2$ can be non-smooth function provided (2). The goal is the synthesis of continuous control u, providing (5) under (2)–(4).

In order to ensure (3), let us extend the states space of system (6) using two first-order filters of the following form:

(8) $\dot{z}_1 = -a_1z_1 - v_1,\ \dot{z}_2 = -a_2z_2 - v_2,$

where $a_i,\ M_i = \text{const} > 0,\ i = 1, 2,\ v_i = M_i\text{sign}s_i$ are auxiliary discontinuous controls, $s_i \in R$ are virtual variables, which are linear combinations of the variables of extended system (6), (8) and

will be specified later. Solutions of system (8) limited by $|z_i(t)| \le |z_i(0)| + M_i / a_i \quad \forall t \ge 0$. For simplicity, we assume $z_i(0) = 0$, then

(9) $|z_i(t)| \le M_i / a_i, |\dot{z}_i(t)| \le 2M_i \ \forall t \ge 0, i = 1, 2.$

According to the block approach, in system (6) state variable x_2 are fictitious control, u is real control, which are formed as a continuous and bounded function (linear combinations of variables x_i, z_i) using follows stepwise procedure.

Step 1. Unlike (7) we introduce non-degenerate changes of variables as

(10) $\bar{x}_2 = x_2 - a_1 z_1 \in R, \ s_1 = x_1 + z_1 \in R,$

then the first equation of system (6) take the form $\dot{x}_1 = \bar{x}_2 + a_1 z_1 + \eta_1$ and

(11) $\begin{aligned} &\dot{s}_1 = \bar{x}_2 - a_1 z_1 + \eta_1 + a_1 z_1 - v_1 = \bar{x}_2 + \eta_1 - v_1, \\ &v_1 = M_1 \operatorname{sign} s_1, \end{aligned}$

Step 2. In subsystem $\dot{\bar{x}}_2 = \eta_2 + u - a_1 \dot{z}_1$ we choose a real control as a continuous function

(12) $u = a_2 z_2$

and introduce a non-degenerate change of variable

(13) $s_2 = \bar{x}_2 + z_2 \in R,$

then $\dot{\bar{x}}_2 = a_2 z_2 + \eta_2 - a_1 \dot{z}_1$ and

(14) $\dot{s}_2 = \eta_2 - a_1 \dot{z}_1 - v_2, \ v_2 = M_2 \operatorname{sign} s_2.$

When selecting in subsystems (11) and (14) amplitudes M_i of auxiliary discontinuous controls v_i based inequalities [4] $s_i \dot{s}_i < 0$, the ideal sliding mode occurs on the on the manifolds $s_i = 0$ in the virtual space of the variables of the extended system (6), (8) for the finite time $t > t_i$, $i = 1, 2$. At $t > T = \max\{t_1, t_2\}$ from (10), (13) we get

(15) $\begin{aligned} &s_1 = x_1 + z_1 = 0 \Rightarrow x_1(t) = -z_1(t), \\ &s_2 = \bar{x}_2 + z_2 = 0 \Rightarrow \bar{x}_2 = -z_2 \text{ and } x_2(t) = a_1 z_1(t) - z_2(t), \end{aligned}$

that reduces the stabilization problem of states variables of system (6) to the stabilization problem of filters variables (8).

Taking into account (9), (12), (15), restrictions (3) are executed $\forall t \ge T$, when

(16) $M_1 + M_2 / a_2 \le X_2, \ M_2 \le X_3.$ and

(17) $|z_1(t)| \le M_1 / a_1 = \Delta_1 \Rightarrow |x_1(t)| \le \Delta_1 \ \forall t > T.$

If we can achieve $0 < \Delta_1 \le \Delta$ under (16), then problem (5) should be solved.

In this algorithm, condition $|u(t)| \le X_3$ provided for $\forall t \ge 0$, but in the general case we can not guarantee the condition $|x_2(t)| \le X_2$ on the interval $t \in (0; t_2)$, where equalities (15) are not met, and the assessment $\dot{x}_2 = \eta_2 + a_2 z_2 = -a_2 x_2 + \eta_2 + a_2 (s_2 + a_1 z_1), \ |x_2(t)| \le |x_2(0)| + N_2 / a_2 + s_{2\max} + M_1$ depends on an assessment $|s_2(t)| \le s_{2\max} \ \forall t \in [0; t_2)$.

To find the lower acceptable estimates of the amplitudes M_i, let us express the equivalent values of the auxiliary controls from the statics equations $\dot{s}_i(t) = 0 \quad \forall t > T$ of systems (11), (14) successively. In view of (8), (15) we obtain

$$(18)\quad \begin{aligned} &\dot{s}_1 = \bar{x}_2 + \eta_1 - v_{1eq} = 0 \Rightarrow v_{1eq} = \bar{x}_2 + \eta_1 = -z_2 + \eta_1, \\ &\dot{s}_2 = \eta_2 - a_1 \dot{z}_1 - v_{2eq} = 0 \Rightarrow v_{2eq} = \eta_2 - a_1 \dot{z}_1. \end{aligned}$$

Conditions for the existence of the sliding modes fulfilled, if $s_i \dot{s}_i < 0 \Leftrightarrow M_i > |v_{ieq}|, i = 1,2$, which leads to the following system of inequalities in view of (2), (9), (16):

$$(19)\quad N_1 + M_2 / a_2 < M_1,\ N_2 + 2a_1 M_1 < M_2.$$

A joint decision inequalities (16) and (19) yields the following result:

$$(20)\quad \begin{aligned} &1)\ N_2 < M_2 \le X_3, \\ &2)\ N_1 + M_2 / a_2 < M_1 \le X_2 - M_2 / a_2 \Rightarrow \\ &3)\ 0 < \frac{2M_2}{X_2 - N_1} < a_2 \Rightarrow X_2 > N_1;\ \ 0 < 2a_1 M_1 < M_2 - N_2 \Rightarrow X_3 > N_2, \\ &4)\ a_1 < \frac{M_2 - N_2}{2M_1} < \frac{M_2 - N_2}{2(N_1 + M_2 / a_2)}. \end{aligned}$$

As we can see, the fundamental possibility of solving the problem (5) under (2)–(3) is determined by conditions (4), as was pointed in the problem statement.

In view of the first inequality (19) limit relations follow $a_2 \to +\infty \Rightarrow M_1 > N_1$ is this requirement feedforward compensation of a disturbance in the first subsystem (6).

On the basis of inequalities (20), we have the following algorithm to select the parameters of filters (8) "from bottom to top": amplitude M_2 is taken based on the first inequality (20); then a high gain a_2 is taken based on the third inequality (20); then amplitude M_1 is taken based on the second inequality (20) and, finally, gain a_1 is taken from the fourth inequality (20).

In view of the last inequalitiy (20), theoretically possible accuracy of the solution of problem (5) can be obtained as

$$(21)\quad \frac{M_1}{a_1} = \Delta_1 > \frac{2(N_1 + X_3 / a_2)^2}{X_3 - N_2}.$$

When designing the control system, which is necessary to provide a desired accuracy (5), sufficient restrictions (3) will be obtained with a given estimate (2) of the worst disturbances by solving the inequalities (21), (20) in reverse order.

Note that the conditions of existence of the sliding modes are are sufficient (redundant). The resulting lower bounds for selecting amplitudes (19) and hence, stabilization accuracy of the output variable (21) can be reduced in practical applications on the basis of simulation results. The example given in the next section demonstrates this situation.

2.2 Numerical Example

Let us represent system (6) with respect to the tracking error $x_1(t) := x_1(t) - g(t) = e(t)$ (see Remark 1). The simulation of extended closed-loop system (6), (8), (12) was performed for the following functions

$$\eta_1(x_1, x_2 t) = \overline{\eta} - \dot{g}(t),\ \eta_2(t) = \sin 10t,$$

(22) $g(t) = \sin 2t,\ \overline{\eta}(t) = 0.5 x_1 x_2 \sin t +$

$$+ \begin{cases} 0,\ t \in [0, \overline{T}) \cup [2\overline{T}, 3\overline{T}) \cup \ldots, \\ 0.2,\ t \in [\overline{T}, 2\overline{T}) \cup [3\overline{T}, 4\overline{T}) \cup \ldots,\ \overline{T} = 0.5 \text{sec}. \end{cases}$$

with initial conditions $e(0) = 1,\ x_2(0) = -4,\ z_{1,2}(0) = 0$. From conditions (16) under given restrictions (3)–(4), namely,

(23) $|x_2(t)| \le X_2 = 4,\ |u(t)| \le X_3 = 20, |\eta_1(t)| \le N_1 = 3.7,\ |\eta_2(t)| \le N_2 = 1\ \forall t \ge 0$

the following amplitudes $M_{1,2}$ of auxiliary discontinuous controls $v_{1,2}$ and high gain a_2 were taken: $M_2 = 20$, $a_2 = 100 \Rightarrow M_1 = X_2 - M_2 / a_2 = 3.8$. High gain $a_1 = 100$ does not satisfy the second inequality (19) and hence, the fourth inequality (20). It selected to ensure the stabilization accuracy $\Delta_1 = 0.02$ of the tracking error $e(t)$ in view of (17).

Figures 1–6 show the plots of states variables $e(t)$, $x_2(t)$, real control $u(t)$ (12), $\overline{\eta}(t)$ (22) and virtual variables $s_1(t)$ (10), $s_2(t)$ (13). As you can see, the simulation results confirm the effectiveness of the developed approach. For the selected parameters sliding modes in virtual space occur in finite time $s_1(t) = 0\ \forall t > t_1 = 3$ sec., $s_2(t) = 0\ \forall t > t_2 = 2.4$ sec., $|s_2(t)| \le s_{2\max} = 7$ $\forall t \in [0; t_2)$. Specified restrictions (23) not only for $u(t)$, but also $x_2(t)$ are performed for $\forall t \ge 0$ and $|e(t)| \le 0.02$ $t \ge T = 2.4$ sec. Regular emissions in the plot of $u(t)$ associated with the permanent influence of stepped external disturbance.

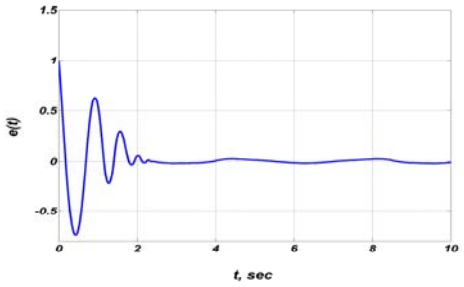


Fig. 1. Plot of $x_1(t) = x_1(t) - g(t) = e(t)$,

$|e(t)| \le 0.02$ $\forall t \ge T = 2.4$ sec.

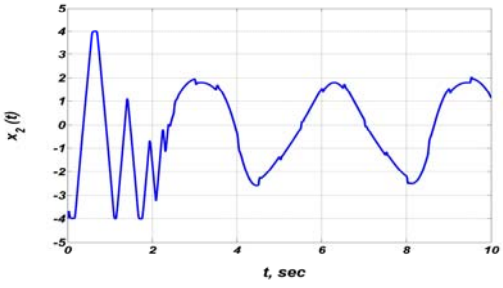


Fig. 2. Plot of $x_2(t)$, $|x_2(t)| \le 4\ \forall t \ge 0$.

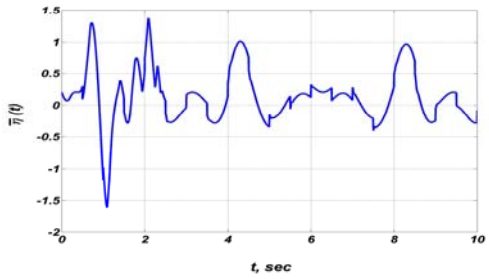


Fig. 3. Plot of $\bar{\eta}(t)$ (24), $|\bar{\eta}(t)| \le 1.7 \ \forall t \ge 0$.

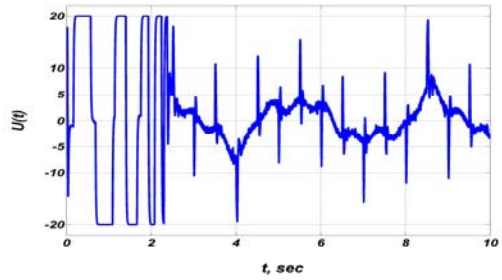


Fig. 4. Real control $u(t)$ (12), $|u(t)| \le 20 \ \forall t \ge 0$.

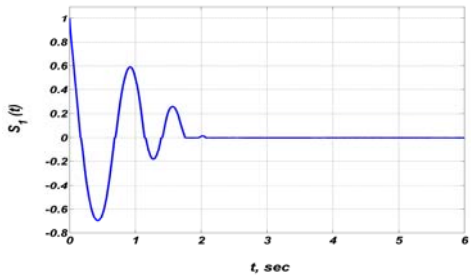


Fig. 5. *Switching manifold* $s_1(t)$ *(10),* $s_1(t) = 0$ $\forall t > 2$ sec.

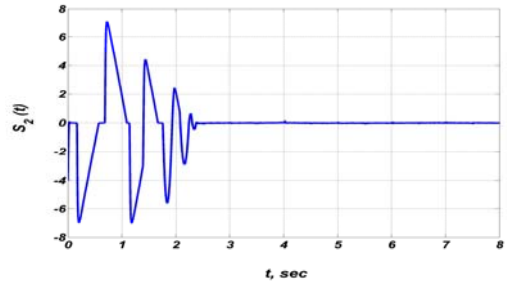


Fig. 6. *Switching manifold* $s_2(t)$ *(13),* $s_2(t) = 0$ $\forall t > 2.4$ sec.

Acknowledgment

Whis work partly has been supported by Russian Foundation for Basic Research under projects 15-08-01543A, 14-01-31190-mol_a.

References

[1] Utkin, V.A. (2001). Invariance and independence in systems with separable motion. *Autom. and Remote Cont.,* 62 (11), 1825–1843.

[2] Krasnova S.A. and Mysik N.S. (2014a). Cascade design of the state observer with nonlinear correction actions. *Autom. and Remote Cont.,* 75 (2), 263–280.

[3] Krasnova, S.A. and Utkin, V.A. (2014b). The block design of invariant tracking system for MIMO nonlinear control plant. *Proc. of 13th IEEE International Workshop on Variable Structure Systems (VSS'13)*, № 31651.

[4] Utkin, V.I., Guldner, J., and Shi J. (2009). *Sliding mode control in electro-mechanical systems*. New York: CRC Press.

[5] Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., and Levant, A. (2012). *Sliding mode control and observation*. Control Engineering: Birkhauser.

СИНТЕЗ КВАЗИАДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ ДЛЯ МНОГОСВЯЗНОГО ОБЪЕКТА С ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ ПО ВЫХОДУ

А.З. Асанов[1], В.С. Каримов[2]

[1] Институт кибернетики МГТУ МИРЭА
119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78, Россия
askhat.asanov@gmail.com
тел: +7 (495) 433-00-66

[2]Набережночелнинский институт К(П)ФУ
423812, г. Набережные Челны, д. 68/19, Россия
kvs-chelny@mail.ru
тел: +7 (8552) 39-71-40, факс: +7 (8552) 39-59-72

Ключевые слова: *объект с запаздываниями по выходу, технология вложения систем, эталонная модель, квазиадаптивная система*

Abstract

It was proposed an analytical solution to the problem of design of quasiadaptive automatic control system with a reference model for multivariable controlled plant with time delays on the output vector on basis of system embedding technology. The observer of a full order was applied to reproduction of a state vector of plant. Were calculated the algebraically expressions, which to determine solution set of problem design and existence conditions this solution.

Введение

Реальные объекты управления зачастую являются сложными, поэтому синтез законов управления ими сильно затруднен. Это обусловлено наличием нелинейностей в каналах связи многосвязного объекта, неполнотой информации о параметрах объекта, невозможностью измерения вектора состояния объекта управления и т.д.

Для управления сложными объектами, работающими в условиях неопределенностей, как параметрических, так и внешней среды, можно использовать адаптивные системы [1,2]. Однако применение классических методов адаптации для многосвязных систем значительно усложняется из-за целого ряда причин. Поэтому для управления объектами в условиях неопределенностей нашли применение системы, приближающиеся по своим свойствам к адаптивным (квазиадаптивные системы). Их достоинством является простота технической реализации, связанная с отсутствием цепей настройки коэффициентов регуляторов [3]. К такого рода квазиадаптивным системам можно отнести автоматические системы с эталонной моделью, эквивалентные по своим свойствам в определенных условиях функционирования адаптивным системам.

Наличие нелинейностей в каналах управления объекта сильно затрудняет реализацию закона управления. К таким нелинейностям можно отнести запаздывания. Запаздывания, которые сосредоточены в каналах связи объекта управления, могут привести к возникновению автоколебательности, ухудшению качества процессов управления и даже потери устойчивости системы [4].

В данной работе происходит поиск закона управления многосвязным объектом с запаздываниями по выходу в условиях неопределенностей на основе технологии вложения систем [5, 6].

Допустим, что фазовый вектор состояния объекта недоступен для непосредственного наблюдения. Поэтому предлагается рассматривать систему управления с наблюдающим устройством [7], которое воспроизводит фазовый вектор состояния объекта. С помощью технологии вложения систем будут определяться матричная передаточная функция (МПФ) регулятора и МПФ наблюдателя, а также условия их определяющие, при которых поведение системы управления будет описываться желаемой матричной передаточной функцией. Поиск закона управления будет проводиться по вынужденной составляющей рассогласования замкнутой динамической системы.

1 Постановка задачи синтеза

Пусть поведение динамического объекта с сосредоточенными запаздываниями по выходу может быть представлено в виде уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) &= \sum_{i=0}^{l} C_i x(t-\tau_i), \end{aligned} \tag{1}$$

где $\tau_0 = 0, \quad 0 < \tau_1, \tau_2, ..., \tau_l$ – постоянные времена запаздываний, $i = 0,1,...,l$, $u(t) \in R^s$ – вектор управлений объекта, $y(t) \in R^m$ – вектор выходных переменных, $x(t) \in R^n$ – вектор состояний объекта управления. В нашем случае матрица A имеет размер $n \times n$, $B - n \times s$, $C_i - m \times n$. Слагаемые $C_i x(t-\tau_i)$ описывают запаздывания сигналов на время τ_i в каналах выхода объекта управления (ОУ). Кроме того полагаем, что матрицы системы A, B, C_i A_i, B, C таковы, что системные передаточные нули отсутствуют [8, 9].

Начальные условия зададим с учетом запаздывания сигналов в объекте управления – формально будем рассматривать отрицательные моменты времени $t<0$, предполагая, что в объекте происходили динамические процессы до начального момента времени:

$$x(t) = \varphi_x(t), \; t_0 - \tau \le t \le t_0,$$

где τ – наибольшее время запаздывания.

Пусть наблюдающее устройство, вычисляющее текущий вектор состояния $x(t)$ объекта, представлено уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)), \\ \hat{y}(t) &= \sum_{i=0}^{l} C_i \hat{x}(t-\tau_i), \end{aligned} \tag{2}$$

где $\hat{x}(t) \in R^n$ – вектор состояния наблюдающего устройства, $\hat{y}(t) \in R^m$ – вектор выхода наблюдающего устройства, L – МПФ наблюдателя размера $n \times m$.

Целью управления является обеспечение поведения синтезируемой системы управления близкой к поведению эталонной модели, не содержащей запаздываний, которая описывается в пространстве состояний уравнениями:

$$\dot{x}_M(t) = A_M x_M(t) + B_M g(t),$$
(3)
$$y_M(t) = C_M x_M(t),$$

где $x_M(t) \in R^n$ – вектор состояния эталонной модели объекта, $y_M(t) \in R^m$ – вектор выходных переменных модели объекта, A_M, B_M, C_M – матрицы эталонной модели соответствующих размеров, $g(t) \in R^s$ – вектор управления на входе системы.

Пусть закон управления описывается матричным уравнением, записанным в операторной форме:

(4) $u(p) = g(p) - K(p)(\hat{y}(p) - y_M(p)),$

где $K(p)$ – МПФ регулятора размера $n \times s$.

Требования к синтезируемой системе управления формализуем на основе сигнала рассогласования $\Delta y = \hat{y} - y_M$. Пусть близость поведения синтезируемой системы к эталонной характеризуется матричной передаточной функцией $E^g_{\Delta y}(p)$:

$$E^g_{\Delta y}(p) = E^g_{\hat{y}}(p) - E^g_{y_M}(p),$$

где $E^g_{\hat{y}}(p)$ – МПФ от управляющих воздействий к оценке выхода объекта, $E^g_{y_M}(p)$ – МПФ от управляющих воздействий к выходу модели объекта, $E^g_{\Delta y}(p)$ – МПФ от управляющих воздействий к рассогласованию объекта и модели.

Задача: для ОУ (1), наблюдателя состояния (2), цели управления (3) и закона управления (4) необходимо найти МПФ регулятора $K(p)$ и МПФ наблюдателя $L(p)$ или условия их определяющие, при которых поведение САУ (рисунок 1) будет описываться желаемой МПФ $E^g_{\Delta y}(p)$.

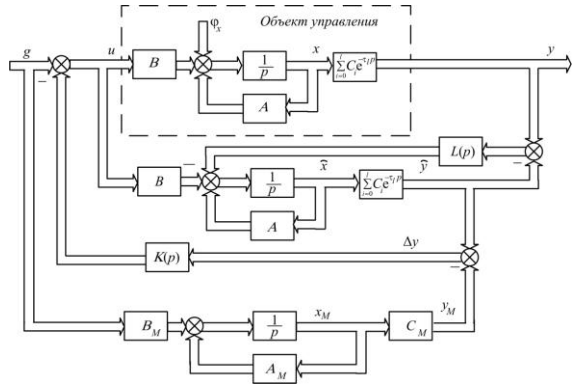


Рисунок 1 – Квазиадаптивная система управления с запаздываниями по выходу

2 Синтез квазиадаптивной САУ с запаздываниями по выходу

При синтезе системы управления будем использовать технологию вложения систем [5, 6]. С учетом уравнений (1) – (4) и выполнения процедур метода вложения систем проблемная матрица (проматрица) рассматриваемой задачи будет иметь вид:

$$\Omega(p)=\begin{bmatrix} (pI_n-A) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -B & 0 \\ -\sum_{i=0}^{l} C_i e^{-\tau_i p} & I_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L(p) & (pI_n-A) & L(p) & 0 & 0 & -B & 0 \\ 0 & 0 & -\sum_{i=0}^{l} C_i e^{-\tau_i p} & I_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (pI_n-A_M) & 0 & 0 & -B_M \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C_M & I_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K(p) & 0 & -K(p) & I_s & -I_s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_s \end{bmatrix}.$$

Репроматрица системы в обобщенном виде представляется следующим образом

$$\Omega^{-1}(p)=\begin{bmatrix} E_x^{\varphi}(p) & * & * & * & * & * & * & E_x^{g}(p) \\ E_y^{\varphi}(p) & * & * & * & * & * & * & E_y^{g}(p) \\ E_{\tilde{x}}^{\varphi}(p) & * & * & * & * & * & * & E_{\tilde{x}}^{g}(p) \\ E_{\tilde{y}}^{\varphi}(p) & * & * & * & * & * & * & E_{\tilde{y}}^{g}(p) \\ E_{x_M}^{\varphi}(p) & * & * & * & * & * & * & E_{x_M}^{g}(p) \\ E_{y_M}^{\varphi}(p) & * & * & * & * & * & * & E_{y_M}^{g}(p) \\ E_u^{\varphi}(p) & * & * & * & * & * & * & E_u^{g}(p) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_s \end{bmatrix}.$$

Здесь $E_j^i(p)$ – МПФ от параметра i к параметру j. Блоки, не представляющие интереса в данном исследовании, отмечены звездочками.

Матрицы α и β, используемые при вложении систем имеют вид:

$\alpha=[0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ I_s]^T$, $\beta=[0\ \ 0\ \ 0\ \ I_m\ \ 0\ \ -I_m\ \ 0\ \ 0]$ при $\omega=E_{\Delta y}^{g}(p)$,

где ω – образ синтезируемой системы – желаемая матричная передаточная функция.

После выполнения процедур технологии вложения – последовательной факторизации матриц $\Omega=\Sigma\Xi$, $\alpha=\Sigma\delta$, $\beta=\pi\Xi$, $\omega=\pi\delta$ (π, δ, Ξ, Σ – вспомогательные матрицы), можно получить уравнения, которым должна удовлетворять МПФ регулятора $K(p)$ и наблюдателя $L(p)$ при синтезе по вынужденной составляющей $E_{\Delta y}^{g}(p)$ рассогласования Δy замкнутой динамической системы.

Для решения матричных уравнений, которые получаются в результате применения процедур вложения, возможно применение аппарата канонизации матриц [10].

Применение технологии вложения при синтезе по вынужденной составляющей рассогласования Δy дает следующую систему уравнений относительно передаточных матриц $K(p)$, $L(p)$, π_x, $\pi_{\tilde{x}}$, π_{x_M}:

$$\begin{aligned} &\pi_x(pI_n-A)=\pi_{\tilde{x}}L\sum_{i=0}^{l}C_i e^{-\tau_i p}, \\ &\pi_{\tilde{x}}(pI_n-A)=(I_m-\pi_{\tilde{x}}L)\sum_{i=0}^{l}C_i e^{-\tau_i p}, \\ &\pi_{x_M}(pI_n-A_M)=((\pi_x B+\pi_{\tilde{x}}B)K-I_m)C_M, \\ &E_{\Delta y}^{g}=\pi_{x_M}B_M+\pi_x B+\pi_{\tilde{x}}B. \end{aligned} \quad (5)$$

Из первого уравнения системы (5), используя аппарат канонизации матриц [10], получим множество матриц наблюдателя $L(p)$ относительно неизвестных π_x и $\pi_{\hat{x}}$:

$$(6)\quad \{L(p)\}_{\eta,\mu} = \widetilde{\pi_{\tilde{x}}}\pi_x(pI_n - A)\overline{\sum_{i=0}^{l} C_i e^{-\tau_i p}} + \overline{\pi_{\tilde{x}}}^{R}\eta(p) + \mu(p)\overline{\sum_{i=0}^{l} C_i e^{-\tau_i p}}^{L}.$$

Условия существования множества решений (6) имеют вид:

$$(7)\quad \begin{aligned} &\overline{\pi_{\hat{x}}}^{L}\pi_x(pI_n - A) = 0,\\ &\pi_x(pI_n - A)\overline{\sum_{i=0}^{l} C_i e^{-\tau_i p}}^{R} = 0 \end{aligned}$$

или

$$(8)\quad \begin{aligned} &\pi_x(pI_n - A) = \pi_{\hat{x}}(\pi_{\hat{x}})^{\sim R}\xi(p),\\ &\pi_x(pI_n - A) = \vartheta(p)(\sum_{i=0}^{l} C_i e^{-\tau_i p})^{\sim L}\sum_{i=0}^{l} C_i e^{-\tau_i p}, \end{aligned}$$

где ξ(p), ϑ(p) – произвольные дробно-полиномиальные матрицы соответствующих размеров.

Из системы уравнений (5) найдем выражения для матриц $\pi_{\hat{x}}$, π_{x_M}

$$(9)\quad \pi_{\hat{x}} = \sum_{i=0}^{l} C_i e^{-\tau_i p}(pI_n - A)^{-1} - \pi_x,$$

$$(10)\quad \left\{\pi_{x_M}\right\}_{\kappa} = (E^g_{\Delta y} - \sum_{i=0}^{l} C_i e^{-\tau_i p}(pI_n - A)^{-1}B)\widetilde{B_M} + \kappa(p)\overline{B_M}^{L},$$

где κ(p) – произвольная дробно-полиномиальная матрица соответствующих размеров.

Условия существования множества значений матрицы π_{x_M} (10) имеют вид:

$$(11)\quad (E^g_{\Delta y} - \sum_{i=0}^{l} C_i e^{-\tau_i p}(pI_n - A)^{-1}B)\overline{B_M}^{R} = 0,$$

или

$$(12)\quad (E^g_{\Delta y} - \sum_{i=0}^{l} C_i e^{-\tau_i p}(pI_n - A)^{-1}B) = \chi(p)\widetilde{B_M}^{L}B_M,$$

где χ(p) – произвольная дробно-полиномиальная матрица соответствующих размеров.

Из системы уравнений (5) можно получить выражение для искомой матрицы $K(p)$:

$$(13)\quad \pi_{x_M}(pI_n - A_M) = ((\pi_x B + \pi_{\hat{x}}B)K - I_m)C_M.$$

Используя аппарат канонизации матриц, из уравнения (13) найдем выражение для множества регуляторов K(p):

$$(14)\quad \left\{K(p)\right\}_{\chi,\rho} = \widetilde{(\pi_x B + \pi_{\tilde{x}}B)}(C_M + \pi_{x_M}(pI_n - A_M))\widetilde{C_M} + \overline{(\pi_x B + \pi_{\tilde{x}}B)}^{R}\chi(p) + \rho(p)\overline{C_M}^{L},$$

где $\chi(p)$, $\rho(p)$ – произвольная дробно-полиномиальная матрица соответствующего размера.

Условия разрешимости уравнения (13), а значит и существования множества решений (14) имеет вид:

$$(15)\quad \begin{aligned} &\overline{(\pi_x B + \pi_{\hat{x}}B)}^{L}(C_M + \pi_{x_M}(pI_n - A_M)) = 0,\\ &(C_M + \pi_{x_M}(pI_n - A_M))\overline{C_M}^{R} = 0 \end{aligned}$$

или

$$(C_M + \pi_{x_M}(pI_n - A_M)) = (\pi_x B + \pi_{\bar{x}} B)(\pi_x B + \pi_{\bar{x}} B)^{\sim R}\gamma(p),$$

(16)

$$(C_M + \pi_{x_M}(pI_n - A_M)) = \xi(p)\widetilde{C_M}^{L} C_M,$$

где $\gamma(p)$, $\xi(p)$ – произвольные дробно-полиномиальные матрицы соответствующих размеров.

Таким образом, были получены решения задачи синтеза (6) и (14) с условиями существования этих решений (7) или (8), (11) или (12), (15) или (16) при синтезе по вынужденной составляющей рассогласования Δy замкнутой динамической системы, которые позволяют найти множество матриц наблюдателя и регулятора, удовлетворяющих закону управления (4).

Результаты цифрового имитационного моделирования подтверждают компенсацию запаздываний по выходу и достижение желаемых процессов в системе управления.

Заключение

Был проведен синтез квазиадаптивной системы автоматического управления с эталонной моделью для многосвязного объекта с запаздываниями по выходу. Найдено множество решений задачи синтеза и условия разрешимости задачи с помощью применения технологии вложения систем.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-08-00651).

Список литературы

[1] Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными системами. –СПб.: Наука, 2000. – 549 с.

[2] Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптация в нелинейных динамических системах. СПб.: ЛКИ. – 2008. – 378 с.

[3] Асанов А. З. Синтез многотемповой системы управления, эквивалентной адаптивной, по технологии вложения // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 8. – С. 2–8.

[4] Филимонов А.Б. Спектральная декомпозиция систем с запаздываниями. Компенсация запаздываний. М.: Физматлит. –2002. – 288 с.

[5] Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем.– Калуга: Издательство научной литературы Н.Ф. Бочкаревой, 2006. – 720 с.

[6] Асанов А.З. Технология вложения систем и ее приложения. – Уфа:Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – 2007. –227 с.

[7] Асанов А.З. Синтез адаптивной системы с эталонной моделью и наблюдателем по технологии вложения // Известия вузов. Авиационная техника. −2004. −№ 2. −С.21–25.

[8] Асанов А.З., Демьянов Д.Н. Вопросы анализа и синтеза несобственных динамических систем с учетом передаточных нулей // Известия вузов. Авиационная техника. −2009. −№ 2. –С.24–28.

[9] Смагина Е.М. Вопросы анализа линейных многомерных объектов с использованием понятия нуля системы. – Томск: изд-во Том.ун-та. – 1990. -- 160 с.

[10] Буков В. Н., Рябченко В. Н., Косьянчук В. В., Зябин Е. Ю. Решение линейных матричных уравнений методом канонизации // Вестник Киевского университета. Серия: Физико-математические науки.– Вып.1.–2002.– С.19–28.

РЕАЛИЗАЦИЯ СЛОЖНОЙ ДВУХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ «НАВЕДЕНИЕ-СТАБИЛИЗАЦИЯ» ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ УЧЕТА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ПОДСИСТЕМ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПО НАВЕДЕНИЮ

А.В. Ванин, Е.М. Воронов, А.А. Карпунин, К.К. Любавский

Кафедра систем автоматического управления
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана
107005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, Россия
[1]mole@list.ru
тел: +7(926)940-16-05

Ключевые слова: *оптимизация управления, иерархические системы, координация, исполнительное управление, наведение, стабилизация, летательный аппарат.*

Abstract

In this paper methods of coordinated stably-effective compromise for optimizing hierarchical control systems based on hierarchical trims and optimize the management of multi-site multiobjective systems on the levels of the hierarchy develop and apply. The study formed the inter-layer coordination strategy based on generalized hierarchical coordination Stackelberg. Consider getting tiered Pareto-optimal stable-effective someone compromises based on a modified equilibrium-arbitration algorithm. Formed hierarchical optimization algorithm based management system The developed-ous methods of obtaining coordinated stably-effective compromise. Powered generalization of this method and discussed examples of its application

Введение

В работе развивается и применяется метод координированных стабильно-эффективных компромиссов для оптимизации иерархических систем управления на основе иерархических уравновешиваний и оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами уровней. В рамках исследования формируются стратегии межуровневого координирования на основе обобщенного иерархического координирования по Штакельбергу [1, 2, 3]. Рассматривается получение поуровневых Парето-оптимальных стабильно-эффективных компромиссов на основе модифицированного равновесно-арбитражного алгоритма [3, 5, 7]. Сформирован алгоритм оптимизации иерархической системы управления на основе разработанной методики получения координированных стабильно-эффективных компромиссов [2, 8, 9]. Приведено обобщение этого метода и рассмотрены примеры его применения.

1 Структура и модель двухуровневой системы [2]

В рамках данной работы рассматривается методика оптимизации структурно и функционально сложных АСУ. Примером представления такой многоуровневой АСУ и практически полезной моделью для исследования является двухуровневая математическая модель наведения-стабилизации многоканальной СУ беспилотного летательного аппарата (СУ ЛА), представленная на рисунке 1.

На рисунке 1 в соответствии с терминологией [6]:

КСУ, КССТ — каналы системы управления и системы стабилизации ЛА;

$u_{1,2}$— сигналы наведения ЛА (координирующие воздействия на систему стабилизации);

k_y, k_k — управляющие параметры, коэффициенты передачи устройства выработки команд КСУ (метода наведения) и чувствительного элемента координатора цели соответственно;

$k_{дг}$, $k_{длу}$ — управляющие параметры, коэффициенты передачи дифференцирующего гироскопа и датчика линейных ускорений соответственно;

$\delta_в$, $\delta_н$ — управляющие воздействия рулей высоты и направления системы стабилизации (исполнительные воздействия на ЛА).

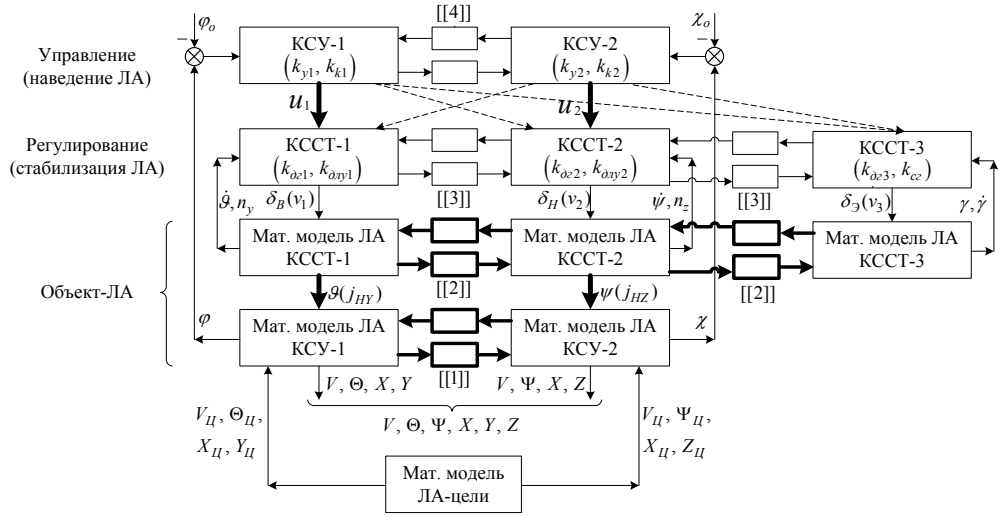


Рисунок 1 - Двухуровневая модель наведения-стабилизации трехканальной СУ ЛА

Следует иметь в виду, что в линеаризованном варианте представленной модели вектор состояния центра масс (V, Θ, Ψ) заменяется на вектор (ΔV, $\Delta\Theta$, $\Delta\Psi$), где данные динамические величины есть отклонения ЛА от опорного движения (V_0, Θ_0, Ψ_0). Блоки с обозначением [[i]], i=1:4 являются перекрестными связями в динамике поступательного движения центра масс ЛА, углового (вращательного) движения вокруг центра масс ЛА, между регуляторами ССт и в методе пространственного наведения ЛА соответственно. В типичной ситуации существенна связь между каналами вращательного и поступательного движения ЛА, что определяет связь каналов стабилизации и наведения соответственно [6].

Математическая модель движения ЛА дана моделью углового (вращательного) движения вокруг центра масс по углам тангажа ϑ и рысканья ψ (далее на рис. 4 с расширением по углу крена γ) с соответствующими воздействиями аэродинамического управления по нормальному ускорению ($j_{\text{Н}}$) в каналах управления направлением скорости центра масс в вертикальной плоскости по углу наклона траектории (Θ) и в горизонтальной плоскости по углу поворота траектории (Ψ).

Как известно [6], в общем случае система динамических и кинематических связей двухканальной математической модели ЛА на уровне КСУ имеет при $V = const$ вид системы дифференциальных уравнений (1), которая при малых углах Ψ (или Θ) декомпозируется на модели каналов СУ ЛА — горизонтальный (или вертикальный) с управлениями j_{HZ} (j_{HY}). Поэтому общую модель ЛА КСУ можно считать двухканальной с перекрестными кинематическими связями [[1]], где $j^{\text{П}}_{\text{HY}} = j_{\text{HY0}} + j_{\text{HY}}$, $j^{\text{П}}_{\text{HZ}} = j_{\text{HZ0}} + j_{\text{HZ}}$, причем решение сис-темы при j_{HY0}, j_{HZ0} дает $\Theta_0(t)$, $\Psi_0(t)$ (или, наоборот, заданные Θ_0, Ψ_0 формируют j_{HY0}, j_{HZ0}).

$$(1)\quad \begin{cases} \dot{\Theta} = \left(j_{HY}^{\Pi} - g\cos\Theta \right)/V; \\ \dot{\Psi} = -j_{HZ}^{\Pi}/(V\cos\Theta); \\ \dot{X} = V\cos\Theta\cos\Psi; \\ \dot{Y} = V\sin\Theta; \\ \dot{Z} = -V\cos\Theta\sin\Psi, \end{cases}$$

Текущее расстояние $||O_0O_{\text{Ц}}||$

$$(2)\quad R = \sqrt{\left(X - X_{Ц}\right)^2 + \left(Y - Y_{Ц}\right)^2 + \left(Z - Z_{Ц}\right)^2}.$$

Для иллюстрации динамического описания задачи на уровне регулирования (стабилизации) ЛА на рис. 2 дана структурная схема трехканального описания линеаризованной системы стабилизации в блоке: КССТ - математическая модель углового движения ЛА - перекрестные связи [[2]].

На рис. 2 введены следующие обозначения:

a_{ij}, b_{ij} — аэродинамические коэффициенты;

ϑ_0, γ_0 — элементы опорной траектории;

$M_{\text{возм}\,\vartheta,\,\psi}$ — возмущающие моменты (для расчета влияния возмущений).

Передаточная функция (ПФ) летательного аппарата:

$$(3)\quad W_{\delta_B}^{\dot{\vartheta}} = \frac{k(T_1 s + 1)}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1};\ W_{\dot{\vartheta}}^{j_{HZ}} = \frac{V}{T_1 s + 1};$$

$$W_{\delta_H}^{\dot{\psi}} = \frac{k(T_2 s + 1)}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1};\ W_{\dot{\psi}}^{j_{HY}} = \frac{V}{T_2 s + 1};$$

ПФ рулевого привода:

$$(4)\quad W_{РП} = \frac{k_{РП}}{T_{РП} s + 1}$$

ПФ датчика угловой скорости (дифференцирующего гироскопа): $W_{\text{дг}1,2} = k_{\text{дг}1,2}$

ПФ датчиков линейного ускорения: $W_{\text{длу}1,2} = k_{\text{длу}1,2}$.

Нелинейный элемент f_2 задает ограничение сигнала u_l, (l=1,2).

В целом структурная схема двухуровневой двухканальной системы «наведение-стабилизация» беспилотного ЛА с перекрестными связями дана на рисунке 3.

На рисунке 3 замкнутые системы с внутренней обратной связью являются двухканальным координатором цели (КЦ) головки самонаведения (ГС) беспилотного ЛА на основе двухосного силового гироскопического стабилизатора [6]. Коэффициент k_{kl}, (l=1,2) является коэффициентом передачи чувствительного элемента КЦ. Датчик момента и гиростабилизатор имеет передаточную функцию $W_{\text{г}}(s)=(k_{\text{г}}k_{\text{д}})/s$, где $k_{\text{д}}$ — коэффициент передачи датчика момента, k_{Γ} — коэффициент передачи гиростабилизатора $k_{\text{г}}=1/H$, где H — кинетический момент гироскопа стабилизатора.

Нелинейный элемент f_1 учитывает эффект стробирования ГС. В более общем описании двухканальный КЦ создает дополнительные перекрестные связи типа [[4]], которые в данной работе не учитываются.

Передаточная функция устройства выработки команд (УВК) в простейшем виде [6] имеет вид $W_{\text{увк}}(s)=k_{yl}$, где k_{yl} — коэффициент передачи УВК КСУ-l, определяющий качество метода пропорционального наведения [4].

В целом структурная схема двухуровневой двухканальной системы «наведение–стабилизация» беспилотного ЛА с перекрестными связями дана на рис. 3. В силу того, что канал системы стабилизации по углу крена отрабатывает только возмущающее воздействие, и на него не поступает сигнал наведения с уровня управления, то на структурной схеме (см. рис. 3) система стабилизации имеет вид двухканальной системы.

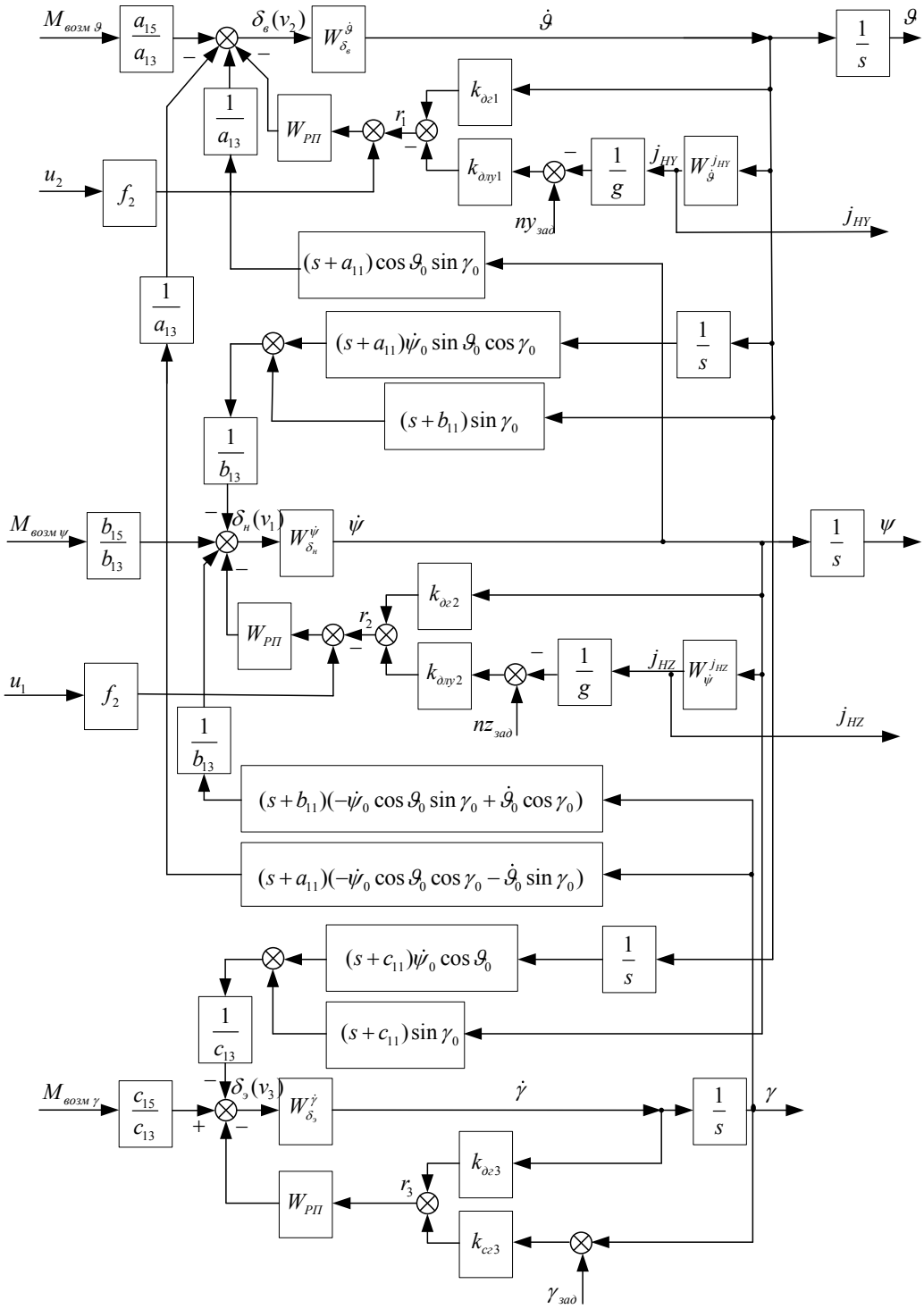


Рисунок 2 - Структурная схема двухканальной ССт

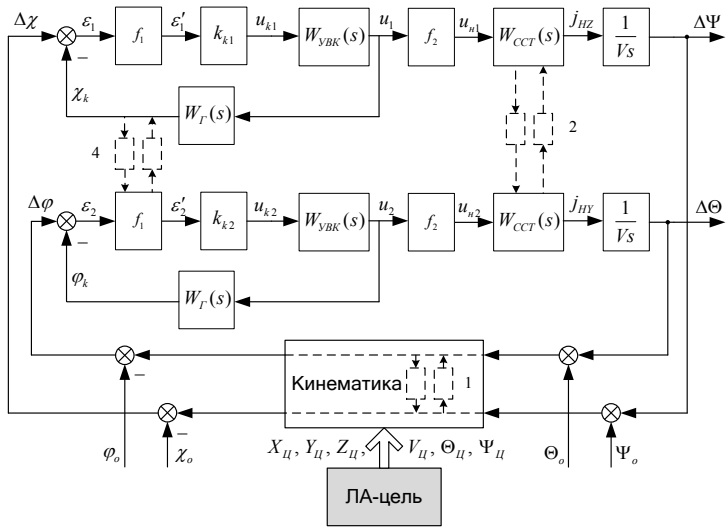


Рисунок 3 - Структурная схема двухканальной системы «наведение-стабилизация» беспилотного летательного аппарата

2 Концепция и определение обобщенного управления многоуровневой системой [1,2]

Методика оптимизации формируется на основе комбинации методов проектирования иерархических распределенных систем (ИРС) для выбора оптимальной функциональной структуры ИРС–АСУ (облика АСУ); методов оптимизации ММС на основе стабильно-эффективных игровых компромиссов для оптимизации и уравновешивания (балансировки) подсистем в составе ММС-уровня регулирования, управления, принятия решения по эффективности или потерям; методов оптимизации межуровневой координации с приоритетом — «правом первого хода» каждого верхнего уровня в ИРС–АСУ. Данная концепция позволяет сформулировать определение обобщенного оптимального управления в ИРС–АСУ.

Определение. Обобщенное оптимальное управление многоуровневой АСУ формируется на основе комбинации процессов:

1) многокритериального выбора оптимальной функциональной структуры АСУ (облика АСУ);
2) равновесно-арбитражной многокритериальной оптимизации ММС-уровней;
3) оптимизации межуровневой координации.

Очевидно, что данное обобщенное управление АСУ с учетом поуровневых и межуровневых связей требует разработки единой технологии его оптимизации.

В качестве комментария определения в практическом примере двухуровневой двухканальной СУ наведения–стабилизации ЛА (рис. 1) функциональный облик уже выбран. Далее формируется итерационная процедура оптимизации управления на основе равновесно-арбитражного алгоритма на ММС-уровнях и алгоритма получения межуровневых координаций на основе обобщенного иерархического уравновешивания по Штакельбергу. На соответствующих уровнях выбираются параметры, которые обеспечивают балансировку и Парето-оптимальность на основе равновесно-арбитражной схемы стабильно-эффективного компромисса [3, 5, 7]. Сигналы u_l, (l=1,2) обеспечивают межуровневую координацию между уровнем управления и стабилизации, а v_l, (l=1,2,3) обеспечивают исполнительное управление. На уровне стабилизации в качестве управляющих сигналов v_l приняты сигналы изменения углов отклонения руля высоты, руля направления и элеронов.

В работе представлен алгоритм оптимизации обобщенного управления многоуровневой АСУ на основе разработанного метода иерархического уравновешивания по Штакельбергу, в котором обобщается известное понятие стратегии по Штакельбергу в классе иерархических дифференциальных игр (ИДИ).

3 Определение и структурные свойства иерархического равновесия в многоуровневых системах управления с обобщением стратегии Штакельберга [1, 2, 9]

В отличие от известных результатов и в соответствии со структурным требованием многоуровневой СУ каждый верхний уровень представляет собой структурированную ММС с исходной структурной несогласованостью, представленную на рис. 4.

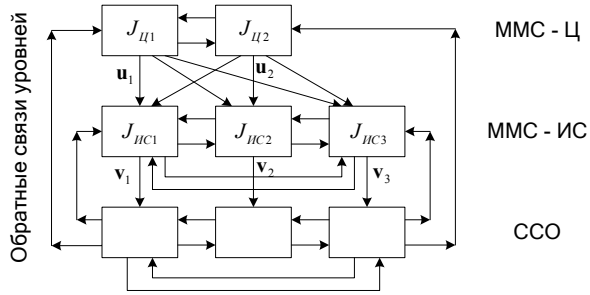


Рисунок 4 - Структурная схема двухуровневой трехподсистемной ИДИ: верхний уровень: ММС–Центр; нижний уровень: ММС–Исполнительная Система (ММС–ИС). Структурно-сложный объект (ССО)

На рис. 4 сохранены традиционные обозначения двухступенчатой дифференциальной игры Центра и исполнительной системы (ИС). Но в соответствии, например, с двухуровневой структурой управления–регулирования на рис. 1 верхний уровень может иметь смысл ММС. Таким образом, в данной работе имеет место обобщение двухступенчатой ИДИ [1,8].

Структурно сложный объект (ССО) имеет математическую модель

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(t,\ \mathbf{x},\ \mathbf{v},\ \mathbf{u}),\ \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0,\ \mathbf{x} \in \mathbf{E}^n \tag{5}$$

где $\mathbf{v}$ — исполнительное управление с распределенным исполнением (рис. 4)

$$\begin{gathered} \mathbf{v} = (v_1,\ v_2,\ v_3),\ \dim v_i = m_i,\ i = 1,2,3,\ v_i \in \mathbf{V}_i \subset \mathbf{E}^{m_i}, \\ \dim \mathbf{v} = m = \sum_{i=1}^{3} m_i,\ \mathbf{v} \in \mathbf{V} = \mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2 \times \mathbf{V}_3 \subset \mathbf{E}^m. \end{gathered} \tag{6}$$

Управление–координация ММС–Ц

$$\begin{gathered} \mathbf{u} = (u_1,\ u_2),\ \dim u_l = k_l \geq 3,\ u_l \in \mathbf{U}_l \subset \mathbf{E}^{k_l}, \\ \dim \mathbf{u} = k = \sum_{l} k_l,\ \mathbf{u} \in \mathbf{U} = \mathbf{U}_1 \times \mathbf{U}_2 \subset \mathbf{E}^k. \end{gathered} \tag{7}$$

При распределенной координации $\mathbf{u}$, связанной с одной из подсистем ММС–ИС (рис. 1), последнее неравенство может не выполняться.

Структурно и функционально связанные задачи ММС–Ц и ММС–ИС характеризуются соответственно функциями эффективности

$$J_{Цl} = J_{Цl}(\mathbf{v}, \mathbf{u}),\ l = 1,\ 2; J_{ИСi} = J_{ИСi}(\mathbf{v}, \mathbf{u}),\ i = 1,\ 2,\ 3. \tag{8}$$

Определение 2 (ИРИДИШ). Структурные свойства иерархического равновесного решения двухуровневой ИДИ с обобщением стратегии Штакельберга составляют следующую трехэтапную процедуру получения обобщенного управления.

На *первом этапе* ММС–Центр на «правах первого хода» сообщает ММС–ИС свою координацию в форме закона-стратегии.

На *втором этапе* на уровне ММС–ИС формируется отображение **R: U->V** такое, что при каждом фиксированном **u**

(9) $$\max_{\mathbf{v}\in\mathbf{V}} \varphi_{\text{ИС}}\left(J_{\text{ИС1}}(\mathbf{u},\,\mathbf{v}),...,J_{\text{ИС3}}(\mathbf{u},\,\mathbf{v})\right)=\varphi_{\text{ИС}}\left(J_{\text{ИС1}}(\mathbf{u},\,\mathbf{Ru}),...,J_{\text{ИС3}}(\mathbf{u},\,\mathbf{Ru})\right).$$

Конкретный вид функции $\varphi_{\text{ис}}$ определяется на множестве степеней конфликтности подсистем ММС–ИС (антагонизм, бескоалиционный или коалиционный конфликт, кооперация).

На *третьем этапе*, который развивает стратегию Штакельберга и обобщает ИРИДИШ, ММС–Ц выбирает решение

(10) $$\max_{\mathbf{u}\in\mathbf{U}} \varphi_{\text{Ц}}\left(J_{\text{Ц1}}(\mathbf{u},\,\mathbf{Ru}),...,J_{\text{Ц3}}(\mathbf{u},\,\mathbf{Ru})\right)=\varphi_{\text{Ц}}\left(J_{\text{Ц1}}(\mathbf{u}^o,\,\mathbf{Ru}),...,J_{\text{Ц3}}(\mathbf{u}^o,\,\mathbf{Ru})\right).$$

Конкретный вид функции $\varphi_{\text{ц}}$ определяется на множестве степеней конфликтности подсистем ММС–Ц.

Набор $\{\mathbf{u}^r,\,\mathbf{Ru}\}$ определяется как *иерархическое равновесие по Штакельбергу*(ИРИДИШ).

Замечание 1. В общем случае управление-координация **u** ММС–Ц и исполнительное управление **v** ММС–ИС являются обобщенными векторами **u(*t*,x), v(*t*,x)** соответственно с набором показателей-требований.

Замечание 2. Функции $\varphi_{\text{ц}}$, $\varphi_{\text{ис}}$ являются, например, функциями балансировки на уровнях на основе уравновешивания по Нэшу.

Замечание 3. Для обеспечения на ММС-уровнях балансировки с последующей Парето-оптимизацией функций $J_{\text{ис}}$ и $J_{\text{ц}}$ с учетом арбитражной схемы Нэша (АСН) функции $\varphi_{\text{ц}}$, $\varphi_{\text{ис}}$ принимают более общий вид: на втором шаге формируется $\mathbf{R}_{\text{АСН}}(\mathbf{u})=\mathbf{v}^{\text{АСН}}$, а на третьем вводится дополнительная операция

$$J_{\text{Ц}}\left(\mathbf{u}^{\text{П}},\,\mathbf{R}_{\text{АСН}}(\mathbf{u}^{\text{П}})\right)=\max_{u}\prod_{l}\left[J_{\text{Ц}\,l}-J_{\text{Ц}\,l}\left(\mathbf{u}^r,\,\mathbf{R}_{\text{АСН}}(\mathbf{u}^r)\right)\right],\ l=\overline{1,2},$$

где $\mathbf{u}^{\text{П}}$ — оптимально по Парето.

Замечание 4. В двухуровневой задаче наведения-стабилизации (рис. 1) при заданных функциональных связях $\mathbf{u}=\mathbf{F}_{\mathbf{u}}(\mathbf{k},\mathbf{x})$ и $\mathbf{v}=\mathbf{F}_{\mathbf{v}}(\mathbf{k},\mathbf{x})$ координация формируется вектором параметров $k_{\text{ц}}=(k_y,\ k_k)$, а исполнительное управление определяется вектором параметров $k_{\text{ис}}=(k_{\partial г},k_{\partial лу})$.

Данный вариант с параметрической настройкой исследован в работах [2, 8, 9]. При показателях общего вида в линейном варианте математической модели наведения-стабилизации и, тем более, при нелинейной модели данной двухуровневой задачи возникает проблема решения задачи синтеза в форме получения ИРИДИШ на основе системы функциональных уравнений Гамильтона-Келли [1].

Определенное приближение в методах получения ИРИДИШ, которое позволяет решить задачу в общем случае описания (5)–(8), основывается на стратегиях в виде приближенного программно-корректируемого зако-на управления (ПКЗУ) и его параметризации на программном такте ПКЗУ [8,9].

В другом варианте, на основе замечания 4 структуры **u, v** на уровнях наведения и стабилизации являются известными функциональными связями с вектором параметров пространства состояний и управляющими параметрами на каждом из уровней.

$$u_1=u_1\left(\mathbf{k},\,\mathbf{x},\,t\right);\ u_2=u_2\left(\mathbf{k},\,\mathbf{x},\,t\right);$$

$$v_1=v_1\left(\mathbf{k},\,\mathbf{u},\mathbf{x},\,t\right);\ v_2=v_2\left(\mathbf{k},\,\mathbf{u},\mathbf{x},\,t\right);\ v_3=v_3\left(\mathbf{k},\,\mathbf{u},\mathbf{x},\,t\right);\ \text{где}\ \mathbf{k}=\left(\mathbf{k}_{\text{Ц}},\mathbf{k}_{\text{ИС}}\right).$$

При этом оптимальные равновесные показатели будут являться функциями от управляющих параметров: $J_{Цl} = J_{Цl}\left(\mathbf{k}_{Ц}, \mathbf{k}_{ИС}\right),\ l = 1,2; J_{ИСi} = J_{ИСi}\left(\mathbf{k}_{Ц}, \mathbf{k}_{ИС}\right),\ i = \overline{1,3}.$

В данном варианте задача сводится к параметрической оптимизации в форме иерархического уравновешивания с поуровневой балансировкой, а в соответствии с Замечанием 3 и с обеспечением Парето-оптимального решения.

4 Алгоритмическое обобщение задачи получения оптимального управления двухуровневой системой наведения-стабилизации на основе адаптации оптимальных параметров системы стабилизации от перегрузок ЛА на уровне наведения

В работах [8, 9] приведено решение задачи получения управления двухуровневой системой наведения-стабилизации ЛА. В рамках этой задачи на втором и третьем шаге ИРИДИШ необходимо решать систему уравнений Гамильтона-Келли [1]. Решение системы уравнений Гамильтона– Келли связано со значительными аналитическими и вычислительными сложностями. Для того чтобы решать задачу оптимизации в двухуровневой многоканальной системе наведения–стабилизации в данном обобщении используются следующие возможности:

- Из описания модели замкнутой двухуровневой многоканальной системы в соответствии с Замечанием 4 на обоих уровнях иерархии выявляются функциональные связи с параметрами на каждом из уровней $\mathbf{u} = \mathbf{F}_{\mathbf{u}}(\mathbf{k}, \mathbf{x})$ и $\mathbf{v} = \mathbf{F}_{\mathbf{v}}(\mathbf{k}, \mathbf{x})$, где $\mathbf{k} = \left(\mathbf{k}_{Ц}, \mathbf{k}_{ИС}\right)$.
- Исходя из предыдущего тезиса, можно напрямую, не решая системы уравнений Гамильтона–Келли с це-лью получения управлений на каждом из уровней системы, осуществить переход к параметрической оп-тимизации вектора **k** на иерархических уровнях на основе стратегии Штакельберга или её равновесно-арбитражного обобщения на уровнях.
- Для упрощения процедуры получения оптимальных управляющих параметров *k* на уровне стабилизации формируется база данных, описывающая адаптивную зависимость оптимизированных на основе равновесно-арбитражной схемы управляющих параметров системы стабилизации от координаций уровня наведения.

Полученные из описания модели зависимости позволяют уйти от решения уравнения Гамильтона на втором и третьем этапах получения ИРИДИШ, что значительно упрощает задачу получения обобщенных иерархических равновесий при рассмотрении многоуровневых и многоканальных систем. Данные управления не являются оптимальными, но благодаря параметрической настройке осуществляется их оптимизация.

Таким образом, можно упростить алгоритм оптимизации двухуровневой системы управления. В ходе параметрической оптимизации параметры на уровне стабилизации получаются путем выбора из базы данных, полученной в результате решения задачи оптимизации системы стабилизации на основе равновесно-арбитражного алгоритма [7].

В рассматриваемой прикладной задаче наведения-стабилизации противокорабельной ракеты [6] каналы системы стабилизации при наличии перекрестных связей (рис. 5) необходимо бескоалиционно сбалансировать по J_i $(i = 1, 2, 3)$ устойчивости, качеству, точности и быстродействию в каждом канале, а затем результат спроектировать в точку Парето-границы множества значений отображения $J_{ИС}\left(\mathbf{k}\right)$, наиболее близко к сбалансированной точке уравновешивания $J^r = \left(J_1^r, J_2^r, J_3^r\right)$, где r — индекс равновесия.

Таким образом, на уровне системы стабилизации осуществляется оптимизация управления ММС. За основу метода оптимизации берется метод получения обобщенного компромисса на основе последовательного применения бескоалиционного и кооперативного «взаимодействия» каналов ССт [7].

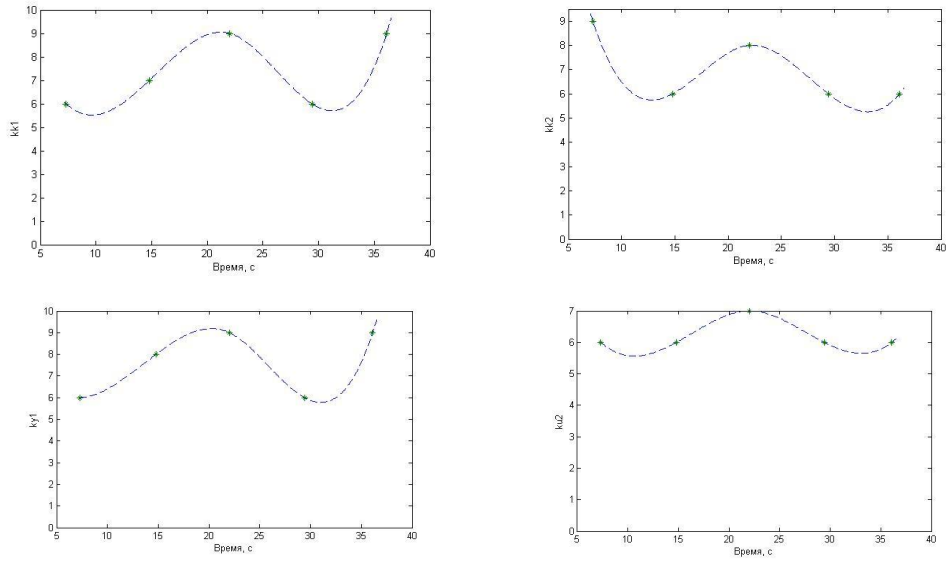


Рисунок 5 - Оптимальные значения параметров уровня наведения в зависимости от моментов времени

Формируется следующая трехэтапная алгоритмическая структура обобщенного СТЭК в задаче оптимизации многоканальной системы наведения–стабилизации с перекрёстными связями с обеспечением балансировки и предельной эффективности:

Этап 1. Получение параметров системы стабилизации в каждом канале ССт (начальные приближения для равновесно-арбитражной оптимизации каналов ССт);

Этап 2. Нахождение балансировочного параметрического решения на основе равновесия по Нэшу;

Этап 3. Парето-оптимизация параметрического решения ССт на основе арбитражной схемы Нэша.

Результатом исследования системы стабилизации на опорной траектории будет получение оптимальных зависимостей параметров ССт в зависимости от перегрузок в продольном и боковом канале.

Систему стабилизации считаем уравновешенной по возмущениям. Поэтому в ходе оптимизации управления с учетом межуровневых координаций на основании функции зависимости управляющих параметров на уровне стабилизации от величины перегрузки в каждом из каналов значения $k_{дг}$,$k_{длу}$ будут выбираться на основании зависимостей, полученных на в результате исследования системы стабилизации и получения оптимальных параметров при отработке внешних возмущений и внешних управляющих воздействий.

5 Исследование структуры оптимальной взаимосвязи высокоманевренной траектории противокорабельной ракеты с динамическими свойствами перекрестных каналов наведения и оптимальной трехканальной ССт

Оптимизацию двухуровневой системы будем проводить по параметрам в двух каналах системы наведения с фиксированными параметрами в каналах системы стабилизации, принимая в рассмотрении ситуацию, когда система стабилизации сбалансирована по наведению и её параметры выбираются из уже полученных в результате оптимизации системы стабилизации.

Исследование двухуровневой системы «наведение-стабилизация» осуществляется на всем протяжении опорной траектории с учетом оптимальных параметров ССт, сбалансирован-

ной по наведению. Опорная траектория разбивается на подинтервалы, на каждом из которых решается система дифференциальных уравнений и осуществляется параметрическая оптимизация на уровне наведения с учетом оптимальных параметров на уровне стабилизации. В результате получены функции изменения оптимальных параметров системы наведения при движении по опорной траектории.

Заключение

Сформирована двухуровневая математическая модель иерархической системы наведения–стабилизации ЛА с учетом перекрестных связей на уровнях.

Разработан метод многокритериальной оптимизации иерархической системы наведения–стабилизации на основе координируемых компромиссов с учетом связей оптимальных параметров системы стабилизации с перегрузкой — координацией верхнего уровня в процессе двухуровневой оптимизации.

Разработана методика оценки влияния траекторных параметров на динамические свойства перекрестных связей трехканальной ССт и двухканальной системы наведения ЛА.

Список литературы

[1] Воронов Е.М., Карпунин А.А., Серов В.А. Иерархическое равновесие в многоуровневых системах управ-ления // Вестник РУДН. Инженерные исследования. —2008.—№4.— С. 18-29.

[2] Воронов Е.М., Карпунин А.А., Серов В.А. Алгоритмы иерархической оптимизации в двухуровневой мно-гоканальной задаче «управления-регулирования» // Вестник РУДН. Инженерные исследования. —2009. — №3. — С. 1-18.

[3] Воронов Е.М. Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных компромиссов. – М.: Изд-во МГТУ, 2001. – 576 с.

[4] Вайсборд Э.М., Жуковский В.И. Введение в дифференциальные игры нескольких лиц и их приложения. – М.: Советское радио, 1980. – 304 с., ил.

[5] Воронов Е.М., Ефремов В.А., Сычев С.И., Любавский К.К., Тихонов М. Многокритериальная оптимизация сложной трехканальной системы стабилизации летательного аппарата в форме равновесно-арбитражного компромисса // Труды XV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» - Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. С 208-217.

[6] Лебедев А.А. Карабанов В.А. Динамика систем управления беспилотными летательными аппаратами.— М.: Машиностроение, 1965.— 528 с.

[7] Аксенов А. С., Воронов Е. М., Любавский К. К., Сычев С. И. Многокритериальная параметрическая оптимизация трехканальной системы стабилизации летательного аппарата с перекрестными связями // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. — 2014. — № 3. — С. 16–36.

[8] Ванин А. В., Воронов Е. М., Карпунин А. А. Оптимальное управление в двухуровневой иерархической многоканальной системе «стабилизация–наведение» // Проблемы управления в сложных системах: Труды XV Международной конференции. — Самара : Изд-во Самарского научного центра РАН. — 2013. — С. 217–223.

[9] Ванин А. В., Воронов Е. М., Карпунин А. А. Оптимизация управления в двухуровневой иерархической системе стабилизации-наведения летательного аппарата // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. — 2012. — № 11. — С. 19–42.

АВТОНОМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ ДЛЯ МАНЕВРИРОВАНИЯ В СТЕСНЁННЫХ УСЛОВИЯХ

И.А. Васильев, Д.А. Вохминцев

Центральный НИИ Робототехники и технической кибернетики
194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21, Россия
vas@rtc.ru
тел: +7 (812) 552-15-08, факс: +7 (812) 550-81-19

Ключевые слова: *подводный аппарат, автономное управление, маневрирование, робот*

Abstract
This article describes two mathematical models. The first model describes the behavior of a simple sea-based object, and the second one describes the modeling techniques cramped conditions ("the body in the bath"). The last section contains three methods for control of such object.

Введение

В последнее время увеличивается количество подводных работ. Многие работы связаны с проведением различного рода инспекционных и разведывательных операций в ограниченных и стеснённых условиях. Это могут быть работы вблизи дна, морских горных условий, внутри подводных пещер и вблизи и внутри искусственных сооружений, в том числе повреждённых затонувших судов.

В условиях тесноты возникает проблема управления подводным аппаратом с учётом безопасности. Поэтому практичнее использовать не классическую кинематику «подводной лодки» с единственным движителем – маршевым винтом и вертикальными и горизонтальными пассивными рулями, а аппарат без пассивных рулей, но с подруливающими устройствами.

В алгоритмах безопасности и маневрирования определяющими являются динамические параметры объекта управления. Поэтому вначале требуется рассмотреть математическую модель объекта и по этой модели определить требующиеся значения. Для определения этих значений нет необходимости создавать максимально точную модель, вполне хватает и приближённой. Тем более, что в отличие от точной модели, которая может состоять из системы уравнений, имеющих лишь численное решение, приближённая модель даёт возможность аналитического анализа решений.

1 Упрощённая математическая модель подводного беспилотного ОМБ

Рассмотрим модель подводного ОМБ, применяемого для проведения исследований и обзорной съемки, типа аппарата Института проблем морских технологий ДВО РАН.

Этот подводный аппарат имеет специфику – рулей у него нет, а есть лишь подруливающие устройства.

Для упрощения пусть геометрически совпадают: центр масс (ЦМ), центр величины (т.е. центр плавучести – ЦП), геометрический центр (ГЦ) и пусть ось направления силы тяги основного движителя проходит вдоль продольной оси симметрии корпуса.

Рассмотрим все силы, прилагаемые к аппарату: силы тяги, силы инерции, силы сопротивления, архимедова сила и сила тяжести. Рассмотрим рисунок 1.

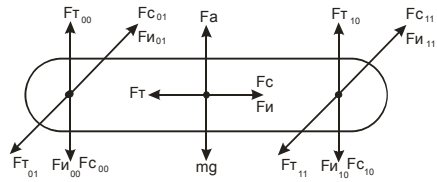


Рисунок 1 – Силы, приложенные к аппарату

На этом рисунке архимедова сила обозначена Fa, сила тяжести mg, силы тяги Fт, силы сопротивления Fc, силы инерции Fи. Индексы 00 – вертикальные силы носового движителя, 01 – горизонтальные силы носовые, 10 – вертикальные кормовые и 11 – горизонтальные кормовые.

Методами теоретической механики находим суммарную силу и суммарный момент сил, действующих на аппарат – см. рисунок 2 (чтобы не загромождать рисунок, не показана сила тяги основного – маршевого – движителя).

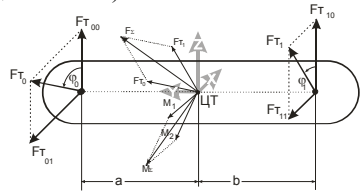


Рисунок 2 – Схема суммирования сил и моментов

Следовательно, можно расписать сумму сил и моментов в векторном виде:

$\vec{F}_{\Sigma} = \vec{F}_{\mathrm{T00}} + \vec{F}_{\mathrm{T01}} + \vec{F}_{\mathrm{T10}} + \vec{F}_{\mathrm{T11}} + \vec{F}_{\mathrm{T}} + \vec{F}_{\mathrm{A}}$,

$\vec{M}_{\Sigma} = \vec{a} \times \vec{F}_{\mathrm{T00}} + \vec{a} \times \vec{F}_{\mathrm{T01}} + \vec{b} \times \vec{F}_{\mathrm{T10}} + \vec{b} \times \vec{F}_{\mathrm{T11}}$

Отсюда получаем проекции сил и моментов:

$F_{\Sigma x} = F_{T01} + F_{T11}$

$F_{\Sigma y} = F_T$

$F_{\Sigma z} = F_{T00} + F_{T10}$

$M_{\Sigma x} = a\, F_{T00} - b\, F_{T01}$

$M_{\Sigma y} = 0$

$M_{\Sigma z} = a\, F_{T01} - b\, F_{T11}$

2 Основное уравнение МПО

Найденные силы и моменты требуются для подстановки в уравнения гидродинамики. Уравнение сил гидродинамики тела в среде хорошо известно:

(1) $A\, \dot{y} = U - C\, y^2, \quad y(t0) = y0,$

где A – аналог инерционного коэффициента (масса и момент инерции);

y – аналог контролируемой величины (линейной и угловой скоростей);

U – управляющее воздействие (усилие и момент);

C – аналог коэффициента гидродинамического сопротивления (для поступательного и вращательного движений).

Будем в дальнейшем уравнение (1) называть Основным уравнением.

Основное уравнение (1) имеет аналитическое решение. Но так как аналитическое решение выражается через гиперболические и обратные гиперболические функции, которые имеют нетривиальные области определения и значений, пользоваться ими затруднительно. Тем бо-

лее, что аналитические решения возможны лишь при $U = const$. В математической модели удобнее использовать численные методы решения такого довольно простого и гладкого дифференциального уравнения.

3 Модель тела в узкой чаше

Модель тела в узкой чаше, наполненной водой требуется для отработки алгоритмов маневрирования в узостях. Рассмотрим общие принципы построения такой модели.

В данной задаче рассматривается ускоренное движение ОМБ в диаметральной плоскости, горизонтальная составляющая движения пренебрежимо мала. Соответственно, численное решение данной задачи возможно с помощью четырехмерной стеки, где три измерения соответствуют трехмерному объему, относительно которого производятся расчеты, а четвертое - временной переменной. При математическом моделировании подобных задач используется модель сплошной среды, для описания движения которой традиционно применяют два подхода: Эйлера и Лагранжа. Далее рассмотрим численные методы решения задач гидродинамики.

Методы, основанные на подходе Эйлера, используют стационарную, чаще всего регулярную сетку, сквозь которую движутся частицы (малые объемы) сплошной среды, а все физические характеристики определяются в узлах данной сетки, т.е. они не связаны с конкретными материальными частицами, а в каждый момент времени являются характеристиками разных частиц, находящихся в данный момент в данной точке пространства. Методы этого класса позволяют рассчитывать задачи с большими деформациями и чаще всего применяются для задач гидро- и газодинамики. Решения, полученные с их помощью, обладают высокой точностью, кроме того они хорошо изучены и имеют проработанное теоретическое обоснование. Сложность применения методов данного класса к решению задач со свободными границами является заранее неизвестное положение свободной границы и вытекающие отсюда проблемы с постановкой граничных условий.

Методы, основанные на Лагранжевом подходе, используют подвижную сетку, которая представляет собой дискретное представление материальной среды. Узлы такой сетки жестко связаны ребрами и вместе с ними образуют ее ячейки. В этом случае сетка двигается и деформируется вместе со сплошной средой, при этом связи узлов сохраняются. Физические характеристики, определяемые в узлах сетки, являются характеристиками соответствующих частиц материальной среды. В отличие от эйлеровых, данные методы позволяют легко отслеживать свободные границы и границы раздела, но также имеют и недостатки, наиболее значительный из которых - невозможность рассчитывать задачи с большими деформациями расчетной области, поскольку они приводят к значительным деформациям расчетной сетки вплоть до пересечений границ (ребер) ячеек, что, в свою очередь, влечет за собой аварийное завершение программы.

Одним из способов для расчета является произвольный метод Лагранжа-Эйлера (Arbitrary Lagrangian Eulerian или ALE). В данном методе используется сетка, которая может двигаться произвольно, т.е. она не остается фиксированной, как эйлерова сетка, но и не подчиняется законам движения лагранжевой сетки, как, например, в методе конечных элементов, откуда и слово "произвольный"(arbitrary) в названии метода.

Рассмотрим уравнения статики в ALE-форме, где скорость движения сетки $\boldsymbol{u_{m,j}}$ вычисляется на основе границ областей движения тела [2]. Закон сохранения массы имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(u_j - u_{m,j}\right)\frac{\partial \rho}{\partial x_i} = 0$$

Закон сохранения импульса:

$$u_i\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} - \left(u_j - u_{m,j}\right)\frac{\partial \rho}{\partial x_i}\right) = F_s + F_b$$

Стабилизирующая сила на теле:

$$F_s = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu \frac{\partial u_{m,j}}{\partial x_i}\right)$$

Полная сила, действующая на тело:

$$F_b = -\rho \frac{d_0^2 R}{dt^2}$$

Для учета деформации сетки, запишем уравнения турбулентности в ALE-форме:

$$k\frac{\partial \rho}{\partial t} + k\left(u_i - u_{m,j}\right)\frac{\partial \rho}{\partial x_j} = P_k - \beta' \rho k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]$$

$$\omega\frac{\partial \rho}{\partial t} + \omega\left(u_i - u_{m,j}\right)\frac{\partial \rho}{\partial x_j} = \alpha\frac{\omega}{k}P_k - \beta' \rho k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]$$

Уравнения Лапласа распространяют движение граничного слоя во внутреннюю область жидкости. Полученное решение, путем интегрирования по времени, позволяет определить скорость перемещения сетки $\boldsymbol{u_{m,j}}$. Уравнение перемещения сетки имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial x_i}\left(\Gamma \frac{\partial x_i'}{\partial x_i}\right) = 0$$

где $x_i' = x_i - x_i^0$

Г – функция расстояния до поверхности (стенки препятствия или ОМБ).

Система уравнений, описанная ниже, используется для иллюстрации связи уравнений движения тела с уравнениями движения жидкости в ALE-форме для моделирования движения тела с 6 степенями свободы (6-DOF simulation). Уравнения движения тела, основанные на переходе к системе координат, прикрепленной к координатам погруженного тела имеют следующий вид. Главное уравнение движения:

$$\sum F = m\,\dot{u_G}$$

$$\dot{u_G} = (\dot{u_0})_{xyz} + \dot{\omega} r_G + \omega r_G$$

$$\sum M_0 = \left(\dot{I}\omega + \dot{I}\alpha\right)_{xyz} + r_G m\,\dot{u}_G$$

Моменты инерции являются функциями времени и оцениваются на каждом новом шаге по времени, где

$$\dot{I}\omega + \dot{I}\alpha = \frac{d(I\omega)}{dt}$$

Это позволяет решать систему уравнений, определяя движение тела, где x, y, z - составляющие силы имеют вид:

$$\begin{cases} m\left[\dot{u} - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q}) = X_{CFD} + X_s + X_p\right] \\ m\left[\dot{v} - y_G(p^2 + r^2) + z_G(rq - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r}) = Y_{CFD} + Y_s + Y_p\right] \\ m\left[\dot{\omega} - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p}) = Z_{CFD} + Z_s + Z_p\right] \end{cases}$$

с векторами сил, полученных из стабильных и видимых сил.

Аналогично, моменты относительно осей x, y и z имеют вид:

$$\begin{cases} I_x\dot{p} - I_{xx}\dot{r} - I_{xy}\dot{q} - \dot{I}_x p - \dot{I}_{zz} r - \dot{I}_{xy} q + m(y_G\dot{\omega} - z_G\dot{v}) = K_{CFD} + K_s + K_p \\ I_y\dot{q} - I_{xy}\dot{p} - I_{yz}\dot{r} - \dot{I}_y q - \dot{I}_{xy} p - \dot{I}_{yz} r + m(z_G\dot{u} - x_G\dot{w}) = M_{CFD} + M_s + M_p \\ I_z\dot{r} - I_{yz}\dot{q} - I_{zx}\dot{p} - \dot{I}_z r - \dot{I}_{yz} q - \dot{I}_{zx} p + m(x_G\dot{v} - z_G\dot{u}) = N_{CFD} + N_s + N_p \end{cases}$$

Решение матричной системы приводит к оценкам ускорений, которые в свою очередь с известным временным шагом допускают вычисление скоростей.

4. Модель движения ОМБ

Рассмотрим перемещение на заданное расстояние. Начальные условия: аппарат покоится с выключенным приводом. Расстояние *s* задано.

Нетрудно понять, что для перемещения АНПА его требуется разогнать до некоторой скорости, а потом, соответственно, затормозить до останова. Для перемещения требуется выполнение следующих четырёх простых условий:

1) интеграл скорости по времени равным заданному перемещению s;
2) в начальный и конечный момент времени скорость и ускорение ОМБ должны быть равными нулю;
3) за весь период движения скорость изменения усилия привода не должна превышать максимальную;
4) в начальный и конечный момент времени усилие на приводе должно быть нулевым.

Других условий не налагается. Поэтому, в качестве закона изменения скорости можно выбрать любую функцию, лишь бы она удовлетворяла этим четырём условиям. Очевидно, что график функции скорости должен быть колоколообразным: разгон и торможение – см. рисунок 3. Для функции скорости предложено использовать полином четвёртого порядка от времени:

$$v(t) = \frac{b}{a^4}((t-a)(t+a))^2$$

В результате применения к этому уравнению условий1-4, а также подставления его в Основное уравнение получаем выражение для управляющего воздействия:

$$U(t) = \frac{b^2(-225 \cdot s^2 + 256 \cdot b^2 t^2) \cdot (51840000 \cdot A \cdot b \cdot s^4 t - c \cdot (225s^2 - 256 \cdot b^2 t^2)^3)}{2562890625 \cdot s^8}.$$

Следует обратить внимание: это выражение универсальное – в нём есть как гидродинамический коэффициент *c*, так и инерционный коэффициент *A*, а большие целочисленные коэффициенты являются лишь последствием применения полинома 4-й степени.

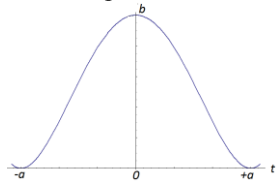


Рисунок 3 – График скорости

Рассмотрим разгон ОМБ до требующейся скорости. Для разгона требуется выполнение следующих пяти простых условий, сходных с условиями для перемещения:

1) при старте скорость и её производная должны быть нулевыми;
2) при окончании разгона скорость должна быть заданной, ускорение – равно нулю;
3) при старте усилие и его производная должны быть равны нулю;
4) при окончании разгона усилие должно соответствовать скорости;
5) производная усилия не должны превышать максимальное значение.

Первые два пункта можно обеспечить простым образом. Напишем выражение производной, удовлетворяющее первым двум пунктам:

$t^2(t-a)^2$.

Здесь видно, что эта формула при $t = 0$ и $t = a$ строго равна нулю. Проинтегрируем её:

$$\int t^2(t-a)^2 dt = \frac{a^2 t^3}{3} - \frac{a \cdot t^4}{2} + \frac{t^5}{5}$$

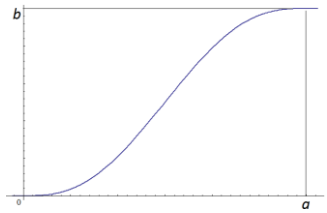


Рисунок 4 – Разгон

Далее подставляем эту функцию в Основное уравнение и получаем:

$$U(t) = \frac{30b(a^5A \cdot (a-t)^2t^2 + \frac{1}{30}b \cdot c \cdot t^6(10a^2 - 15a \cdot t + 6t^2)^2)}{a^{10}}$$

Рассмотрим вывод подобным образом формулы управления для останова с текущей скорости. В отличие от процессов разгона и перемещения, осуществляющихся с нулевых скоростей и усилий приводов, останов может производиться с любых скоростей и любых усилий на приводах.

Сформулируем требования к формулам останова:

1) в начальный момент времени скорость должна равняться текущей, а ускорение скорости – текущему ускорению;
2) в конечный момент времени скорость, ускорение, сила должны быть равны нулю;
3) производная силы на всём этапе торможения не должна превышать максимально допустимую.

Для производной рассмотрим уравнение второй степени:

$$\dot{v}(t) = aa \cdot t^2 + bb \cdot t + cc$$

Выполняя все условия и подставляя всё получающееся в Основное уравнение, получаем формулу управляющего воздействия для торможения:

$$U(t) = \frac{A\,(a-t)\,(-6\,b \cdot t + a(a - 3\,t)vs0)}{a^3} + \frac{c\,(a-t)^4(2\,b \cdot t + a\,(b + t \cdot vs0))^2}{a^6}$$

Заключение

Данный подход к управлению малыми перемещениями в узких пространствах показал свои преимущества. При этом оказалось удобным ввести более универсальный способ задания Унифицированной функции, которая изменяет скорость ОМБ с текущей до заданной. Так как эта функция своими параметрами имеет текущие значения, а на выходе выдаёт текущее управление для обеспечения требующейся скорости, то через неё возможно реализовать регулятор. Более того, через такую функцию возможно реализовать и регулятор для малых перемещений ОМБ (от 10 мм до 2,5 м).

Список литературы

[1] Макарчук Р.С. Математическое моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости со свободными границами методом сглаженных частиц: автореф. Дис. Канд. Физ.-мат.наук: 01.02.05 / КГУ. – Кемерово, 2012 - 16с.

[2] Computational fluid dynamic re-mesh method to generating hydrodynamic models for maneuvering simulation of two submerged bodies in relative motion / Zhi Quan Leong, Dev Ranmuthugala, Irene Penesis, Hung Duc Nguyen // Journal of Computer Science and Cybernetics. – 2011. – № 4.

[3] И.И. Смирнов. Курс высшей математики в 5 томах. / Москва- 1951

УПРАВЛЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВЫМ ПРОЦЕССОМ ГОРЕНИЯ В РАКЕТЕ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

О.О. Власова

Воронежский государственный университет
394006, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1
VlasovaMath@gmail.com
тел: +7 (473) 220-87-15, факс: +7 (473) 220-87-55

Ключевые слова: *реактивный двигатель на твердом топливе, автоматическое регулирование, аппроксимация, моделирование, конечномерный регулятор, передаточная функция*

Abstract

Control of burning in a solid-propellant rocket is considered. The transfer function of control plant is received by the mathematical model. The plant is unstable and not fully controlled. The finite-dimensional regulator providing stability and defined quality parameters of transition process is constructed by means of Pade's approximations and a method of synthesis of modal regulators.

Введение

Ракеты с РДТТ (реактивный двигатель на твердом топливе) имеют различные типы и размеры [1,2]. Ракеты на твердом топливе применяются в ракетной артиллерии, в боевых и космических ракетах и, в отдельных случаях, в качестве ускорителей (в космонавтике) [1,3]. По сравнению с ракетами на жидком топливе, ракеты с РДТТ обычно более просты в изготовлении и применении , могут быть герметично упакованы для длительного хранения (5-10лет), требуют небольшого обслуживания. С другой стороны, ракеты на твердом топливе не могут быть полностью проверены прежде, чем будут использованы, и, кроме того, РДТТ сила тяги не может быть произвольно изменена.

Двигатели ракет на твердом топливе иногда имеют неустойчивый процесс горения, что может вызвать отказ (разрушения) двигателя из-за слишком большого давления, увеличенной теплоотдачи или из-за комбинации этих двух причин. Неустойчивое горение особенно опасно для больших ракет [4,5]. Основными средствами, препятствующими неустойчивому горению в РДТТ, являются либо помещенный в камеру сгорания прут из не горящего материала, либо просверленные через небольшой интервал радиальные отверстия [2]. Процессы не устанавливающегося и неустойчивого горения, наблюдающиеся в ракетах с РДТТ, интенсивно исследовались как теоретически, так и экспериментально [4,1,6,7,8,9]. Модель горения, несмотря на многочисленные отличия в различных аспектах анализа, рассматривалась как система, имеющая три фазы: твердую, твердо-газовую и газовую. Твердо-газовая фаза в ракетах, вообще говоря, незначительна и поэтому исследуются только две основные фазы: тверда и газовая. Большинство известных моделей рассматривают твердую фазу как однородную область. Основные отличия наблюдаются при описании газовой фазы. Модель, которая используется, основана на работах [2,7]. Модель, полученная в [2,7], предполагает, что время, характеризующее процессы горения в РДТТ, мало по сравнению со временем, характеризующим теплопроводность в твердой фазе. Процесс горения в РДТТ, мало по сравнению со временем, характеризующим теплопроводность в твердой фазе. Процесс горения характеризуется инертной теплопроводностью, поверхностью газификации,

подчиняющиеся закону Аррениуса и горением в газовой фазе с высокой безразмерной энергией активизации. Свойства твердой фазы предполагаются постоянными.

Цель данного исследования состоит в том, чтобы обеспечить стабилизацию стационарного режима горения в ракете с РДТТ, используя граничное управление, приложенное к не горящему концу (см. рис. 1).Управление осуществляется за счет нагревания /охлаждения, не горящего конца ракеты [2]. Такой способ управления подробно рассматривался в [11] для ракет с жидкостным реактивным двигателем и нашел широкое применение для ракет с РДТТ [2] несмотря на то, что распределенное нагревание/охлаждение представило бы больше возможностей для управления в случае, когда удельная тепло проводимость РДТТ мала.

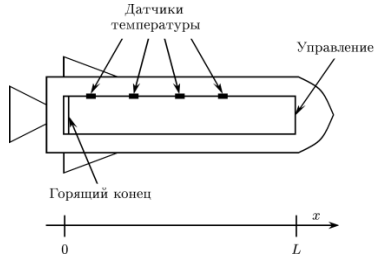


Рисунок 1 – Стабилизация стационарного режима горения в ракете с РДТТ

1. Математическая модель

Рассмотрим задачу нахождения математической модели распространения тепла в твердом ракетном топливе. Для этого воспользуемся результатами, полученными в [2,7]. Предположим, что время, характеризующее распространение тепла в твердой фазе, значительно меньше времени переноса тепла в газовой фазе и времени химических реакций. Допустим далее, что влияние квазистационарного режима в газовой фазе газ - твердое тело. Кроме того, имеют место следующие принципиальные предположения: рассматривается гомогенное ракетное топливо с постоянными свойствами, число Льюиса равно единице, горение продолжается непрерывно без затухания, отсутствие реакции в твердой фазе, испарение подчиняется закону Аррениуса и горение не вызывает эрозии.

При данных предположениях уравнение управляемого переноса тепла в твердой фазе имеет вид

(1.1), $pC\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = m(t)C\frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + K\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial t^2}$,

где T(x,t)- температура твердой фазы, определенная для пространственной переменной $X \in [0, X_{max}(t)]$ и времени $t \geq 0$; ρ, C и K - соответственно плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность твердой фазы; m(t)- поток массы к горящей поверхности в момент времени t. Следует заметить, что длина заряда твердого топлива $x_{max}(t)$ есть функция времени и непрерывно уменьшается вследствие сгорания топлива, однажды воспламененного РДТТ. Поток массы определяется формулой $n(t) = e^{-\left[\frac{E}{RT(0,t)}\right]}$, где R- газовая постоянная; E- активационная энергия испарения и разложения на левом конце $x = 0$.

Уравнение (1.1) удовлетворяет граничному условию

(1.2) $T(x_{max}(t), t) = T_0(t)$,

где $T_0(t)$ - температура не горящего конца. Другое условие на горящем конце (x=0) получается из теплового баланса на горящей поверхности. Перенос тепла внутри твердой фазы определяется уравнением

(1.3) $K\frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = \left(\widetilde{K}\frac{\partial T(0,t)}{\partial x}\right)_g + m(t)(CT(0,t) - C_1T(0,t) - L).$

Здесь C_1- удельная теплота газа; L - теплота, поглощаемая при испарении и разложении индекс g соответствует свойствам газа. Кроме того, согласно уравнениям сохранения энергии и вещества в газовой фазе, получаем соотношение для температурного градиента в произвольной точке газовой фазы

(1.4) $\frac{\widetilde{K}}{C_1 m(t)}\frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = (T_1(t) - T(x,t) - \frac{Q}{C_1}\varepsilon),$

где $T_1(t)$ - температура пламени; Q - теплота горения; ε- массовая доля расхода участвующего в реакции топлива. Подставляя уравнение (1.4) при x=0 в (1.3), получаем граничное условие для x=0

(1.5) $\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}|x_{=0} = \frac{m(t)}{K}(C_1T_1(t) - CT(0,t) + L - \varepsilon Q),$

Уравнение (1.1) с граничными условиями (1.2) и (1.5) имеет стационарный режим

$$\overline{T}(x) = \overline{T}(0) - \frac{\overline{T}(0) - \overline{T_0}}{1 - e^{\left(\frac{\overline{m}C}{K}\right)x_{max}}}\left[1 - e^{-\left(\frac{\overline{m}C}{K}\right)x}\right],$$

где $\overline{m} = m(\overline{T}(0))$. Вводя в рассмотрение соответственно безразмерные пространственную переменную, время и температура отклонение $x' = (\overline{m}C/K)x, t' = (\overline{m}^2C/\rho K)t, y(x',t') = [T(x',t') - \overline{T}(x')]/\overline{T}(0)$, и опуская верхний индекс ′ для краткости, получаем безразмерную систему

$$\frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} + f_1\big(y(0,t)\big)\frac{\partial y(x,t)}{\partial x} + B_1e^{-x}\big[1 - f_1\big(y(0,t)\big)\big],$$

(1.6) $\frac{\partial y(x,t)}{\partial t}|_{x=0} = -f_2\big(y(0,t)\big),$

$$y(x,t)|_{x=L} = u(t).$$

Здесь используют следующие обозначения:

$$f_1(y) = e^{B_2\left[\frac{y}{1+y}\right]},\ f_2(y) = B_1[f_1(y) - 1] + f_1(y)y,$$

$$L = \left(\frac{\overline{m}C}{K}\right)x_{max}, B_1 = \frac{\left[1 - \frac{T_0}{\overline{T}(0)}\right]}{1 - e^{-L}}, B_2 = \frac{E}{R\overline{T}(0)},$$

$u(t)$- управляющее воздействие. Заметим, что в силу неравенства $y(0, t) > -1$ (равенство $y(0, t) = -1$ соответствует абсолютному нулю), функции f_1 и f_2 полностью определены. Несмотря на то, что B_1 может увеличиваться, когда L медленно меняется, фактически B_1 остается постоянной [2]. Линеаризуя систему дифференциальных уравнений (1.6) в окрестности положения равновесия, получаем систему

$$\frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} - Ae^{-x}y(0,t),$$

(1.7)
$$\frac{\partial y(x,t)}{\partial t}|x_{=0} = -qy(0,t),$$
$$y(x,t)|x_{=L} = u(t),$$

где $A=B_1B_2$, $q=1+A$. Пусть, кроме того, задано начальное распределение температуры

(1.8) $y(x, 0)=f(x)$.

Замечание 1. Как показано в [4,1,2,7], одной из проблем, с которыми сталкиваются в практике применения РДТТ, является самопроизвольное возникновение колебаний давления в камере, которые, как правило, имеют характерную частоту и могут нарастать до больших амплитуд, создавая опасность механического разрушения двигателя. Возникновение колебаний связано с такими факторами, как изменение геометрии камеры в процессе выгорания топлива и изменение давления и поля течения в ней. Вследствие этих факторов система выходит за границы устойчивости, где возмущения в газе усиливаются в результате динамического взаимодействия с процессом горения, а осредненное течение обладает достаточной энергией для поддержания этого возмущения и даже, что часто бывает, для его усиления. Из-за многократных отражений от стенок полости камеры сгорания возмущения являются периодическими и соответствуют модам собственных колебаний в камере сгорания. На рис. 2 представлена зависимость (единственного) положительного собственного значения λ_+ краевой задачи (1.6), (1.7) от длинны L ракеты для практически важного случая A = 1.

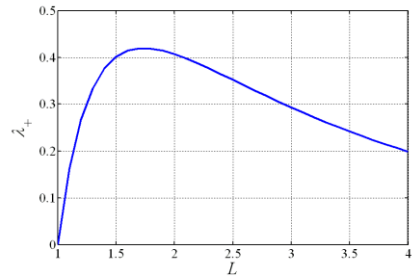


Рисунок 2 – Зависимость положительного собственного значения λ_+ от длины L ракеты

Для нахождения передаточной функции объекта управления при $f(x)=0$ применим к полученной системе (1.7), (1.8) преобразование Лапласа по переменной t и по пространственной переменной x. Тогда, передаточная функция объекта определяется формулой

$$W(p) = \frac{1}{\widetilde{W}(L,p)},$$

(1.9)
$$\widetilde{W}(x,p) = \frac{e^{-x/2}}{p\gamma(p)}\left\{\left[(p+A)\gamma(p)ch\frac{x\gamma(p)}{2} - ((1+2A)p+A)\,sh\frac{x\gamma(p)}{2}\right] - A\gamma(p)\,e^{-\frac{x}{2}}\right\}.$$

$$\gamma(p) = \sqrt{4p+1.}$$

2. Синтез конечномерного регулятора

Для дальнейших рассуждений выберем практически важный случай A=1 и L=2.При этих значениях имеем λ_+=0,406849133. Предполагается, что измерение температуры двигателя ракеты производится с помощью одного датчика температуры в точке x=0. Кроме того, положим $f(x)$=0. Воспользуемся методом синтеза конечномерных регуляторов, предложенным в [12]. Аппроксимируем передаточную функцию объекта (1.9) дробью Паде

(2.1) $W_{[2,3]}(p) = \frac{B(p)}{A(p)}$,

где

$$B(p) = 33{,}150676p^2 - 210{,}621458p,$$

$$A(p) = 3(-7{,}0399842p^3 - 20{,}49849514p^2 + 9{,}5015049p).$$

Плюсы передаточной функции (2.1) определяются равенствами $p_1 = -3{,}318436763$, $p_2 = 0$, $p_3 = 0{,}4067121684$.

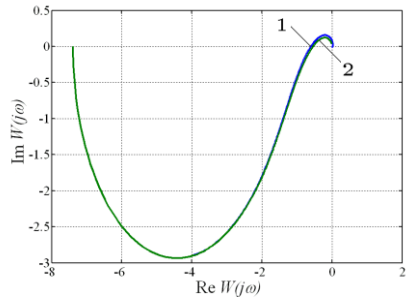


Рисунок 3 – Амплитудно-фазовые частотные характеристики $W(j\omega)$ (кривая 1) и $W_{[2,3]}(j\omega)$ (кривая 2)

Передаточную функцию конечномерного регулятора будем искать в виде

$$V(p) = \frac{S(p)}{R(p)},$$

где известные многочлены $S(p)$ и $R(p)$ удовлетворяет следующему полиномиальному уравнению:

(2.2) $B(p) = (p)S(p) + A(p)R(p) = D(p)$.

Здесь $D(p)\epsilon R_n$ - произвольный характеристический многочлен замкнутой системы, степень n которого удовлетворяет условию $n \geq 5$. Пусть n=5 и

$$D(p) = (p + 1.9)(p + 2)(p + 9)(p + 10)(p + 15).$$

Тогда решением полиномиального уравнения является пара многочленов

$$S(p) = 30{,}5884p^2 + 121{,}1865p + 73{,}0695;$$

$$R(p) = 0{,}1420p^3 + 4{,}9699p^2 + 106{,}3755p.$$

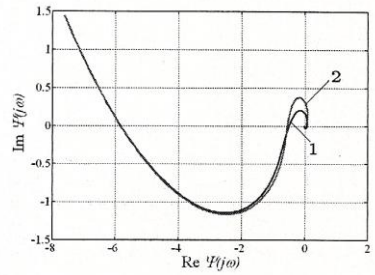


Рисунок 4 – Амплитудно-фазовые частотные $V(j\omega)W(j\omega)$ (кривая 1) и $V(j\omega)W_{[2,3]}(j\omega)$ (кривая 2)

Нетрудно проверить, что замкнутая система управления с передаточной функцией

$$\phi(p) = \frac{V(p)W(p)}{1 + V(p)W(p)}$$

является устойчивой.

Переходные характеристики замкнутых систем управления, соответствующие исходному объекту (1.9) (кривая 1) и аппроксимации Паде (2.1) (кривая 2) изображены на рис. 5.

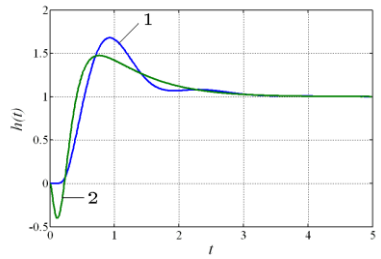


Рисунок 5 – Переходные характеристики замкнутых систем управления

Заключение

Таким образом, результаты моделирования показывают хорошие качества конечномерного регулятора, синтезированного в ракете с реактивным двигателем на твердом топливе.

Список литературы

[1] Тимнат И. Ракетные двигатели на химическом топливе. – М.: Мир, 1990-294 с.
[2] Bošković D.M., Krstič M. Stabilization of a solid propellant rocket instability by state feedback // Int. J. Robust Nonlinear Control.- Vol. 13. - P. 483-495.
[3] Sutton G.P., Biblarz O. Rocket propulsion elements. - New York: Wiley, 2001.-768 p.
[4] Натанзон М.С. Неустойчивость горения. – М.: Машиностроение , 1986-248 с.
[5] Hill P.G., Peterson C. Mechanics and thermodynamics of propulsion. - Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1992-563 p.
[6] Culick F.E.C. A review of calculations for unsteady burning of a solid propellant // AIAA Journal. – 1968. – Vol. 6, No. 12. – P. 2241-2255.
[7] Denison M.R., Baum E.A. simplified model of unstable burning in solid propellants // ARS Journal. – 1961. - Vol. 31, No.8.-P.1112-1122
[8] Williams F.A. Combustion theory. - New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1985-195 p.
[9] Williams F.A. Quasi-steady gas-phase flame theory in unsteady burning of a homogeneous solid propellant // AIAA Journal. – 1973. – Vol. 11, No. 9.- P. 1328-1330.
[10] Bošković D.M., Krstič M. Stabilization of a solid propellant rocket instability by state feedback // Int. J.
[11] Sutton G.P., Biblarz O. Rocket propulsion elements. - New York: Wiley, 2001.-768 p.
[12] Дылевский А.В. Синтез конечномерных регуляторов для бесконечномерных объектов : диссертация ... доктора технических наук : 05.13.01 / Дылевский Александр Вячеславович; [Место защиты: Ин-т систем. анализа РАН].- Воронеж, 2009.- 304 с.: ил. РГБ ОД, 71 09-5/423

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОГО НАКОПЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ PLC-R КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ ЛОКОМОТИВОМ

А.В. Волынская[1], И.В. Сапожников[2]

[1]Уральский государственный университет путей сообщения
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, Россия
Anna-Volinskaya@mail.ru
тел. +7(922) 205-95-92

[2]Уральский технический институт связи и информатики
620109, Екатеринбург, ул. Репина, 15, Россия

Ключевые слова: *телеуправление, сложные сигналы, импульсные помехи, прерывания, накопление сигналов, корреляция, адаптация, компьютерное моделирование*

Abstract

Results of computer modeling of algorithm of adaptive accumulation of signals in channels of telecontrol with powerful pulse hindrances and interruptions are given. It is shown that simple accumulation in these conditions isn't effective. Adaptive accumulation at which to "good" realization of a signal (the comer against a weak hindrance) appropriates big weight, and "bad" (the comer against a powerful hindrance) – small or zero weight can provide high reliability of detection of signals. Such algorithm provides the steady growth of the relation a signal/hindrance at accumulation. The weight coefficient for accumulation is calculated on correlation coefficient between basic and the accumulated signals.

Введение

Целью разработки каналов передачи информации по проводам контактной подвески (PLC-R – Power Line Communication-Railway) является повышение надежности или увеличение дальности передачи ответственных команд управления.

Канал передачи информации по контактному проводу характерен мощными импульсными помехами и прерываниями [1]. В этих условиях целесообразно применить многократное повторение сигнала управления на передающей стороне и его синхронное накопление на приемной [2]. При накоплении увеличивается отношение сигнал /помеха, т.к. сигнал растет пропорционально числу накоплений, а помеха, поскольку она случайна, – не больше чем корню квадратному из числа накоплений; но только при условии, что помеха – стационарная. Однако, если помеха нестационарная, и при очередном накоплении возможно ее увеличение, либо в случае пропадания сигнала из-за отрыва пантографа принятая реализация снизит отношение сигнал/помеха, полученное ранее, что может только ухудшить результат. Поэтому накопление должно быть адаптивным к мощным помехам и прерываниям сигнала: «хорошие» реализации сигнала, пришедшие на фоне слабой помехи, следует суммировать с большим весом, а реализации, пришедшие на фоне сильной помехи, – с малым и даже нулевым весом [3].

1 Теоретические предпосылки

В радиосвязи известен способ приема на разнесенные антенны [4]. Он применяется, как правило, на коротких волнах для борьбы с замираниями сигнала в точке приема. При этом, если в одной антенне сигнал уменьшился, то хотя бы в одной из остальных он увеличится. Далее сигналы складывают, чтобы отношение сигнал/помеха в суммарном сигнале увеличи-

лось. При этом наибольший эффект дает весовое суммирование с весами определяемыми по следующей формуле

$$(1) \quad k_i = C\frac{\sqrt{\overline{s_i^2(t)}}}{\sigma_{ni}^2},$$

где $\overline{s_i^2(t)}$ – мощность сигнала при *i*-ом накоплении; σ_{ni}^2 – мощность помехи при *i*-ом накоплении; *C* – постоянная.

Как видно из этого выражения, больший вес должен приписываться тем сообщениям, которые имеют большее отношение сигнал/помеха и наоборот.

В выражении (1) примем постоянную *C* равной

$$(2) \quad C = C_0\sqrt{\overline{s_i^2(t)}}\,.$$

Тогда получим, что

$$(3) \quad k_i = C_0\sqrt{\overline{s_i^2(t)}}\,\frac{\sqrt{\overline{s_i^2(t)}}}{\sigma_{ni}^2} = C_0\,\frac{\overline{s_i^2(t)}}{\sigma_{ni}^2} = C_0\left(\text{с}/\text{п}\right)_p.$$

Т.е. весовой коэффициент для каждой реализации сигнала пропорционален отношению сигнал/помеха по мощности.

В канале телеуправления при многократном повторении сигнала имеет место разнесение во времени, а не в пространстве, но это не должно снижать эффективность алгоритма. Однако напрямую формулой (3) воспользоваться не удается, т.к. по отдельности мощности сигнала и помехи неизвестны. Если сделать допущение о некоррелированности сигнала и помехи, то весовой коэффициент можно определить по пиковому значению коэффициента корреляции между опорным, записанным в память приемника, и накопленным сигналами. Установим связь коэффициента корреляции с отношением сигнал/помеха, полагая, что в качестве опорного сигнала используется сигнал $a_0 s(t)$, пропорциональный полезному сигналу. Коэффициент корреляции в пиковой точке имеет значение

$$(4) \quad \begin{aligned} R &= \frac{\sum_j a_0 s_j (s_j + n_j)}{\sqrt{\sum_j {a_0}^2 {s_j}^2 \sum_j (s_j + n_j)^2}} = \\ &= \frac{\overline{\sum_j {s_j}^2} + \overline{\sum_j s_j n_j}}{\sqrt{(\sum_j {s_j}^2)^2 + \sum_j {s_j}^2 \sum_j 2 s_j n_j + \sum_j {s_j}^2 \sum_j {n_j}^2}} \end{aligned}$$

Т.к. помеха $n(t)$ и сигнал $s(t)$ – независимы, слагаемое $\sum_j 2 s_j n_j$ равно нулю, поэтому

$$(5) \quad R^2 = \frac{{E_s}^2}{{E_s}^2 + E_s E_n},$$

где $E_s = \sum_j {s_j}^2$; $E_n = \sum_j {n_j}^2$

Выражение (5) преобразуем, обозначив $\left(\text{с}/\text{п}\right)_p = \frac{E_s}{E_n}$:

$$R^2 {E_s}^2 + R^2 E_s E_n = {E_s}^2; \quad (1-R^2){E_s}^2 - R^2 E_s E_n = 0;$$

$$(6) \quad (1-R^2)\left(\text{с}/\text{п}\right)_p^{\,2} - R^2\left(\text{с}/\text{п}\right)_p = 0; \quad (1-R^2)\left(\text{с}/\text{п}\right)_p - R^2 = 0;$$

$$\left(\text{с}/\text{п}\right)_p = \frac{R^2}{1-R^2}.$$

Итак, весовой коэффициент при адаптивном накоплении будем определять по коэффициенту корреляции

$$(7) \quad k_i = \frac{{R_i}^2}{1-{R_i}^2}.$$

2 Результаты моделирования

Проведем сравнение эффективности адаптивного накопления с простым путем компьютерного моделирования в среде Visual Studio 2010.

Рассмотрим три характерные ситуации: 1) помеха невелика и плавно уменьшается; 2) помеха сначала невелика, затем резко увеличивается (при 16-ом цикле); 3) уровень помехи от реализации к реализации резко изменяется случайным образом. На рисунке 1 показан пример изменения уровня помехи при 30 циклах накопления.

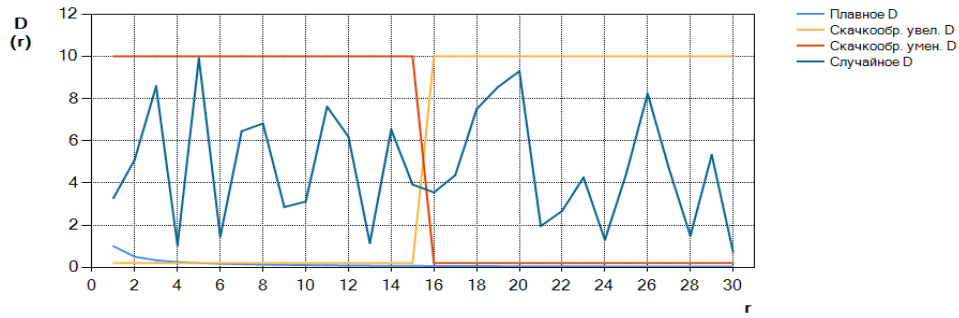


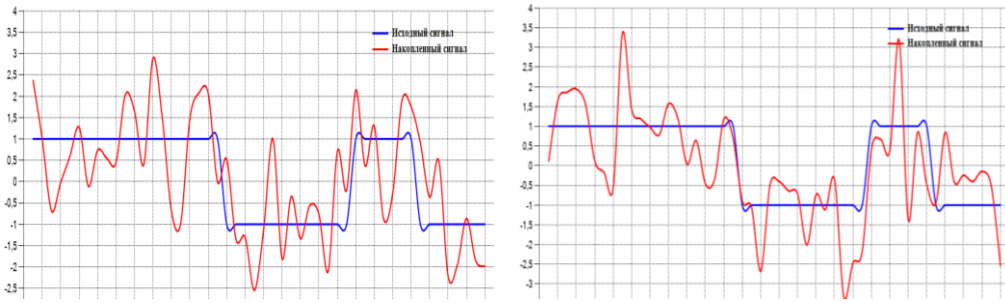
Рисунок 1 – Изменение уровня помехи при моделировании (r – количество накоплений; D – относительный уровень помехи)

В качестве полезного сигнала применим 7-элементный двоичный сигнал Баркера +1+1+1-1-1+1-1, имеющий узкий и высокий пик автокорреляционной функции [5].

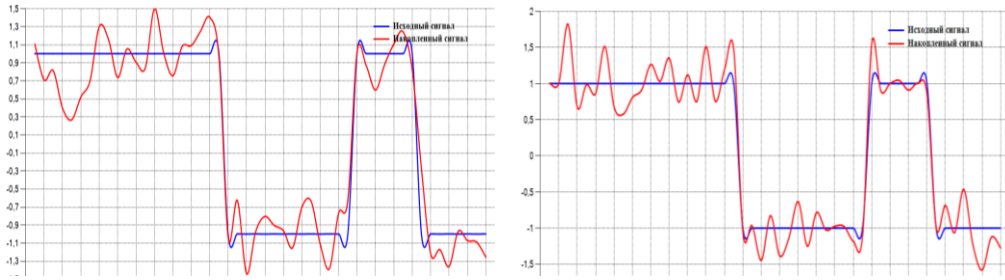
На рисунках 2-6 приведены некоторые из полученных графиков. Уровень полезного сигнала всегда одинаков, но в случае мощной помехи, уменьшается масштаб – для наглядности восприятия истинного отношения сигнал/помеха.

2.1 Ситуация 1 – помеха плавно уменьшается

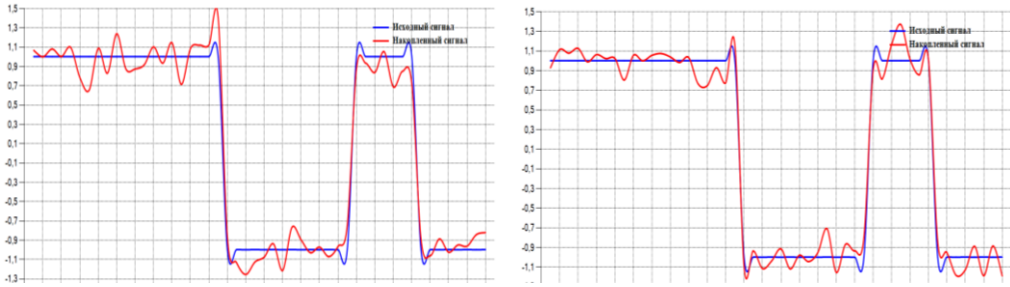
На рисунке 2 приведены результаты моделирования при 1, 5 и 10 циклах накопления.



а) одно накопление



б) 5 накоплений



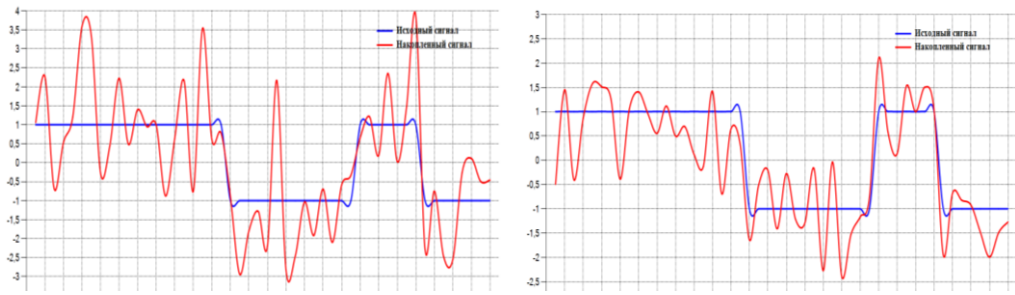
в) 10 накоплений

Рисунок 2 – Простое (слева) и адаптивное (справа) накопления при плавном уменьшении уровня помехи

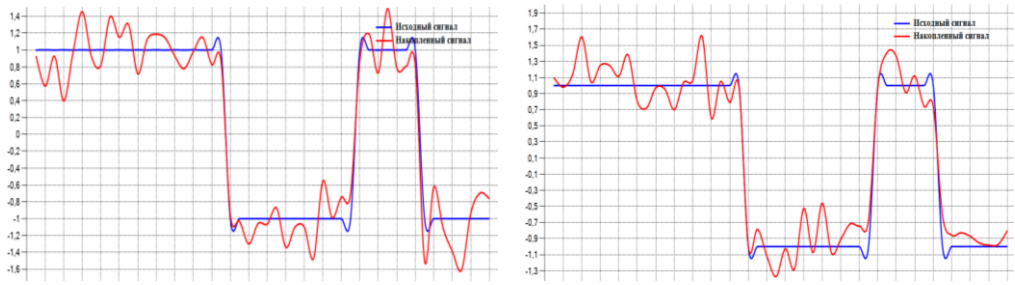
Видим, что очищение сигнала от помех происходит примерно одинаково как при простом, так и при адаптивном накоплениях, что и следовало ожидать. То есть при стационарной помехе адаптивное накопление не имеет преимущества перед простым.

2.2 Ситуация 2 – помеха сначала соизмерима с сигналом, а при 16-ом цикле увеличивается в 10 раз

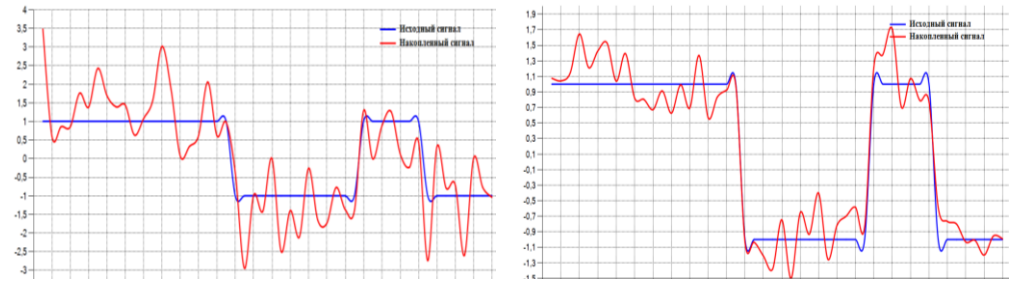
Результаты моделирования приведены на рисунке 3.



а) одно накопление



б) 15 накоплений



в) 16 накоплений

Рисунок 3 – Простое (слева) и адаптивное (справа) накопления при скачкообразном увеличении уровня помехи

До 15-го цикла отношение сигнал/помеха растет примерно одинаково, как и в первой ситуации. Далее на фоне мощной помехи приходит 16-ая реализация: видим, что при простом накоплении это сразу разрушает ранее накопленный сигнал, а при адаптивном – качество сигнала сохраняется.

Для численной оценки качества накопленного сигнала на рисунке 4 приведены зависимости коэффициента корреляции от количества накоплений для простого и адаптивного режимов.

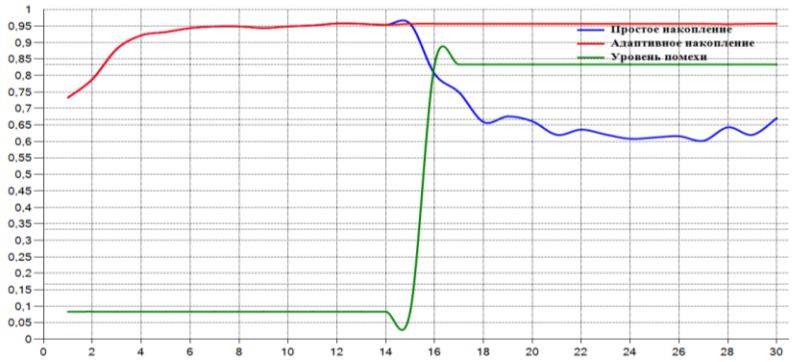
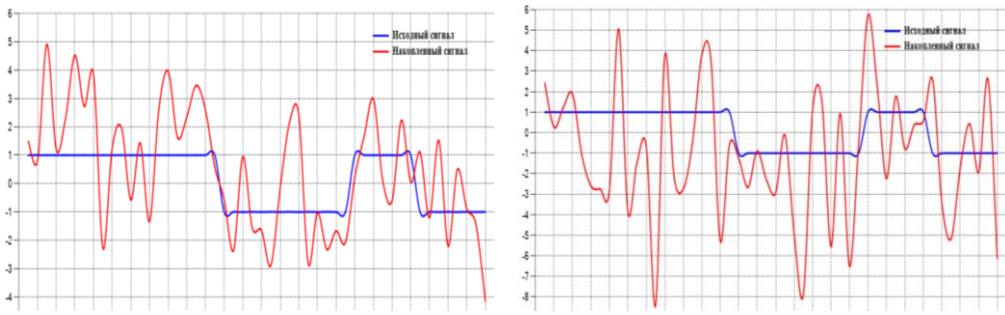


Рисунок 4 – Коэффициент корреляции при скачкообразном увеличении уровня помехи (30 накоплений)

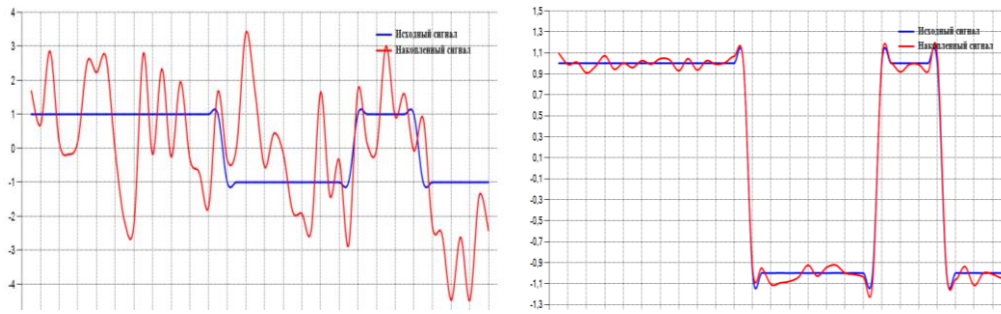
Видим, что коэффициент корреляции растет до 15-ой реализации. После 16-ой реализации при простом накоплении происходит разрушение накопленного сигнала (коэффициент корреляции падает до 0,8 и ниже), а при адаптивном – качество сохраняется и характеризуется коэффициентом корреляции выше 0,95.

2.3 Ситуация 3 – уровень помехи резко меняется случайным образом

Результаты моделирования приведены на рисунке 5.



а) одно накопление



б) 30 накоплений

Рисунок 5 – Простое (слева) и адаптивное (справа) накопления при случайном изменении уровня помехи:

На рисунке 6 показано, как меняется качество накопленного сигнала при изменении уровня помехи в широких пределах случайным образом.

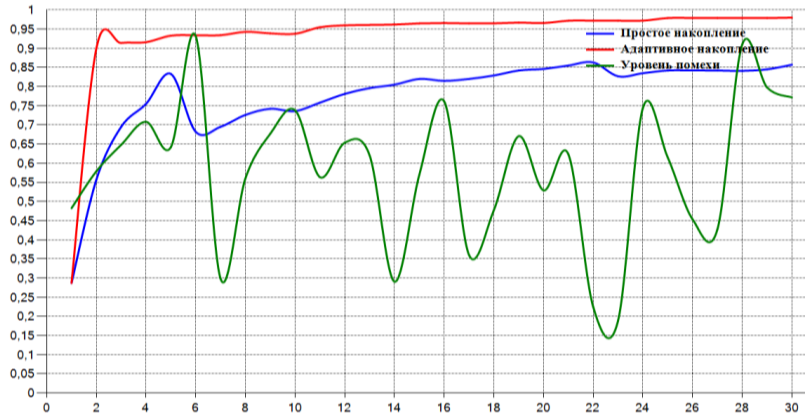


Рисунок 6 – Коэффициент корреляции при случайном изменении уровня помехи (30 накоплений)

Видим, что простое накопление неэффективно – качество накопленного сигнала почти не растет. Адаптивное же накопление дает улучшение качества за счет того, что при мощной помехе накопление происходит с малым весом и результат, полученный ранее, не разрушается; а при уменьшении помехи – растет. В результате уже после 10-го накопления коэффициент корреляции составляет 0,95 и при следующих циклах накопления – повышается.

Заключение

Проведена оценка эффективности адаптивного накопления, при котором вес очередной накапливаемой реализации сигнала вычисляется через коэффициент корреляции между опорным и входным сигналами. Наиболее показательные и характерные для практики случаи изменения помех приведены на графиках. Результаты оценки показывают, что преимущество адаптивного накопления перед простым тем больше, чем более нестационарна помеха. Адаптивное накопление устойчиво в том смысле, что мощная помеха не ухудшает качество уже накопленного сигнала; рост же отношения сигнал/помеха продолжается в паузах между помехами. Такая ситуация характерна для каналов с прерываниями и мощными импульсными помехами.

Список литературы

[1] Баранов Л.А. и др. Системы автоматического и телемеханического управления электроподвижным составом. – М.: Транспорт, 1984. – 311 с.

[2] Волынская А.В. Интеллектуальная подсистема ИСУЖТ для мониторинга устройств, обеспечивающих движение поездов, на основе когнитивного канала передачи информации по контактной сети // Вестник транспорта Поволжья : Науч.-техн. журнал. – Самара : СамГУПС, 2013. – № 2 (38). – С. 32-36.

[3] Волынская А.В. Адаптивное накопление сигналов на основе их корреляционной обработки для PLC-каналов автоматизированных систем железнодорожного транспорта // Материалы VI Международной науч.-практ. конф. «Наука и образование транспорту». – Самара : СамГУПС, 2013. – С. 165-169.

[4] Зюко А.Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи. – М.: Государственное издательство по вопросам связи и радио, 1963. – 320 с.

[5] Barker R.H. Group synchronizing of binary digital system // Communication theory. – London, 1953. – 273 p.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА ДЕФЕКТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АПК

В.Е. Гвоздев[1], Д.В. Блинова[1]

[1]Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия
blinova.darya@gmail.com
тел: +7 (347) 272-74-65

Ключевые слова: *функциональная безопасность АПК, управление дефектами, диверсионный анализ, неопределенность*

Abstract
This article focuses on the issues of analysis and management of hardware-software complexes functional safety defects. Discusses some known approaches of system analysis and complex systems control with respect to the defect management. A classifications of defects from several points of view are given.

Введение

В литературе, посвященной проблематике исследования и управления сложными системами [1, 2] отмечается необходимость исследования не только «полезных» (useful), но и «вредных» (harmful) функций системы. В работе [3] подчеркивается необходимость смещения акцентов в проблематике создания информационных систем от вопросов штатной эксплуатации к вопросам безопасного функционирования программных продуктов. Там же отмечается необходимость совершенствования технологий разработки, позволяющих обеспечивать защиту изделий как от злонамеренных действий, так и от непреднамеренных ошибок, допускаемых разработчиками на разных стадиях жизненного цикла программных продуктов. В работах [4, 5, 3] отмечается, что одним из перспективных современных направлений исследований в области системной инженерии является создание методологических и теоретических основ дефектологии программных продуктов. При этом следует выделять классы задач, связанные с обеспечением технологической и эксплуатационной безопасности (задачи, решаемые в рамках комплексной проблемы защиты информации [3]; задачи, связанные с обеспечением конфиденциальности, целостности и доступности информации для случая, когда в решении задач активное участие принимает пользователь [5]; задачи, связанные с построением АПК для управления и обработки информации в реальном времени при относительно малом участии пользователей (задачи функциональной безопасности [5]). В работе [6] обсуждается проблематика классификации дефектов, а также затрагиваются вопросы формирования терминологии в области дефектоскопии программных продуктов.

Проведенный анализ литературы позволяет сделать заключение о необходимости различать подходы к управлению дефектами, вносимыми в программные продукты преднамеренно, и дефекты, допускаемые разработчиками непреднамеренно. Кроме того, следует по-разному подходить к управлению непреднамеренно допускаемыми дефектами на разных стадиях жизненного цикла изделий в силу их различной природы.

В настоящей работе рассматриваются некоторые вопросы формирования подходов к управлению дефектами в рамках задач функциональной безопасности. Под функциональной безопасностью АПК понимается свойство АПК сохранять работоспособность в соответствии

со своим назначением при случайных дестабилизирующих воздействиях и отсутствии злоумышленного влияния на программную, аппаратную составляющую или базы данных.

1 Проблематика управления дефектами

Нам представляется, что рассматривая проблему управления дефектами, в первую очередь следует обратить внимание на то, что эта проблема принадлежит области управления сложными системами. Действительно, в 1965 году IFIP признал программные продукты разновидностью сложных систем. Из этого следует, что методологической основой управления дефектами должна стать методология управления сложными системами. Это, с одной стороны, обосновывает возможность адаптации наработок, полученных при исследованиях других сложных систем, в область управления дефектами программных продуктов (на важность этого направления работ указывается в [5]). В упомянутом источнике отмечается, что «...многие достижения в области теории и практики управления качеством сложной промышленной продукции, как правило, не известны и не используются специалистами, создающими и применяющими системы на базе программных средств». Таким образом, в настоящее время полезный опыт, накопленный в области управления качеством промышленных объектов, весьма слабо переносится в индустрию разработки сложных программных продуктов. Поэтому, одним из аспектов управления качеством сложным программных систем является адаптация уже существующих и проверенных методологий анализа, проектирования, эксплуатации и модернизации сложных промышленных систем в сферу разработки программного обеспечения.

С другой стороны, следует подчеркнуть, что требуется большая осторожность при выполнении такой адаптации в силу большого субъективизма в отображении проблемных ситуаций различными правообладателями (понятие «правообладатель» понимается в смысле, определенном в [7]).

Концептуальную основу управления дефектами в программных продуктах составляет следующее положение: практический интерес представляет управление лишь теми дефектами, которые отрицательно влияют на финансовые, клиентские и фидуциарные показатели деятельности организации, использующей программный продукт. Управление дефектами – трудоемкий и дорогостоящий процесс, реализация которого имеет смысл лишь в том случае, когда перспективы сокращения потерь от проявлений дефектов превышают затраты на управление дефектами. Интерес вызывает разработка АПК, в которых дефекты проявляются уже на ранних стадиях создания и не входят в состав готовой продукции.

Вопросам дефектологии в России на сегодняшний день не уделяется достаточно внимания [3], анализ литературы в этой области показал, что в области дефектологии не сформировано устойчивой терминологии, что свидетельствует о начальной стадии развития этого научного направления.

Так, в [8] непреднамеренный дефект – объективно и (или) субъективно образованный дефект, приводящий к получению неверных решений (результатов) или нарушению функционирования компьютерной системы.

Согласно [9], дефект – каждое отдельной несоответствие продукции установленным требованиям.

В [5] дефекты аппаратуры, программы или данных – негативные события, заключающиеся в непреднамеренном отклонении от требований спецификации или документации в процессах жизненного цикла.

Авторами в данной работе под дефектом понимается предпосылка к ошибке, возникновение (реализация) которой влечет за собой значимые потери для пользователя АПК.

2 Подходы к управлению дефектами

Рассмотрим содержание некоторых известных подходов системного анализа и управления сложными системами применительно к управлению дефектами.

Если подходить к управлению дефектами с позиций ресурсного подхода, то можно утверждать, что дефект неизбежно проявится, если будет иметь место подходящее для этого стечение обстоятельств. Подобная трактовка открывает возможность адаптации положений I-TRIZ [10] в область управления дефектами, в том числе методов Anticipatory Failure Determination (AFD-1, ADF-2). Суть AFD-1 состоит в реализации управления на основе изучения исторических данных, зарегистрированных в PHD (Project History Document), на анализе опыта эксплуатации систем с целью установления закономерностей в местах возникновения дефектов, а также причин возникновения дефектов. Суть AFD-2 заключается в разработке профилактических мероприятий, ориентированных на недопущение возникновения дефектов в программных продуктах. Концептуальной основой ADF-2 является изучение программного продукта с позиций «диверсанта»: «что, где и когда нужно сделать для того, чтобы в программном продукте имела место ошибка, имеющая наиболее тяжелые последствия».

Если подходить к управлению дефектами с позиций ситуационного подхода, то следует исходить из того, что содержания понятия «дефект» определяется режимом использования программного продукта. То проявление дефекта, которое несущественно для потребителя информационных продуктов и услуг в одном режиме использования, может иметь важное последствие при другом режиме использования. Это служит основанием для разработки разных сценариев испытаний на основе совокупности функциональных и операционных профилей [11], которые ставятся в соответствие разным режимам использования.

Важным моментом в управлении дефектами является выявление причин возникновения дефектов. В качестве возможного подхода к проявлению дефектами в программных продуктах на основе известных в других прикладных областях методов, рассмотрим нашедший использование в управлении качеством технических систем RCA (Root Cause Analysis) [12]. В рамках этого метода выделяется пять ступеней анализа, содержание которых применительно к управлению дефектами, может быть представлено следующим образом.

1. Симптомы (англ.- Symptoms). На этом шаге устанавливается факт отклонения поведения программного продукта от «эталонного», т. е определенного в спецификации.

2. Проблемы (англ. - Problems). На этом шаге выявляется разница между тем, какими свойствами должен обладать программный продукт, и тем, какими свойствами он фактически обладает. Результатом реализации этого шага является локализация дефекта. Следует подчеркнуть, что под локализацией дефекта понимается более широкое понятие, нежели выявление дефекта в программном коде. Мы исходим из того, что помимо программных кодов существуют разные форму представления программных продуктов: описание внешнего облика; спецификация требований пользователей; спецификация системных требований; архитектура и структура программной системы; тесты; сценарии использования; функциональные и операционные профили т.д. На множественность форм представления программного продукта обращается внимание, например, в [13, 14].

3. Причины первого уровня (англ. – First-Level Causes). На этом шаге выявляются непосредственные причины возникновения дефектов (например, недостаточная изученность желаний и ожиданий пользователей; подмена тестирования программных компонентов демонстрационными прогонами; незнание, либо неправильное толкование областей применимости различных моделей и технологий, используемых при проектировании программных продуктов и т.п.).

4. Причины высокого уровня (англ. – Higher-Level Cause). Причины, приводящие к возникновению причин первого уровня. Хотя эти причины непосредственно не создают дефектов, они формируют звенья цепи причинно-следственных связей, реализация которых в конечном итоге приводит к возникновению дефекта. Применительно к программным продуктам на этом

уровне анализируются причины низкой культуры программного проекта(в технико-технологическом, методическом, экономическом, организационном и иных аспектах). Примером причины высокого уровня может служить расчет коэффициента парной корреляции на основе неоднородных в статистическом смысле данных.

5. Причины высшего уровня (англ. – Highest-Level Cause). Это коренные причины, приводящие к возникновению дефектов. Применительно к программным продуктам этот уровень может ассоциироваться с недостатком у правообладателей нематериальных активов. Следуя [Нортон, Каплан] к составным частям нематериальных активов следует отнести компетенции правообладателей программного продукта и компетенции исполнителей проекта; владение ими актуальной информацией в области информационных технологий и проектирования программных систем; создание руководителем проекта условий, стимулирующих исполнителей на полную реализацию своих возможностей.

3 Неопределенность как источник возникновения дефектов

Основной причиной возникновения непредумышленных дефектов на разных стадиях жизненного цикла программного продукта является неопределенность. Следует различать «внешнюю», «внутреннюю» и «пограничную» неопределенность. Каждый из выделенных классов неопределенностей имеет свою природу, что обуславливает разные способы управления дефектами, имеющими разную природу.

«Внешняя неопределенность», негативно влияющая на функциональную пригодность программных продуктов с точки зрения пользователей, обусловлена недостаточной изученностью среды использования программного продукта. Истоками этой неопределенности являются, во-первых, невозможность точного предсказания (на момент предъявления заказчику программного продукта) состояния внешних бизнес-процессов, управление которыми подпирает программный продукт. Во-вторых, сложности, возникающие при формировании допустимых множеств исходных данных. Методологическую основу управления дефектами, обусловленными «внешней неопределенностью», составляют методы валидации программных продуктов (к числу которых относится сценарный подход [11]). Примером нормативного документа, регламентирующего процессы валидации программных продуктов, является [15].

«Внутренняя» неопределенность, негативно влияющая на эффективность программного проекта в форме дополнительных затрат на устранение дефектов, обусловлена множественностью маршрутов обработки данных. Истоками этой неопределенности является большое число решающих правил, что проявляется в большом числе различных маршрутов обработки данных. Из-за ограниченности ресурсов, выделяемых на испытание программных продуктов, возможно наличие такого пути преобразования данных, для которого поведение программного продукта на стадии тестирования не исследовалось. Если такой путь содержит дефект, то он может послужить причиной уменьшения функциональной пригодности. Методологическую основу управления дефектами, обусловленными «внутренней» неопределенностью, составляют методы тестирования программных систем. Классификация и описание методов тестирования приводится, например, в [13].

«Пограничная» неопределенность обусловлена искажением и неполным отображением в виде спецификации требований (эталонных моделей программного продукта) потребностей, ожиданий и желаний представителей заказчика. Истоками этой неопределенности являются, во-первых, различное отображение одних и тех же проблемных ситуаций разными представителями заказчика программного продукта. Во-вторых, вербальная, слабо формализованная форма представления спецификаций требований пользователей (следует подчеркнуть, что чем более сложной и масштабной является создаваемый программный продукт, тем более нечеткими являются формулировки в исходной спецификации требований пользователей). Нечеткость формулировок спецификации является причиной неоднозначности из толкования раз-

ными правообладателями (термин «правообладатель» понимается в смысле, определенном ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005). Методологическую основу управления дефектами, обусловленными «пограничной» неопределенностью, составляют методы верифицирования программных продуктов. Примером нормативного документа, регламентирующего процессы верификации программных продуктов, является [15].

4 Классификация дефектов

Реализация системного подхода предполагает, в том числе, разноаспектный анализ предмета управления. С точки зрения управления дефектами представляется целесообразным выделение следующих подходов к классификации дефектов:

- по месту возникновения дефекта (внешний облик программного продукта; спецификации требований; архитектура и структура системы; интерфейсы (с внешней средой, межмодульные, с операционной системой));
- с привязкой к моменту возникновения дефекта (при реализации определенной стадии жизненного цикла программного продукта; на границе между стадиями; при развертывании у пользователя; при обслуживании и модернизации);
- исходя из последствий проявления дефекта (для внешних бизнес-процессов; с точки зрения состояния клиентской составляющей разработчиков программного продукта; с точки зрения влияния на технологические процессы, связанные с разработкой и испытаниями программных продуктов);
- с точки зрения развития (улучшающего и радикального) технологий проектирования, реализации и испытания программных продуктов.

Классификация дефектов служит основанием для формирования внутри выделенных классов типовых приемов управления дефектами.

В [12] дается классификация коренных причин дефектов. Нам представляется, что применительно к программным продуктам содержание классов приобретает следующее толкование:

- осязаемые (материальные) причины. К этому классу относятся, например, причины, обусловленные недостаточной изученностью технических характеристик компонентов информационных компьютерных и телекоммуникационных систем;
- субъекты. К этому классу относятся дефекты, обусловленные низким качеством проектных решений, либо нарушением условий эксплуатации систем (непредумышленные ошибки исполнителей и пользователей);
- внешние (экономические) факторы окружающей среды. Например, несоответствие бюджета проекта масштабу и сложности программного продукта;
- административные причины. Несоответствие организационной структуры программного проекта состояниям внешней и внутренней сред проекта; низкое качество целеполагания; слабые коммуникации между правообладателями, принадлежащими к разным классам; низкая эффективность менеджмента; недостаточные усилия по постоянному совершенствованию внутренних бизнес-процессов;
- организационные причины. Содержание причин этого класса выражается в несоответствии производительных сил и производственных отношений уровням внешней и внутренней неопределенностей программного проекта;
- информационное обеспечение, технологические причины. Представителями причин, относящихся к этому классу, могут служить: недостаточность необходимой для принятия решений информации; несоответствие технологической платформы информационной системы информационным потребностям организации.

Заключение

Таким образом, в качестве методологической основы управления дефектами в программно-аппаратных комплексах следует выбрать методологию управления сложными системами. Первым шагом в разработке теоретических основ управления следует определить адаптацию известных подходов, ориентированных на управление качеством сложных технических систем в область программной инженерии.

Благодарности

Данная работа поддержана грантом РФФИ 14-08-97036.

Список литературы

[1] Лапыгин Ю. Н. Стратегический менеджмент. Учебное пособие – М.: Высшее образование, 2007.

[2] Kan-Hin Chai, Jun Zhang, Kay-Chuan Tan A TRIZ-Based Method for New Service Design. National University of Singapore// Journal of Service Research, Volume 8, №1, August 2005, pp. 48-66.

[3] Нагибин С.Я., Пальчун Б.П., Ухлинов Л.М. Технологическая безопасность программного обеспечения – новая проблема в области создания информационных систем // Информационное общество, 1995, вып. 6. - С. 45-49.

[4] Бородакий Ю. В., Юсупов Р. М., Пальчун Б. П. Проблема имитационного моделирования дефектоскопических свойств компьютерной инфосферы / труды третьей всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» Санкт-Петербург, 2007. - С. 87-92.

[5] Липаев В.В. Функциональная безопасность программных средств. М.: СИНТЕГ, 2004

[6] Марков А.С. Фадин А.А. Систематика уязвимостей и дефектов безопасности программных ресурсов. Защита информации INSIDE №3, 2013. – С. 2-7

[7] ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010 Информационная технология. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств

[8] Казарин О.В. Безопасность программного обеспечения компьютерных систем. Монография. – М.: МГУЛ, 2003.

[9] ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции.

[10] Stan Kaplan, S. Visnepolschi, B. Zlotin, A. Zusman: NEW TOOLS FOR FAILURE & RISK ANALYSIS. An Introduction to Anticipatory Failure Determination (AFD) and The Theory of Scenario Structuring. Ideation International Inc., 1999.

[11] Lyu Michael R. Handbook of Software Reliability Engineering, IEEE and McGraw-Hill, 1996

[12] Duffy G, Moran J, Riley W (2012). Solve the real problem using root cause analysis. Washington DC: Public Health Foundation.

[13] Майерс Г. Надежность программного обеспечения – М.: Мир, 1980.

[14] ESA PSS-05-02 Guide To The User Requirements Definition Phase, March 1995

[15] ESA PSS-05-10 Guide To Software Verification And Validation (MAR 1995)

МНОГОКАНАЛЬНОЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ЕДИНСТВЕННОЙ ВЫХОДНОЙ ВЕЛИЧИНОЙ: ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ, ПРОБЛЕМЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ

В.А. Жмудь[1], Л. В. Димитров[2]

[1]ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»
630073, Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20, Россия
oao_nips@bk.ru
тел: +7 (383) 346-11-19, факс: +7 383) 346-11-19

[2]Технический университет Софии
София 1000,
бул."Кл. Охридски" 8, Болгария
lubomir_dimitrov@tu-sofia.bg

Ключевые слова: *автоматика, управление, робототехника, численная оптимизация, энергосбережение*

Abstract

Controlling of objects with the feedback negative loop is widely used in industry, intelligent technologies, robotics and transport systems. A negative feedback loop by comparing of the prescribed value of the output value with measured value of it generates a control signal, which adjusts the output value of the object. Typically, the number of controlled output values is equal to the number of feedback channels acting on the object, but in some cases, the number of the channel can be more. This situation is especially often in transportation systems. In the problem of the design of regulators, they pay the most attention to ensuring of the required static and dynamic control accuracy, but recently the attention to the conservation of the resource manager increased. This saves fuel or energy costs, which is especially important, for example, in space technology. The task of saving resources in the control of an object with an excess amount of control channels was not previously considered in the literature. In this paper, the problem is investigated by numerical optimization with the simulation. In some cases, the cost of resource of the control by the different channels may vary. At the same time the cheaper resources can have the worst quality of the control, for example, it can has a discrete form or (and) less speed and so on. In this paper, we study such state of the problem and give its solution. It is shown that for a suitable choice of the cost function one can preserve rather high quality of the control, while ensuring saving of the controlling resources. Resource saving can reach in some cases 96%, which is illustrated by example.

Введение

Для определенности положим шаг нелинейности на уровне 0,2 единицы, то есть 20 % от предполагаемого входного скачка. Это делает данный вид нелинейности вполне ощутимым при решении поставленной задачи.

Стоимостную функцию предлагается формировать на основе интеграла от модуля ошибки, умноженного на время с момента начала переходного процесса, куда вносится затраченный на управление ресурс в виде квадрата от управляющего воздействия с весовым коэффициентом, как предлагалось ранее в наших работах [5–7]. Дополнительным отличием будут разные весовые коэффициенты для разных управляющих сигналов.

Результаты оптимизация регулятора

Рассмотрим уравнение объекта в операторной форме:

(1) $Y(s) = W_1(s)U_1(s) + W_2(s)U_2(s)$.

Здесь U_1, U_2 – входные сигналы, Y – выходной сигнал, W_1, W_2 – соответствующие передаточные функции, s – оператор преобразования Лапласа.

Уравнение регулятора в общем виде:

(2) $U_1(s) = (p_1 + sd_1)E(s)$.

(3) $U_2(s) = (p_2 + sd_2)E(s)$.

(4) $E(s) = [V(s) - Y(s)]$.

Здесь E – ошибка управления, V - предписанное значение выходного сигнала, p_1, p_2, d_1, d_2 - неизвестные коэффициенты, которые требуется отыскать с помощью численной оптимизации.

На *Рис*. 1 показана структура для моделирования и оптимизации регулятора, содержащего два канала управления.

Пример 1. Пусть передаточные функции в (1) заданы соотношениями:

(5) $W_1(s) = \dfrac{1}{(0.1s^2 + s + 1)s}$.

(6) $W_2(s) = \dfrac{1}{(4s + 1)s}$.

Кроме того, введем нелинейный элемент вида квантующего устройства с шагом квантования 0,2 единицы.

Наиболее целесообразно использовать энергосберегающие алгоритмы управления для объектов, содержащих в своей модели интегратор. Поэтому в качестве примера избран именно такой объект, общий интегратор описан звеном с символом 1/S. Два различных канала управления представлены звеньями между меткой шины управляющего сигнала, соответственно, u1 и u2, и входами сумматора, обозначенного символом Σ. Два управляющих сигнала, u1 и u2, формируются двумя различными регуляторами, имеющими пропорциональный и дифференцирующий тракты. В пропорциональном тракте коэффициенты заданы переменными p1 и p2, а в дифференцирующем тракте коэффициенты заданы переменными d1 и d2. Дифференцирующий элемент обозначен символом derivative. Узел вычисления стоимостной функции содержит генератор линейно нарастающего сигнала, а также выпрямитель abs, подключенный к шине сигнала ошибки e. Эти два сигнала перемножаются блоком * и интегрируются блоком 1/S.

Результат оптимизации показан в виде значений найденных коэффициентов, а также в виде значения энергетических затрат. Кроме того, в результате вычисляются и строятся графики переходных процессов в системе, которые показаны на *Рис*. 2 и 3.

Также в проекте имеется блок вычисления энергетических затрат, осуществляющий возведение в квадрат каждого из управляющих сигналов, суммирование этих квадратов и интегрирование результата. При этом использованы разные весовые коэффициенты, соответствующие стоимости энергии, а именно, 0,5 и 0,01. Кроме того, имеется блок оптимизации, содержащий четыре элемента, обозначаемых символом parameterUnknown. Эти блоки осуществляют процедуру поиска требуемых коэффициентов регуляторов, которые обеспечивают минимум положительной величины, поступающей на вход блока cost в конце переходного процесса.

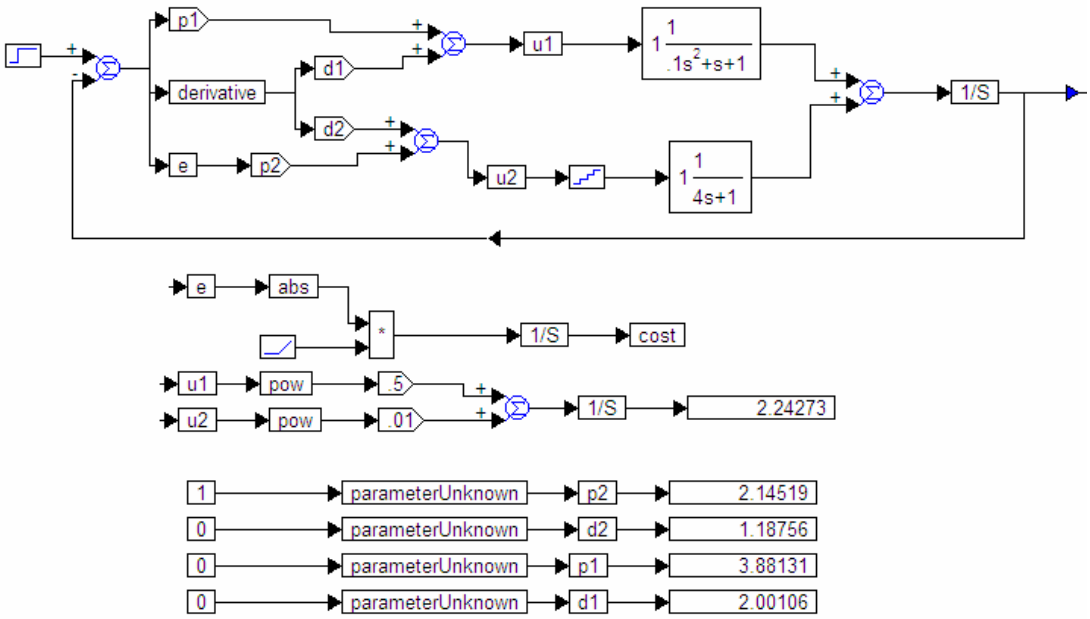


Рисунок 1 – Структура для оптимизации регулятора и результат (коэффициенты и затраты ресурса) при использовании целевой функции, не включающей затраты ресурса (шаг дискретности нелинейного элемента равна 0,2)

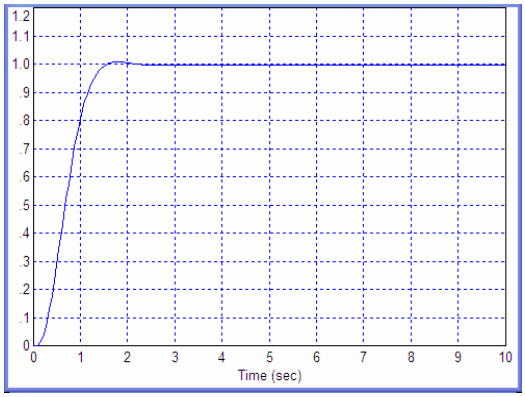


Рисунок 2 – Переходный процесс в системе по Рисунку 1

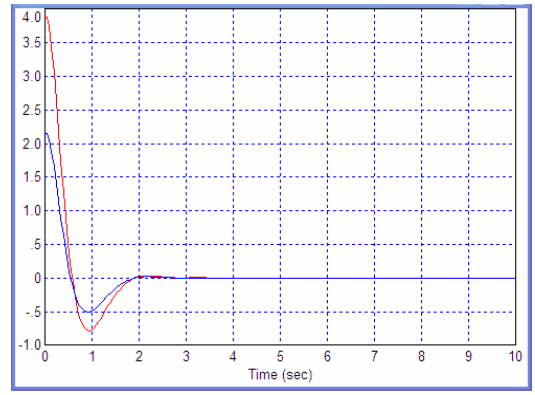


Рисунок 3 – Управляющие сигналы в системе по Рисунку 1

Полученный переходный процесс по выходной величине (см. Рис. 2) отвечает требованиям, поскольку оканчивается на предписанном значении, равном единице. Перерегулирование практически отсутствует. Графики на *Рис*. 3 показывают вид управляющих сигналов, что может служить иллюстрацией к тому, как будет действовать опция сбережения энергии этих сигналов. В данном примере, который иллюстрируют *Рис*. 1–3, опция энергосбережения не была включена, поскольку связь между выходом блока вычисления затрат энергии и входом блока cost отсутствовала.

На *Рис*. 4–6 показаны аналогичные результаты при использовании функции энергосбережения. По сопоставлению *Рис*. 2 и *Рис*. 5 можно сделать вывод, что качество переходного процесса почти не пострадало, лишь быстродействие несколько снизилось (в 2,5 раза), перерегулирования не появилось, статическая ошибка не возникла. Сбережение стоимости энергии составило около 96%, поскольку снизилось от величины 2,24 до величины 0,0822. По сопоставлению *Рис*. 6 и *Рис*. 3 можно видеть, что в результате введения в стоимостную функцию стоимости затрат энергии относительный вклад управляющего сигнала с меньшей стоимостью возрос по сравнению с предыдущим результатом. Если ранее этот сигнал был почти вдвое меньше, то теперь он стал почти вдвое больше, чем сигнал в канале с большей стоимостью управляющего ресурса.

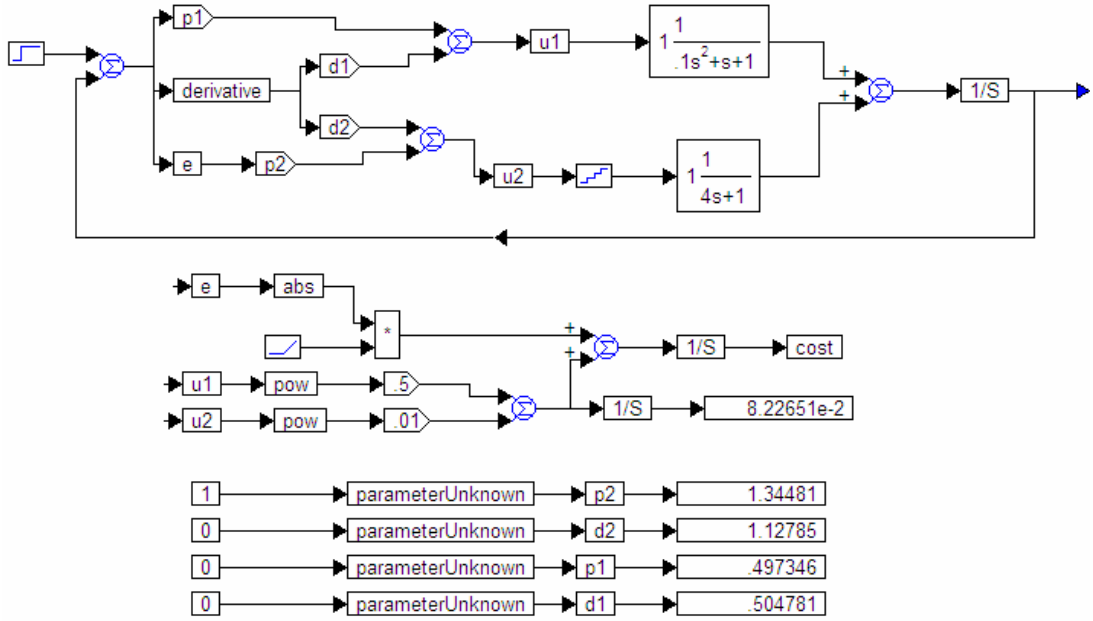


Рисунок 4 – Структура для оптимизации регулятора и результат (коэффициенты и затраты ресурса) при использовании целевой функции, включающей затраты ресурса

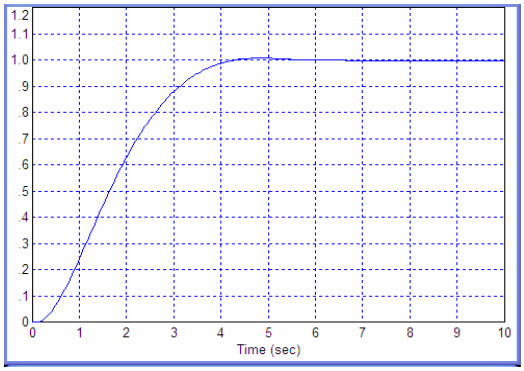


Рисунок 5 – Переходный процесс в системе по Рисунку 4

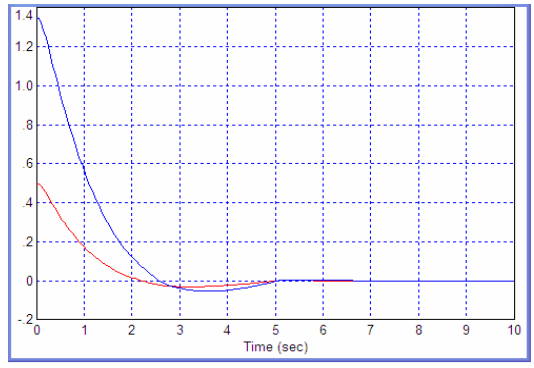


Рисунок 6 – Управляющие сигналы в системе по Рисунку 4

Пример 2. Введем в модель объекта дифференцирующее звено между выходом нелинейного элемента и входом передаточной функции. В этом случае по второму каналу можно осуществить лишь импульсное управление, поскольку если сигнал на входе нелинейного устройства изменяется в пределах одного шага квантования, выходной сигнал нелинейного элемента не изменяется, и на выходе дифференцирующего звена, подключенного к этому нелинейному элементу, сигнал будет нулевым. Такой канал крайне не удобен для управления, но он также может работать, поскольку в объекте содержится интегратор. Дифференцирующий и интегрирующий элементы частично взаимно компенсируют свое действие, однако это ослабляет требуемый эффект интегрирования, важный для сбережения энергии при управлении. Решим задачу в этих измененных условиях с помощью аналогичной структуры. Получаемые графики переходных процессов показаны на Рисунках 7 и 8.

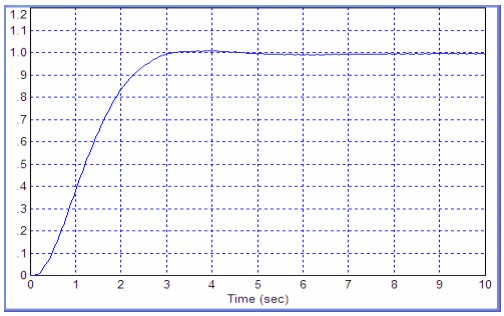


Рисунок 7 – Переходный процесс в системе по Примеру 2

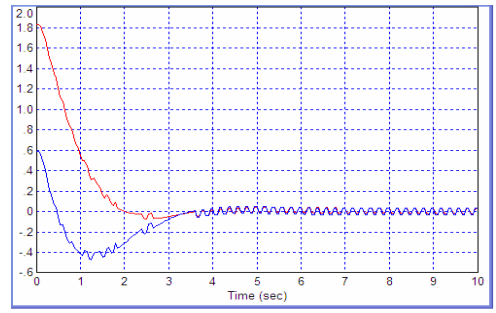


Рисунок 8 – Управляющие сигналы в системе по Примеру 2

Использование в стоимостной функции суммарной стоимости энергетических затрат приводит к использованию второго канала с более дешевым энергетическим ресурсом, однако это приводит к небольшим автоколебаниям. При этом стоимость расхода ресурса для управления составила около 0,92 единицы.

Пример 3. Для сравнения исключим из стоимостной функции Примера 2 слагаемое, равное затратам энергии. Стоимость затрат энергии в этом случае составит 2,53 единицы, то есть более чем в 2,5 раза больше. Но при этом качество управления заметно возрастает, как показано на графиках переходных процессов, представленных на Рисунках 9 и 10.

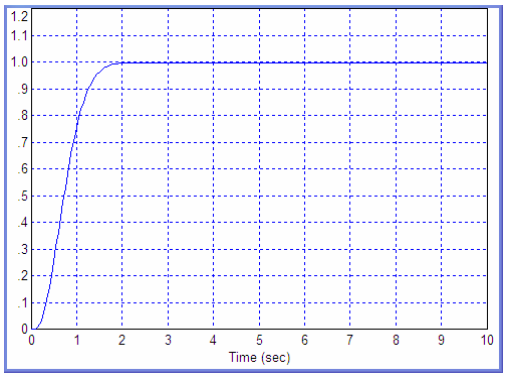


Рисунок 9 – Переходный процесс в системе по Примеру 3

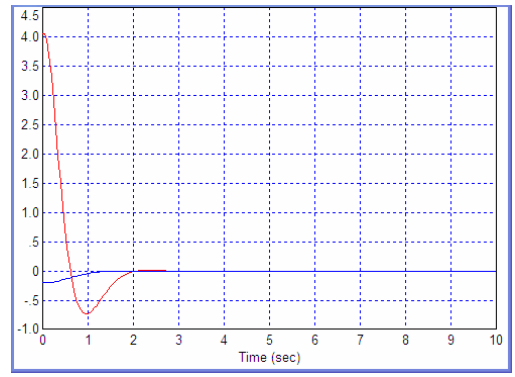


Рисунок 10 – Управляющие сигналы в системе по Примеру 3

Таким образом, при рассмотренной структуре модели объекта с выбранной структурой регулятора снижение стоимости управления может быть достигнуто лишь ценой существенного ухудшения качества управления, и наоборот, повышение качества переходных процессов достигается повышением стоимости управления.

Пример 4. Введем в регулятор второго канала нелинейный элемент типа «зона нечувствительности» с шириной зоны нечувствительности, равной 0,2 единицы, как показано на *Рис*. 11. Соответствующие переходные процессы показаны на Рисунках 12 и 13.

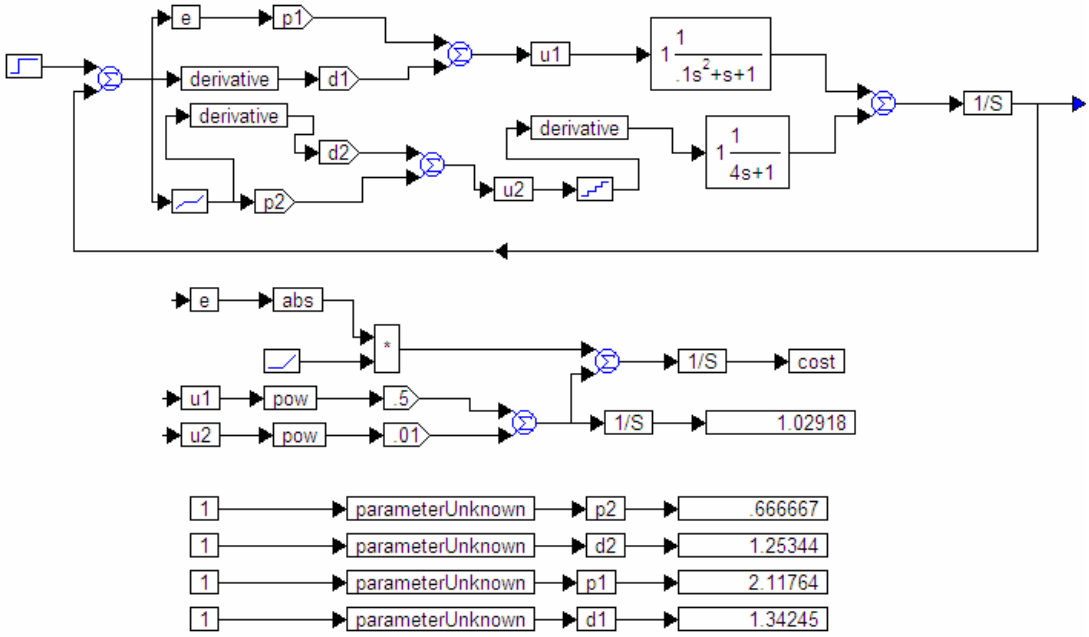


Рисунок 11 – Структура и результаты оптимизации с учетом затрат ресурсов; структура регулятора также изменена: введена зона нечувствительности

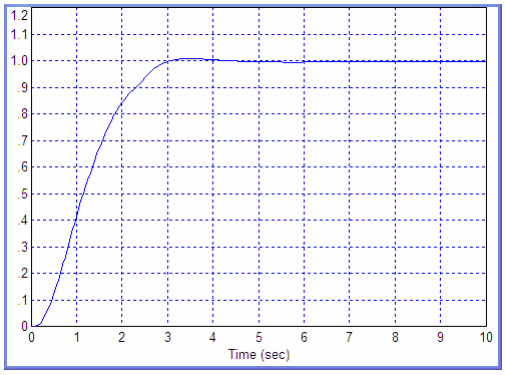


Рисунок 12 – Переходный процесс в системе по Примеру 4

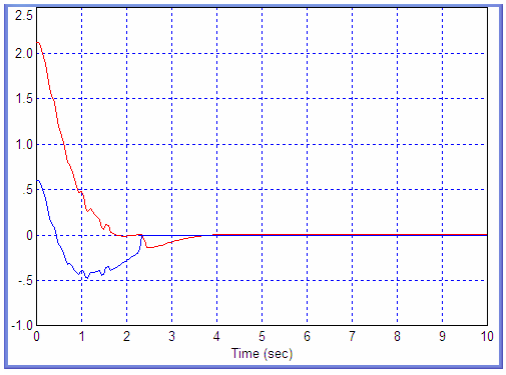


Рисунок 13 – Управляющие сигналы в системе по Примеру 4

Видно, что длительность переходного процесса немного возросла (в 1,5 раза) в сравнении с предыдущим результатом, показанным на Рисунке 9. Но все же автоколебания отсутствуют,

установившаяся ошибка стремится к нулю, и при этом затраты ресурса управления лишь немногим отличаются от результата, полученного в Примере 2, а именно: 1,029 против 0,92 единиц. Следовательно, введение элемента с зоной нечувствительности позволяет совместить требование экономии затрат ресурса управления с требованием устранения автоколебаний.

Варьирование ширины зоны нечувствительности приводит к другим результатам, которые также можно оценить как успешные. А именно: при ширине зоны нечувствительности 0,4 единицы затраты энергии составляют 1,15 единиц, длительность переходного процесса – около 3 с, процесс близок к процессу, показанному на Рисунке 12. При ширине зоны нечувствительности 0,3 единицы затраты энергии составляют 1,044 единицы, переходный процесс практически такой же.

Благодарности

Авторы признательны Минобрнауки России за поддержку исследований в рамках поддержки проекта по государственному заданию №2014/138, тема проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности».

Заключение

В данной статье подтверждена возможность и разработана методика с рекомендациями для двухканального управления одной выходной величиной объекта при обеспечении экономии стоимости ресурса управления. Показано, что даже при крайне ограниченных возможностях управления альтернативного канала при меньшей стоимости ресурса управления в этом канале можно обеспечить эффективное сочетание двух видов воздействия с обеспечением высокого качества астатического управления без перерегулирования и с малыми затратами управляющих ресурсов.

Список литературы

[1] В.А. Жмудь, А.В. Касторный. Концепция энергосберегающих регуляторов Автоматика и программная инженерия. 2013. № 4 (6). С. 14–21. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия). http://www.nips.ru/images/stories/zhournal-AIPI/7/aipi-4-2013-02.pdf

[2] В.А. Жмудь, А.Н. Заворин. Метод проектирования энергосберегающих регуляторов для сложных объектов с частично неизвестной моделью. В кн.: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVI Международной конференции 30 июня – 03 июля 2014 г., Самара. Россия. С. 557–567.

[3] В.А. Жмудь. Проектирование робастных энергосберегающих регуляторов (ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия) Автоматика и программная инженерия. 2014. № 2 (8). С. 58–65.

[4] Жмудь В.А., Семибаламут В.М. Проектирование энергосберегающих регуляторов для многоканальных объектов методом симуляции и оптимизации. Сборник научных трудов НГТУ. 2014. №3(77), стр.7 – 22.

[5] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V., Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012. Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.

[6] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program vissim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.

[7] V. Zhmud, O. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. http://www.must.edu.mn/IFOST2013/

[8] Vadim A. Zhmud, Dashi B. Imekov, Kirill Yu. Lastochkin and Anna V. Lukicheva. New Structure of Regulator for Controlling of Object with Oscillation Features and its Modelling Testing. Proceedings of International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization (OPT-i-2014). Kos Island, Greece, 4-6 June 2014.

[9] Vadim ZHMUD. New Modeling Tested Method for Controlling of Object with Oscillation Features. Proceeding of 2014 International Conference on Mechanical Design, Manufacture and Automation Engineering (MDMAE 2014). ISBN: 978-1-60595-156-0. Thailand, Phuket. Part II. Author statement: Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. Keywords: Numerical optimization, Regulators, Automation, Modeling, Dynamic systems, Accuracy of control.P.289 – 296.

[10] Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Yadrishnikov O.D. Calculation of regulators for the problem of machatronics by means of the numerical optimization method // 12-th Inter. Conf. on Actual Propblems of Electronic Instrum. Engineering (APEIE). Proceedings. – Novosibirsk – 2014. – Vol.1, P. 739–744.

Biography

Vadim Arkadievich Zhmud, professor, Doctor of Sciences, is head of Department of Automation in Novosibirsk State Technical University. Scope of interests is automation, numerical optimization, feedback control, laser systems, optics and optoelectronics, measurements, accuracy, basic metrology.

Lubomir Vankov Dimitrov, professor, Doctor of Sciences, is Dean of Machine-building Faculty in Technical University of Sofia, Bulgaria. Scope of interests is automation, numerical optimization, feedback control, optics and optoelectronics, measurements, accuracy, mechatronics.

СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ ЖЕЛАЕМЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

О.А. Иванова[1], В.Ю. Попов[2,3], Д.Н. Сузанский[1], О.О. Царева[2]

[1] АО «Концерн «ВЕГА»
121170, Москва, Кутузовский пр-т, д.34
suzansky@mail.ru
тел: +7 (903) 625-79-40

[2] МГУ им. М.В.Ломоносова, Физический Факультет
119991, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, д.1, стр.2

[3] Финансовый университет при Правительстве РФ
125993, Москва, ГСП-3, Ленинградский пр-т, д.49
masterlu@mail.ru
тел: +7 (903) 515-50-99

Ключевые слова: *безопасность полетов, опорная траектория, маловысотный полет, цифровая карта рельефа местности*

Abstract
A method of aircraft reference trajectory synthesis during urban terrain operation is considered. The suggested approach is based on the flat potential flows conformal mapping method. The algorithm of path synthesis is obtained as a result.

Введение

Важным элементом решения задачи траекторного управления сложным объектом является синтез опорной (желаемой, требуемой) траектории его движения. Сложность такого синтеза заключается в том, что заданные значения параметров опорной траектории должны удовлетворять некоторому глобальному критерию качества функционирования системы. При решении задачи автоматического управления возникает определенная сложность в выборе единого качества. Это обусловлено тем, что заранее предугадать все возможные траектории движения системы практически невозможно из-за многообразия начальных и конечных условий. Таким образом, выбор или задание опорной траектории движения является одной из основных проблем при решении задачи синтеза алгоритмов управления сложной динамической системой.

В последние десятилетия в связи с бурным развитием беспилотных летательных аппаратов (БЛА) большой интерес вызывают методы, позволяющие осуществлять управление БЛА при выполнении маловысотного полета (МВП). Режим МВП позволяет обеспечить скрытность полета беспилотного летательного аппарата и, тем самым, существенно повысить его живучесть при выполнении поставленной задачи. Именно поэтому режим маловысотного полета используется для преодоления различных опасных зон (ОЗ) [1]. Важно отметить, что для повышения скрытности полета необходимо, чтобы весь комплекс радиотехнического оборудования БЛА использовался в пассивном режиме, в котором получение навигационной информации происходит либо от автономной навигационной системы, либо от внешних источников с передачей ее непосредственно на борт БЛА [2].

1 Постановка задачи и метод решения

Полет на малой высоте принято разделять на два вида: первый – обход препятствий в горизонтальной плоскости с сохранением высоты, второй – обход препятствий в вертикальной

плоскости с сохранением заданного курса. В настоящее время задача построения опорной траектории для МВП, как правило, выполняется на основе известной цифровой карты рельефа местности (ЦКРМ) с использованием различных подходов: от ручного определения оператором (штурманом) контрольных точек маршрута до использования процедур искусственного интеллекта. Спектр математических подходов, применяемых для решения поставленной задачи, довольно широк. Это использование различных переборных методов, методов теории дифференциальных игр, градиентных методов, нейронных сетей и генетических алгоритмов, а также положений теории гидродинамики [3, 4, 5, 6]. Столь значительное многообразие методов говорит, с одной стороны, о важности рассматриваемой задачи, а с другой – об отсутствии единого подхода для ее решения.

Целью работы является рассмотрение одного из подходов к построению опорных траекторий движения летательного аппарата при совершении маловысотного полета над местностью с типичной городской застройкой.

В работе рассматривается способ получения траекторий, в основе которого лежат положения теории функции комплексного переменного и метода конформных отображений потенциальных потоков идеальной жидкости [7]. В качестве примера рассматриваются задачи построения опорных траекторий движения беспилотного летательного аппарата при выполнении им маловысотного полета в условиях городской застройки в следующих режимах: огибания рельефа в горизонтальной плоскости и облета рельефа в вертикальной плоскости. Исходными данными для решения обеих задач является цифровая карта рельефа местности. Задачи решаются в предположении, что объекты городской застройки без существенной потери точности могут быть приняты имеющими форму прямоугольных параллелепипедов.

В [10] авторами были получены результаты решения аналогичных задач при условии аппроксимации замкнутых кривых, полученных в сечении рельефа местности, кругами и эллипсами. Применяемый в настоящей работе подход также основан на использовании комплексного потенциала бесциркуляционного обтекания объектов прямоугольного сечения, который может быть получен на основе метода конформных отображений плоского потенциального потоков течения идеальной несжимаемой жидкости [7]. Предполагая, что подготовительные этапы, а именно: получение сечения рельефа застройки соответствующими поставленной задаче плоскостями и приближение полученных замкнутых кривых прямоугольниками, – уже проделаны, найдем комплексный потенциал течения $W(z)$ ($z = x + iy$, где x и y – координаты в рассматриваемой плоскости) при обтекании N произвольно расположенных прямоугольников плоским потоком идеальной жидкости.

В общем виде система дифференциальных уравнений, фазовый портрет которой позволит построить множество желаемых траекторий полета БЛА, должна иметь вид:

$$(1) \quad \begin{cases} \dot{x} = f(x, y) \\ \dot{y} = g(x, y) \end{cases},$$

а начальные условия положения БЛА определят искомую траекторию.

Так как при использовании комплексного потенциала течения система принимает вид [10]:

$$(2) \quad \begin{cases} \dot{x} = \mathrm{Re}\left(\dfrac{dW}{dz}\right) \\ \dot{y} = -\mathrm{Im}\left(\dfrac{dW}{dz}\right) \end{cases},$$

то, следовательно, в данном случае задача сводится к нахождению комплексного потенциала обтекания N произвольно расположенных прямоугольников плоским потоком идеальной жидкости.

Воспользовавшись теоремой Кристоффеля-Шварца о конформном отображении круга единичного радиуса на внутренность конечного n-угольника (при n=4), получаем комплексный потенциал обтекания квадрата с центром в начале координат:

$$(3)\quad W(z) = C\int_0^{\frac{1}{z}} \frac{1}{\sqrt{1+t^4}}\,dt,$$

где C – некоторая комплексная константа.

Чтобы учесть произвольность соотношения длин сторон и угла поворота диагонали, в (3) необходимо добавить соответствующие параметры:

$$\alpha = \begin{cases} \dfrac{2}{\pi}\arccos\dfrac{Y}{\sqrt{(Y-X)^2+Y^2}}, & Y \ge X, \\ -\dfrac{2}{\pi}\arccos\dfrac{X}{\sqrt{(X-Y)^2+X^2}}, & Y < X, \end{cases}$$ – угол, отвечающий за изменение соотношения сторон прямоугольника (X – длина, Y – высота прямоугольника);

φ – угол поворота прямоугольника вокруг оси Ox.

Тогда выражение для комплексного потенциала обтекания N произвольно расположенных прямоугольников в общем случае примет вид:

$$(4)\quad W(z) = V\sum_{j=1}^{N}\int_0^{w\left(\frac{z-z_{0j}}{C_j}\right)} \frac{e^{i\phi\frac{\pi}{180}}}{\sqrt{\left(1-0.8ie^{i\alpha\pi\xi^2}\right)\left(1+0.8ie^{-i\pi\alpha\xi^2}\right)}}\,d\xi + \bar{V}z,$$

где V и $\bar{V}$ – скорость БЛА (до и после облета рельефа) и его сопряженная скорость, соответственно; $w(z) = \dfrac{e^{-i\phi\frac{\pi}{180}}}{z}$, $z_{0j} = x_{0j} + iy_{0j}$ (x_{0j}, y_{0j} – смещение центра j-ого прямоугольника относительно начала координат), $C_j = \dfrac{1}{2}\sqrt{X_j^2 + Y_j^2}$.

Для получения опорной траектории огибания рельефа в вертикальной плоскости необходимо дополнительно воспользоваться методом изображений (методом зеркальных отображений), который позволит строить решения только в верхней координатной полуплоскости.

В общем случае полученный алгоритм целесообразно применять следующим образом. Построить горизонтальное сечение рельефа застройки, соответствующее требуемой высоте полета (либо вертикальное сечение, соответствующее требуемому курсу), выбрать систему координат XOY, центр которой совпадает с начальным положением БЛА, а ось OX сонаправлена с его вектором скорости, в построенной системе координат приближенно описать прямоугольниками замкнутые кривые в полученном сечении рельефа, параметры прямоугольников занести в память ЭВМ. Далее, используя полученные выражения, строится желаемая траектория для начальных условий $x(0) = 0$ и $y(0) = 0$.

Для примера на рисунке 1 показана искомая траектория движения БЛА в горизонтальной плоскости для случая пяти прямоугольников с заданными центрами, длинами сторон и углами поворота.

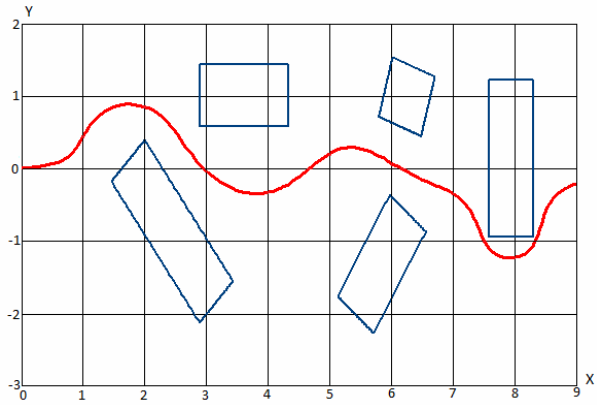


Рисунок 1 – Вариант траектории полета БЛА в горизонтальной плоскости

На рисунке 2 показана траектория движения БЛА в вертикальной плоскости для случая четырех прямоугольников с заданными центрами и длинами сторон.

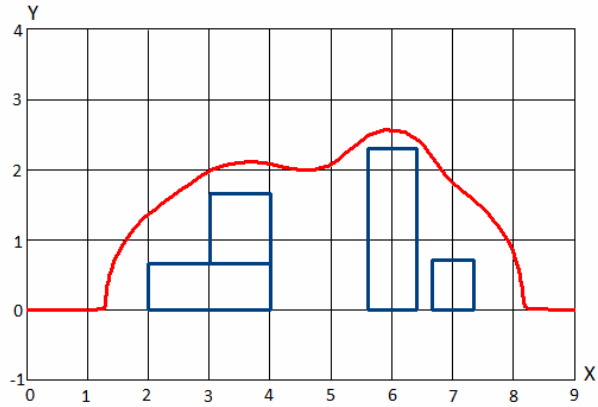


Рисунок 2 – Вариант траектории полета БЛА в вертикальной плоскости

Таким образом, разработан алгоритм получения множества опорных траекторий полета БЛА для совершения маловысотного полета над местностью с типичной городской застройкой с возможностью выполнения маневров либо в горизонтальной плоскости с сохранением высоты, либо в вертикальной плоскости с сохранением курса, а начальные условия (координаты положения БЛА в соответствующей плоскости) позволяют определить искомую опорную траекторию.

Очевидно, что полученная таким образом опорная траектория не является оптимальной для конкретных условий применения. В большинстве случаев она изменяется, если учитывать ограничения, налагаемые использованием конкретного вида БЛА. Это могут быть ограничения, связанные с перегрузками, допустимыми углами крена, конструкцией органов управления. Кроме того, существенное влияние может оказать устройство системы автоматического управления БЛА.

Заключение

В работе предложен довольно простой и эффективный способ формирования опорной траектории полета летательных аппаратов при выполнении МВП в режиме огибания рельефа

местности с типичной городской застройкой в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В основе указанного способа лежит метод конформных отображений плоских потенциальных потоков.

Список литературы

[1] Авиационные системы радиоуправления. Т. 3. Системы командного радиоуправления. Автономные и комбинированные системы наведения самонаведения / А. И. Канащенков, В. И. Меркулов, [и др.]. М.: Радиотехника, 2004.

[2] Верба В.С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Состояние и тенденции развития. М.: Радиотехника. 2008.

[3] Patsko S, Botkin N.D., Turova V.I., Zarku M.A. Control of Aircraft Landing in Windshear // Journal of Optimization Theory and Applications. Vol. 83, Nov 1994.

[4] Брюсов С.В. Метод оптимизации пространственной траектории полета в режиме огибания рельефа местности. // Авиакосмическое приборостроение. 2006. №2. С. 47-50.

[5] Никифорова Л.Н., Яковлев К.С. Маловысотный полет вертолета и проблемы его автоматизации // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. №3. С. 42-48.

[6] Кирсанов А.П., Сузанский Д.Н. Способ траекторного управления летательным аппаратом в горизонтальной плоскости при облете им неподвижной опасной зоны // Радиотехника. 2013. №1. С. 73-76.

[7] Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1965, 716 с.

[8] Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Учебник. Ч. I. М., Физматгиз, 1963, 727с.

[9] Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Учебное пособие. Изд. 2-е. М., Физматгиз, 1959, 784с.

[10] Сузанский Д.Н., Попов В.Ю. Способ построения опорной траектории движения сложной системы // Труды XV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. С. 543-547.

АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ЛОГИЧЕСКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

Б.Г. Ильясова, Г.А. Саитова, И.И. Сабитов

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, Россия
ilyasov@tc.ugatu.ac.ru, saitova@bk.ru, iskra1990@gmail.com
тел: +7 (347) 273-79-27, факс: +7 (347) 272-29-18

Ключевые слова: *многосвязная система, нелинейный закон управления, многомерный логический регулятор, логический закон управления*

Abstract
The article analyzes the possibility and efficiency of using the logical control algorithms for correction the dynamics of movement in nonlinear multivariable automatic control system of complicated dynamic object

Введение

Современные исследуемые многосвязные системы автоматического управления (МСАУ) сложными динамическими объектами (СДО) разнообразной физической природы представляют собой комплекс различных подсистем, взаимосвязанных и взаимодействующих друг с другом [1]. Примерами таких систем являются МСАУ газотурбинным двигателем, энергетическим комплексом и так далее.

Наличие нелинейностей существенно затрудняет проектирование МСАУ любыми техническими объектами независимо от их физической природы. В нелинейных системах возможны случаи возникновения автоколебаний, что, если это не предусмотрено техническим заданием, может резко снизить надежность системы и вывести из строя отдельные блоки, создавая тем самым аварийную ситуацию. При проектирование нелинейных МСАУ необходимо учитывать возможность появления автоколебаний и уметь рассчитывать параметры системы таким образом, чтобы исключить их появление [2]. Поэтому синтез нелинейных МСАУ СДО является актуальной теоретической и прикладной задачей. Для её решения в данной статье проводится анализ возможности и эффективности использования логических законов управления для коррекции динамики движения в нелинейной МСАУ СДО.

1 Постановка задачи

Рассмотрим гомогенную многосвязную систему автоматического управления (рисунок 1), которая описывается следующей системой уравнений:

$$(1)\qquad \begin{cases} \mathbf{Y}(t) = \mathbf{U}(t)\mathbf{W}_{OV}(s), \\ \mathbf{U}(t) = \mathbf{R}(t)\mathbf{W}_{РЕГ}(s), \\ \mathbf{R}(t) = \left[\mathbf{G}(t) - \mathbf{Y}(t)\right]\left(\mathbf{f}_{НЗУ}(s) + \mathbf{f}_{ЛЗУ}(s)\right), \end{cases}$$

где $\mathbf{G}(t)$, $\mathbf{Y}(t)$ – соответственно векторы задающих и управляемых координат, $\mathbf{U}(t)$ – вектор линейной координаты управления, $\mathbf{R}(t)$ – вектор нелинейной координаты управления, $\mathbf{W}_{ОУ}(s)$ – (n x n)-матричная передаточная функция объекта управления, $\mathbf{W}_{РЕГ}(s)$ – (n x n)-матричная передаточная функция линейного регулятора, $\mathbf{f}_{НЗУ}(s)$ – нелинейный закон управления, $\mathbf{f}_{ЛЗУ}(s)$ – логический закон управления.

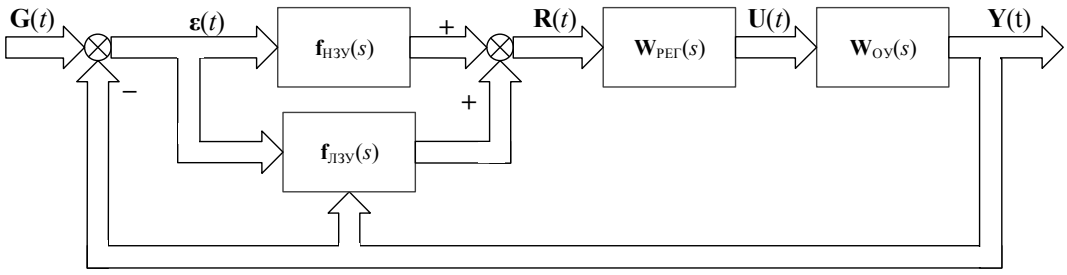


Рисунок 1 – Структурная схема исследуемой нелинейной МСАУ СДО с логическими законами управления

В качестве логических законов управления рассматривается многомерный логический закон

$$\varepsilon_i^0 = \varepsilon_i^*(t) + \overline{\varepsilon_i}(t), \quad i = 1,...,n, \tag{2}$$

где $\varepsilon_i(t)$–ошибка управления собственной i-й сепаратной подсистемой, $\varepsilon_i^*(t)$ – корректирующий логический сигнал для i-й сепаратной подсистемой, $\overline{\varepsilon_i}(t)$ – координирующий логический сигнал для i-й сепаратной подсистемой, состоящий из логического закона управления сепаратной подсистемой [1], формирующего корректирующий логический сигнал

$$\varepsilon_i^*(t) = \begin{cases} 0 & при \quad (\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) \le 0) \wedge (\varepsilon_i(t)(\varepsilon_i(t) + \tau_p \varepsilon_i'(t)) \ge 0), \\ \tau_p \varepsilon_i'(t) & при \quad (\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) \le 0) \wedge (\varepsilon_i(t)(\varepsilon_i(t) + \tau_p \varepsilon_i'(t)) < 0), \\ k_p \varepsilon_i(t) & при \quad \varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) \le 0, \end{cases} \tag{3}$$

где $\varepsilon_i'(t)$ – скорость изменения ошибки управления, k_p – коэффициент усиления, зависящий от быстродействия объекта управления, τ_p – постоянная времени, зависящая от инерционности объекта управления, на основе анализа текущего состояния и динамики движения собственной подсистемы, и логического закона управления связями [2], формирующего координирующий логический сигнал

$$\overline{\varepsilon_i}(t) = \begin{cases} -\alpha y_i'(t) & при \quad (y_i'(t)y'(t) \ge 0) \wedge (y_i'(t)(y_i'(t) - y'(t)) < 0), \\ -\alpha y'(t) & при \quad (y_i'(t)y'(t) \ge 0) \wedge (y_i'(t)(y_i'(t) - y'(t)) \ge 0), \\ \alpha y'(t) & при \quad y_i'(t)y'(t) < 0, \end{cases} \tag{4}$$

где $y_i'(t)$ – динамика движения собственной i-й (i=1,…,n) сепаратной подсистемы, $y_i'(t)$ – динамика движения j-й (j=1,…,n, $j \neq i$) сепаратной подсистемы, $y'(t)$ – максимальная динамика среди $y_j'(t)$, α – параметр, характеризующий силу формируемой связи, на основе анализа влияния перекрестных связей на динамику движения многосвязного объекта в целом.

Идентичные нелинейности находятся только в прямых каналах связи, а перекрестные связи между подсистемами голономные. Нелинейности представляют собой однозначные статические характеристики произвольного вида, представленные на рисунке 2.

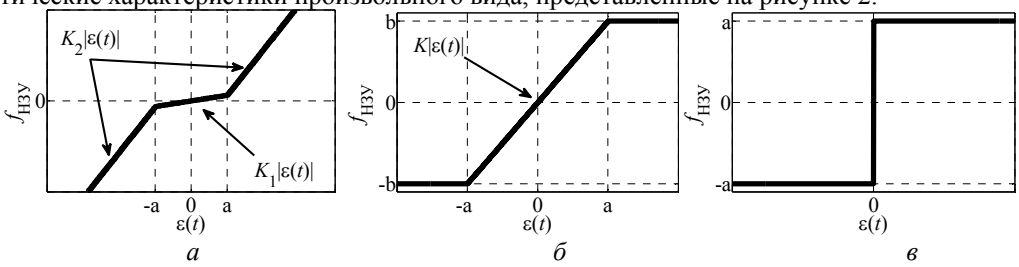


Рисунок 2 –Нелинейные звенья, имеющие характеристики: *а* – с переменным коэффициентом усиления; *б* – с насыщением; *в* – идеально реле

Рассмотрим следующую задачу в рамках данной статьи: исследование качества функционирования нелинейной МСАУ СДО с многомерными логическими законами управления в сепаратных подсистемах.

2 Исследование нелинейной МСАУ СДО с многомерными логическими регуляторами

В соответствии с (1), определим матричные передаточные функции структурных элементов исследуемой МСАУ СДО.

В качестве многосвязного объекта управления рассмотрим колебательное звено второго порядка, описывающееся следующей матричной передаточной функцией (МПФ):

$$\mathbf{W}_{OY}(s) = \frac{1}{T_{OY}^2 s + 2\xi T_{OY} s + 1}\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $T_{\text{ОУ}}$ – постоянная времени объекта управления, $\xi_{\text{ОУ}}$ – коэффициент демпфирования, K_{ij} – коэффициент передачи из j-й сепаратной подсистемы в i-ю сепаратную подсистему.

На расчетном режиме параметры многосвязного объекта управления принимают следующие значения: $T_{\text{ОУ}} = 0{,}5$, $\xi_{\text{ОУ}} = 0{,}75$, $K_{11} = K_{22} = K_{33} = 1$, $K_{12} = -0{,}6$, $K_{13} = -0{,}3$, $K_{21} = 0{,}4$, $K_{23} = 0{,}7$, $K_{31} = = 0{,}5$, $K_{32} = -0{,}2$.

В качестве линейного регулятора рассмотрим изодромное звено с фильтром:

$$\mathbf{W}_{PEГ}(s) = \frac{\tau_{PEГ} s + 1}{(T_{\Phi} s + 1)s}\begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где T_{Φ} – постоянная фильтра ($T_{\Phi} = 0{,}05$), $\tau_{\text{РЕГ}}$ – постоянная форсирования изодромного звена, K_{ii} – коэффициент усиления изодромного звена в i-й сепаратной подсистеме. На расчетном режиме параметры изодромного звена принимают следующие значения: $\tau_{\text{РЕГ}} = 0{,}5$, $K_{11} = 3$, $K_{22} = 2$, $K_{33} = 1$.

Проведем анализ влияния первой нелинейности, представленной на рисунке 2*а*, на качество функционирования исследуемой МСАУ СДО с логическими законами управления и без. На рисунке 3 представлены графики переходных процессов в исследуемой нелинейной МСАУ СДО без логических законов управления (рисунок 3*а*) и с логическими законами управления (рисунок 3*б*) при следующих параметрах $\mathbf{f}_{\text{НЗУ}}$ ($a = 0{,}25$, $K_1 = 0{,}25$, $K_2 = 1{,}5$) и $\mathbf{f}_{\text{ЛЗУ}}$ ($\tau_{\text{р}} = 0{,}75$, $K_{\text{р}} = 1$, $\alpha = 0{,}5$).

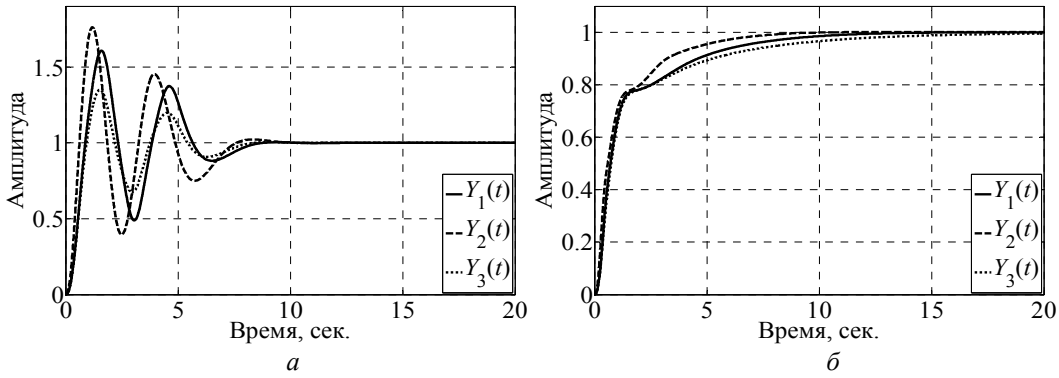


Рисунок 3 – Графики переходных процессов в исследуемой нелинейной МСАУ СДО:
а – без логических законов управления, б – с логическими законами управления

Проведем анализ влияния нелинейности, представленной на рисунке 2*б*, на качество функционирования исследуемой МСАУ СДО с логическими законами управления. На рисунке 4 представлены графики переходных процессов в исследуемой нелинейной МСАУ СДО без логических законов управления (рисунок 4*а*) и с логическими законами управления (рисунок 4*б*) при следующих параметрах $\mathbf{f}_{\text{НЗУ}}$ ($a = 1$, $b = 2$, $K = 2$) и $\mathbf{f}_{\text{ЛЗУ}}$ ($\tau_{\text{р}} = 0{,}75$, $K_{\text{р}} = 1{,}\alpha = 0{,}5$).

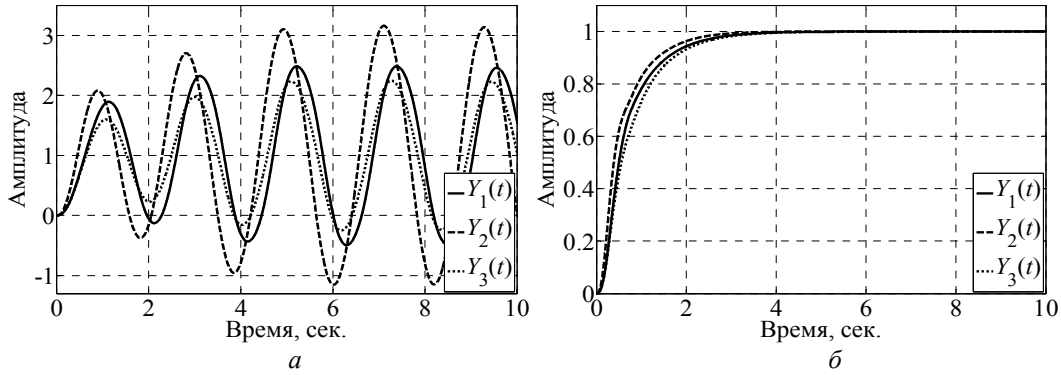


Рисунок 4 – Графики переходных процессов в исследуемой нелинейной МСАУ СДО:
а – без логических законов управления, б – с логическими законами управления

Введение нелинейных элементов в подсистемы существенно ухудшило качество переходных процессов (рис. 3*а*, 4*а*). Однако в системе с предложенным логическим регулятором качество переходных процессов значительно лучше, чем в системе без него. Введение логического регулятора заметно улучшает качество функционирования многосвязной системы, стабилизирует и координирует все сепаратные подсистемы.

Проведем анализ влияния нелинейности, представленной на рисунке 2*в*, на качество функционирования исследуемой МСАУ СДО с логическими законами управления. На рисунке 5 представлены графики переходных процессов в исследуемой нелинейной МСАУ СДО без логических законов управления (рисунок 5*а*) и с логическими законами управления (рисунок 5*б*) при следующих параметрах $\mathbf{f}_{\text{НЗУ}}$ ($a = 1$) и $\mathbf{f}_{\text{ЛЗУ}}$ ($\tau_{\text{р}} = 0{,}75$, $K_{\text{р}} = 1$, $\alpha = 0{,}5$).

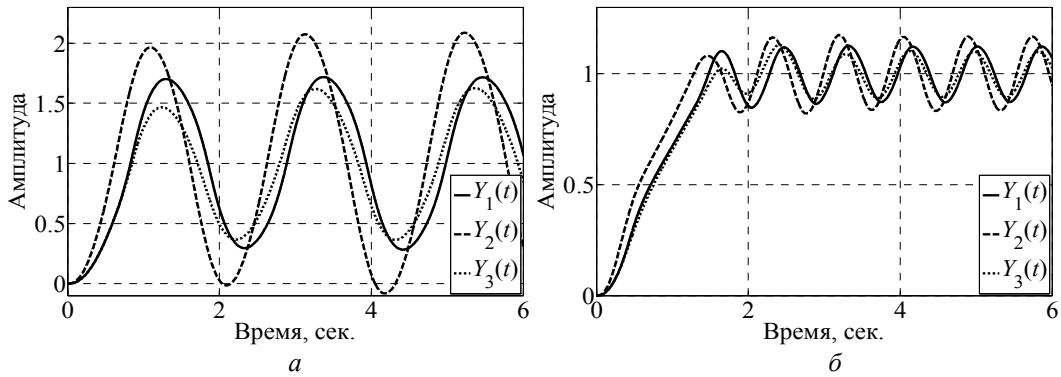


Рисунок 5 – Графики переходных процессов в исследуемой нелинейной МСАУ СДО:
а – без логических законов управления, *б* – с логическими законами управления

Видно, что в исследуемой системе без логического регулятора наблюдается автоколебание (рис. 5*а*). Введение логического регулятора заметно улучшает качество сепаратных под-

систем, хотя и не избавляет от автоколебаний. Амплитуда колебаний уменьшается, частота увеличивается.

Также можно отметить, что представляя формируемый логический сигнал (2) в виде

$$\varepsilon_i^0 = k\left(\varepsilon_i^*(t) + \overline{\varepsilon_i}(t)\right), \quad i = 1,...,n, \tag{7}$$

можно, путем изменения коэффициента усиления k, существенно скорректировать амплитуду и частоту автоколебаний без изменения самой нелинейности $\mathbf{f}_{\text{НЗУ}}$. На рисунке 6 представлены графики переходных процессов в исследуемой нелинейной МСАУ СДО с логическими законами управления $\mathbf{f}_{\text{ЛЗУ}}$ ($\tau_p = 0{,}75$, $K_p = 1$, $\alpha = 0{,}5$) при различных значениях параметра k.

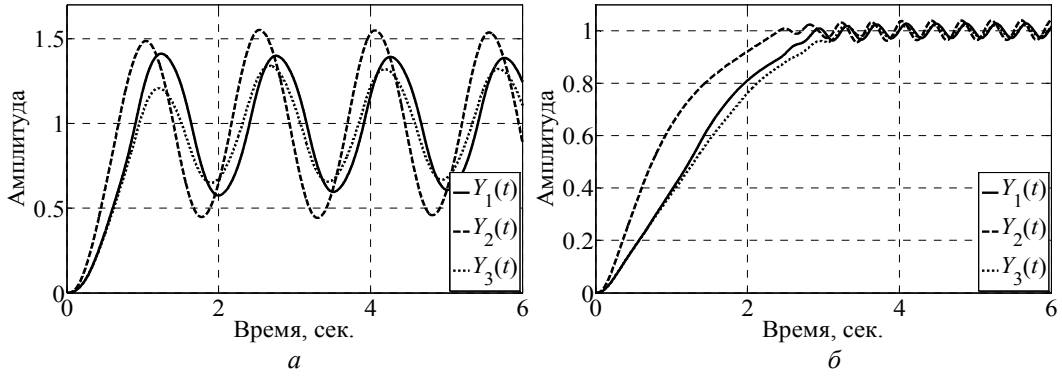


Рисунок 6 – Графики переходных процессов в исследуемой нелинейной МСАУ СДО с логическими законами управления: а – при k = 0,25, б – при k = 4

На данном примере видно, что с увеличением коэффициента усиления k амплитуда автоколебаний уменьшается, а частота – увеличивается.

По результатам имитационного моделирования установлено, что внедрение логических законов управления в нелинейные МСАУ СДО заметно улучшает качество функционирования всей многосвязной системы, а также корректирует и согласовывает динамику движения всех сепаратных подсистем.

Заключение

Проведен анализ качества функционирования нелинейной многосвязной системы автоматического управления сложным динамическим объектом с логическими законами управления в сепаратных подсистемах.

Установлено, что рассматриваемый многомерный логический регулятор корректирует и согласовывает динамику движения каждой сепаратной подсистемы и существенно улучшается качество переходных процессов при различных видах нелинейных элементов, что приводит к значительному улучшению качества функционирования многосвязной системы автоматического управления в целом.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ 14-08-97056 р_поволжье_а, 14-08-01019 А, 15-08-01146 А).

Список литературы

[1] Ильясов Б.Г., Саитова Г.А., Сабитов И.И. Логический закон управления сепаратной подсистемой при структурно-параметрических изменениях многосвязного объекта // Наука и образование. Электрон. журн. 2014. № 11. Режим доступа: http://technomag.edu.ru/doc/739091.html (дата обращения 06.12.2014). – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014 – С. 585-595.

[2] Ильясов Б.Г., Сабитов И.И. Синтез многосвязных систем автоматического управления с логическими связями между подсистемами // Современные проблемы науки и образования. Электрон. журн. 2015. № 1. Режим допуска: http://www.science-education.ru/121-17530 (дата обращения: 27.02.2015).

[3] Ильясов Б.Г., Денисова Е.В., Саитова Г.А. Анализ периодических движений в нелинейных однотипных многосвязных системах автоматического управления (МСАУ) // Мехатроника: Науч.-технич. и производ. журн. М.: Машиностроение, 2001. № 7. С. 29–34.

[4] Оптимизация многомерных систем управления газотурбинных двигателей летательных аппаратов / А.А. Шевяков, Т.С. Мартьянова, В.Ю.Рутковский и др.: Под общей ред. А.А.Шевякова и Т.О. Мартьяновой. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ СИСТЕМ КЛАССА ВИНЕРА

Н.В. Коплярова[1]

[1]Сибирский Федеральный университет
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79
тел: +7 (913) 170-56-62

Ключевые слова: *непараметрическая оценка, нелинейная динамика, модель Винера, априорная информация, непараметрическая идентификация*

Abstract
The problem of nonlinear dynamical systems identification of Wiener type is considered. The linear dynamical part of the system is in nonparametric uncertainty conditions. The common type of nonlinearity is assumed to be known with set of parameters. Presented algorithm allows to create the adequate in the sense of mean-square criterion models**.**

Введение

Существующая ныне теория автоматического управления в основном относится к разряду параметрических. То есть к случаю, когда вид уравнения, описывающего объект (процесс) задан с точностью, описываемой до вектора параметров. Но зачастую априорной информации недостаточно, чтобы определить структуру исследуемого процесса. Это обстоятельство делает актуальным настоящее исследование в связи с тем, что для определения порядка уравнения, описывающего процесс, необходимо дополнительно проводить цикл исследований, связанных с идентификацией в «узком смысле». Это направление в настоящее время достаточно интенсивно развивается [1].

Рассматривается задача идентификации нелинейных динамических систем класса Винера в случае, когда априорная информация соответствует уровню частичной непараметрической неопределенности. В данных условиях предлагается использовать непараметрические модели. Большое число нелинейных систем можно представить в виде блока с последовательным включением нелинейного элемента и линейной части.

1 Постановка задачи идентификации

В общем виде задача идентификации нелинейной динамической системы может быть описана схемой, представленной на рисунке 1:

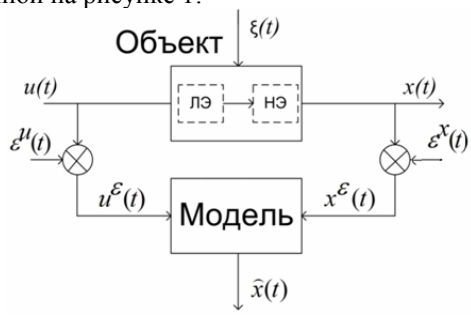


Рисунок 1 – Общая схема задачи идентификации

где Объект – нелинейная динамическая система, состоящая из ЛЭ – линейной динамической и НЭ – нелинейной статической частей, ИУ – измерительное устройство, *u(t)* - входная переменная объекта, *x(t)* - выходная переменная, $u_t^{\varepsilon}, x_t^{\varepsilon}$ - соответствующие наблюдения переменных процесса в дискретный момент времени, которые из соображения простоты далее будем обозначать *{u_i,x_i, t=1,s}*, *ξ(t)* - ненаблюдаемое случайное воздействие, $\varepsilon^u(t), \varepsilon^x(t)$ - случайные факторы (помехи), действующие в каналах измерения переменных в дискретные моменты времени *t*, такие что $M\{\varepsilon\} = 0,\ D\{\varepsilon\} < \infty$, $\tilde{x}(t)$ - выход модели объекта, *w(t)* - выходная переменная нелинейного элемента системы.

Исходные данные о состоянии исследуемого объекта составляют выборку измерений реакции объекта на входное воздействие *u(t)*: $\{u_i, x_i, i = \overline{1,s}\}$. Параметры и порядок дифференциального уравнения, которым может быть описана линейная динамическая часть системы, неизвестны. Пусть нелинейность в объекте описывается некоторой функцией, вид которой предполагается известным с точностью до набора параметров.

Исследователь имеет возможность проведения эксперимента, то есть может подавать на вход исследуемого объекта некоторые воздействия и измерять его реакцию на них. Требуется по наблюдаемым «входным – выходным» переменным процесса построить математическую модель стохастического объекта, с помощью которой можно получать прогноз его поведения в различных условиях (при произвольном входном воздействии и наличии помех), который будет достаточно удовлетворительным с практической точки зрения. Задача идентификации нелинейной системы в описанной постановке может быть разделена на два этапа. На первом этапе предлагается оценить параметры нелинейного звена и переходной характеристики линейного динамического элемента, а на втором – построить требуемую математическую модель исследуемого объекта. Сначала рассмотрим задачу идентификации линейного элемента.

2 Идентификация линейной динамической системы

Непараметрическая модель линейного динамического объекта строится на основании переходных характеристик. На вход объекта подается функция Хевисайда u(t)=1(t), а на выходе наблюдаем его переходную функцию *x(t) = h(t)*. По наблюдениям *{u_i, x_i, i=1,s}* требуется построить непараметрическую модель линейной динамической системы, порядок которой неизвестен. Непараметрическая модель линейной динамической системы (ЛДС) конструируется на основе оценки интеграла Дюамеля. В этом случае зависимость реакции динамической системы *w(t)* на входное воздействие *u(t)* при нулевых начальных условиях описывается интегралом свертки [2]:

$$(1) \quad w(t) = \int_0^t h'(t-\tau)u(\tau)d\tau = \int_0^t k(t-\tau)u(\tau)d\tau,$$

где *h(t)*-переходная характеристика системы, *k(t)*-весовая (импульсная переходная) функция этой же системы, τ - переменная интегрирования.

Вычисление значения выхода объекта $w(t)$ при этом возможно, если известна его весовая функция *k(t)*. Однако в реальных системах «снятие» весовой функции объекта представляется невозможным, в связи с чем требуется специальный прием, изложенный ниже. Основная идея идентификации ЛДС в условиях непараметрической неопределенности[1] состоит в непараметрическом оценивании весовой функции системы. Подав на вход системы воздействие в виде функции Хевисайда, получим значения ее переходной функции в дискретные моменты времени t_i, i =1,s. Тогда оценку переходной функцию системы можно записать в виде стохастической аппроксимации регрессии непараметрического типа следующим образом[1]:

(2) $$h_s(t) = \frac{1}{sc_s} \cdot \sum_{i=1}^{s} h_i H\left(\frac{t - t_i}{c_s}\right),$$

где $\{ h_i = x_i / u(t)=1,\ i=1,s\}$ - экспериментально полученные значения переходной характеристики ЛДС, то есть сигнал, получаемый на выходе системы при подаче на ее вход единичного ступенчатого воздействия $u(t)=1(t)$ при нулевых начальных условиях. При этом в выражении (2) колоколообразная функция $H(\cdot)$ и параметр размытости c_s должны удовлетворять следующим условиям сходимости[5]:

(3) $$c_s > 0;\ \lim_{s\to\infty} c_s = 0;\ \lim_{s\to\infty} sc_s = \infty\ ,$$

(4) $$\int_{\Omega(u)} H'(u)du = 0 \qquad\qquad c_s \int_{\Omega(u)} H'(u)udu = -1$$

$$\lim_{s\to\infty} c_s^{-1} H\left(\frac{\tau - t}{c_s}\right) = \delta(\tau - t), u = \frac{\tau - t}{c_s}\ .$$

Известно, что весовая функция $k(t)$ определяется соотношением $k(t) = dh(t)/dt$. Тогда непараметрическая оценка весовой функции примет следующий вид:

(5) $$k_s(t) = h_s'(t) = \frac{1}{sc_s} \cdot \sum_{i=1}^{s} h_i H'\left(\frac{t - t_i}{c_s}\right).$$

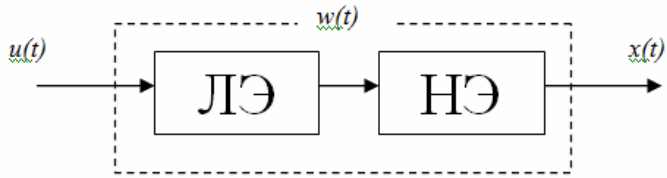
Подставив оценку весовой функции в интеграл Дюамеля, получим непараметрическую модель ЛДС. После чего, заменив интеграл его дискретным аналогом, получим непараметрическую расчетную модель линейного динамического элемента системы[2]:

(6) $$\hat{w}_s(t) = \frac{1}{sc_s} \cdot \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta\tau} h_i H'\left(\frac{t - \tau_j - t_i}{c_s}\right) u(\tau_j)\Delta\tau\ ,$$

где τ - переменная интегрирования, $\Delta\tau$ - шаг дискретизации. Далее рассмотрим алгоритм идентификации нелинейной системы.

3 Идентификация системы типа Винера

Рассмотрим систему, поведение которой может быть описано с помощью модели Винера (Рисунок 2).



ЛЭ – линейная динамическая часть, НЭ - нелинейный элемент системы, u(t) – входное воздействие, w(t) – выход промежуточного звена объекта, x(t) – выход объекта

Рисунок 2 - Модель Гаммерштейна

Выход линейного динамического блока объекта $w(t)$ измерению недоступен. Пусть параметризованная структура дифференциального (разностного) уравнения, описывающего ЛЭ не известна, а вид нелинейной функции НЭ известен с точностью до набора параметров.

Согласно рисунку 2 связь между входом *u(t)* и выходом *x(t)* объекта при нулевых начальных условиях может быть описана системой уравнений вида:[4]

$$w(t) = \int_0^t k(t-\tau)w(\tau)d\tau,$$

$$x(t) = f(u(t), \alpha), \quad (7)$$

Или, если исключить переменную $w(t)$ в соответствии с (7), получим:

$$x(t) = f\left(\int_0^t k(t-\tau)u(\tau)d\tau, \alpha\right), \quad (8)$$

где *k(t)* – весовая функция линейного динамического блока; $f(u,\alpha)$ - нелинейная функция, заданная с точностью до вектора неизвестных параметров α. Таким образом, задача сводится к оценке переходной функции ЛЭ *h(t)* и параметров α НЭ. Тогда для построения модели возможно вместо $h(t)$ и α использовать их статистические оценки, полученные на основании наблюдений входа и выхода нелинейной системы $u(t_i) = 1(t_i), x(t_i), i = \overline{1,s}.$ Однако в соответствии с (7), оценки требуемых параметров могут быть получены, если бы имелась выборка значений выхода ЛЭ системы при единичном входном воздействии $w_i, i = \overline{1,s}$. Таким образом, в связи с тем, что *w(t)* неизмеряемо, необходимо при тех же условиях эксперимента, в которых были получены реализации $u(t_i) = 1(t_i), x(t_i), i = \overline{1,s}$, сформировать выборку $w_i, i = \overline{1,s}$. Затем, минимизируя среднеквадратичный критерий

$$\sum_{j=1}^{s}(x_j - \hat{x}_j)^2 \to \min_{\alpha,\omega} \quad (9)$$

можно найти оценки α и ω_1, $i = \overline{1,m}$.

Пусть, например, для некоторых классов нелинейных элементов $f(u,\alpha)$ может быть разрешена относительно $\omega(t)$, т.е.

$$\omega_1(t) = f^{-1}(x(t), \alpha), \quad (10)$$

где $\omega_1(t)$ - оценка переходной функции ЛЭ, полученная по выборке выхода объекта $u(t_i) = 1(t_i), x(t_i), i = \overline{1,s}.$ Получим непараметрическую линейного элемента:

$$\omega_s(t) = \frac{1}{sc_s} \cdot \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta\tau} \omega_1(t_i) \cdot H'\left(\frac{t-\tau_j-t_i}{c_s}\right) u(\tau_j)\Delta\tau, \quad (11)$$

где τ - переменная интегрирования, Δt - шаг дискретизации.

Тогда непараметрическая модель динамического объекта класса Винера примет вид:

$$x_s(t) = \hat{f}\left(\frac{1}{sc_s} \cdot \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta\tau} \omega_{s\,i} H'\left(\frac{t-\tau_j-t_i}{c_s}\right) u(\tau_j)\Delta\tau, \hat{a}\right) \quad (12)$$

где *f{w(t),α}* – оценка нелинейной функции, $\hat{\alpha}$ – оценки параметров нелинейного элемента системы, ω_s – оценка переходной функции линейного элемента системы. Далее приводится алгоритм моделирования при НЭ в виде квадратора.

4 Непараметрическая модель системы с квадратором

Пусть имеем систему, представленную в виде модели Винера (Рисунок 2). Причем нелинейная часть системы представляет собой квадратор, описываемый функцией вида: $f(p) = ap^2$, где *a*=const. Тогда выход исследуемого объекта вычисляется следующим образом: $x(t) = f(w,a) = aw^2$. Отметим еще раз, что значения $\omega(t)$ являются недоступными для измерения исследователем.

Обозначим переходную характеристику линейного элемента системы как: $w(t, u(t) = 1(t)) = h(t)$. При этом выход нелинейной системы равен $x_1(t) = ah^2(t)$, то есть переходную характеристику линейного элемента *h(t)* можно выразить через выход исследуемого нелинейного процесса следующим образом:

(13) $\hat{k}(t) = \sqrt{x_1(t)/a}$.

При произвольном входном воздействии и нулевых начальных условиях выход линейной части системы описывается выражением:

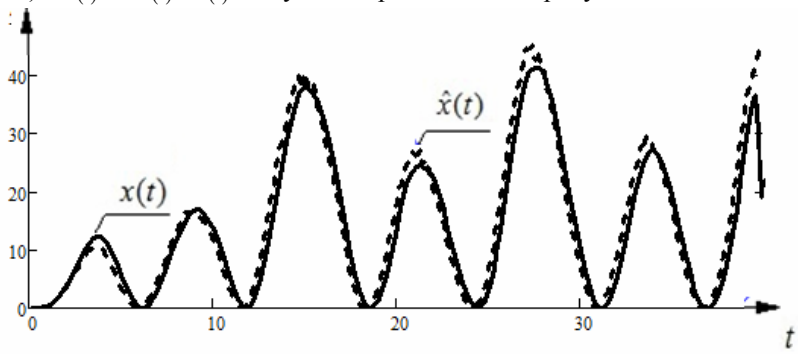
(14) $w_s(t) = \frac{1}{sc_s}\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta t} k(t_i)\cdot H'\left(\frac{t-\tau_j-t_i}{c_s}\right)u(\tau_j)\Delta\tau.$

Непараметрическая модель нелинейного объекта *x(t)* тогда примет вид:

(15)
$$x_s(t) = a\left[\frac{1}{sc_s}\frac{1}{\sqrt{a}}\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta t}\sqrt{x_1(t_i)}\cdot H'\left(\frac{t-\tau_j-t_i}{c_s}\right)u(\tau_j)\Delta\tau\right]^2 =$$
$$= \left[\frac{1}{sc_s}\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta t}\sqrt{a\cdot k_s^2(t_i)}\cdot H'\left(\frac{t-\tau_j-t_i}{c_s}\right)u(\tau_j)\Delta\tau\right]^2,$$

где $x_1(t_i)$ – реакция нелинейной системы на единичное входное воздействие, *u(t)* - входное воздействие, *a* - параметр квадратора.

Пример. Рассмотрим нелинейную динамическую систему Винера, состоящую из квадратора с параметром *a*=2 и разностного аналога дифференциального уравнения (имитирующего объект): $3\cdot x''(t)+1{,}2\cdot x'(t)+1\cdot x(t)=u(t)$. Результат представлен на рисунке 3.



xmodel(t) - модель нелинейной системы, объем выборки s=300, Δt=0.117, помеха 5%, *u(t)=3cos(0.5t)+sin²(0.7t)*, относительная ошибка моделирования 2.8%

Рисунок 3 - Результат оценки выхода *x*(*t*)

Как видно из вычислительного эксперимента моделирования нелинейного динамического объекта с видом нелинейности типа квадратор, непараметрическая модель достаточно точно

описывает систему при различных значениях параметров нелинейной части объекта, в условиях зашумленности каналов связи, при различных входных воздействиях.

Заключение

Настоящий доклад посвящен рассмотрению задачи непараметрической идентификации нелинейных динамических систем, представленных в виде модели Винера. Исследуется случай, когда задача идентификации ставится в условиях как параметрической, так и непараметрической неопределенности. При этом структура линейного динамического блока неизвестна, а вид нелинейности предполагается известным с точностью до параметров. Задача идентификации нелинейной системы рассмотренного типа разделена на две части. Сначала рассматривается непараметрическая идентификация линейного элемента, алгоритм которой связан с тем, что реакция линейной системы на входное воздействие описывается интегралом Дюамеля. Приводятся методика построении моделей для получении прогноза выхода нелинейных систем посредством сочетания моделей линейного динамического и нелинейного статического процессов в общей модели системы. Были проведены вычислительные эксперименты при различной интервале дискретизации и различном уровне помех при измерении «входных-выходных» переменных. В докладе приведен лишь один из них. Полученная непараметрическая модель достаточно точно описывает исследуемые системы.

Список литературы

[1] Медведев А.В. Непараметрические алгоритмы идентификации нелинейных динамических систем. / Стохастические системы управления. Изд-во: Наука. Новосибирск, 1979. – с 15-22.

[2] Чайка С.Н. К идентификации динамических систем при частично параметризованной структуре модели / Динамика систем: Управление и оптимизация. Горький: Изд-во Горьковского гос. ун-та, 1989.

[3] Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. М. «Наука», 1984г. – 320 с.

[4] Попков Ю.С., Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем, - М.: Энергия, 1976г., 440 с.

[5] Надарая Э.А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии / Э.А. Надарая. Тбилиси: Издательство Тбилисского университета, 1983.

СИНТЕЗ ИНВАРИАНТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМОВ ВТОРОГО РОДА ПРИ ВОЗМУЩЕНИЯХ, ЗАВИСЯЩИХ ОТ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ

С.А. Кочетков, Ю.М. Рассадин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65, Россия
kos@ipu.ru, rassadin@ipu.ru
тел: +7 (495) 334-93-21

Ключевые слова: *вихревой алгоритм, скользящий режим второго рода, инвариантность, ограниченные гладкие возмущения*

Abstract

Invariance problem to smooth bounded disturbances is considered. The proposed feedback allows to reduce relay amplitude and to lower control resources for sliding mode control. No homogeneous restrictions were imposed on the differential equation of the closed system. A matching type of disturbances is considered. Motion time estimates were obtained for different initial conditions. Simulation results show the efficiency of proposed approach.

Введение

Существует не так много методов исследования систем со скользящими режимами высших порядков. Большинство из них справедливо только для однородных дифференциальных уравнений, описывающих замкнутую систему управления [1-3]. В частности, если доказана асимптотическая сходимость переменных системы к нулю, то на основе качественной теории дифференциальных уравнений доказывается, что сходимость происходит за конечное время. Требование однородности дифференциальных уравнений ограничивают класс систем и алгоритмов управления, которые могут быть использованы при синтезе.

В статье [4] рассмотрен редкий случай, когда автору удалось подобрать негладкую функцию Ляпунова для доказательства конечно-временной сходимости для одного из алгоритмов скольжения второго рода. В работе [5] предложена модификация метода Зубова В.И. [6] для поиска кандидатов на функцию Ляпунова для некоторых алгоритмов управления на скользящих режимах второго рода. Сложности поиска подходящей функции Ляпунова несколько ослаблены в публикации [7], где предложен альтернативный подход к доказательству конечной сходимости. Основная идея состоит в следующем: при конечной сходимости переменных системы к нулю за конечное время сойдется и любая положительно полуопределенная функция от этих переменных. Доказательство в этом случае можно провести на основе средней скорости затухания для некоторой функции, характеризующей энергию в системе.

На основе теории скользящих режимов второго рода предложен новый класс регуляторов. Существенной новизной предложенного алгоритма является отсутствие ограничений на однородность уравнений замкнутой системы. Приведено доказательство конечной сходимости таких систем в предположении, что выполняются условия согласования, т.е. возмущения действуют только по каналам управления. Для возмущений, зависящих от переменных состояния системы, получены ограничения на амплитуду управляющих воздействий. Использование релейных алгоритмов управления с меньшими амплитудами реле приводит к снижению амплитуды колебаний в установившемся режиме, и, следовательно, повышает точность регулирования выходных переменных.

Работа имеет следующую структуру. В первом разделе приведена постановка задачи. В следующем разделе рассмотрена основная идея синтеза управляющего воздействия и приве-

дено качественное доказательство сходимости за конечное время. В разделе 3 предложен новый класс регуляторов и приведено доказательство конечной сходимости с оценкой времени на основе функции Ляпунова. В разделе 4 приведен численный пример расчета оценок времени переходного процесса. Результаты работы и направления дальнейших исследований обсуждаются в заключении.

1 Постановка задачи

Рассмотрим систему управления вида

$$(1)\quad \begin{aligned} \dot{s}_1 &= s_2, \\ \dot{s}_2 &= \xi(t) + u, \end{aligned}$$

где $s_1, s_2 \in \Re$ – измеряемые переменные состояния, $u \in \Re$ – управляющее воздействие $|\xi(t)| < \Sigma = \text{const} > 0$ – неизвестная функция внешних возмущений и неопределенностей системы, которая полагается ограниченной и дифференцируемой по всем своим аргументам:

$$(2)\quad |\dot{\xi}(t)| \le \overline{\Sigma} = \text{const} > 0, \forall t > 0.$$

Переменные s_1, s_2 доступны измерению.

Ставится задача стабилизации переменных состояния за конечное время $s_1(t) = s_2(t) = 0, \forall t > t_r$ за счет статической обратной связи $u = U(s_1, s_2)$. Закон управления может включать как разрывные, так и непрерывные функции. Предварительно отметим, что константа t_r, зависящая, в том числе, от начальных условий, заранее не задана. Исследуется проблема ее существования и оценивания.

2 Основная идея синтеза управляющих воздействий

Все алгоритмы скольжения второго рода базируются на использовании релейной обратной связи, которая обеспечивает колебательный характер переходного процесса для переменных системы. Добавляя при этом в контур обратной связи некоторый сигнал, осуществляющий диссипацию энергии, можно обеспечить асимптотическую или конечно-временную сходимость переменных системы к нулю.

Используя в системе (1) «вихревой» алгоритм управления вида [8]

$$(3)\quad u = -\alpha s_2 - M\text{sign}(s_1),\ M > \Sigma,\ \alpha(M - \Sigma) > \overline{\Sigma},$$

можно обеспечить асимптотическую сходимость переменных s_1, s_2 к началу координат. Нелинейный осциллятор организуется за счет релейной составляющей $-M\text{sign}(s_1)$, а компонента $-\alpha s_2$ обеспечивает диссипацию энергии колебаний в системе. Согласно поставленной задаче модифицируем алгоритм управления (3) на основе следующих соображений. Известно [9], что дифференциальное уравнение с квадратным корнем $\dot{s} = -\sqrt{|s|}\text{sign}(s)$ обладает свойством конечно-временной сходимости. В разделе 3 получено доказательство сходимости за конечное время системы (1) с управлением [8]:

$$u = -\alpha\sqrt{|s_2|}\text{sign}(s_2) - M\text{sign}(s_1).$$

На основе этого результата в разделе 3 предложен новый класс регуляторов, в которых управление выбирается в форме [8]:

$$\begin{aligned} &u = -\alpha s_2 - \alpha |s_2|^{\beta} \text{sign}(s_2) - M\text{sign}(s_1), \\ &\beta = \text{const} > 0, 0 < \beta < 1, \alpha(M - \Sigma) > \Sigma, \\ &M > \Sigma, \alpha = \text{const} > 0, M = \text{const} > 0. \end{aligned}$$

Управляющие воздействия (4) со степенной функцией с дробным показателем придают системе (1) свойство конечно-временной сходимости к началу координат. Отметим, что данное свойство обеспечивается за счет меньших амплитуд реле по сравнению с алгоритмом «скручивания».

3 Доказательство конечной сходимости с оценками времени

В данном разделе получено доказательство сходимости за конечное время переменных замкнутой системы (1),(4):

$$(4)\quad \begin{aligned} \dot{s}_1 &= s_2, \\ \dot{s}_2 &= -\alpha s_2 - \alpha \,|\, s_2 \,|^{\beta} \operatorname{sign}(s_2) - M\operatorname{sign}(s_1) + \xi(t) \end{aligned}$$

При одинаковых начальных условиях, фазовые портреты систем (5) и системы сравнения

$$(5)\quad \begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2, \\ \dot{y}_2 &= -f(y_2) - M\operatorname{sign}(y_1) + \xi(t), \end{aligned}$$

при условии выполнения неравенств $f(y_2) > 0, \forall y_2 > 0$ $f'(y_2) > 0, \forall y_2 > 0$ $f(0) = 0$, имеют вид, показанный на рис.1, где кривая *a* соответствует фазовому портрету системы (5), кривая *b* – портрету (6). Эти рассуждения справедливы в пространстве, а не во времени, поэтому они будут использованы для получения оценок времени переходного процесса для системы (5) и для доказательства сходимости за конечное время ее переменных $s_1(t), s_2(t)$.

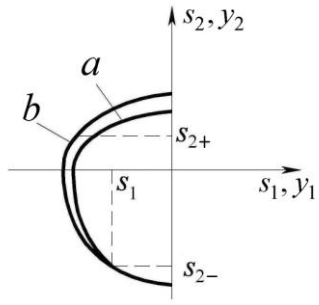


Рисунок 1 – Фазовые портреты систем (5) и (6).

Разобьем весь переходный процесс для переменных системы (5) на три этапа:

1) этап попадания в область $|\, s_2(t) \,| \le \varepsilon_1 = \dfrac{M + \Sigma}{\alpha}$;

2) движение системы в области $\varepsilon_2 \le |\, s_2(t) \,| \le \dfrac{M + \Sigma}{\alpha}$;

где ε_2 – некоторая положительная константа, которая будет указана ниже;

3) движение в области $|\, s_2(t) \,| \le \varepsilon_2$ за конечное время к нулю.

Рассмотрим последовательно указанные этапы и найдем оценки времени нахождения переменной в каждой из областей. Предварительно введем следующие обозначения:

1) t_0 – начальный момент времени;
2) t_1 – момент времени, при котором $s_1(t_1) = 0$;
3) $t_1^{'}$ – момент времени, при котором $s_2(t_1^{'}) = 0$;
4) t_2 – момент времени, при котором $s_1(t_2) = 0, |\, s_2(t_2) \,| \le \varepsilon_1$;
5) $t_3^{'}$ – момент времени, при котором $|\, s_2(t_3^{'}) \,| \le \varepsilon_2$;
6) t_3 – момент времени, при котором $s_1(t_3) = 0, |\, s_2(t_3) \,| \le \varepsilon_2$
7) 7) t_r – момент времени, в который возникает скользящий режим второго рода.

Отметим, что в зависимости от начальных условий не все перечисленные этапы происходят в реальности. Дальнейшие выкладки довольно громоздкие будут представлены на слайдах.

4 Ограничения на амплитуду управляющих воздействий

В системе (1) функция возмущений $\xi(t)$ явно зависит только от времени. Если же рассмотреть класс моделей возмущений $\xi(t,s_1,s_2)$, явно зависящий и от переменных состояния системы, то для того, чтобы ограничения (2) оставались справедливыми, для управляющих воздействий $u=U(s_1,s_2)$ возникают ограничения амплитуды.

Распишем более подробно производную по времени от расширенной модели возмущений

$$\frac{d}{dt}\xi(t,s_1,s_2)=\frac{\partial}{\partial t}\xi(t,s_1,s_2)+\frac{\partial\xi(t,s_1,s_2)}{\partial s_1}s_2+\frac{\partial\xi(t,s_1,s_2)}{\partial s_2}\left(\xi(t,s_1,s_2)+u\right). \quad (6)$$

Не нарушая общности можно предположить, что переменные состояния ограничены по модулю $\left|s_{1,2}\right|\le S_{1,2}$, как и частные производные функции возмущения: $\left|\xi'_{t,s_1,s_2}\right|\le\overline{\Sigma}_{t,s_1,s_2}$. Подставив в (5) также известные ограничения (2), получим $\overline{\Sigma}_t+\overline{\Sigma}_{s_1}S_2+\overline{\Sigma}_{s_2}\Sigma+\overline{\Sigma}_{s_2}|u|\le\overline{\Sigma}$, что

$$|u|\le\frac{\overline{\Sigma}-\left(\overline{\Sigma}_t+\overline{\Sigma}_{s_1}S_2+\overline{\Sigma}_{s_2}\Sigma\right)}{\overline{\Sigma}_{s_2}} \quad (7)$$

Следует заметить, что подобная оценка является довольно грубой. Тем не менее, ограничение управляющего воздействия по амплитуде имеет понятный физический смысл, связанный, например, с сопротивлением вязкой среды или профилем поверхности, по которой передвигается объект управления. Численное моделирование демонстрирует работоспособность подобного закона управления.

5 Численный пример

Рассмотрим систему (1) с возмущениями, описываемыми уравнениями

$$\xi(s_1,s_2,t)=7s_1-5\sin(s_1)+\cos(s_2)++10\sin(5t)-4-2\cos(9t). \quad (8)$$

Для переменных состояния $s_1(t)$, $s_2(t)$ и управляющих воздействий u существуют естественные «физические» ограничения

$$|s_1(t)|\le 10,|s_2(t)|\le 1.5,|u|\le 300. \quad (9)$$

Запишем, согласно (7),(8), неравенства:

$$\begin{aligned}&|\xi(s_1,s_2,t)|\le 7|s_1|+5|\sin(s_1)|+|\cos(s_2)|+10|\sin(5t)|+4+2|\cos(9t)|\le 92;\\ &|\dot{s}_2|\le 392;\\ &|\xi(s_1,s_2,t)|\le 7|s_2|+7{,}5|\cos(s_1)|+392|\sin(s_2)|+50|\cos(5t)|+18|\sin(9t)|\le 478.\end{aligned} \quad (10)$$

Для численного моделирования закона управления (4) выберем следующие его параметры

$$u=-\mathrm{sat}(s_2)-M\,\mathrm{sign}(s_1),\ \alpha=800,\ M=99 \quad (11)$$

согласно ограничениям (4)–(5) и неравенствам из (6)

$$M>92,\ \alpha(M-92)>478,$$

где $\mathrm{sat}(s_2)$ – функция насыщения

$$\mathrm{sat}(s_2)=\begin{cases}200,\ s_2+\sqrt{|s_2|}\,\mathrm{sign}(s_2)\ge 0.25;\\ -200,\ s_2+\sqrt{|s_2|}\,\mathrm{sign}(s_2)\le -0.25;\\ 800(s_2+\sqrt{|s_2|}\,\mathrm{sign}(s_2)),\ |s_2|+\sqrt{|s_2|}<0.25,\end{cases}$$

которая вводится для ограничения амплитуды управляющих воздействий.

В примере используется следующий закон обратной связи [10]

$$(12)\quad \begin{array}{l} u = -M_2 \operatorname{sign}(s_2) - M_1 \operatorname{sign}(s_1), \\ M_1 = 186,\ M_2 = 93 \end{array}$$

в соответствии с неравенствами

$$M_1 > \Sigma + M_2 \Rightarrow M_1 > M_2 + 92,\ M_2 > \Sigma \Rightarrow M_2 > 92.$$

Эксперимент 1. Заменим функцию знака $\operatorname{sign}(s_1)$ в законах управления (12), (13) реле с гистерезисом $\Delta = \text{const} > 0$. Для численного моделирования использовался метод Эйлера с шагом интегрирования $t_s = 10^{-5}$ с. Обозначая за e_{tw} и e_m максимальные ошибки переменной $s_1(t)$ в установившемся режиме для “twisting”-алгоритма и разработанного в главе закона управления, занесем результаты моделирования в таблицу 1.

Таблица 1: Результаты моделирования для неидеальности типа реле с гистерезисом

Δ	0,1	0,01	10^{-3}	10^{-4}
e_{tw}	0,208	0,0216	$2{,}18\cdot10^{-3}$	$2{,}22\cdot10^{-4}$
e_m	0,049	0,0101	$1{,}001\cdot10^{-3}$	$1{,}01\cdot10^{-4}$
e_{tw}/e_m	4,2449	2,1386	2,1778	2,198

Эксперимент 2. Заменим функцию знака sign(s 1) в законах управления (12), (13) реле с запаздыванием $\operatorname{sign}[s_1(t-\tau)],\ \tau = \text{const} > 0$. Для численного моделирования использовался метод Эйлера с шагом интегрирования $t_s = 10^{-5}$ с. Результаты моделирования приведены в таблице 2.

Таблица 2: Результаты моделирования законов управления с запаздыванием

τ	0,1	0,01	10^{-3}	10^{-4}
e_{tw}	8,6	0,1	$1{,}01\cdot10^{-3}$	$1{,}26\cdot10^{-5}$
e_m	$1{,}53\cdot10^{-3}$	$1{,}58\cdot10^{-4}$	$1{,}63\cdot10^{-5}$	$1{,}69\cdot10^{-6}$
e_{tw}/e_m	5620,9	632,91	61,693	7,456

Эксперимент 3. Для демонстрации зависимости установившейся ошибки регулирования от частоты переключения реле проведем численное моделирование работы замкнутых систем (1), (12) и (1), (13) методом Эйлера с различными шагами интегрирования t_s. Результаты моделированияприведены в таблице 3.

Таблица 3: Результаты моделирования с различным шагом интегрирования

t_s	0,01	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
e_{tw}	0,208	$2{,}15\cdot10^{-3}$	$2{,}15\cdot10^{-5}$	$2{,}2\cdot10^{-7}$
e_m	$49\cdot10^{-3}$	$4{,}067\cdot10^{-4}$	$2{,}67\cdot10^{-6}$	$1{,}48\cdot10^{-7}$
e_{tw}/e_m	1,487	8,05	5,296	1,49

Из результатов моделирования следует, что за счет уменьшения амплитуды реле M в законе управления (12) по сравнению с амплитудой реле в законе (13) удается получить меньшую ошибку регулирования (в некоторых случаях отношение ошибок может составлять несколько порядков).

Заключение

В данной главе был предложен новый класс регуляторов на основе скользящих режимов второго рода и рассмотрено доказательство сходимости переменных замкнутой системы в нуль. На основе метода усреднения функции Ляпунова была получена оценка конечного времени сходимости переменных замкнутой системы в нуль при действии на систему внешних ограниченных гладких возмущений. Отметим, что с помощью разработанного закона управления сходимость переменных обеспечивается при меньших амплитудах реле по сравнению с существующими алгоритмами управления на скользящих режимах второго рода. Существенно, что в процессе доказательства не накладывалось требование однородности дифференциальных уравнений, описывающих замкнутую систему управления, что значительно расширяет класс функций, которые могут использоваться в обратной связи.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ в проектах 14-01-31190-мол_а и 15-08-01543-А.

Список литературы

[1] Bhat S.P., Bernstein D.S. Continuous finite-time stabilization of the translational and rotational double integrators. – IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 43, No. 5. P. 678–682.
[2] Levant A. Higher Order Sliding Modes, Differentiation and Output Feedback Control // Int. J. Control. 2003. V. 76. No. 9–10. P. 924–941.
[3] Orlov Y. Finite Time Stability and Robust Control Synthesis of Uncertain Switched Systems // SIAM J. Control Optimization. 2005. V. 43. No. 4. P. 1253–1271.
[4] Moreno J., Osorio M. Strict Lyapunov Functions for the Super-Twisting Algorithm // IEEE Trans. on Automatic Control. 2012. V. 57. No. 4. P. 1035–1040.
[5] Поляков А.Е., Позняк А.С. Метод функций ляпунова для систем со скользящими режимами высших порядков // АиТ. № 5. 2011. С. 47–68.
[6] Зубов В.И. Динамика управляемых систем. М.: Высшая школа, 1982.
[7] Utkin V. On Convergence Time and Disturbance Rejection of Super-Twisting Control // IEEE Trans. on Automatic Control. 2013. V. 58, No. 8. P.2013–2017.
[8] Кочетков С.А. Об одном алгоритме скольжения второго рода и доказательстве его сходимости // Труды XI всероссийской школы-семинара молодых учёных «Управление большими системами» УБС'14. Арзамас. 9– 12 сентября 2014 г. С. 239–259.
[9] Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1965.
[10] Андреев Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами. М.: Наука, 1976.

МАНЕВРЕННАЯ БЛОЧНАЯ ПАРОГАЗОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДСКИХ РАЙОНОВ

М.Ю. Лившиц[1], Е.А. Ларин[2], Л.П. Шелудько[1]

1Самарский государственный технический университет

443100, Самара, ул. Молодогвардейская 244, Россия

usat@samgtu.ru

тел. +7(846) 332-42-34, факс

2Саратовский государственный технический университет им. Ю.А.,Гагарина

443100, Саратов, ул. Политехническая 77, Россия

larin@ sstu.ru

тел. 8-92-722-45-889

Ключевые слова: *энергоснабжение, газотурбинные установки , парогазовые установки, маневренность системы автоматического управления*

Abstract

New type of Highiy maneuverable unit combined-cycle cogeneration plant is suggested o provide heat and electric energy to the districts of big cities such as Moscow and Samara. It represents derivative type gas turbine unit.

Предложен новый тип высокоманевренной блочной теплофикационной парогазовой установки для обеспечения тепло- и электроснабжения микрорайонов крупных городов, например, Москвы и Самары. В составе ПГУ ТЭЦ-1 применяются отечественные конвертированные газотурбинные установки НК-37.

Введение

Из-за механического и физического износа снизилась тепловая экономичность и надежность большинства эксплуатируемых паротурбинных энергетических установок. При действующей системе тарифов прибыль, получаемая от действующих электростанций чаще всего недостаточна для их капитальных ремонтов, технического перевооружения и реконструкции. Возникла необходимость, приступить к строительству экономичных парогазовых установок, прежде всего теплофикационных парогазовых установок (ПГУ) [1]. Например, на Сызранской ТЭЦ и Новокуйбышевской ТЭЦ-1 в Самарской области за последние два года введены в эксплуатацию два блока ПГУ электрической мощностью по 220 МВт. Но в связи с использованием дорогого импортного энергетического оборудования, прежде всего газовых турбин, сроки окупаемости капиталовложений превышают пятнадцатилетний период [3], что снижает их инвестиционную привлекательность. В ближайший период отечественная промышленность не может приступить к серийному производству газотурбинных установок (ГТУ) мощностью выше 100 МВт, необходимых для строительства современных ПГУ.

В этих условиях становятся наиболее актуальными работы по проектированию, доводке и серийному выпуску мощных отечественных ГТУ, на что потребуется не меньше пяти –

семи лет. В то же время, имеется возможность за более короткий период и с меньшими затратами средств, осуществить производство и ввод в эксплуатацию экономичных блочных теплофикационных ПГУ с электрической мощностью блоков в 30 – 50 МВт и тепловой мощностью в 20 - 50 Гкал с использованием отечественных конвертированных энергетических ГТУ мощностью 14 - 25 МВт и противодавленческих паровых турбин мощностью в 10 – 25 МВт. Размещение блочных теплофикационных ПГУ вблизи потребителей способствует экономичной когенерационной выработке электрической и тепловой энергии, а также снижению потерь при ее транспорте к потребителям. В большинстве стран Европы до 15-20% электрической и тепловой энергии вырабатывается на мини-ТЭЦ. Принят ряд законов и льгот, стимулирующих широкое внедрение этих установок и предусматривающих частичное бюджетное финансирование при их строительстве, снижение экологических налогов и возможность беспрепятственной поставки в электрические сети излишков выработанной электроэнергии [1]. В ряде стран построены блочные теплофикационные ПГУ-ТЭЦ для децентрализованного тепло- и электроснабжения потребителей. Но из-за более мягкого климата, чем в России, для этих энергоисточников, при их работе в отопительных режимах, характерно уменьшение когенерационной выработки электрической энергии относительно суммарной выработки электрической и тепловой энергии.

1 Перспективы применения в мегаполисах городов высокоманевренных парогазовых теплоэлектроцентралей

Проведенные исследования показали, что для микрорайонов крупных городов экономически целесообразно применение нового типа блочной теплофикационной ПГУ-ТЭЦ-1 со средними параметрами пара [4]. Как и в блочной парогазовой ТЭЦ Nossener Bruke [2] (Германия), ПГУ-ТЭЦ-1 содержит ГТУ, котлы-утилизаторы (КУ) с двумя камерами дожигания топлива КД-1 и КД-2, теплофикационную противодавленческую паровую турбину, сетевые (СП) и газоводяные подогреватели (ГВП) сетевой воды теплосети. КД1 служит для поддержания постоянной температуры перегрева пара подаваемого в противодавленческую паровую турбину. Но, в отличие от тепловой схемы ПГУ-ТЭЦ Nossener Bruke, испаритель КУ в ПГУ-ТЭЦ-1 содержит две ступени с установленной между ними второй камерой дожигания КД-2. Это позволяет в отопительный период ее работы за счет дополнительного сжигания топлива в КД-2, значительно увеличить, по сравнению с неотопительным периодом, паропроизводительность, КУ, электрическую и тепловую мощность ПГУ-ТЭЦ-1. На Рис.1 приведена TQ – диаграмма, показывающая характер изменения температур продуктов сгорания в КУ ПГУ-ТЭЦ-1.

пунктирные линии соответствуют работе ПГУ-ТЭЦ-1 в неотопительных режимах со сжиганием топлива в первой камере сгорания КД-1, а сплошные линии - ее работе в отопительных режимах со сжиганием топлива как в первой КД-1, так и во второй камере сгорания КД-2.

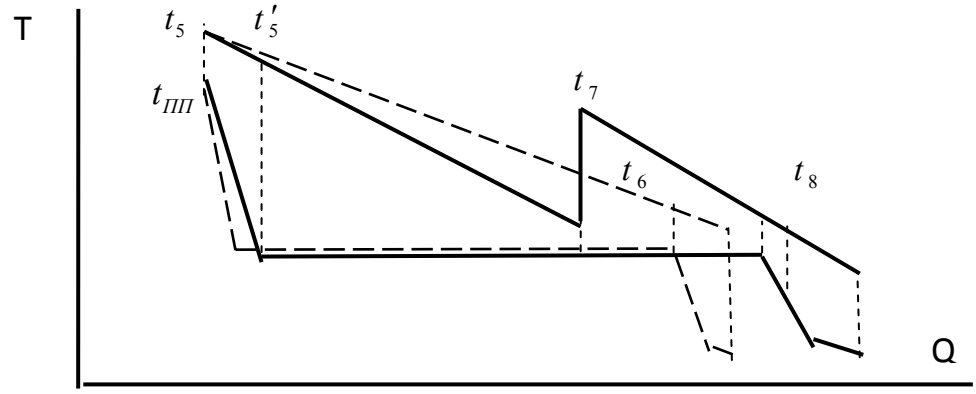


Рисунок 1 - TQ диаграмма парового котла-утилизатора ПГУ-ТЭЦ-1

Здесь: t_5 - температура газа за ГТУ, t'_5 - температура газа за КД1, t_6 - температура газа за второй ступенью испарителя КУ, t_7 - температура газа за КД-2, t_8 - температура газа за первой ступенью испарителя КУ, $t_{ПП}$ - температура перегретого пара. На Рис.2 изображена принципиальная тепловая схема этой установки.

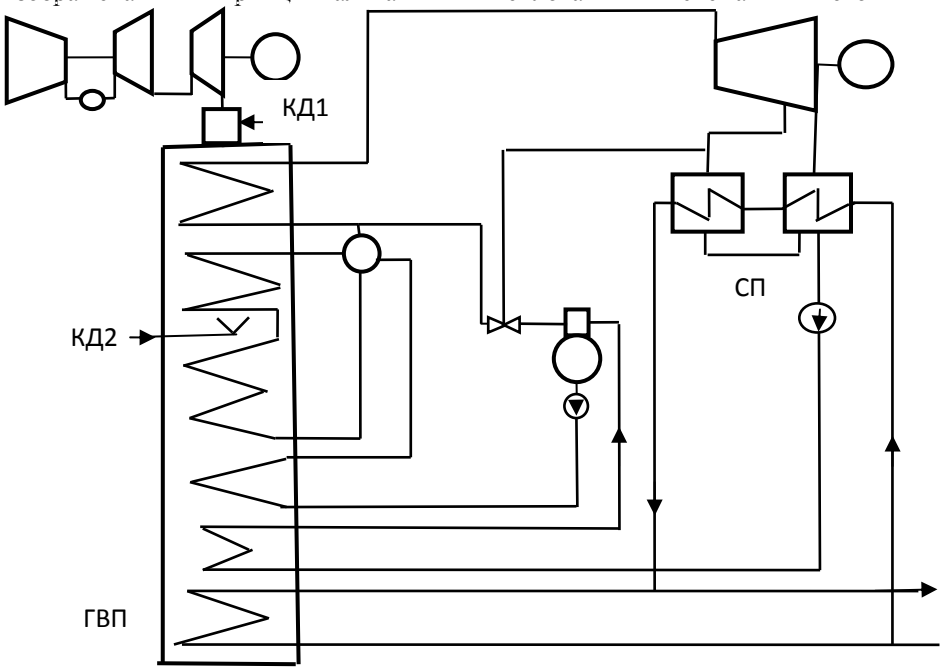


Рисунок 2 - Тепловая схема теплофикационной блочной ПГУ-ТЭЦ-1

Проведенные исследования позволили получить ряд основных выражений для расчетов и определения основных характеристик КУ при различных режимах работы ПГУ-ТЭЦ-1.

Расход топлива в КД-1

$$(1) \qquad B_{КД\ 1} = G_{Г} \frac{h_5 - h_4}{Q^{P}_{H} \eta_{КД\ 1} - h_5}$$

Расход пара вырабатываемого КУ в неотопительных режимах

$$(2) \qquad D_{КУ} = (G_{Г} + B_{КД1}) \frac{(h_5 - h_8)\eta_{КУ}}{(h'' - h') + (1 - \alpha_{ПР})(h_{ПП} - h'')}$$

Расход топлива в КД2 в отопительных режимах:

$$(3) \qquad B_{КД\ 2} = (G_{Г} + B_{КД\ 1}) \frac{h_7 - h_6}{Q^{P}_{НГ} \eta_{КД\ 2} - h_7}$$

Расход пара вырабатываемого КУ в отопительных режимах

$$(4) \qquad D_{КУ} = \frac{[(G_{Г} + B_{КД\ 1})(h_5 - h_8) + (G_{Г} + B_{КД\ 1} + B_{КД\ 2})(h_7 - h_6)]\eta_{КУ}}{(h'' - h') + (1 - \alpha_{ПР})(h_{ПП} - h'')}$$

Здесь $G_{Г}$, h_4 расход (кг/с) и энтальпия (кДж/кг) газа за ГТУ, Q^{P}_{H} - теплотворная способность топлива (кДж/кг) $q_{ИСП} = h'' - h'$ - удельный подвод тепла в испарителе (кДж/кг); h_5, h'_5, h_6, h_7, h_8 - энтальпии газа (кДж/кг) за КД-1; за пароперегревателем; за второй ступенью испарителя; за КД-2 и за первой ступенью испарителя.

В качестве типового примера проведен анализ эффективности строительства ПГУ-ТЭЦ-1 в новом городском микрорайоне Самары. Запланировано, что к 2030 году его население достигнет 100-150 тыс. человек, электрическая мощность 150-200 МВт, тепловая 250-300 Гкал. Из-за удаленности от существующих ТЭЦ, предусмотрено применить в нем раздельную систему энергоснабжения с теплоснабжением от «крышных» котельных [5], а электроснабжением - из централизованных ЛЭП. Для раздельной системы энергоснабжения, по сравнению с когенерационной выработкой электрической и тепловой энергии, характерны системный перерасход топлива, пониженная надежность энергоснабжения и более высокие отпускные тарифы. Поэтому, в качестве альтернативы, предлагается построить на территории этого микрорайона высокоманевренную экономичную блочную теплофикационную ПГУ-ТЭЦ-1, снабженную конвертированной ГТУ НК-37 мощностью 25 МВт и КПД 36,4%, КУ, газоводяным подогревателем сетевой воды теплосети (ГВП), теплофикационной противодавленческой паровой турбиной, сетевыми подогревателями сетевой воды (СП).

Причем КУ этой ПГУ содержит две камеры дожигания. Впервые камера дожигания была разработана в ОАО «Кузнецов» и установлена за конвертированной ГТУ НК-37 при модернизации Лидской ТЭЦ (Белоруссия), с помощью парогазовой установки [3]. В ПГУ-ТЭЦ-1 первая КД1 установлена в выхлопном газоходе газовой турбины и используется для повышения температуры газа перед пароперегревателем КУ до $t_5 = 500\ ^0C$. Параметры пара перед противодавленческой паровой турбиной $P_{П.П.}$ = 3,2 МПа, $t_{П.П}$ = 435^{0}С.

Вторая камера дожигания (КД-2), включается в отопительных режимах работы этой парогазовой установки. Расход топлива сжигаемого в КД2 и температура газа t_7 на ее выходе, регулируются, в соответствии с тепловой мощностью ПГУ-ТЭЦ-1 и температурным

графиком теплосети. При повышении t_7 происходит увеличение тепловосприятия испарителя КУ, паропроизводительности КУ, электрической мощности теплофикационной противодавленческой паровой турбины и тепловой мощности СП.

Проведен сравнительный анализ эффективности строительства в этом микрорайоне двух типов теплофикационных парогазовых установок - ПГУ-ТЭЦ-1 и ПГУ-ТЭЦ-2. В этих установках предусмотрено применение тех же ГТУ НК-37, но КД2 в ПГУ-ТЭЦ-2, в отличие от ПГУ-ТЭЦ-1, устанавливается перед ГВП сетевой воды теплосети на выходе из КУ, т.е. также, как это сделано в ПГУ-ТЭЦ Nossener Bruke.

Расчеты сравниваемых блочных теплофикационных ПГУ были проведены как для неотопительных, так и для отопительных периодов года. При этом расходы топлива сжигаемого в КД1 и КД2 и паропроизводительность КУ определялись с использованием выше приведенных выражений (1 - 4). Результаты расчета этих установок, приведенные на Рис.3 – 6, показали, что при работе ПГУ-ТЭЦ-1 в отопительный период со сжиганием топлива в КД2, установленной между ступенями испарителя КУ, (сплошные линии на Рис.3-6), происходит повышение ее основных эксплуатационных показателей:

$D_{КУ}$ - паропроизводительности котла-утилизатора, $N_{ПТ}$ - электрической мощности противодавленческой паровой турбины, $Q_{СП}$ - тепловой мощности СП и величины W - относительной выработки электроэнергии на тепловом потреблении, по сравнению с работой в этот период ПГУ-ТЭЦ-2, с КД2, установленной перед ГВП КУ, (пунктирные линии на Рис.3-6).

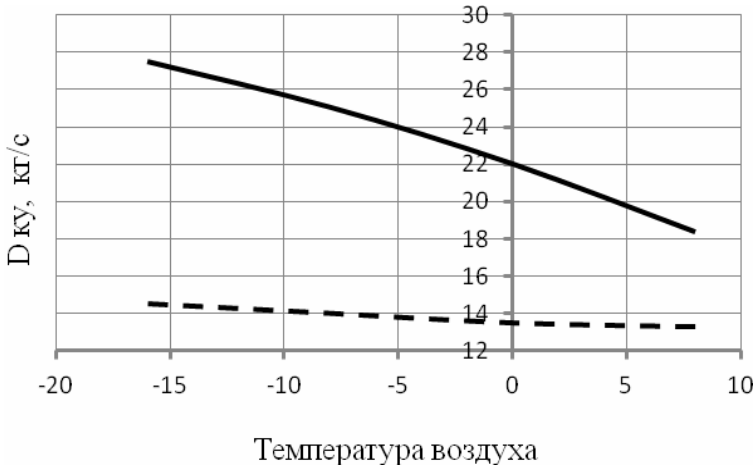


Рисунок 3 - Изменение паропроизводительности $D_{КУ}$ котлов-утилизаторов ПГУ-ТЭЦ-1 и ПГУ-ТЭЦ-2 при их работе в отопительных режимах

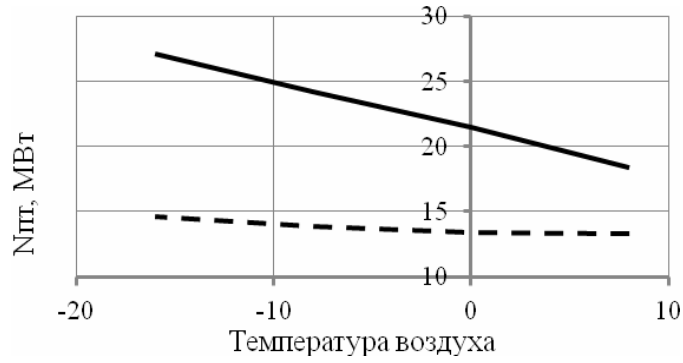


Рисунок 4 - Влияние температуры воздуха на электрическую мощность паровой турбины в ПГУ-ТЭЦ-1 и ПГУ-ТЭЦ-2

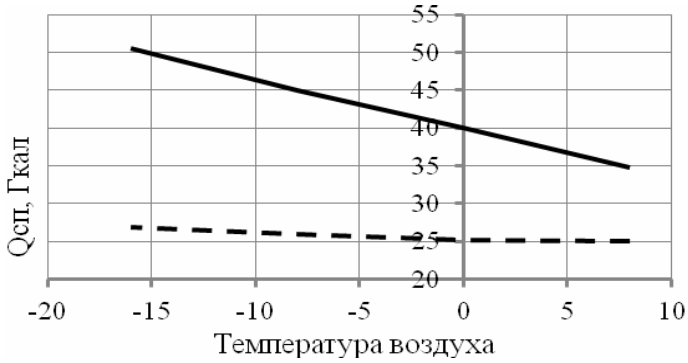


Рисунок 5 - Увеличение тепловой мощности сетевых подогревателей в ПГУ-ТЭЦ-1 и ПГУ-ТЭЦ-2 при понижении температуры воздуха

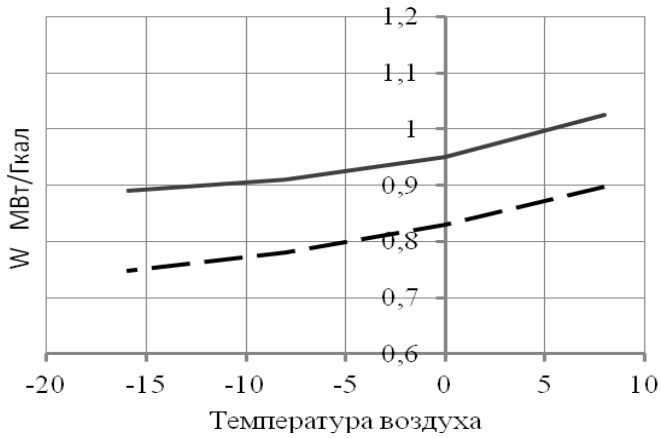


Рисунок 6 - Влияние температуры воздуха на относительную выработку электроэнергии на тепловом потреблении для ПГУ-ТЭЦ-1 и ПГУ-ТЭЦ-2

2 Управление режимами работы теплофикационной блочной ПГУ-ТЭЦ

Автоматизированная система управления (АСУ) блочной теплофикационной ПГУ-ТЭЦ должна обеспечить адаптацию вырабатываемой ей тепловой мощности к изменяющимся тепловым нагрузкам потребителей при условиях поддержании постоянной частоты электрического тока, вырабатываемого в электрогенераторах ГТУ и теплофикационной противодавленческой паровой турбиины.

При работе ПГУ-ТЭЦ-1 в неотопительных режимах, при изменении температуры и расхода атмосферного воздуха, система автоматического регулирования ГТУ обеспечивает поддержание заданной температуры газа перед газовой турбиной турбокомпрессора и частоты электрического тока ее электрогенератора.

Подсистема АСУ котла-утилизатора обеспечивает регулирование выработки пара и стабилизацию температуры перегрева пара на выходе из котла-утилизатора путем изменения расхода топлива сжигаемого в КД1, регулирование расхода и температуры питательной воды. При этом задачами подсистемы АСУ теплофикационной противодавленческой паровой турбины является стабилизация частоты электрического тока и регулирование давления пара, подаваемого из нее в сетевые подогреватели теплосети для подогрева в них сетевой воды, направляемой для горячего водоснабжения потребителей.

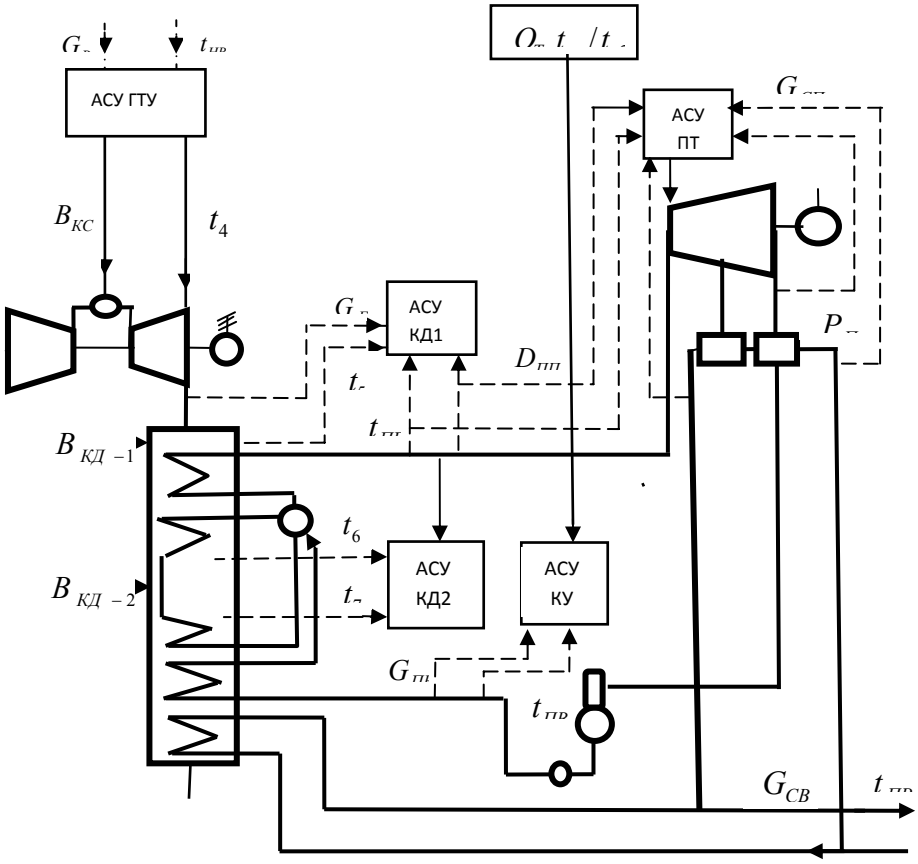


Рисунок 7- Функциональная схема АСУ ПГУ-ТЭЦ-1

Технологические каналы линии - сплошные толстые линии, управляющие каналы - сплошные тонкие линии, сигналы датчиков – пунктирные линии

Обозначения: $Q_T, Q_{СП}$ - тепловая мощность ПГУ-ТЭЦ-1 и тепловая мощность СП, $G_B, G_Г, G_{ПВ}, G_{СВ}$ - соответственно, расходы воздуха, газов за ГТУ, питательной воды на КУ, сетевой воды теплосети; $t_{НВ}, t_4, t_5, t_6, t_7, t_{ПВ}, t_{ПР}, t_{ОБР}$ - соответственно, температуры наружного воздуха, газов за ГТУ, за КД-1, за второй ступенью испарителя КУ, за КД-2, питательной воды КУ, прямой сетевой воды, обратной сетевой воды.

Сжигание топлива в КД-2 начинается при переходе ПГУ-ТЭЦ-1 к отопительным режимам работы с переменными значениями тепловых нагрузок, зависящими от температурного графика теплосети. Соответственно, в отопительных режимах, при понижении температуры наружного воздуха АСУ ПГУ-ТЭЦ-1 обеспечивает регулирование параметров газотурбинной установки, ее мощности и обеспечивает, за счет изменения расхода топлива сжигаемого в КД-1 и КД-2, повышение паропроизводительности КУ, электрической мощности теплофикационной противодавленческой паровой турбины и тепловой мощности СП. При этом обеспечивается также стабилизация температуры перегрева пара и изменение температуры сетевой воды, путем регулирования давления пара на выходе из теплофикационной противодавленческой паровой турбины.

Заключение

Результаты проведенного анализа энергетических характеристик нового типа теплофикационной блочной ПГУ-ТЭЦ-1 показывают, что применение в ее составе конвертированных газотурбинных установок и противодавленческих паровых турбин, выпускаемых моторостроительными предприятиями России, позволяет, на первом этапе модернизации отечественных моторостроительных предприятий, частично решить проблему импортозамещения в энергетике и организовать производство высокоэкономичных теплофикационных блочных парогазовых установок, строительство которых будет экономически целесообразно для обеспечения эффективного тепло- и электроснабжения строящихся новых микрорайонов в ряде крупных городов страны, прежде всего в Москве и в Самаре.

Список литературы

[1] Анализ мирового опыта развития передовых технологий в теплоэнергетике. Приложение №3 к программе «Модернизация электроэнергетики России на период до 2020 года».

[2] Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. Учебное пособие. – М.: Изд-во МЭИ, 2002.

[3] Шелудько Л.П., Пешков Л.И. Направления и перспективы развития электроэнергетики в условиях ее реформирования» Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Труды XIV Международной конференции Самара 2012. С. 351-355.

[4] Л.П. Шелудько, Ю.И. Цыбизов Перспективные направления совершенствования газотурбинных мини-ТЭЦ. «Проблемы теплоэнергетики». Сб. научных трудов, выпуск 2. С.156-163.Саратов, 2012.

[5] А.Б. Богданов. Котельнизация России – беда национального масштаба. /www.exergy.narod,ru/

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ОПРЕДЕЛЕННОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Ю.К. Машунин[1]

[1]Дальневосточный федеральный университет
690090, Владивосток, ул. Суханова, 8, Россия
mashunin@mail.ru
тел: 8 (423) 231-63-30, факс: 8 (423) 243-23-15

Ключевые слова: *векторная оптимизация, моделирование технических систем, моделирование в условиях определенности, неопределенности*

Abstract

The purpose of the report to present methodology of modelling of the technical system (TS) which model is presented by the vector problem of mathematical programming (VPMP). The model is intended for an assessment and a choice of necessary technical characteristics (criteria) and determination of the corresponding parameters TS. Such problem arises in the course of design during the studying, the analysis and synthesis of technical systems. Creation of mathematical model of Technical System is carried out in the conditions of definiteness when functional dependence of each characteristic and restrictions on parameters of Technical System is known, in the conditions of uncertainty, when there is no sufficient information on functional dependence of each characteristic and restrictions from parameters, at this VPMP is based with use of methods of the regression analysis. As a result VPMP is formed. The solution of VPMP is based on normalization of criteria, the principle of the guaranteed result. The modelling methodology in the conditions of definiteness and uncertainty is illustrated on a numerical example of the TS model, in the form of a vector problem of nonlinear programming with four criteria realized in Matlab system.

Введение

Решение вопросов по созданию новых технических систем (ТС), отвечающих последним достижениям науки и техники, ускорения их проектирования, повышения качества, надежности ТС стимулировало создание математических моделей, которые адекватно описывают функционирование ТС. Поэтому проблеме математического моделирования ТС, как составной частью системы автоматизированного проектирования уделяется большое внимание, как в России, так и за рубежом [4, 6, 7].

Проблема исследования и создания новых технических объектов, систем, состоит в том, что ТС описывается некоторым набором характеристик, функционально зависящих от параметров ТС, и улучшение по одной из этих характеристик приводит к ухудшению другой. Встает проблема определения таких параметров, которые бы улучшали все характеристики одновременно. Эти задачи решаются в настоящее время, как на техническом (экспериментальном), так и на математическом (модельном) уровне. Модель в этом случае может быть сформирована в виде векторной задачи математического программирования (ВЗМП), векторный критерий которой определяет характеристики ТС. Для решения предлагается использовать методы, основанные на нормализации критериев и принципе гарантированного результата, которые впервые представлены [1], а в дальнейшем, в приложении к техническим системам, развиты в работах [2-7]. Эти методы позволяют решать ВЗМП, как при равнозначных критериях, так и при определенной важности (приоритете) критерия. Построение математической модели ТС может осуществляется в условиях определенности, когда известна функциональная

зависимость каждой характеристики и ограничений от параметров ТС, а также в условиях неопределенности, когда нет достаточной информации о функциональной зависимости каждой характеристики и ограничений от параметров. На решение этих проблем направлена данная работа.

Цель данной работы – формирование методологии построения модели и математического моделирования технической системы в виде векторной задачи математического программирования, ее решения, как в условиях определенности, так и в условиях неопределенности, создания программного обеспечения, реализующее решение при представленных условиях.

Для реализации поставленной цели в работе представлено: построение модели технической системы в виде векторной задачи математического программирования; показана методология построения математической модели технической системы условиях определенности и неопределенности и реализация принятия решений (т. е. выбор оптимальных параметров ТС), на базе программного обеспечения. Методология моделирования проиллюстрирована на численном примере модели ТС, в виде векторной задачи нелинейного программирования реализованной в системе Matlab [8].

1 Построение математической модели технической системы

Проблема выбора оптимальных параметров технических систем по функциональным характеристикам связана с выпуском продукции высокого качества. Такая проблема всегда возникает при анализе и проектировании технических систем. Рассматривается техническая система, функционирование которой зависит от $\boldsymbol{N}$ - множества конструктивных параметров[1]: $X=\{x_1\, x_2\, \ldots\, x_N\}$, N - число параметров, каждый из которых лежит в заданных пределах:

(1) $x_j^{\min} \le x_j \le x_j^{\max}$, $j=\overline{1, N}$, или $X^{min} \le X \le X^{max}$,

где $x_j^{\min}$, $x_j^{\max}$, $\forall j \in \boldsymbol{N}$ - нижний и верхний пределы изменения вектора параметров ТС.

Результат функционирования технической системы определяется набором (множеством) $\boldsymbol{K}$ технических характеристик $f_k(X)$, $k=\overline{1, K}$, которые функционально зависят от конструктивных параметров ТС $X=\{x_j, j=\overline{1, N}\}$, в совокупности они представляют вектор-функцию:

(2) $F(X) = (f_1(X)\ f_2(X)\ \ldots f_K(X))^{\mathrm{T}}$.

Множество характеристик (критериев) $\boldsymbol{K}$ подразделяется на два подмножества $\boldsymbol{K}_1$ и $\boldsymbol{K}_2$: $\boldsymbol{K}=\boldsymbol{K}_1 \cup \boldsymbol{K}_2$. $\boldsymbol{K}_1$ - это подмножество технических характеристик, числовые величины которых желательно получить, как можно выше: $f_k(X) \rightarrow \mathbf{max}$, $k=\overline{1, K_1}$.

$\boldsymbol{K}_2$ - это подмножества технических характеристик, числовые величины которых желательно получить, как можно ниже: $f_k(X) \rightarrow \mathbf{min}$, $k=\overline{K_1+1, K}$, $\boldsymbol{K}_2 \equiv \overline{K_1+1, K}$

Математическую модель технической системы, решающую в целом проблему выбора оптимального проектного решения (выбора оптимальных параметров ТС), можно представить в виде векторной задачи математического программирования.

(3) $\mathbf{Opt}\ F(X) = \{\mathbf{max}\ F_1(X) = \{\mathbf{max}\ f_k(X), k=\overline{1, K_1}\}\}$,

(4) $\mathbf{min}\ F_2(X) = \{\mathbf{min}\ f_k(X), k=\overline{1, K_2}\}\}$,

(5) $G(X) \le 0$,

[1] Иная запись вектора $X=\{x_j, j=\overline{1, N}\}$

(6) $x_j^{\min} \le x_j \le x_j^{\max}$, $j = \overline{1, N}$,

где X - вектор управляемых переменных (конструктивных параметров ТС) из (1);

$F(X)=\{f_k(X),\ k=\overline{1, K}\}$ - векторный критерий, каждая компонента которого представляет характеристику ТС из (2), функционально зависящую от вектора переменных X;

в (5) $G(X)=(g_1(X)\ \ g_2(X)\ \ ...\ \ g_M(X))^{\mathrm{T}}$ – вектор-функция ограничений, накладываемых на функционирование ТС, $\boldsymbol{M}$ – множество ограничений.

Ограничения определяются протекающими в них технологическими, физическими и тому подобными процессами и могут быть представлены функциональными ограничениями, например, $f_k^{\min} \le f_k(X) \le f_k^{\max}$, $k=\overline{1, K}$.

Предполагается, что функции $f_k(X)$, $k=\overline{1, K}$ дифференцируемы и выпуклы, $g_i(X)$, $i=\overline{1, M}$ непрерывны, а заданное ограничениями (5)-(6) множество допустимых точек $\boldsymbol{S}$ не пусто и представляет собой компакт:

$\boldsymbol{S}=\{X\in\boldsymbol{R}^N \mid G(X)\le 0,\ X^{min}\le X\le X^{max}\}\ne\varnothing$.

Соотношения (3)-(6) образуют математическую модель ТС. Требуется найти такой вектор параметров $X^o\in\boldsymbol{S}$, при котором каждая компонента вектор - функции $F_1(X)=\{f_k(X),\ k=\overline{1, K}_1\}$ принимает максимально значение, а функции $F_2(X)=\{f_k(X),\ k=\overline{1, K}_2\}$ принимает минимальное.

Для решения такого класса ВЗМП в данной статье используются методы, основанные на нормализации критериев и принципе гарантированного результата [1-7]. Они позволяют решать ВЗМП при равнозначных критериях и при заданном приоритете критерия. Кратко представим ***алгоритм решения ВЗМП*** (3)-(6) при равнозначных критериях в виде ряда шагов.

Шаг 1. Решается задача (3)-(6) по каждому критерию отдельно, т.е. для $\forall k \in K_1$ решается на максимум, а для $\forall k \in K_2$ решается на минимум. В результате решения получим:

X_k^* - точка оптимума по соответствующему критерию, $k=\overline{1, K}$;

$f_k^* = f_k(X_k^*)$ – величина k-го критерия в этой точке, $k=\overline{1, K}$.

Шаг 2. Определяем наихудшую величину каждого критерия (антиоптимум): f_k^0, $k=\overline{1, K}$. Для чего решается задача (3),(5)-(6) для каждого критерия $k = \overline{1, K}_1$ на минимум:

$f_k^0 = \min f_k(X),\ G(X) \le B,\ X \ge 0,\ k = \overline{1, K}_1$.

Решается задача (4)-(6) для каждого критерия на максимум:

В результате решения получим: $X_k^0 = \{x_j,\ j=\overline{1, N}\}$ - точка оптимума по соответствующему критерию, $k=\overline{1, K}$; $f_k^0 = f_k(X_k^0)$ – величина k-го критерия в точке, X_k^0, $k=\overline{1, K}$.

Шаг 3. Выполняется анализ множества точек, оптимальных по Парето, для этого в оптимальных точках $X^* = \{X_k^*,\ k=\overline{1, K}\}$ определяются величины целевых функций и относительных оценок: $\lambda(X^*) = \{\lambda_q(X_k^*),\ q=\overline{1, K},\ k=\overline{1, K}\}$, $\lambda_k(X) = \dfrac{f_k(X) - f_k^o}{f_k^* - f_k^o}$, $\forall k \in \boldsymbol{K}$:

(7) $F(X^*)=\begin{vmatrix} f_1(X_1^*),\ldots, f_k(X_1^*), \\ \ldots \\ f_1(X_k^*),\ldots, f_k(X_k^*) \end{vmatrix}$, $\lambda(X^*)=\begin{vmatrix} \lambda_1(X_1^*),\ldots, \lambda_k(X_1^*), \\ \ldots \\ \lambda_1(X_k^*),\ldots, \lambda_k(X_k^*) \end{vmatrix}$.

В целом по задаче относительная оценка $\lambda_k(X)$, $k=\overline{1, K}$ $\forall k\in\boldsymbol{K}$ лежит в пределах $0\le\lambda_k(X)\le 1$.

Шаг 4. Построение λ-задачи. Первоначально строится максиминная задача оптимизации с нормализованными критериями:

(8) $\lambda^o = \max\limits_{X \in S} \min\limits_{k \in K} \lambda_k(X)$.

На втором этапе задача (8) преобразуется в стандартную задачу математического программирования, названную λ-задачи:

(9) $\lambda^o = \mathbf{max}\ \lambda$,

(10) $\lambda - \frac{f_k(X^o) - f_k^o}{f_k^* - f_k^o} \le 0,\ k = \overline{1, K}$,

(11) $G(X) \le B,\ X \ge 0$,

где вектор неизвестных X имеет размерность N+1: $X=\{\lambda, x_1, \ldots, x_N\}$.

Шаг 5. Решение λ-задачи.

λ-задача (9)-(11) – это стандартная задача выпуклого программирования и для ее решения используются стандартные методы. В результате решения λ-задачи получаем:

$\boldsymbol{X^o}=\{\lambda^o, X^o\}$ - точку оптимума;

$f_k(X^o),\ k=\overline{1, K}$ - величины критериев в этой точке;

$\lambda_k(X^o) = \frac{f_k(X^o) - f_k^o}{f_k^* - f_k^o},\ k=\overline{1, K}$ - величины относительных оценок;

λ^o - максимальную относительную оценку, которая является максимальным нижним уровнем для всех относительных оценок $\lambda_k(X^o)$, или гарантированным результатом в относительных единицах, λ^o гарантирует, что в точке X^o все относительные оценки $\lambda_k(X^o)$ больше или равны λ^o: $\lambda_k(X^o) \ge \lambda^o,\ k=\overline{1, K}$ или

(12) $\lambda^o - \lambda_k(X^o) \le 0,\ k=\overline{1, K}$.

2 Методология построения математической модели технической системы и принятия решений

При построении математической модели технической системы (3)-(6) возможны ситуации, когда известна функциональная зависимость каждой характеристики и ограничений от параметров ТС, такую модель принято называть моделью в условиях определенности (хорошо структуризированные задачи), при этом используются выше представленные методы [1, 5]. Ситуации, когда нет достаточной информации о функциональной зависимости каждой характеристики и ограничений от параметров, определяются как моделирование в условиях неопределенности (плохо структуризированные задачи) [4]. В этом случае устранение неопределенности состоит в использовании качественных и количественных описаний ТС, которые могут быть получены, например, по принципу “вход-выход”. Преобразования такой информации – исходных данных в функциональную зависимость путем использования математических методов (регрессионного анализа). Методология включает четыре блока: построение модели в условиях определенности; неопределенности; общая часть для обоих видов условий; и стандартные блоки практической реализации. Блок-схема методологии представлена на рисунке 1 и описана, как последовательность ряда шагов (блоков).

Блок 0. Формируется техническое задание на разрабатываемые изделия, где формулируются цели и требования к техническим системам.

Блок 1. *Построение модели в условиях определенности*.

1.1. Проводится исследование физических процессов, протекающих в ТС, и построения математических моделей таких процессов используются фундаментальные законы физики: моделирование магнитных, температурных полей; законы сохранения энергии, движения и т.д.;

1.2. Формируется полный перечень всех функциональных характеристик технических систем и параметров, от которых зависят эти характеристики. Дается их вербальное описание. Устанавливается техническая и информационная взаимосвязь всех компонентов ТС, т.е. строится структура. Здесь же решается задача выбора наилучшей (в каком-то смысле) структуры ТС, т.е. выполняется задача структурной оптимизации [3];

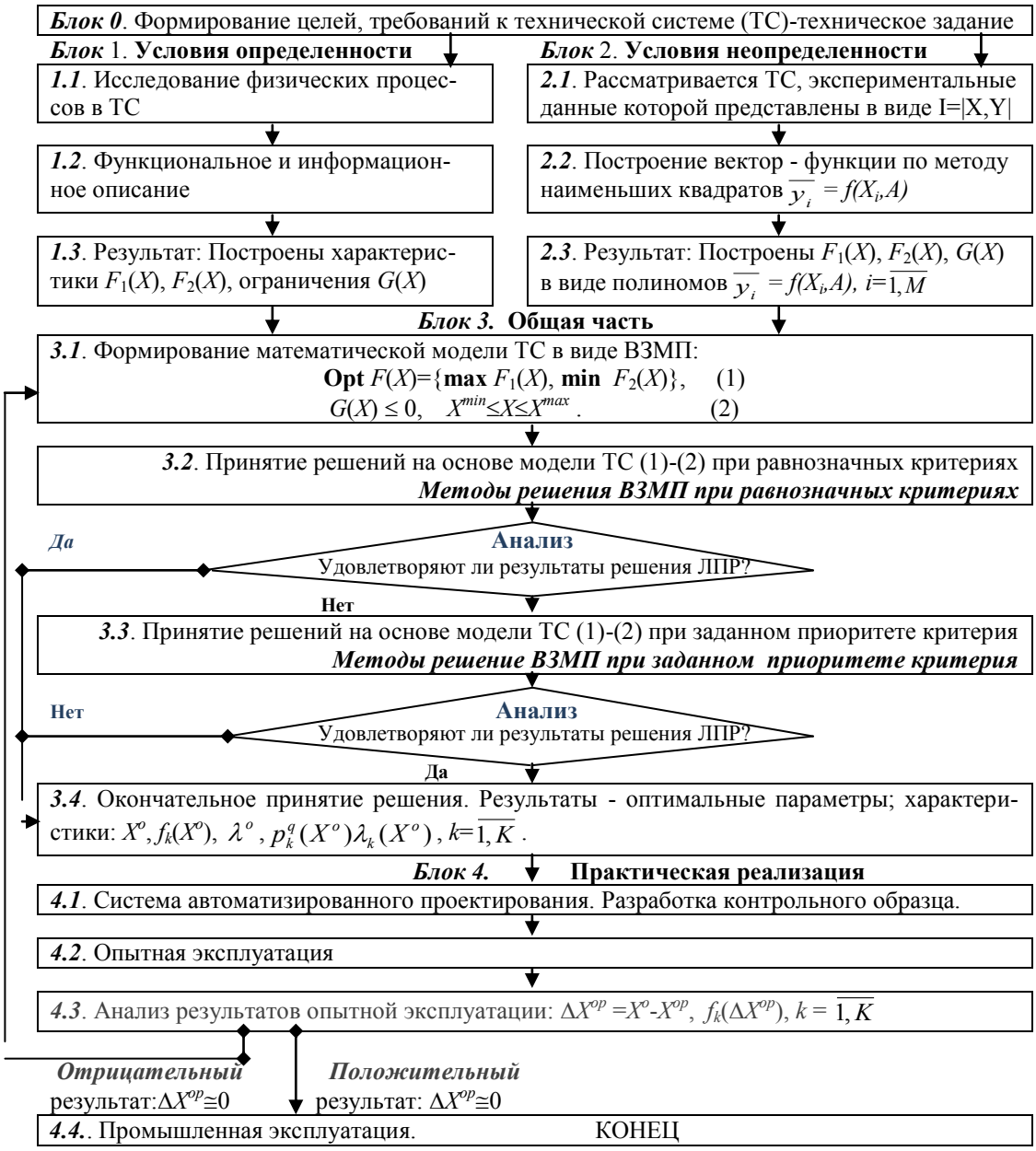


Рисунок 1 - Блок-схема процесса проектирования и место математической модели ТС в принятии решения.

1.3. В результате должна быть построена функциональная взаимосвязь характеристик $F_1(X)$, $F_2(X)$ и ограничений $G(X)$ от параметров.

Блок 2. *Построение модели в условиях неопределенности*. 2.1. Рассматривается ТС, экспериментальные данные которой представлены в виде матрицы I=|X,Y|, где: $X=\{X_i=\{x_{ij}, j=\overline{1,N}\}, i=\overline{1,M}\}$ - конструктивные параметры ТС, ***N*** – множество параметров системы, ***M*** - множество альтернатив (экспериментов); $Y=\{y_{ik}, k=\overline{1,K}, i=\overline{1,M}\}$, ***K*** – множество критериев (характеристик), по которым оценивается каждая альтернатива.

2.2. Построение вектор - функции (критериев) осуществляется по методу наименьших квадратов $\min\sum_{i=1}^{M}(y_i-\bar{y}_i)^2$, где y_i, $i=\overline{1,M}$ - реально наблюдаемые величины, и $\bar{y}_i$, $i=\overline{1,M}$ их оценки, полученные для однофакторной модели с помощью функции $\bar{y}_i=f(X_i,A)$, $X_i=\{x_i\}$, где $f(x_i, A)$ используем полином. В прикладной части работы используется уравнение

$$\min_A f(A,X)\equiv\sum_{i=1}^{M}(y_j-(a_0+a_1x_{1i}+a_2x_{1i}^2+a_3x_{2i}+a_4x_{2i}^2+a_5x_{1i}*x_{2i}))^2,$$

2.3. Результат: Построены функции $F_1(X)$, $F_2(X)$, $G(X)$ в виде полиномов $\overline{y_i}=f(X_i,A)$, $i=\overline{1,M}$

Блок 3. *Общая часть для модели в условиях определенности и неопределенности.*

3.1. Формирование математической модели ТС. Он включает четыре этапа.

1) Определение целей и показателей функционирования ТС.

2) Идентификация вектора переменных ТС.

Обозначим вектор конструктивных параметров ТС через $X=\{x_j, j=\overline{1,N}\}$, где ***N*** - множество индексов (N- их число) переменных. Выявляются пределы изменения вектора переменных: $x_j^{\min}$, $x_j^{\max}$, $\forall j\in$***N***, нижний и верхний пределы изменения вектора переменных. Эти соотношения называют параметрическими ограничениями.

3) Формирование вектора критериев ТС.

Критерий является мерой количественной оценки функциональной зависимости вектора переменных X от каждой выходной характеристики $k=\overline{1,K}$. Множество функциональных зависимостей характеристик представляет собой векторный критерий: $F(X)=\{f_k(X), k=\overline{1,K}\}$,

где ***K*** - множество (число) индексов критериев ТС.

4) Определение функциональной зависимости между ограничениями и параметрами ТС.

Исследуются и накладываются на функционирование ТС ограничения четырех видов:

ограничения, выдвигаемые техническим заданием на создание ТС; технологические ограничения; ограничения, связанные с физическими процессами, протекающими в ТС; ограничения на функционирование ТС, связанные с внешней средой. Устанавливается функциональная зависимость параметров между собой, и, в соответствии с техническими требованиями к входным и выходным параметрам: $X^{min}\le X\le X^{max}$ - параметрические ограничения.

Ограничения в символьной форме можно представить в виде неравенств (5):

$G(X)=(g_1(X)\ g_2(X)\ \dots\ g_M(X))^T$, где ***M*** - множество (число) ограничений ТС.

5) Пусть часть характеристик $f_k(X)$, $k=\overline{1,K}_1$, $K_1\subset K$, по количественной величине желательно получить как можно больше (т.е. соответствующие критерии максимизируются), а часть $f_k(X)$, $k=\overline{1,K}_2$, $K_2\subset K$, минимизируются. С учетом этих требований математическую модель, решающую в целом проблему выбора оптимального проектного решения (выбора оптимальных параметров ТС), можно представить в виде векторной задачи математического программирования, аналогично (3)-(6) – Рис.1, блок 3:

(13) **Opt** $F(X)=\{$**max** $F_1(X)=\{$**max** $f_k(X), k=\overline{1,K}_1\}$,

(14) **min** $F_2(X)=\{$**min** $f_k(X), k=\overline{1,K}_2\}\}$,

(15) $G(X)\le 0,\ x_j^{\min} \le x_j \le x_j^{\max},\ j=\overline{1,N}$.

Предполагаем, что задача (13)-(15) относится к классу выпуклых задач, а множество допустимых точек ***S***, представленных ограничениями (15) не пусто и представляет собой компакт. Отсюда можно определить оптимум по любому из критериев «***K***». ВЗМП (13)-(15) является моделью ТС в статике, но такая модель может использоваться для исследования динамических процессов за небольшой период времени [2].

3.2. Принятие решений на базе модели ТС (13)-(15) при равнозначных критериях [1, 5, 6].

Принимаемое решение определяется решением векторной задачи (13)-(15) при равнозначных критериях, т. е. отсутствием приоритета на какой либо критерий.

Методы решения основаны на нормализации критериев и принципе гарантированного результата представлены в разделе 2. Результат решения:

(16) $\boldsymbol{X^o}=\{\lambda^o, X^o\}; f_k(X^o),\ k=\overline{1,K}\ ;\ \lambda_k(X^o),\ k=\overline{1,K}\ ;\ \lambda^o$.

Выполняется анализ конструктивных параметров X^o и характеристик $f_k(X^o),\ k=\overline{1,K}$ технической системы. Если они удовлетворяют требованиям ЛПР, то переходим блоку 8, иначе следующий блок.

3.3. Принятие решений на основе модели ТС (13)-(15) при заданном приоритете критерия. Решение, полученное в предыдущем блоке, определяется исходя из равнозначности критериев ТС. В реальных условиях обычно накладывается приоритет (предпочтение) какого либо из критериев ТС, например, $q\in K$. Решение в этом случае выбирается из множества точек $S_q\in S$, лежащих между точками X^o и X_q^*, $q\in K$.

Методы решения основаны на нормализации критериев, принципе гарантированного результата и аксиоматики приоритета критерия в ВЗМП [1, 5, 7].

Выполняется анализ конструктивных параметров X^o и характеристик $f_k(X^o),\ k=\overline{1,K}$ технической системы с приоритетом критерия. Если они удовлетворяют требованиям ЛПР, то переходим блоку 7, иначе предыдущий блок.

3.4. Окончательное принятие решения при заданном приоритете критерия. Результаты:

(17) $\boldsymbol{X^o}=\{\lambda^o, X^o\}; f_k(X^o),\ k=\overline{1,K}\ ;\ p_k^q * \lambda_k(X^o),\ k=\overline{1,K}\ ;\ \lambda^o$

определяют параметры и характеристики технической системы.

Блок 4. *Практическая реализация* (Стандартные блоки)

4.1. На основе конструктивных параметров X^o с помощью системы автоматизированного проектирования формируется проектная документация ТС, функционирование которой определяется характеристиками $f_k(X^o),\ k=\overline{1,K}$. Строится опытный образец, который передается в опытную эксплуатацию.

4.2. Опытная эксплуатация. По результатам опытной эксплуатации могут быть получены экспериментальные данные конструктивных параметров X^{op} и функциональных характеристик $f_k(X^{op}),\ k=\overline{1,K}$. Они сравниваются с параметрами X^o из математической модели:

(18) $\Delta X^{*o} = X^o - X^{*o},\ f_k(\Delta X^{*o}),\ k=\overline{1,K}$.

Если отклонения близки к нулю: $\Delta X^{*o} \cong \mathbf{0}$, то ТС передается в промышленную эксплуатацию. Если отклонения значительны: $\Delta X^{*o} \gg \mathbf{0}$, то по результатам опытной эксплуатации начинается второй этап улучшения модели.

4.3. Промышленная эксплуатация. Прикладную часть моделирования ТС представим в виде методологии решения ВЗМП с приоритетом критерия и покажем на тестовых примерах моделей ТС, реализованных в системе Matlab.

3. Моделирование технической системы в условиях неопределенности

Рассмотрим численную задачу моделирование технической системы, в которой известны данные о некотором наборе дискретных значений ТС (блоки 2, 3 рисунка 1).

Постановка задачи.

Дано. Техническая система, функционирование которой определяется двумя параметрами $X=\{x_1, x_2\}$ – вектор (управляемых) переменных. Исходными данными для решения задачи являются четыре критерия (характеристики) $Y(X)=\{y_1(X), y_2(X), y_3(X), y_4(X)\}$, величина оценки которых зависит от вектора X. Числовые значения параметров X и характеристик $Y(X)$ представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Числовые значения параметров и характеристик ТС.

x_1	x_2	$y_1(X)\rightarrow$**max**	$y_2(X)\rightarrow$**max**	$y_3(X)\rightarrow$**max**	$y_4(X)\rightarrow$**min**
20	20	68.4	4340	1148	490.9
20	40	69.6	4180	1473	483.1
20	60	71.9	4420	1798	557.3
20	80	72.1	3860	2122	521.5
40	20	78.7	4960	725	498.1
40	40	77.2	4340	968	521.5
40	60	79.6	4020	1212	549.9
40	80	82.1	3700	1456	578.3
60	20	84.3	5300	440	507.3
60	40	88.1	4820	572	549.9
60	60	91.8	4340	734	592.5
60	80	95.5	3860	897	635.1
80	20	97.4	5990	202	521.5
80	40	102.3	5620	284	578.3
80	60	107.3	4980	385	635.1
80	80	112.2	4340	446	691.9

В принимаемом решении, величину оценки по первой, второй и третьей характеристики (критерию) желательно, получить как можно выше (*max*), четвертой как можно ниже (*min*). В ТС параметры $X=\{x_1, x_2\}$ изменяются в следующих пределах: $x_1, x_2 \in$ [20. 40. 60. 80.].

Требуется, Принять наилучшее (оптимальное) решение.

Решение задачи (3)-(6) в условиях неопределенности в соответствии с рассмотренной методологией представлены двумя (2-м, 3-м) блоками:

2 блок. *Построение векторной задачи* математического программирования - модели технической системы в условиях неопределенности.

2.1. Рассматривается ТС, экспериментальные данные которой представлены в таблице 1. Исходные данные таблицы 1 сформированы в системе *Matlab* в виде матрицы

(19) $I=|X,Y| =\{x_{i1}\ x_{i2}\ y_{i1}\ y_{i2}\ y_{i3}\ y_{i4},\ i=\overline{1,M}\}$.

2.2. Для каждого экспериментального набора данных y_k , $k=\overline{1,4}$ строится функция регрессии методом наименьших квадратов $\min\sum_{i=1}^{M}(y_i-\overline{y_i})^2$ в системе *Matlab*. Для этого формируется полином A_k, определяющий взаимосвязь факторов $X_i=\{x_{1i}, x_{2i}\}$ (19) и функции $\overline{y}_{ki}=f(X_i,A_k)$, $k=\overline{1,4}$, и решается в цикле система уравнений аналогичная (12.6.2)-(12.6.6) из [5].

Результатом является система коэффициентов $A_k=\{a_{0k}, a_{1k}, a_{2k}, a_{k3}, a_{4k}, a_{5k}\}$, которая в программе представлена матрицей A в виде таблицы 2.

Таблица 2 - Коэффициенты функции регрессии характеристик ТС

Коэффициенты	f_1	f_2	f_3	f_4
a_0	67.425	4456.3	1273.5	481.7
a_1	0.0278	- 2.9	-24.9	-0.8644
a_2	0.0037	0.4	0.1	0.0073
a_3	-0.0703	3.5	20.1	0.4419
a_4	0.0005	- 0.1	0.0	-0.0036
a_5	0.0033	- 0.3	-0.	0.0341

Каждая графа матрицы представляет функцию:

(20) $f_k(X,A) = a_{0k} + a_{1k}x_1 + a_{2k}x_1^2 + a_{3k}x_2 + a_{4k}x_2^2 + a_{5k}x_1 * x_2, k = \overline{1,4}$.

Коэффициент детерминации RRj = [0.9835 0.9985 0.9986 0.9871] по каждому критерию соответственно, подробнее в [5, с. 394].

Блок 3. *Общая часть*.

3.1. Используя коэффициенты функции регрессии таблицы 2, построим функциональную зависимость каждой характеристики $k \in \boldsymbol{K}$ и ограничений от всех параметров ТС. Множество критериев $\boldsymbol{K=4}$, из них три критерия $f_1, f_2, f_3 \rightarrow$max и $f_4 \rightarrow$min. В итоге задачу принятия решений в условиях неопределенности представим векторной задачей математического программирования:

(21) **opt** $F(X)=\{$**max** $F_1(X)=\{max\, f_1(X) \equiv A(1,1)+ A(2,1)*x_1+ A(3,1)*x_1^2+ A(4,1)*x_2+A(5,1)*x_2^2+ A(6,1)*x_1*x_2$,

(22) **max** $f_3(X) \equiv A(1,2)+ A(2,2)*x_1+ A(3,2)*x_1^2+ A(4,2)*x_2+A(5,2)*x_2^2+ A(6,2)*x_1*x_2$,

(23) **max** $f_2(X) \equiv A(1,3)+ A(2,3)*x_1+ A(3,3)*x_1^2+ A(4,3)*x_2+A(5,3)*x_2^2+ A(6,3)*x_1*x_2\}$,

(24) **min** $F_2(X)=\{$**min** $f_4(X) \equiv A(1,4)+ A(2,4)*x_1+A(3,4)*x_1^2+ A(4,4)*x_2+A(5,4)*x_2^2+A(6,4)*x_1*x_2\}\}$

при ограничениях

(25) $1000 \le f_2(X) \equiv A(1,2)+ A(2,2)*x_1+ A(3,2)*x_1^2+ A(4,2)*x_2+ A(5,2)*x_2^2 + A(6,2)*x_1*x_2 \le 3100$,

(26) $20 \le x_1 \le 80$, $20 \le x_2 \le 80$.

Модель ТС (21)-(26), у которой функциональная зависимость каждой характеристики (критерия) $k \in \boldsymbol{K}$ (21)-(24) и ограничений (25)-(26) от всех параметров ТС получена с учетом физических, технологических процессов трактуется, как модель в условиях определенности.

Результат, *как в условиях определенности, так и неопределенности,* - векторная задача математического программирования – модель ТС сформирована.

3.2. Решаем ВЗМП (21)-(26) с равнозначными критериями.

Шаг 1. Решение задачи (21)-(26) по каждому критерию отдельно, при этом используется функция *fmincon*(…) системы *Matlab* [8], обращение к функции *fmincon*(…) рассмотрено в [4]. В результате расчета по каждому критерию получаем точки оптимума: X_k^* и $f_k^* = f_k(X_k^*)$, $k = \overline{1,K}$ – величины критериев в этой точке, т. е. наилучшее решение по каждому критерию:
$X_1^* = \{x_1 = 73.8303, x_2 = 80.0\}, f_1^* = f_1(X_1^*) = -106.7$; $X_2^* = \{x_1 = 78.052, x_2 = 47.336\}, f_2^* = f_2(X_2^*) = 5500.0$;
$X_3^* = \{x_1 = 20.0, x_2 = 75.47\}, f_3^* = f_3(X_3^*) = -2030.6$; $X_4^* = \{x_1 = 20.0, x_2 = 20.0\}, f_4^* = f_4(X_4^*) = 488.4$.
Ограничения (25)-(26) и точки оптимума в координатах $\{x_1, x_2\}$ представлены на рисунке 2.

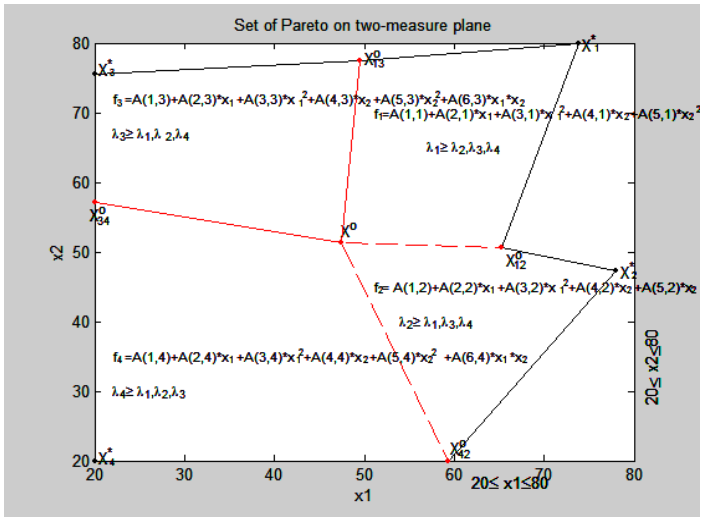


Рисунок 2. Множество Парето, $S^o \subset S$ в двухмерной системы координат

Ш а г 2. Определяется наихудшая неизменяемая часть каждого критерия (антиоптимум):

$X_1^o = \{x_1=20.0, x_2=20.0\}, f_1^o = f_1(X_1^o) = 69.6; X_2^o = \{x_1=20.1, x_2=75.4\}, \quad f_2^o = f_2(X_2^*) = 3800;$

$X_3^o = \{x_1= 80.0, x_2=50.3\}, f_3^o = f_3(X_3^o) = 127.7; X_4^o = \{x_1=80.0, x_2=80.0\}, f_4^o = f_2(X_4^*) = -689.8.$

Ш а г 3. Выполняется анализ множества точек, оптимальных по Парето, для этого в точках $X^* = \{X_1^*, X_2^*, X_3^*, X_4^*\}$ определяются величины целевых функций $F(X^*) = \left\| f_q(X_k^*) \right\|_{q=\overline{1,K}}^{k=\overline{1,K}}$, вектор $D=(d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4)^{\mathrm{T}}$ отклонений по каждому критерию на допустимом множестве $\boldsymbol{S}$: $d_k = f_k^* - f_k^0$, и матрица $\lambda(X^*) = \left\| \lambda_q(X_k^*) \right\|_{q=\overline{1,K}}^{k=\overline{1,K}}$ значений относительных оценок, где $\lambda_k(X) = (f_k^* - f_k^0)/d_k$.

$$F(X^*) = \begin{vmatrix} 577.8 & 1628.5 & 88.7 & 208.8 \\ 316.3 & 1000.0 & 76.7 & 26.0 \\ 237.1 & 3066.7 & 573.1 & 77.2 \\ 45.0 & 2979.6 & 557.1 & 8.2 \end{vmatrix}, \quad D = \begin{vmatrix} 532.7806 \\ -2100.0 \\ 507.4099 \\ -203.832 \end{vmatrix}, \quad \lambda(X^*) = \begin{vmatrix} 1.0 & 0.7007 & 0.0455 & 0.0157 \\ 0.5093 & 1.0 & 0.0218 & 0.9126 \\ 0.3605 & 0.0159 & 1.0 & 0.6611 \\ 0 & 0.0573 & 0.9685 & 1.0 \end{vmatrix}$$

Ш а г 4. Построение λ-задачи осуществляется в два этапа: первоначально строится максиминная задача оптимизации с нормализованными критериями:

(27) $\lambda^o = \max\limits_{x} \min\limits_{k} \lambda_k(X), \ G(X) \le 0, \ X \ge 0,$

которая на втором этапе преобразуется в стандартную задачу математического программирования (λ-задача):

(28) $\lambda^o = \mathbf{max}\ \lambda,$

(29) $\lambda - \dfrac{67.4+0.0278*x_1 + 0.0037*x_1^2 - 0.0703*x_2 + 0.0005*x_2^2 + 0.0033*x_1*x_3 - f_1^o}{f_1^* - f_1^o} \le 0,$

(30) $\lambda - \dfrac{4456.3 - 2.9*x_1 + 0.4*x_1^2 + 3.5*x_2 - 0.1*x_2^2 - 0.3*x_1*x_3 - f_2^o}{f_2^* - f_2^o} \le 0,$

(31) $\lambda - \dfrac{1273.5 - 24.9*x_1 + 0.1*x_1^2 + 20.1*x_2 + 0.0*x_2^2 - 0.02*x_1*x_3 - f_3^o}{f_3^* - f_3^o} \le 0,$

(32) $\lambda - \dfrac{481.7-0.8644*x_1+0.0073*x_1^2+0.4419*x_2-0.0036*x_1*x_2+0.0341*x_1*x_3-f_4^o}{f_4^*-f_4^o} \le 0,$

(33) $1000 \le f_2(x) \le 3100; \quad 0 \le \lambda \le 1, \; 20 \le x_1 \le 80, \; 20 \le x_2 \le 80, \; 20 \le x_3 \le 80,$

где вектор неизвестных имеет размерность N+1: $\boldsymbol{X}=\{x_1, \dots, x_N, \lambda\}$. Обращение к функции: [Xo,Lo]=fmincon('Z_TehnSist_4Krit_L',X0,Ao,bo,Aeq,beq,lbo,ubo,'Z_TehnSist_LConst',options).

В результате решения ВЗМП (21)-(26) при равнозначных критериях и соответствующей λ-задачи (28)-(33) получим: $\boldsymbol{X^o}=\{X^o, \lambda^o\}=\{X^o=\{x_1=47.4, x_2=51.28\}, \lambda^o=0.3558\}$ - точку оптимума – конструктивные параметры ТС – представим ее на рисунке 1; $f_k(X^o)$, $k=\overline{1,K}$ - величины критериев (характеристик ТС): $\{f_1(X^o)=82.8, f_2(X^o)=4404.9, f_3(X^o)=862.5, f_4(X^o)=553.2\}$; $\lambda_k(X^o)$, $k=\overline{1,K}$ - относительные оценки $\{\lambda_1(X^o)=0.3558, \lambda_1(X^o)=0.3558, \lambda_1(X^o)=0.3861, \lambda_1(X^o)=0.6781\}$;

$\lambda^o=0.3558$ – это максимальный нижний уровень среди всех относительных оценок, измеренный в относительных единицах: $\lambda^o=min\,(\lambda_1(X^o), \lambda_2(X^o), \lambda_3(X^o), \lambda_4(X^o))$, λ^o – также называют гарантированным результатом в относительных единицах, т. е. $\lambda_k(X^o)$ и соответственно характеристики ТС $f_k(X^o)$ нельзя улучшить, не ухудшая при этом другие характеристики.

В допустимом множестве точек S, образованных ограничениями (33), точки оптимума $X_1^*, X_2^*, X_3^*, X_4^*$, объединенных в контур, представляют множество точек, оптимальных по Парето, $S^o \subset S$. Рассчитаем дополнительные точки уточняющие границу множества Парето. Для этого λ-задача (28)-(33) решается с двумя критериями: $X_{12}^o=\{65.3\ 50.6\}$, $\lambda^o(X_{12}^o)=0.648$; $X_{13}^o=\{49.5\ 77.45\}$, $\lambda^o(X_{13}^o)=0.\ 5339$; $X_{34}^o=\{20\ 20\}$, $\lambda^o(X_{34}^o)=0.\ 693$; $X_{42}^o=\{50.11\ 20.\}$, $\lambda^o(X_{42}^o)=0.732$.

Множество Парето $S^o \subset S$ лежит между точками оптимума $X_1^* X_{12}^o X_2^* X_{13}^o X_3^* X_{34}^o X_4^* X_{42}^o$. Координаты этих точек, а также относительные оценки покажем в трех мерном пространстве на рисунке 3, где третья ось λ - относительная оценка.

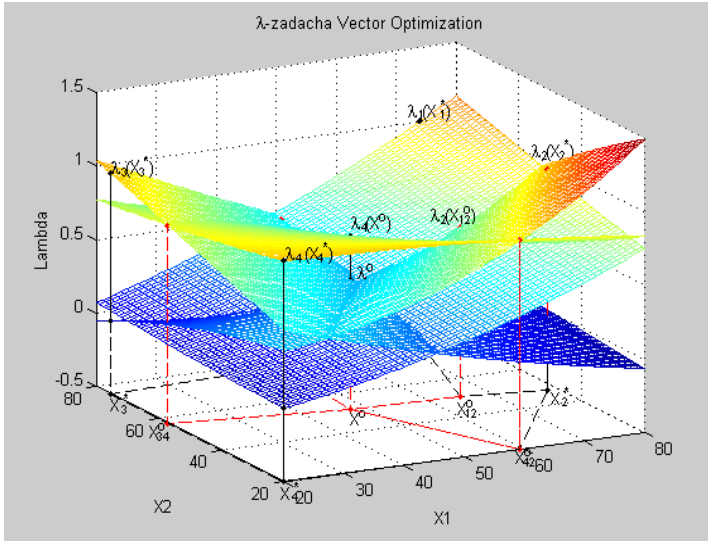


Рисунок 3. Решение λ-задачи в трехмерной системы координат x_1, x_2 и λ

Заключение

Проблема принятия оптимального решения в сложной технической системе по некоторому набору функциональных характеристик является одной из важнейших задач системного анализа и проектирования. В работе представлена новая технология (методология) построения математической модели технической характеристики (критерия) в условиях определенности или неопределенности и принятия оптимального решения на ее основе. При построении такой характеристики использованы регрессионные методы преобразования информации и построения модели технической системы в виде векторной задачи оптимизации. Методология моделирования и принятие оптимального решения основана на нормализации критериев и принципа максимина. Данная методология имеет системный характер. Авторы готовы участвовать в решении векторных задач линейного и нелинейного программирования – моделей экономических и технических систем.

Список литературы

[1] Машунин Ю.К. Методы и модели векторной оптимизации. М.: Наука, 1986. - 141 с.

[2] Машунин Ю.К., Левицкий В. Л. Методы векторной оптимизации в анализе и синтезе технических систем. Владивосток: ДВГАЭУ. 1996. 131 с.

[3] Машунин Ю.К. Решение композиционных и декомпозиционных задач синтеза сложных технических систем методами векторной оптимизации//Изв. РАН. Теория и системы управления. 1999. N3. С. 88-93.

[4] Машунин Ю.К., Машунин К.Ю. Моделирование технических систем в условиях неопределенности и принятие оптимального решения //Изв. РАН. ТиСУ. 2013. №4. С. 19-35.

[5] Машунин Ю.К. Теория управления. Математический аппарат управления в экономических системах. – М.: Логос. 2013. 448 с. (Новая университетская библиотека)

[6] Mashunin Yu.K. Mashunin K.Yu. Modeling of technical systems on the basis of vector optimization (1. At equivalent criteria) / International Journal of Engineering Sciences & Research Technology. 3(9): September, 2014. P. 84-96 .

[7] Mashunin Yu.K. Mashunin K.Yu. Modeling of technical systems on the basis of vector optimization (2. with a Criterion Priority) / International Journal of Engineering Sciences & Research Technology. 3(10): October, 2014. P. 224-240.

[8] Кетков Ю. Л., Кетков А.Ю., Шульц М. М.. МАТЛАБ 6.х.: программирование численных методов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 672 с.

ОБ Н-МОДЕЛЯХ БЕЗЫНЕРЦИОННЫХ СИСТЕМ

Е.Д. Михов, А.А. Корнеева

Сибирский федеральный университет
г.Красноярск , пр.Свободный, д.76а – 810, Россия
edmihov@mail.ru
тел. 8-923-309-21-82

Ключевые слова: *априорная информация, идентификация, непараметрическая модель, непараметрические алгоритмы, Н-модели, пространство дробной размерности.*

Abstract
A modeling of discrete-continuous processes with "tubular" structure in the space of "input-output" variables. Modeling of this process differs significantly from the class of conventional parametric models representing the same surface area. In the construction of students parametric models "tubular" processes require the use of appropriate non-parametric indicators. Some special examples of modeling "tubular" processes, from which it follows that the processes take place in the spaces of fractional dimension. Cited the case of functions of several variables and analyzed the situation when in the course of time, these variables can "disappear" and "occur" again. It is shown that the calculation of the fractional dimension space can be done in different ways.

Введение

Идентификация многих стохастических объектов часто сводится к идентификации статических систем с запаздыванием. Обусловлено это тем, что некоторые выходные переменные объекта контролируются через значительно большие интервалы времени, чем входные и существенно превышают постоянную времени объекта. Например, ряд переменных измеряется электрическим способом (в этом случае дискретность контроля Δt может быть достаточно мала), а другие переменные контролируются в результате химического анализа или физико-механических испытаний (в этом случае дискретность контроля ΔT – велика, т.е. $\Delta T >> \Delta t$).

Наиболее общая схема исследуемого дискретно-непрерывного процесса может быть представлена на нижеследующем рисунке[1]:

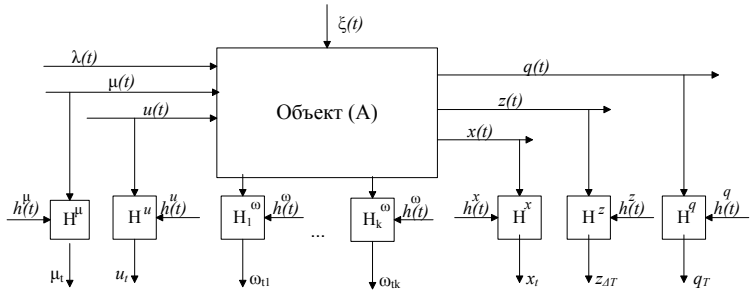


Рисунок 1 – Общая схема исследуемого процесса

На рисунке 1 приняты обозначения: А – неизвестный оператор объекта, $x(t)$, $z(t)$, $q(t)$ – выходные переменные процесса, $u(t)$ – управляющее воздействие, $\mu(t)$ – входная

неуправляемая, но измеряемая переменная процесса, $\lambda(t)$ – входная неуправляемая и не измеряемая переменная процесса, $\xi(t)$ – случайное воздействие, $\omega^i(t)$: $i=1,2,...,k$ – переменные процесса, контролируемые по длине объекта, (t) – непрерывное время, H^{μ}, H^u, H^x, H^z, H^q, H^{ω} – каналы связи, соответствующие различным переменным, включающие в себя средства контроля, приборы для измерения наблюдаемых переменных, μ_t, u_t, x_t, $z_{\Delta T}$, q_T, ω_t – означает измерение $\mu(t)$, $u(t)$, $x(t)$, $z(t)$, $q(t)$, $\omega(t)$ в дискретное время, $h^{\mu}(t)$, $h^u(t)$, $h^x(t)$, $h^z(t)$, $h^q(t)$, $h^{\omega}(t)$ – со значком вверху – случайные помехи измерений соответствующих переменных процесса.

Отметим существенное отличие выходных переменных $z(t), q(t)$ и $x(t)$, представленных на рисунке 1. Выходная переменная $x(t)$, равно как и входные, контролируется через интервалы времени Δt, $q(t)$ контролируются через существенно большие интервалы времени ΔT, z – через T, $T >> \Delta T >> \Delta t$. С практической точки зрения для исследуемого процесса, часто наиболее важным, является контроль переменных $z(t)$.

В этом случае значения выходных переменных зависят от входных и $\omega(t)$ (дополнительная информация), следующим образом:

(1) $x(t) = A(u(t), \mu(t), \omega(t), \lambda(t), \xi(t), t)$.

При моделировании подобных процессов, учитывая различную дискретизацию контроля измерений $x(t)$, $q(t)$ и $z(t)$ при прогнозировании $q(t)$ и $z(t)$ естественно использовать весь набор переменных, влияющих на прогноз $x(t)$, $q(t)$, $z(t)$:

(2) $\hat{x}(t) = \hat{A}(u(t), \mu(t), \omega(t), t)$

(3) $\hat{q}(t) = \hat{A}(u(t), \mu(t), \omega(t), \hat{x}(t), t)$,

(4) $\hat{z}(t) = \hat{A}(u(t), \mu(t), \omega(t), \hat{x}(t), \hat{q}(t), t)$.

Учитывая большие значения ΔT и T, значительно превышающих постоянные времени объекта, при моделировании придется учитывать, что процессы относятся к классу статических с запаздыванием, что значительно повышает их роль и значение в задачах идентификации и управления стохастическими системами.

Для дальнейшего изложения, без нарушения общности, «свернем» все входные и выходные переменные в соответствующие вектора. Тогда исследуемый объект может быть представлен статическим с запаздыванием. Такой процесс целесообразно по соответствующему каналу представить в виде:

(5) $x(t) = f(u(t-\tau), \xi(t))$,

где $x(t)$ – выходная переменная объекта, $u(t-\tau)$ – совокупная входная переменная, τ – запаздывание, $\xi(t)$ – случайное возмущение, действующее на объект, t – непрерывное время.

При моделировании разнообразных дискретно-непрерывных процессов в настоящее время доминирует теория идентификации в «узком» смысле. Ее содержание состоит в том, что на первом этапе, на основании имеющейся априорной информации, определяется параметрический класс оператора объекта A^{α}, например:

(6) $\tilde{x}_{\alpha}(t) = A^{\alpha}(u(t), \alpha)$,

где A^{α} – параметрическая структура модели, α – вектор параметров.

На втором этапе осуществляется оценка параметров α на основе имеющейся выборки $\{x_i, u_i, i=\overline{1,s}\}$, S – объем выборки. Успех решения задачи идентификации в этом случае существенно зависит от того, насколько «удачно» определен оператор (6).

Идентификация в «широком» смысле предполагает отсутствие этапа выбора параметрического класса оператора. Часто оказывается значительно проще определить класс операторов на основе сведений качественного характера, например, линейности процесса или типа нелинейности, однозначности либо неоднозначности и др. В этом случае задача идентификации состоит в оценивании этого оператора на основе выборки $\{x_i, u_i, i=\overline{1,s}\}$ [2,3]

(7) $\tilde{x}_s(t) = A_s(u(t), \vec{x}_s, \vec{u}_s)$,

где $\vec{x}_S = (x_1, x_2, ..., x_S), \vec{u}_S = (u_1, u_2, ..., u_S)$ – временные векторы. Оценка оператора A_s может быть осуществлена средствами непараметрической статистики. Примечательным здесь является то, что при этом исключается этап выбора параметрической структуры. Тем самым, можно утверждать, что идентификация в этом случае, а это вариант идентификации в «широком» смысле, является более адекватной реальным задачам практики.

Пусть $u = (u_1, \ldots, u_k) \in \Omega(u) \subset R^k$, $x \in \Omega(x) \subset R^1$. Вообще говоря, каждая компонента вектора $u_i \in [a_i; b_i]$, $i=\overline{1,k}$, а $x \in [c;d]$. При исследовании реальных процессов значения коэффициентов $\{a_i, b_i, c, d\}$, $i=\overline{1,k}$ всегда известны. В технологических процессах значения этих коэффициентов регламентируются технологическим регламентом (картой). В дальнейшем, без нарушения общности, эти интервалы примем единичными [1], тогда $\Omega(u)$ – единичный гиперкуб, $\Omega_k(u) = [0;1]$, т.е. $u \in [0;1]$, $\Omega_{k+1}(u,x) = [0;1]$, $(u,x) \in \Omega_{k+1}(u,x)$.

Адаптивная модель в этом случае будет выглядеть следующим образом:

(8) $\hat{x}_s(u) = \hat{f}(u, \alpha_s)$.

Наиболее «слабым» местом здесь является выбор параметрической структуры модели. Если на первом этапе допущена достаточно грубая ошибка, то, в итоге, полученная модель вряд ли будет удовлетворительной. Эта проблема достаточно подробно обсуждалась в [2, 3]. Обратим внимание на то, что модели класса (8) представляют собой гиперповерхности в пространстве «входных-выходных» переменных объекта, т.е. $(u,x) \in \Omega(u,x) \subset R^{k+1}$.

Если исследуемый процесс имеет «трубчатую» структуру[2], то модель (8) необходимо подкорректировать следующим образом:

(9) $\hat{x}_s(u) = I_s(u)\hat{f}(u, \alpha_s)$,

либо:

(10) $\hat{x}_s(u) = I_s(u)\sum_{j=1}^{N} \alpha_{sj}\varphi_j(u)$,

где $\varphi_j(u)$ – система линейно-независимых функций, индикатор $I_s(u)$ имеет вид:

(11) $I_s(u) = \begin{cases} 1, & \text{если } u \in \Omega_s^H(u); \\ 0, & \text{если } u \overline{\in} \Omega_s^H(u). \end{cases}$

Заметим лишь, что, вообще говоря, область $\Omega^H(u)$ нам не известна, а известна лишь выборка $\{x_i, u_i, i=\overline{1,s}\}$. Если индикатор равен нулю, то оценка $\hat{x}_s(u)$ не может быть вычислена, т.е. при таких значениях компонент вектора $u \in \Omega(u)$ процесс протекать не может. Если

индикатор $I_s(u)$ при любом значении $u \in \Omega(u)$ равен единице, то модель (9) совпадает с (8). В качестве оценки индикатора $I_s(u)$ можно принять следующее приближение:

$$(12)\ I_s(u) = \operatorname{sgn} \sum_{i=1}^{s} \Phi(c_s^{-1}(x_s(u) - x_i)) \prod_{j=1}^{k} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)),$$

где

$$(13)\ x_s(u) = \sum_{i=1}^{s} x_i \prod_{j=1}^{k} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) / \sum_{i=1}^{s} \prod_{j=1}^{k} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)),$$

а параметр размытости c_s и колоколообразная функция $\Phi(\cdot)$ удовлетворяют некоторым условиям [2].

Таким образом, при известном значении $u = u' \in \Omega(u)$ сначала строится оценка $x_s(u = u')$ по формуле (13), затем вычисляется индикатор $I_s(u)$, и только на следующем этапе используются модели (9) или (10), если индикатор оказался равным единице. Если же индикатор равен нулю, то это означает, что хотя $u' \in \Omega(u)$, но $u' \overline{\in} \Omega^H(u)$, т.е. компоненты вектора $u = u' = (u'_1, \ldots, u'_k)$ определены не верно, иными словами, реально протекающий «трубчатый» процесс не соответствует совокупности заданных значений компонент вектора $u = u'$. Причины этого могут состоять в том, что компоненты вектора $u = u' = (u'_1, \ldots, u'_k)$ выбраны неверно, либо измерены с значительной погрешностью типа «выброс». Конечно же, это справедливо только при условии, что мы располагаем представительной выборкой $\left\{x_i, u_i, i = \overline{1, s}\right\}$. Следует заметить, что использование традиционных моделей типа (8) позволит получить оценку $\hat{x}(u = u')$, которая, естественно, будет далека от реальности.

Естественно считать, что процесс идентификации объекта в параметрической постановке также следует осуществлять с учетом «трубчатой» структуры объекта. Примем класс моделей «трубчатого» процесса в виде

$$(14)\ \hat{x}(u) = I(u) \sum_{j=1}^{N} \alpha_j \varphi_j(u),$$

где $\varphi_j(u)$, $j = \overline{1, N}$ – система выбранных линейно-независимых функций.

Сформируем критерий оптимальности:

$$(15)\ R(\alpha) = M\left\{(x(u) - I(u) \sum_{j=1}^{N} \alpha_j \varphi_j(u))^2\right\}.$$

Наша цель состоит в отыскании таких $\alpha^* = (\alpha_1^*, \ldots, \alpha_N^*)$, что

$$(16)\ R(\alpha^*) = \min_{\alpha} R(\alpha).$$

Решение задачи (16) дается системой рекуррентных соотношений:

$$(17)\ \alpha_s^l = \alpha_s^{l-1} + \gamma_s^l (x_s - I_s(u_s) \sum_{j=1}^{N} \alpha_{s-1}^j \varphi_j(u_s)) \varphi_j(u_s) I_s(u_s), l = 1, \ldots, N.$$

В качестве оценки $I(u_s)$ примем приближение:

$$(18)\ I_s(u_s) = \operatorname{sgn} \sum_{i=1}^{s} \prod_{j=1}^{k} \Phi\left(\frac{u_s - u_i^j}{c_s}\right).$$

Ясно, что сходимость α_s к α_s^* следует при $s \to \infty$.

Приведем следующий пример, имеющий отношение к идентификации безынерционной системы. Рассмотрим следующий простой частный случай. Пусть объект описывается уравнением:

(19) $x(u) = f(u_1, u_2, u_3)$,

где трехмерный вектор $u = (u_1, u_2, u_3) \in R^3$ является входной переменной, а $x \in R^1$ – выходная переменная. Традиционный путь построения модели процесса, описываемого (19) состоит в определении класса параметрических зависимостей $\hat{x}(u) = \hat{f}(u_1, u_2, u_3, \alpha)$ и последующей оценки параметров α тем или иным способом по выборке наблюдений $(u_i, x_i), i = \overline{1,s}$, где s – объем выборки. Проанализируем этот пример с разных точек зрения. Пусть компоненты вектора входных переменных $u = (u_1, u_2, u_3)$ стохастически никак не связаны, т.е. независимы. В этом случае естественно использовать обычный традиционный прием, описанный выше. Теперь предположим, что объективно компоненты вектора входных переменных функционально связаны, например,

(20) $u_2 = \varphi_1(u_1)$, $u_3 = \varphi_2(u_2) = \varphi_2(\varphi_1(u_1))$.

Естественно, исследователь не знает о существовании зависимостей (20). В противном случае можно было бы сделать подстановку (20) в (19) и получить следующую зависимость x уже от одной переменной u_1 вида

(21) $x(u) = f(u_1, \varphi_1(u_1), \varphi_2(\varphi_1(u_1)))$.

Таким образом, зависимость (19) в приведенных выше условиях может быть сведена к одномерной зависимости x от u_1. В случае, если зависимость u_3 от u_2 объективно отсутствует, то (19) легко приводится к виду

(22) $x(u) = f(u_1, \varphi_1(u_1), u_3)$,

т.е. к двумерной зависимости x от u_1, u_3. Отсюда можно заключить, что при наличии функциональной зависимости между компонентами вектора u мы получаем зависимость x от u, в данном случае, одно-двух-трехмерные. Подчеркнем еще раз, что о наличии функциональных зависимостей между компонентами вектора входных переменных исследователю не известно. Просто мы проанализировали случай: «Если бы…». А теперь проанализируем наиболее интересный случай, имеющий непосредственное отношение к Н-процессам [1]. Пусть u_3 и u_2, хотя и неизвестным образом, но стохастически связаны [2]. Подчеркнем – стохастически, а не функционально. Вернемся еще раз к анализу того, что произошло. Во-первых, если компоненты вектора u независимы, то исследуемый процесс описывается функцией трех переменных. Если две компоненты вектора входных переменных u связаны функциональной зависимостью, то процесс описывается функцией двух переменных. Наконец, если две переменные связаны стохастически, то процесс описывается функцией более чем двух переменных, но менее чем трех?! Можно считать, что мы приходим к зависимости от дробного числа переменных и, следовательно, к пространству дробной размерности. Например, Б.Мондельброт в [4] замечает: «Кровеносная система человека – пульсирующая, живая – имеет размерность 2.7». Дробная размерность пространств, по-видимому, впервые была отмечена в работах Хаусдорфа и Безиковича.

Рассмотрим следующую ситуацию. Из простоты соображений, пусть интересующий нас процесс описывается (19).

В случае стохастической зависимости между переменными $u_2(u_1)$, $u_3(u_1)$ по имеющимся в наличии обучающим выборкам можно вычислить квадратичную ошибку прогноза $u_{2s}(u_1)$, $u_{3s}(u_1)$. Здесь $u_{2s}(u_1)$, $u_{3s}(u_1)$ есть непараметрические оценки [1].

(23) $$\delta_{21} = \sum_{i=1}^{s} (u_2 - u_{2s}(u_1))^2 \Big/ \sigma_{u_2}^2 , \qquad \delta_{31} = \sum_{i=1}^{s} (u_3 - u_{3s}(u_1))^2 \Big/ \sigma_{u_3}^2 .$$

«Силу» стохастической связи λ между двумя произвольными переменными можно, например, вычислить по формуле:

(24) $\lambda = 1 - \delta$.

Отсюда видно, что самая сильная стохастическая связь (функциональная) равна 1, отсутствие связи имеет место при λ=0, а при стохастической зависимости между входными переменными 0< λ <1.

Если в более общем случае такого рода процесса интерпретировать как функции многих переменных, то изменчивость этой функции во времени может быть, например, показана на нижеследующей цепочке соотношений действующих во времени[1].

(25)
=f (t, **u1**, **u2**, **u3**, **u4**, **u5**) – T1
:f (t, u1, **u2**, **u3**, u4, **u5**) – T2
:f (t, u1, **u2**, **u3**, u4, **u5**) – T3
:f (t, u1, **u2**, **u3**, u4, **u5**) – T4
:f (t, **u2**, **u3**, u4, **u5**, u6) – T5
:f (t, , **u2**, **u3**, u4, **u5**, u6) – T6
:f (t, u1, **u2**, u3, u4, **u5**, u6) – T7
:f (t, u1, **u2**, u3, u4, **u5**, u6) – T8
:f (t, u1, **u2**, u3, u4, **u5**, **u6**, u7) – T9

Поясним наши обозначения. Наиболее темным цветом (**u1**) обозначены переменные, которые оказывают самое сильное влияние на x (функциональная зависимость). Менее темное обозначение (u_1) говорит о более слабом влиянии переменной на x (возможно, достаточно сильная, стохастическая зависимость), более слабое влияние на x оказывают u1 и u1. Ti, где $i = \overline{1,9}$, интервалы времени существования соответствующих зависимостей. Таким образом, в реально действующих процессах подобного рода роли значения переменных изменчивы. Из приведенных выше зависимостей видно, что некоторые переменные могут утрачивать свое значение, а некоторые утрачивают, а потом восстанавливаются, а некоторые новые переменные появляются впервые, как например u6.

Если сохранить математический «облик» интерпретации функции многих переменных как точку многомерного пространства, то мы приходим к наличию пространства дробной размерности F^{λ}. Вычисление размерности F^{λ} можно осуществить, например, так:

(26) $$\dim F^{\lambda} = (n+1) - \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_{i,i+1} ,$$

где n – размерность вектора u, а $\lambda_{i,i+1}$ означает «силу» стохастической связи между u_i и u_{i+1}.

В принципе, могут быть предложены и другие схемы вычисления размерности пространства. Например,

(27) $$\dim F_1^{\lambda} = (n+1) - \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_{1,i+1} ,$$

где $\lambda_{1,i+1}$ – зависимость всех компонент вектора u от одной компоненты u_1.

При достаточно внимательном анализе разложения функций в ряды уместно вспомнить фразу В.И.Арнольда из книги «Теория катастроф» [5]: «Вычисление в этих прикладных исследованиях обычно проводились без общей теории за счет правильного отбрасывания одних членов ряда Тейлора, и оставления других, наиболее важных. Из физиков, особенно систематически применявших теорию катастроф до ее возникновения, стоит особо выделить Л.Д.Ландау. В его руках искусство отбрасывать «несущественные» члены ряда Тейлора, сохраняя меньшие по величине «физически важные» члены, дало много включаемых в теорию катастроф результатов».

Вычислительные эксперименты

Пусть процесс описывается функцией $x = f(u_1, u_2)$ и находится под воздействием помехи $\xi(t)$. Примем обучающую выборку равной 500, входные переменные – независимы (Рис. 2), также покажем зависимость размерности пространства F^λ от s (Рис. 3).

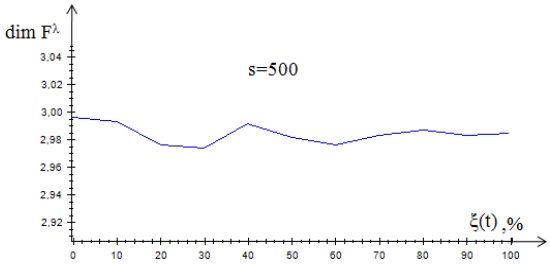


Рисунок 2 – зависимость размерности пространства F^λ в зависимости от уровня помех

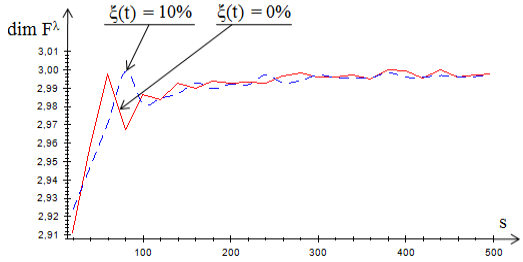


Рисунок 3 – зависимость размерности пространства F^λ в зависимости от объема выборки

На рисунке 2 видно, что при независимых входных переменных, размерность процесса близка к 3.

Рисунок 3 иллюстрирует, что при небольшой выборке, размерность F^λ уменьшается, но при увеличении выборки размерность пространства F^λ близка к 3.

Рассмотрим процесс, имеющий «трубчатую» структуру, то есть H – процесс.

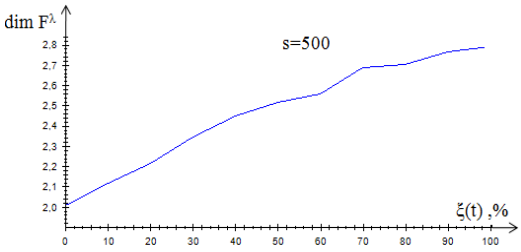


Рисунок 4 – зависимость размерности пространства F^λ в зависимости от уровня помех.

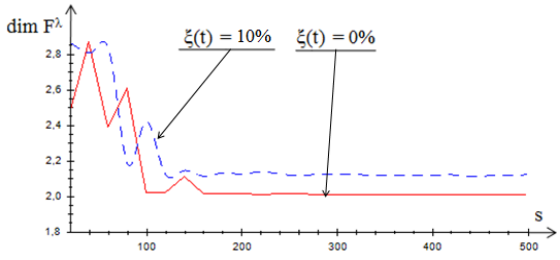


Рисунок 5 – зависимость размерности пространства F^λ без помех и с помехой 10%.

Видно, что у H – процесса, в этом случае, размерность пространства близка к двум (Рис. 4). Объясним, причину данного явления.

Пусть $x = f(u_1, u_2)$, но вследствие того, что данный процесс имеет «трубчатую» структуру $u_2 = g(u_1)$, соответственно $x = f(u_1, u_2) = f(u_1, g(u_1))$. В итоге имеем процесс,

описываемый одной переменной. При увеличении помехи связь между u_1 и u_2 ослабевает, соответственно и размерность процесса растет.

В проведенных экспериментах (Рис. 5) dim F^{λ} отличаются друг от друга, что является следствием того, что u_2, во втором эксперименте стохастически зависит от u_1. Далее проведем эксперимент, когда на входе процесса действуют 10 независимых переменных, а выход, без нарушения общности, скалярный.

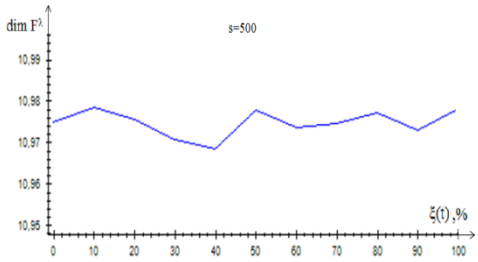


Рисунок 6 – зависимость размерности пространства F^{λ}, в зависимости от уровня помех

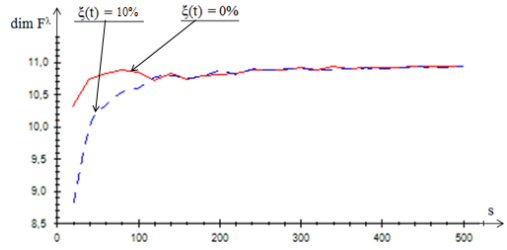


Рисунок 7 – зависимость размерности пространства F^{λ}, в зависимости от объема выборки

На рисунке 6 видно, что размерность близка к 11. Рассмотрим случай, когда в первом на процесс действуют 10% помеха, а во втором – отсутствуют.

На рисунке 7 – размерность пространства F^{λ}, как и следовало ожидать, приближается к 11.

Заключение

Был проведен анализ ситуаций, возникающих при моделировании процессов «трубчатой» структуры, которая имеет место всегда, если компоненты вектора входных переменных процесса стохастически зависимы. В этом случае традиционно используемые модели статических систем с запаздыванием неприменимы или могут приводить к значительным ошибкам. Наиболее интересным является тот факт, что мы приходим к необходимости рассмотрения пространства дробной размерности. Безусловно, интересным является факт исчезновения, и появления влияния некоторых входных переменных в различные периоды времени на значения выходных переменных процесса, что тесно связано не столько с пространством дробной размерности, сколько с пространством изменяющейся размерности.

Список литературы

[1] Медведев А. В. Некоторые замечания к H – моделям безынерционных процессов с запаздыванием // Вестник СибГАУ. 2014. № 2(54), С.24-34.

[2] Медведев А.В. Анализ данных в задаче идентификации // Компьютерный анализ данных моделирования. Т.2.- Минск: БГУ, 1995. С. 201-206.

[3] Медведев А. В. H-модели для безынерционных систем с запаздыванием // Вестник СибГАУ. 2012. № 5(45), С.84-89.

[4] Мондельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М. – Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. 656 с.

[5] Арнольд В.И. Теория катастроф. М.: Наука, 1990. 128 с.

О НАСТРОЙКЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ БЕЗЫНЕРЦИОННЫХ СИСТЕМ

Е.Д. Михов, М.Е. Корнет
Сибирский федеральный университет
г.Красноярск , пр.Свободный, д.76а – 810, Россия
edmihov@mail.ru
тел. 8-923-309-21-82

Ключевые слова: *непараметрическая модель, непараметрические алгоритмы, коэффициент размытости, оптимизация.*

Abstract
A modeling of discrete-continuous processes in space "input - output" variables. Modeling of these processes can be carried out using various parametric and nonparametric. This report examined using non-parametric modeling techniques. When building a model of the object by means of nuclear grade, an important parameter - the coefficient blur kernel. In the report the optimization algorithms coefficient blur kernel, namely the method of enumeration, the flexible polyhedron method and genetic algorithm. As an optimization criterion was selected standard error of the test process models, calculated using the sliding test. As it turns out, the accuracy of the model to optimize the parameters of a blur kernel is slightly inferior to the accuracy of the model with optimized parameter vector blur kernel, and the calculation of the coefficient of blur kernel runs much faster and, as a consequence, the model will be built.

Введение

Идентификация многих стохастических объектов часто сводится к идентификации статических систем. Наиболее общая схема исследуемого дискретно-непрерывного процесса может быть представлена на нижеследующем рисунке[1]:

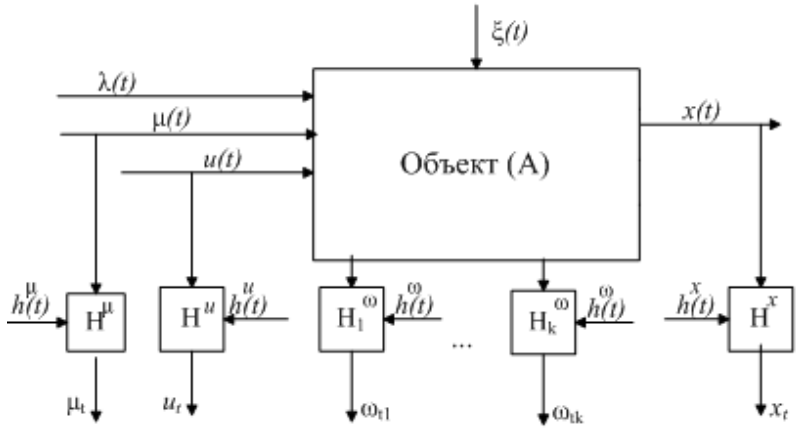


Рисунок 1. Общая схема исследуемого процесса

На рисунке 1 приняты обозначения: А – неизвестный оператор объекта, $\overrightarrow{x(t)}$ – выходной вектор процесса, $\overrightarrow{u(t)}$ – вектор управляющих воздействий, $\overrightarrow{\mu(t)}$ – вектор входных неуправляемых, но измеряемых переменный процесса, $\overrightarrow{\lambda(t)}$ – вектор входных неуправляемых и не измеряемых переменная процесса, $\xi(t)$ – случайное воздействие, $\omega^i(t)$: $i=1,2,...,k$ – переменные процесса, контролируемые по длине объекта, (t) – непрерывное время, H^{μ}, H^{u}, H^{x}, H^{z}, H^{q}, H^{ω} – каналы связи, соответствующие различным переменным, включающие в себя средства контроля, приборы для измерения наблюдаемых переменных, μ_t, u_t, x_t, ω_t – означает измерение $\mu(t), u(t), x(t)$, $\omega(t)$ в дискретное время, $h^{\mu}(t)$, $h^{u}(t)$, $h^{x}(t)$, $h^{\omega}(t)$ – со значком вверху – случайные помехи измерений соответствующих переменных процесса.

При моделировании разнообразных дискретно-непрерывных процессов в настоящее время доминирует теория идентификации в «узком» смысле[5]. Ее содержание состоит в том, что на первом этапе, на основании имеющейся априорной информации, определяется параметрический класс оператора объекта A^{α}, например:

(1) $\tilde{x}_{\alpha}(t) = A^{\alpha}(u(t), \alpha)$,

где A^{α} – параметрическая структура модели, α – вектор параметров.

На втором этапе осуществляется оценка параметров α на основе имеющейся выборки $\{x_i, u_i, i=\overline{1,s}\}$, s – объем выборки. Успех решения задачи идентификации в этом случае существенно зависит от того, насколько «удачно» определен оператор (6).

Идентификация в «широком» смысле предполагает отсутствие этапа выбора параметрического класса оператора. Часто оказывается значительно проще определить класс операторов на основе сведений качественного характера, например, линейности процесса или типа нелинейности, однозначности либо неоднозначности и др. В этом случае задача идентификации состоит в оценивании этого оператора на основе выборки $\{x_i, u_i, i=\overline{1,s}\}$ [6]

(2) $\tilde{x}_s(t) = A_s(u(t), \vec{x}_s, \vec{u}_s)$,

где $\vec{x}_s = (x_1, x_2, ..., x_s), \vec{u}_s = (u_1, u_2, ..., u_s)$ – временные векторы. Оценка оператора A_s может быть осуществлена средствами непараметрической статистики. Примечательным здесь является то, что при этом исключается этап выбора параметрической структуры. Тем самым, можно утверждать, что идентификация в этом случае, а это вариант идентификации в «широком» смысле, является более адекватной реальным задачам практики.

Непараметрическая идентификация

Непараметрическая идентификация представляется в виде моделирования при помощи ядерных оценок(3) [8].

(3) $$x^*_{s+1} = \frac{\sum_{i=1}^{s} u_{(i)1} \prod_{j=1}^{k} \Phi\left(\frac{u^*_{n,s+1} - u_{n,i}}{c_s{}^x}\right)}{\sum_{i=1}^{s} \prod_{j=1}^{k} \Phi\left(\frac{u^*_{n,s+1} - u_{n,i}}{c_s{}^x}\right)}$$

В формуле 3 Ф(*) – это ядерная “сглаживающая” функция (4), а c_s^x – коэффициент размытости ядра.

(4) $$\Phi(o)=\begin{cases}1-|o|, \text{если } |o|\le 1,\\ 0 \quad , \text{если } 1<|o|.\end{cases}$$

Стоит сказать, что от выбранного коэффициента размытости, напрямую зависит качество построенной модели. Данный коэффициент определяет степень участия элементов выборки в вычислении $\hat{x}_{s+1}$ в точке $u_м$(рисунок 2).

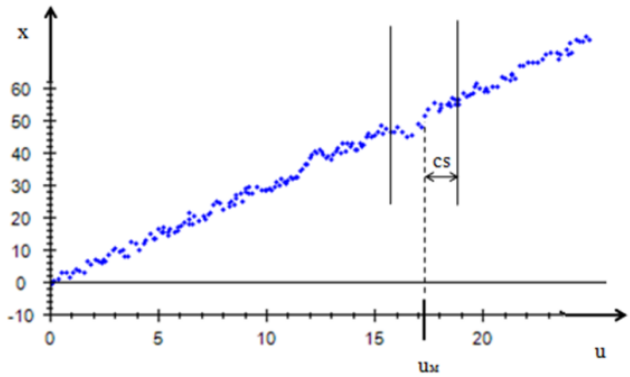


Рисунок 2. Определение коэффициента размытости ядра

Смысл исследования заключается в выборе наиболее точного и быстрого способа оптимизации, а также в выяснении вопроса о необходимости оптимизации коэффициента размытости для каждого входного воздействия. Все исследования проведены на машине с 4-х ядерным процессором, с частотой ядер 2.8 ГГц. Программы написаны в среде Visual Studio 2010, на языке программирования C#.

Для начала оптимизируем вектор коэффициента размытости ядра при помощи метода деформируемых многогранников. Слабостью данного метода можно считать то, что при нахождении минимума, он может «застрять» в локальном экстремуме. Для того, чтобы определить применим ли данный метод, для оптимизации cs, построим график зависимости среднеквадратичной ошибки (б) от cs (Рисунок 3).

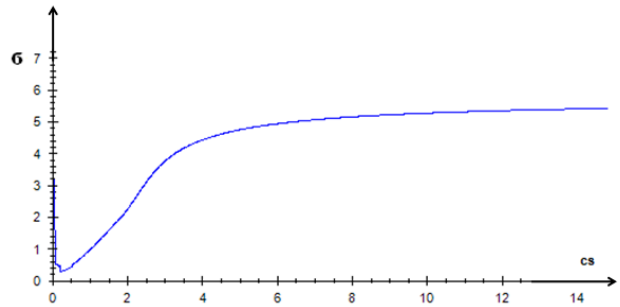


Рисунок 3. Зависимость среднеквадратичной ошибки от коэффициента размытости ядра

Как видно на Рисунке 3, данная зависимость плавная, и в ней нет большого количества локальных минимумов. В связи с этим можно проводить оптимизацию cs при помощи метода деформируемого многогранника [10].

Алгоритм данного метода следующий:

Параметрами метода являются:

коэффициент отражения $\alpha > 0$, обычно выбирается равным 1.

коэффициент сжатия $\beta > 0$, обычно выбирается равным 0,5.

коэффициент растяжения $\gamma > 0$, обычно выбирается равным 2.

1. «Подготовка». Вначале выбирается n+1 точка $x_i = (x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \ldots, x_i^{(n)}),\ i = 1 \ldots n + 1$, образующие симплекс n-мерного пространства. В этих точках вычисляются значения функции:

(5) f1 = f(x1), f2 = f(x2),…, fn+1 = f(xn+1)

2. «Сортировка». Из вершин симплекса выбираем три точки: x_h с наибольшим (из выбранных) значением функции f_h, x_g со следующим по величине значением f_g и x_l с наименьшим значением функции f_l. Целью дальнейших манипуляций будет уменьшение, по крайней мере f_h.

3.Найдём центр тяжести всех точек, за исключением x_h:

$$(6) \quad x_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1, i \neq h}^{n} x_i$$

4.«Отражение». Отразим точку x_h, относительно x_h с коэффициентом α получим точку x_r и вычислим в ней функцию: $f_r = f(x_r)$. Координаты новой точки вычисляются по формуле:

$$(7) \quad x_r = (1+\alpha)x_c - \alpha x_h$$

5.Далее смотрим, насколько нам удалось уменьшить функцию, ищем место f_r в ряду f_h, f_g, f_l.

Если $f_r < f_l$, то направление выбрано удачное и можно попробовать увеличить шаг. Производим «растяжение». Новая точка $x_e = (1 - \gamma)x_c + \gamma x_r$ и значение функции $f_e = f(x_e)$.

Если $f_e < f_r$, то можно расширить симплекс до этой точки: присваиваем точке x_h значение x_e и заканчиваем итерацию (на шаг 9).

Если $f_r < f_e$, то переместились слишком далеко: присваиваем точке x_h значение x_r и заканчиваем итерацию (на шаг 9).

Если $f_l < f_r < f_g$, то выбор точки неплохой (новая лучше двух прежних). Присваиваем точке x_h значение x_r и переходим на шаг 9.

Если $f_g < f_r < f_h$, то меняем местами значения x_r и x_h. Также нужно поменять местами значения f_r и f_h. После этого идём на шаг 6.

Если $f_h < f_r$, то просто идём на следующий шаг 6.

В результате (возможно, после переобозначения) $f_l < f_g < f_h < f_r$.

6.«Сжатие». Строим точку $x_s = \beta x_h + (1 - \beta)x_c$ и вычисляем в ней значение $f_s = f(x_s)$.

7.Если $f_s < f_h$, то присваиваем точке x_h значение x_s и идём на шаг 9.

8.Если $f_s > f_h$, то первоначальные точки оказались самыми удачными. Делаем «глобальное сжатие» симплекса — гомотетию к точке с наименьшим значением x_l:

$$(8) \quad x_i \leftarrow x_l + \frac{(x_i - x_l)}{2}, i \neq l\ .$$

9.Последний шаг — проверка сходимости. Может выполняться по-разному, например, оценкой дисперсии набора точек. Суть проверки заключается в том, чтобы проверить взаимную близость полученных вершин симплекса, что предполагает и близость их к

искомому минимуму. Если требуемая точность ещё не достигнута, можно продолжить итерации с шага 2.

После этого вектор коэффициентов размытости ядра, будет оптимизироваться при помощи генетического алгоритма[12] . Генетический алгоритм выглядит следующим образом:

1. Перед первым шагом нужно случайным образом создать начальную популяцию; даже если она окажется совершенно неконкурентоспособной, вероятно, что генетический алгоритм всё равно достаточно быстро переведёт её в жизнеспособную популяцию. Таким образом, на первом шаге можно особенно не стараться сделать слишком уж приспособленных особей, достаточно, чтобы они соответствовали формату особей популяции, и на них можно было подсчитать функцию приспособленности (Fitness). Итогом первого шага является популяция H, состоящая из N особей.

2. Размножение в генетических алгоритмах обычно половое — чтобы произвести потомка, нужны несколько родителей, обычно два.

Размножение в разных алгоритмах определяется по-разному — оно, конечно, зависит от представления данных. Главное требование к размножению — чтобы потомок или потомки имели возможность унаследовать черты обоих родителей, «смешав» их каким-либо способом.

Особи для размножения обычно выбираются из всей популяции H, а не из выживших на первом шаге элементов H_0 из за того, что проблема многих генетических алгоритмов — недостаток разнообразия (diversity) в особях. Достаточно быстро выделяется один-единственный генотип, который представляет собой локальный максимум, а затем все элементы популяции проигрывают ему отбор, и вся популяция «забивается» копиями этой особи. Есть разные способы борьбы с таким нежелательным эффектом; один из них — выбор для размножения не самых приспособленных, а вообще всех особей.

3. К мутациям относится все, что и к размножению: есть некоторая доля мутантов m, являющаяся параметром генетического алгоритма, и на шаге мутаций нужно выбрать mN особей, а затем изменить их в соответствии с заранее определёнными операциями мутации.

На этапе отбора нужно из всей популяции выбрать определённую её долю, которая останется «в живых» на этом этапе эволюции. Есть разные способы проводить отбор. Вероятность выживания особи h должна зависеть от значения функции приспособленности Fitness(h). Сама доля выживших s обычно является параметром генетического алгоритма, и её просто задают заранее. По итогам отбора из N особей популяции H должны остаться sN особей, которые войдут в итоговую популяцию H'. Остальные особи погибают.

Вычислительный эксперимент

Моделируемый процесс имеет два входных воздействия и один выходной параметр. Обучающая выборка была взята в количестве 300. Помеха, воздействующая на объект, была равна 7%. Критерием оптимизации была выбрана среднеквадратичная ошибка σ.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

Выведем результаты в виде таблицы:

Таблица 1 – Результаты оптимизации cs

Метод оптимизации	Оптимизируемый параметр	Время нахождения оптимального cs, миллисекунд	Среднеквадратичная ошибка σ
Метод деформируемого многогранника	Вектор cs	1118	0,750869
Метод деформируемого многогранника	Скаляр cs	100	0,755853
Перебор возможных значений	Вектор cs	26808	0,780678
Перебор возможных значений	Скаляр cs	934	0,78102
Генетический алгоритм	Вектор cs	39067	0,758035
Генетический алгоритм	Скаляр cs	37028	0,761118

Как мы можем видеть из таблицы 4, оптимизация вектора коэффициента размытости, занимает во много раз больше времени, чем оптимизация скалярного значения, при этом модель практически не становиться лучше.

Также стоит отметить, что оптимизация при помощи метода деформируемых многогранников действует гораздо быстрее, чем оптимизация при помощи стандартного перебора или генетического алгоритма.

Заключение

В статье приведены такие методы оптимизации как: метод деформируемых многогранников, генетический алгоритм и простой перебор возможных значений, и показаны результаты работы данных методов.

Также было доказано возможность использование методов локальной оптимизации для нахождения наилучшего коэффициента размытости ядра.

Было проведено сравнение между оптимизацией при помощи метода деформируемых многогранников, генетического алгоритма и оптимизацией при помощи стандартного перебора, где было доказано превосходство первого, в задаче оптимизации коэффициента размытости ядра.

Доказано, что оптимизация вектора коэффициентов размытости, является нецелесообразной, вследствие больших затрат времени, и малого изменения в точности модели исследуемого процесса.

Список литературы

[1] Tweedle V. Smith R. [A mathematical model of Bieber Fever], Transworld Research Network, 2012, vol. 37/661, num. 2, p. 157-177.

[2] Медведев А. В. Некоторые замечания к Н – моделям безынерционных процессов с запаздыванием // Вестник СибГАУ. 2014. № 2(54), С.24-34.

[3] Медведев А.В. Анализ данных в задаче идентификации // Компьютерный анализ данных моделирования. Т.2.- Минск: БГУ, 1995. С. 201-206.

[4] Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. Москва: Физматгиз, 1963г. 552с.

[5] Рубан А. И. Методы анализа данных: Учебное пособие. Издание 2-е, испр. и доп. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. 319 с.

[6] Prayoth Kumsawat. [A Genetic Algorithm Optimization Technique for Multiwavelet - Based Digital Audio Watermarking] EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010, vol. 1, p.15-25.

АЛГОРИТМЫ ГЕНЕРАЦИИ РАБОЧЕЙ ВЫБОРКИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МНОГОМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Н.А. Сергеева[1], Е.А. Чжан[1]

[1]Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия
eachzhan@mail.ru
тел: +7 (965) 897-06-85

Ключевые слова: *идентификация, качество данных, предварительный анализ данных, безынерционный процесс, непараметрическая оценка функции регрессии по наблюдениям*

Abstract
This clause focuses on the data analysis to improve the quality of the identification problem solution. For this purpose generation of working sample based on the original sample is suggested. The results of computational experiments are presented.

Введение

На практике моделирование сложных систем основывается на априорной информации об объекте и выборке данных. В большинстве случаев количество априорной информации крайне мало: известны лишь входные и выходные переменные объекта и его тип (линейный или нелинейный). Сведений о математическом описании объекта нет. Именно поэтому особую роль играет качество исходных данных – выборки наблюдений входных и выходных переменных. Целесообразно провести предварительный анализ данных для выявления и устранения всех недостатков в выборке. Под предварительным анализом данных принято понимать заполнение пробелов в наблюдениях и устранение выбросов. Однако выборка может обладать и другими недостатками, такими как пропуски в данных и разреженности. Речь о них пойдет в данной статье. Такого рода недостатки могут привести к тому, что полученная модель будет неадекватна исследуемому процессу.

В условиях малого количества априорных данных предлагается использовать непараметрические модели, которые относятся к классу локальных аппроксимаций. Прогноз в областях разреженности данных может быть весьма грубый, а в тех областях, где отсутствуют результаты наблюдений, прогноз и вовсе дать невозможно. Для устранения всех этих недостатков предлагается алгоритм получения рабочей выборки путем генерации новых точек в областях, где их плотность по сравнению с остальными областями невелика. Таким образом, рабочая выборка будет включать как реальные точки (результаты эксперимента), так и искусственно сгенерированные. Качество восстановления с использованием рабочей выборки значительно улучшается, что подтверждается результатами численных экспериментов. Подобного рода алгоритмы являются актуальными и также могут быть использованы при решении задачи распознавания в различных областях, где важна точность классификации.

1 Постановка задачи

Рассмотрим многомерный безынерционный объект, общая схема которого представлена на рис 1.

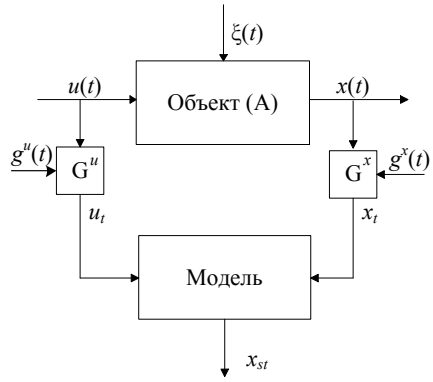


Рисунок 1 – Общая схема исследуемого процесса

Как принято в теории идентификации, схема процесса включает в себя не только непосредственно сам блок объекта, но и блок модели [1, 2]. На рис. 1 приняты следующие обозначения: A – это неизвестный оператор объекта; $u(t) = (u_1(t), u_2(t), \ldots, u_m(t)) \in \Omega(u) \subset R^m$ – векторное входное воздействие объекта размерностью m; $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \ldots, x_n(t)) \in \Omega(x) \subset R^n$ – векторная выходная переменная объекта размерностью n; выполняется условие $m \geq n$; *(t)* – непрерывное время, Δt – дискретность контроля «входных-выходных» переменных процесса; $\xi(t)$ – векторная случайная помеха; G^u, G^x – блоки контроля входных и выходных переменных, в которых действуют случайные помехи $g^u(t)$ и $g^x(t)$ с нулевыми математическими ожиданиями и ограниченными дисперсиями; u_t и x_t – измерения переменных $u(t)$ и $x(t)$ в дискретные моменты времени. Таким образом, измеряя значения входных и выходных переменных, получим выборку $\{u_i, x_i, i = \overline{1, s}\}$, где s – объем выборки.

На основе измерений выходных и выходных переменных процесса строится модель, где с помощью какого-либо алгоритма происходит оценка выхода объекта – x_{st}. Рассмотрим методы идентификации в «широком» и «узком» смысле.

2 Идентификация в «узком» и «широком» смысле

При моделировании разнообразных дискретно-непрерывных процессов в настоящее время доминирует теория идентификации в «узком» смысле [1]. Ее содержание состоит в том, что на первом этапе, на основании имеющейся априорной информации, определяется параметрический класс операторов Aα:

$\tilde{x}_\alpha(t) = A^\alpha(u(t), \alpha),$

где Aα – параметрическая структура модели, а α – вектор параметров. На втором этапе осуществляется оценка параметров α на основе имеющейся выборки {ui, xi, i = 1, 2, …, s}, s – объем выборки. Оценка параметров может осуществляться с помощью многочисленных рекуррентных процедур, в частности, методом стохастических аппроксимаций, либо методом наименьших квадратов. Успех решения задачи идентификации в этом случае существенно зависит от того, насколько «удачно» определен оператор (1).

Идентификация в «широком» смысле предполагает отсутствие этапа выбора параметрического класса оператора [2]. Часто оказывается значительно проще определить класс операторов на основе сведений качественного характера, например, линейности процесса или типа

нелинейности, однозначности либо неоднозначности и др. В этом случае задача идентификации состоит в оценивании этого оператора на основе выборки {ui, xi, i = 1, 2, …, s} в форме:

$$x_s(t) = A_s(u(t), \vec{x}_s, \vec{u}_s),$$

где $\vec{x}_s = (x_1, x_2, \ldots x_s), \vec{u}_s = (u_1, u_2, \ldots u_s)$ – временные векторы. Оценка оператора A_s может быть осуществлена средствами непараметрической статистики [3, 4]. Примечательным здесь является то, что при этом исключается этап выбора параметрической структуры. Тем самым, можно утверждать, что идентификация в этом случае, а это вариант идентификации в «широком» смысле, является более адекватной для некоторых реальных задач.

К методам идентификации в «узком» смысле относится непараметрическая оценка функции регрессии по наблюдениям:

$$(1) \quad x_s(u) = \sum_{i=1}^{s} x_i \prod_{j=1}^{m} \Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right) \Big/ \sum_{i=1}^{s} \prod_{j=1}^{m} \Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right).$$

где параметр размытости ядра c_s и колоколообразная функция $\Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j))$, имеющая вид треугольного ядра, удовлетворяют следующим условиям сходимости [3]:

$$c_s > 0; \qquad \lim_{s\to\infty} c_s = 0; \qquad \lim_{s\to\infty} s c_s^m = \infty;$$

$$\Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) \ge 0; \qquad c_s^{-1} \int_{\Omega(u)} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j))du^j < \infty; \qquad \lim_{s\to\infty} c_s^{-1}\Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) = \delta(u^j - u_i^j).$$

Однако данная оценка чувствительна к качеству исходных данных. Поэтому прежде чем переходить к этапу идентификации предлагается провести предварительный анализ данных.

3 Алгоритм генерации рабочей выборки

В рамках данной работы предлагается алгоритм генерации рабочей выборки на основе исходной, полученной при измерении входных и выходных переменных процесса. Предлагаемый алгоритм основан на генерации новых точек. Данные точки используются лишь при восстановлении оценки выхода модели в реальных точках исходной выборки или в новых точках, в которых необходимо получить значение прогноза. Ниже следует описание алгоритма.

По исходной выборке $\left\{u_i, x_i, i = \overline{1,s}\right\}$ вычисляем с помощью скользящего экзамена величину параметра размытости ядра c_s.

Находим среднее число точек $\rho_{\text{ср.}}$, которое попадает под колокол с радиусом c_s. Для этого для каждой точки выборки точки $u_k, k = \overline{1,s}$ находим количество точек ρ_k: если $\prod_{j=1}^{m} \Phi\left(c_s^{-1}\left(u_k^j - u_i^j\right)\right) \neq 0, i = \overline{1,s}$, то точка u_i попадает под колокол точки u_k. Тогда среднее число точек под колоколом можно найти по следующей формуле:

$$(2) \quad \rho_{\text{ср.}} = \frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s} \rho_i .$$

Между всеми точками выборки вычисляем Евклидово расстояние. Формула многомерного расстояния $d(u_i, u_j)$ между точками u_i и u_j имеет следующий вид:

$$(3) \quad d(u_i, u_j) = \sqrt{\sum_{l=1}^{m} \left(u_i^l - u_j^l\right)^2} .$$

Из основной выборки $\left\{u_i, x_i, i = \overline{1,s}\right\}$ выбираем 70% точек, между которыми расстояния минимальны. Считаем, что в этих областях достаточное количество точек. Оставшиеся 30%

выборки $\{u_i, x_i, i = \overline{1, s'}\}, s' = 0{,}3s$ образуют области разреженности. Процентное соотношение может меняться, предлагается определять опытным путем в зависимости от объема выборки и величины $\rho_{ср}$.

Для 30% выборки $\{u_i, x_i, i = \overline{1, s'}\}$ проверяем условие: $\rho_i < \rho_{ср}$. Если условие выполняется, то генерируем k точек в c_s окрестности точки i, где $k = \rho_{ср.} - \rho_i$. Для новой точки $\tilde{u}$ значение входных переменных будут определяться следующим образом:

(4) $\tilde{u}_k = u_{ki} + 2\sigma c_s, k = \overline{1, m}.$

где σ – случайная величина, распределенная по равномерному закону в интервале [-1; 1], u_i^k – значение входных переменных точки i, в окрестности которой происходит генерация точки $\tilde{u}$.

Для сгенерированной точки нет возможности получить значение выхода объекта, т.к. математическое описание объекта неизвестно. Поэтому для таких точек вычисляем оценку выхода (3) по исходной выборке. Если при вычислении оценки возникнет ситуация неопределенности, т.е. ни одна точка не попала под колокол, то будем увеличивать параметр размытости c_s на 20% до тех пор, пока под колоколом не окажется хотя бы 3 точки исходной выборки. Новые точки в совокупности с исходной выборкой будут составлять рабочую выборку.

Генерирование точек происходит случайным образом, поэтому некоторые точки могут располагаться слишком близко другу или даже совпадать. Такие точки не представляют интереса, и их предлагается удалить. Следует обратить внимание, что удалять будем только искусственно сгенерированные точки. Для этого считаем значение среднего расстояния между точками основной выборки:

(5) $d_{ср.} = \frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{s} d(u_i, u_j), i < j$,

где $d(u_i, u_j)$ – расстояние между точками u_i и u_j, которое вычисляется по формуле (5).

Вычисляем расстояние от искусственно сгенерированной точки до всех точек новой выборки. Находим значение минимального расстояния $d_{\min}$, если $d_{\min} < k \cdot d_{ср.}$, где $k \in (0;1)$, то данная точка удаляется из выборки. Процедура проводится для всех сгенерированных точек. Величина коэффициента k зависит от исходной выборки, средней плотности точек и т.д. Тем самым все лишние точки будут удалены. Настраивая значение коэффициента k, можно регулировать объем сгенерированных точек.

После одной итерации заполнения могут остаться области, где нет ни одной точки, т.к. точки были сгенерированы только лишь вблизи точек исходной выборки. Если же в исходной выборке присутствуют области, где нет наблюдений («пропуски»), то после одной итерации «пропуски» будут заполнены лишь в c_s-окрестностях точек исходной выборки. Таким образом, проводим еще одну итерацию генерирования точек. Однако будем рассматривать не 30% точек исходной выборки, а сгенерированные точки, чьи координаты удовлетворяют следующим условиям:

(6) $\tilde{u}_{ki} \in [\underline{u}_k; \overline{u}_k], k = \overline{1, m}, i = \overline{1, s_1}$,

где s_1 – количество сгенерированных точек, $\underline{u}_k, \overline{u}_k$ – минимальное и максимальное значение входной переменной u_k, которые всегда известны из ТУ, технологического регламента и т.д.

Данное ограничение накладывается для того, чтобы не выйти за границы допустимых значений переменных и не генерировать точки лишние точки, которые не будут учитываться

при восстановлении оценки в силу того, что они находятся далеко за пределами регламентированной области.

После того, как будет получена рабочая выборка, пересчитываем оценку (3). В оценку (3) вместо x_i подставляем выход объекта для точек исходной выборки и значение выхода модели, вычисленное на этапе генерации точки, для сгенерированных точек, т.к. для таких точек нет возможности вычислить выход объекта.

Таким образом, будем генерировать точки в тех областях, где присутствуют места разреженности или вовсе отсутствуют точки. Сгенерированные точки не дают новых сведений об объекте, они лишь будут входить в новую рабочую выборку. Объем выборки увеличивается в среднем в 2-3 раза в зависимости от исходной выборки, при вычислении непараметрической оценки под колокол ядерной функции будет попадать большое количество точек, что приведет к повышению точности восстановления.

4. Вычислительные эксперименты

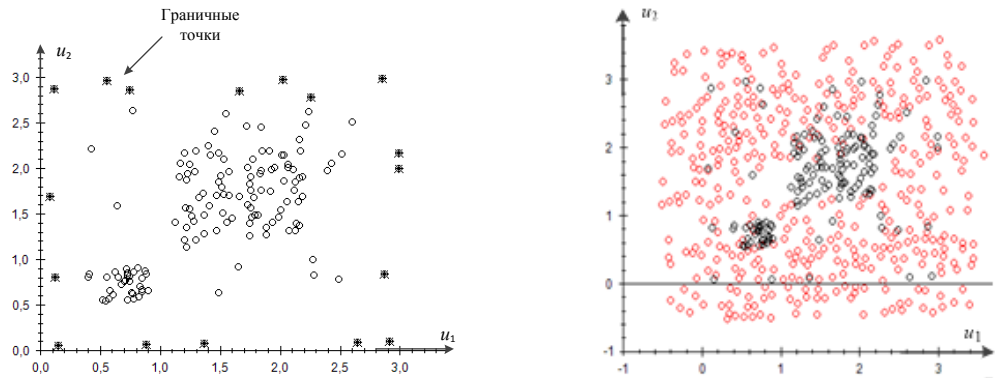
Из простоты рассуждений и иллюстрации рассмотрим объект, который имеет две входные и одну выходную переменную, причем в каналах измерения действуют случайные помехи. Пусть объект описывается следующим уравнением:

(7) $x(u) = u_1 + u_2 + \xi$,

где ξ – случайная величина, распределенная по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием в интервале [-1; 1].

При работе будем оперировать лишь выборкой, вид зависимости (9) задается лишь для генерации исходной выборки. В дальнейшем при проведении вычислительного эксперимента будем считать, что вид зависимости неизвестен. Пусть значения входных переменных будут распределены в интервале [0; 3]. При исследовании и идентификации реальных процессов границы допустимых значений известны из требований ГОСТ, ТУ и т.д.

Сгенерируем выборку объемом 100 точек таким образом, что в ней будут присутствовать места «сгущений», где плотность точек высока, места «разреженности», где точек небольшое количество или их нет, и «пропуски» в данных, где точек выборки нет совсем. Таким образом, плотность точек в выборке неоднородна. Поле корреляции по входным переменным u_1, u_2 показано на рис. 2а. Были выделены граничные точки при помощи условия (8), где параметр $\varepsilon = 10\%$.



а) б)

Рисунок 2 – Поле корреляции по входным переменным
а) исходная выборка, б) рабочая выборка

Восстанавливать выход объекта будем методом идентификации в «узком» смысле с помощью непараметрической оценки (3). О качестве полученной оценки будем судить по относительной ошибке аппроксимации:

$$(8) \quad W = \sqrt{\frac{\frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s}(x_{si} - x_i)^2}{\frac{1}{s-1}\sum_{i=1}^{s}(x_i - \hat{m}_x)^2}},$$

где $\hat{m}_x$ – оценка математического ожидания выхода объекта.

В результате работы вышеописанного алгоритма была сгенерирована рабочая выборка (рис. 2б), которая включает в себя точки исходной выборки – показаны черным цветом и искусственно сгенерированные – красным. Объем новой выборки составил 281 точку. Как видно из рис. 2б точки были сгенерированы только в тех областях, где их плотность по отношению к остальной выборке невелика. Таким образом, удалось не только заполнить пропуски, увеличить число точек в подобластях разреженности, но и увеличить число точек под колоколом у граничных точек. Данный алгоритм позволяет автоматически улучшить качество восстановления в граничных точках.

Для анализа работы алгоритма оценку (3) будем восстанавливать для точек исходной выборки, используя при этом только исходную выборку. В этом случае обозначим ошибку (10) – $W_{до}$. Затем оценивать выход объекта будем также для точек исходной выборки, но уже по новой сгенерированной выборке ($W_{после}$).По исходной выборке вследствие того, что она обладает рядом недостатков, прогноз будет низкого качества, а в некоторых случаях получить его будет невозможно. Так, при получении оценки (3) по исходной выборке $W_{до} = 0{,}18$, по рабочей – $W_{после} = 0{,}12$. Таким образом, использование рабочей выборки привело к улучшению качества восстановления более чем на 40%. Для граничных точек: $W_{до} = 0{,}28$, $W_{после} = 0{,}14$. Качество восстановления возросло в 2 раза.

Заключение

Решение задачи идентификации затрудняет как малый объем исходных данных, так и наличие в них изъянов. В данной работе рассмотрены такие недостатки, как подобласти разреженности и отсутствия наблюдения. Для их устранения предложен алгоритм генерации новой рабочей выборку, что позволит повысить качество восстановления.

Благодарности

Выражаем признательность научному руководителю д.т.н. профессору Медведеву А.В. за помощь разработке алгоритма и написании данной статьи.

Список литературы

[1] Медведев А.В. Непараметрические системы адаптации. – Новосибирск: Наука, 1983. - С. 174.
[2] Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. – М: Наука, 1984. - С. 320.
[3] Надарая Э.А. Непараметрические оценки плотности вероятности и кривой регрессии. – Тбилиси: Издательство Тбилисского университета, 1983. - С. 194.
[4] Медведев А.В. Анализ данных в задаче идентификации // Компьютерный анализ данных моделирования. Минск: БГУ, 1995. Т. 2. С. 201-206.

РАЗРАБОТКА БОРТОВЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В.Е. Юрин

АО «РКЦ «Прогресс»
443009,Россия, Самара, ул. Земеца, 18
yurin.vit@yandex.ru

Ключевые слова: *космический аппарат, бортовой комплекс управления, перенацеливание, оптимальное управление, переориентация, двухточечная краевая задача*

Abstract

The article deals with the development of the on-board spacecraft reorientation algorithms. The complete mathematical model of the spacecraft reorientation is given. There are considered some features and limitations during the on-board algorithm working-out. The efficiency of implemented on-board reorientation algorithms for spacecraft “Resurs-DK” and “Resurs-P” are demonstrated.

Введение

Управление движением современного космического аппарата (КА) тесно связано с процессами управления угловым движением относительно центра масс КА, характер которого напрямую зависит от выполняемых аппаратом целевых задач. Например, для решения задач съёмки земной поверхности современным высокопроизводительным КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) требуется обеспечить его вращательное движение с угловой скоростью до нескольких градусов в секунду относительно произвольной оси [1-4].

Рассматривается задача переориентации КА за определённый промежуток времени из некоторого начального в некоторое заданное конечное угловое положение. Эта задача реализуется каждым современным КА ДЗЗ на различных участках полёта [3]: при переводе аппарата от ориентации, необходимой для выдачи импульса коррекции орбиты, к ориентации, обеспечивающей заряд солнечных батарей, либо к ориентации, обеспечивающей работу системы спутниковой навигации, к ориентации для съёмки заданных участков земной поверхности (так называемых маршрутов съёмки) и между ними, для съёмки звёздного поля с заданной угловой скоростью, а также для отслеживания аппаратурой зондирования пространственных объектов. При этом всегда решается задача управления, которая в указанных выше случаях сводится к двухточечной краевой задаче на заданном временном интервале [4]. Решением каждой такой задачи является закон, или программа, управления угловым движением (ПУУД) КА [1-7, 14]. Как правило, эти задачи имеют множество решений [4, 13].

Производительность КА ДЗЗ в значительной степени определяется не только мощностью исполнительных органов его системы ориентации и стабилизации, но и эффективностью алгоритмов, по которым формируются законы управления угловым движением КА. Эффективные решения позволяют существенно увеличить производительность КА по целевому назначению и реализовать необходимую точность ориентации при съёмке или маневрировании [6-7].

1 Постановка задачи

Итак, рассматривается задача управления переориентацией космического аппарата (КА) на интервале $[t_0, t_f]$ в том случае, когда задаются произвольные граничные условия для кине-

матических характеристик углового движения КА [2, 6-9], уравнения для которых в общем виде выглядят следующим образом:

(1) $d\varphi/dt = \omega + f_\varphi$, $d\omega/dt = Bu + f_\omega$,

где φ– вектор параметров ориентации КА, ω– вектор его угловой скорости, $f_\varphi = f_\varphi(t, \varphi, \omega)$, $f_\omega = f_\omega(t, \varphi, \omega)$ – функции, обусловленные нелинейными членами; B – матрица эффективности для управляющих параметров $u = \mathrm{col}(u_1, u_2, u_3)$.

Манёвр задан граничными условиями:

(2) $\varphi(t_0) = \varphi_0$, $\omega(t_0) = \omega_0$, $\varphi(t_f) = \varphi_f$, $\omega(t_f) = \omega_f$,

где φ_0, φ_f , ω_0, ω_f– некоторые константы.

Предполагается, что управляющие параметры u удовлетворяют ограничениям:

(3) $\|u(\tau)\|_\mu \le 1$ для всех $\tau \in [t_0, t_f]$, $\mu = 2, \infty$,

где $\|u(\tau)\|_2 = \sqrt{u_1^2(\tau) + u_2^2(\tau) + u_3^2(\tau)}$, $\|u(\tau)\|_\infty = \mathbf{max}_{n=1,2,3} |u_n(\tau)|$, критерий оптимальности: $\mathbf{max}_{\tau\in[t_0, t_f]} \|u(\tau)\|_\mu \to \min$, $\mu = 2, \infty$.

Необходимо отметить, что эффективность решения задачи переориентации КА напрямую зависит от корректности и точности формализации ограничений (3), а также степени их соответствия возможностям реализующей системы: в данном случае – системы ориентации и стабилизации КА [10]. Поэтому в общем случае ограничения (3) и критерий оптимальности могут отличаться от представленных.

2 Бортовые алгоритмы формирования ПУУД КА

ПУУД КА определяет программное положение КА в инерциальной системе координат. Принципы формирования ПУУД КА, состав ИД для расчёта ПУУД КА на участках зондирования рассмотрены в работах [1, 2] для КА «Ресурс-ДК». Реализуемые виды съёмки и особенности алгоритмов расчёта ПУУД КА на маршрутах подробно описаны в [3, 11].

Автономность БКУ налагает жёсткие требования к его алгоритмическому обеспечению. Стандартные требования к алгоритмам [12] – дискретность, конечность, детерминированность, «понятность», массовость, результативность, отсутствие ошибок – тщательнейшим образом учитываются при разработке и отладке бортовых алгоритмов. Кроме того, они дополняются ограничениями на размер реализующей алгоритм программы, на время её выполнения, на объём памяти, отводимый под хранение результатов расчёта, на возможность и целесообразность использования некоторых стандартных функций. Также при разработке бортовых алгоритмов необходимо учитывать такт работы бортовой аппаратуры, скорость выполнения вычислительных операций и точность, реализуемую бортовой вычислительной системой.

В работах [4, 5] показаны особенности параметризации ПУУД КА для различных участков полёта. Рассчитанные в БКУ программы управления интерполируются полиномами: в сравнении с другими классами функций скорость работы со степенными функциями максимальна. Основной задачей при выборе параметров интерполяции программ управления степенными сплайн-функциями (шага, степени, узлов интерполяции) является обеспечение максимальной точности выполнения условий формирования ПУУД КА [4]. Для участков переориентации условиями расчёта программ управления являются граничные условия (2).

Вследствие перечисленных ограничений бортовые алгоритмы, как правило, носят специальный характер: они не являются универсальными, поскольку предназначены для решения конкретных задач в ограниченном диапазоне изменения исходных данных.

По тем же причинам предложенный в [6-9] алгоритм решения задачи (1)-(2) с ограничениями (3) методом последовательных приближений, несмотря на универсальность и эффективность , не может быть реализован в БКУ в представленном виде без дополнительной оптимизации.

3 Реализация бортовых алгоритмов переориентации КА

Параметры, определяющие программу управления, рассчитываются в БКУ КА «Ресурс-ДК» и «Ресурс-П» на начальном этапе формирования ПУУД КА как функции изменения углов тангажа $\vartheta(t)$, крена $\gamma(t)$ и рыскания $\psi(t)$, которые позволяют представить пространственный поворот тройкой плоских поворотов по углам тангажа ϑ, крена γ и рыскания ψ. Они имеют наглядный физический смысл и в каждый момент времени дают представление об угловом положении КА в орбитальной системе координат (ОСК) [4].

Необходимое условие формирования ПУУД КА – непрерывность изменения управляющих параметров, которыми являются компоненты вектора абсолютного углового ускорения КА ε – обеспечивается непрерывностью $\ddot{\varphi}(t)$;

$$\varepsilon = \varepsilon\left(\varphi(t), \dot{\varphi}(t), \ddot{\varphi}(t)\right),$$

где $\varphi(t) = \{\vartheta(t), \gamma(t), \psi(t)\}$, $\dot{\varphi}(t) = \left\{\dot{\vartheta}(t), \dot{\gamma}(t), \dot{\psi}(t)\right\}$, $\ddot{\varphi}(t) = \left\{\ddot{\vartheta}(t), \ddot{\gamma}(t), \ddot{\psi}(t)\right\}$.

При этом набор граничных условий (2) расширяется:

$$\varepsilon(t_0) = \varepsilon_0, \quad \varepsilon(t_f) = \varepsilon_f, \tag{4}$$

где ε_0, ε_f – некоторые константы.

С учётом (4) перепишем граничные условия (2) следующим образом:

$$\varphi(t_0) = \varphi_0, \dot{\varphi}(t_0) = \dot{\varphi}_0, \ddot{\varphi}(t_0) = \ddot{\varphi}_0, \varphi(t_f) = \varphi_f, \dot{\varphi}(t_f) = \dot{\varphi}_f, \ddot{\varphi}(t_f) = \ddot{\varphi}_f, \tag{5}$$

где φ_0, $\dot{\varphi}_0$, $\ddot{\varphi}_0$, φ_f, $\dot{\varphi}_f$, $\ddot{\varphi}_f$ – некоторые константы.

Характеристики системы ориентации и стабилизации КА, которым должны отвечать программы управления, могут быть записаны следующим образом:

$$\|\omega(\tau)\|_2 \le \omega_{\text{ДОП}}; \quad \|\varepsilon(\tau)\|_2 \le \varepsilon_{\text{ДОП}}; \quad \|\dot{\varepsilon}(\tau)\|_2 \le k_{\text{ДОП}}, \tau \in [t_0, t_f], \tag{6}$$

где $\omega_{\text{ДОП}}$, $\varepsilon_{\text{ДОП}}$, $k_{\text{ДОП}}$ – некоторые константы.

Таким образом, имеем двухточечную краевую задачу (1), (5) с ограничениями (6).

Простейшим решением $\varphi(t)$ краевой задачи с граничными условиями (5) является полином пятой степени, коэффициенты которого находятся из условий (5). Основной недостаток такого решения – широкая амплитуда в случаях, если длительность участка $[t_0, t_f]$ превышает несколько минут. В целях уменьшения диапазона изменения решения краевой задачи $\varphi(t)$ на изделии «Ресурс-ДК1» отрезок $[t_0, t_f]$ разбивается на три участка – «разгона», движения с постоянной угловой скоростью и «торможения» [4], на первом и третьем из которых $\varphi(t)$ описывается сплайн-функцией пятой степени, на втором – линейной функцией (рис. 1).

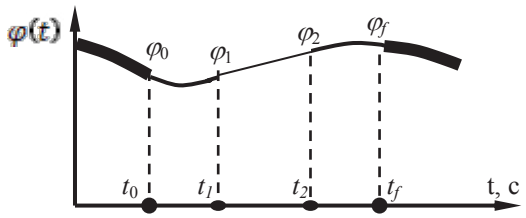


Рисунок 1 – Разбиение участка переориентации

Основная цель разбиения – спрямление полинома пятой степени на отрезке $[t_1, t_2] \subset [t_0, t_f]$.

Тем не менее, выбор полиномов пятой степени в качестве основы решения краевой задачи с граничными условиями (5) не позволяет говорить об оптимальности решения по введённому критерию оптимальности. Для подтверждения достаточно провести визуальный анализ законов управления угловым движением КА на участках переориентации, основанных на полиномах и сплайн-функциях пятой степени (приведены в пункте 4).К тому же отсутствие свободных параметров при построении решения краевой задачи с граничными условиями (5) в

виде полиномов пятой степени и их минимальное количество при построении решения в виде сплайн-функции пятой степени не позволяет учесть ограничения (6) при формировании законов управления. На соответствие ограничениям (6) проверяется уже найденное решение $\varphi(t)$, что нерационально.

Алгоритм поиска решения поставленной задачи переориентации КА, реализованный в БКУ КА «Ресурс-П», основан на кубических полиномиальных сплайнах.

Аналогично предыдущему решению, $[t_0, t_f]$ разбивается на три участка: «разгона» $[t_0, t_3]$, движения с постоянной угловой скоростью $[t_3, t_4]$ и «торможения» $[t_4, t_f]$. Расчёт параметров углового движения на отрезке $[t_0, t_f]$ начинается с построения кусочно-линейной непрерывной функции $\ddot{\varphi}(t)$, интегрируя которую, получим $\dot{\varphi}(t)$ и $\varphi(t)$ (рис. 2):

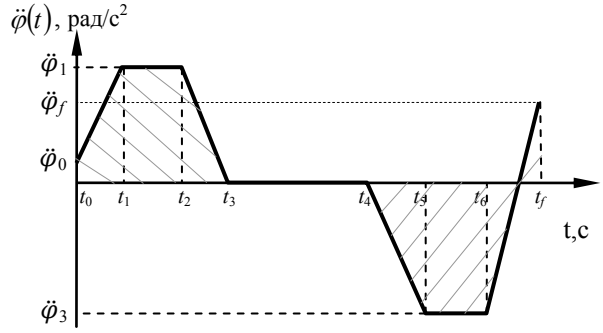


Рисунок 2 – Общий вид $\ddot{\varphi}(t)$

На участках $[t_1, t_2]$ и $[t_5, t_6]$ движение совершается с максимальным (но не превышающим допустимое) ускорением $|\ddot{\varphi}_1| \le \varepsilon_{\text{ДОП}}$, $|\ddot{\varphi}_3| \le \varepsilon_{\text{ДОП}}$. На участке $[t_3, t_4]$ ускорение равно нулю, и

$$(7) \quad \dot{\varphi}(\tau) \equiv \dot{\varphi}_{\text{СР}} = \frac{\varphi_f - \varphi_0}{t_f - t_0},\ \tau \in [t_3, t_4]$$

где $\dot{\varphi}_{\text{СР}}$ – константа, которая подлежит уточнению на очередной итерации.

Значения $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, \ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_3$ являются определяемыми параметрами и находятся из граничных условий(5) и ограничений (6). При этом выполнение ограничений (6) обеспечивается на этапе построения $\ddot{\varphi}(t)$.

Площадь заштрихованных на рисунке 2 фигур соответствует изменению $\dot{\varphi}(t)$ на участках $[t_0, t_3]$ и $[t_4, t_f]$:

$$(8) \quad \begin{cases} \dot{\varphi}(t)\big|_{t_0}^{t_3} = \int_{t_0}^{t_3} \ddot{\varphi}(t)\,dt; \\ \dot{\varphi}(t)\big|_{t_3}^{t_4} = 0; \\ \dot{\varphi}(t)\big|_{t_4}^{t_f} = \int_{t_4}^{t_f} \ddot{\varphi}(t)\,dt; \end{cases}$$

и, аналогично:

$$(9) \quad \begin{cases} \dot{\varphi}(t)\big|_{t_0}^{t_3} = \int_{t_0}^{t_3} \dot{\varphi}(t)\,dt; \\ \dot{\varphi}(t)\big|_{t_3}^{t_4} = \dot{\varphi}_{\text{СР}} \cdot (t_4 - t_3); \\ \dot{\varphi}(t)\big|_{t_4}^{t_f} = \int_{t_4}^{t_f} \dot{\varphi}(t)\,dt. \end{cases}$$

Значение угловой скорости на участке $[t_3, t_4]$ $\dot{\varphi}_{\text{СР}}$ из (7) уточняется из систем (8)-(9) , после чего уточняются параметры $t_j, \ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_3$, j=1..6. Общее количество итераций – три. Оптимальность решения $\varphi(t)$ определяется выбором правой части (7) и точек разбиения отрезка $[t_0, t_f]$.

Решения, реализованные в бортовом алгоритме переориентации КА «Ресурс-П» из заданного начального в заданное конечное угловое положение, приближают результаты его работы к оптимальным, что многократно подтверждено при анализе результатов моделирования законов переориентации КА за период эксплуатации КА «Ресурс-П» №1, 2.

4 Моделирование законов управления при переориентации КА

Примеры изменения параметров программ управления на участке переориентации КА, полученные как решение поставленной задачи в классе сплайн-функций третьей и пятой степени, приведены на рисунках 3-6.

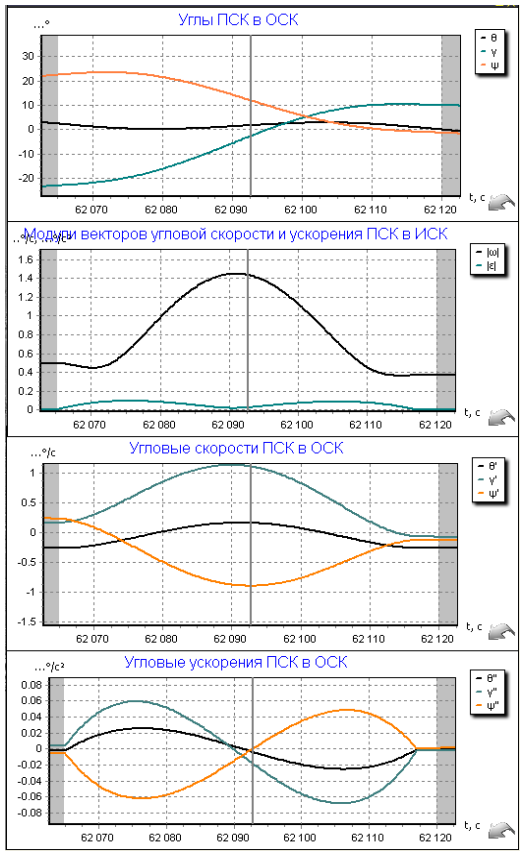


Рисунок 3 – Пример изменения параметров ПУУД КА на участке переориентации КА, полученный как решение поставленной задачи в классе полиномов пятой степени

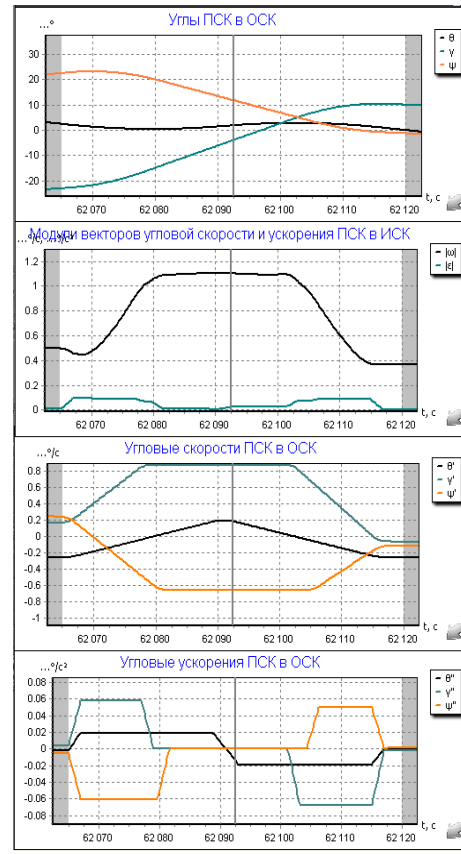


Рисунок 4 – Пример изменения параметров ПУУД КА на участке переориентации КА, полученный как решение поставленной задачи в классе сплайн-функций третьей степени

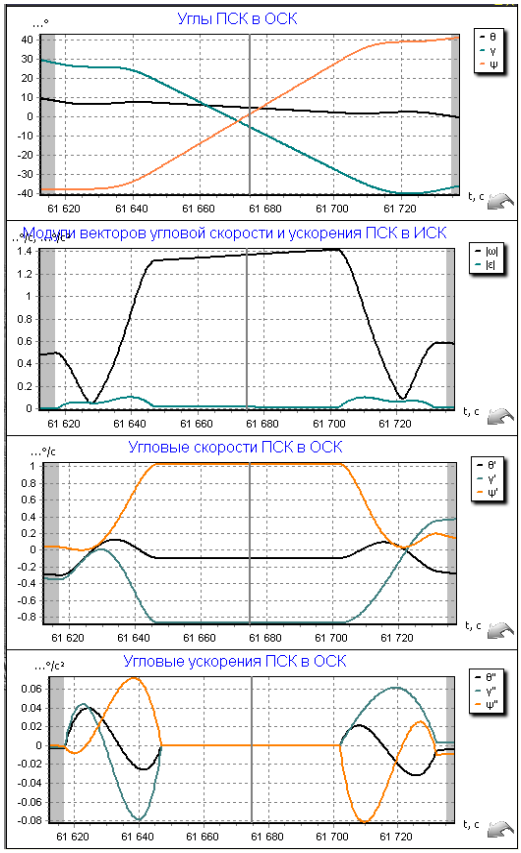


Рисунок 5 – Пример изменения параметров ПУУД КА на участке переориентации КА, полученный как решение поставленной задачи в классе сплайн-функций пятой степени

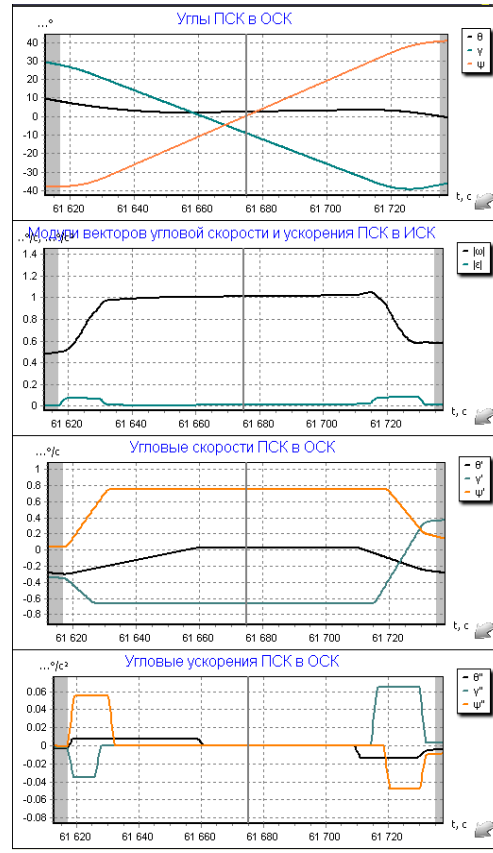


Рисунок 6 – Пример изменения параметров ПУУД КА на участке переориентации КА, полученный как решение поставленной задачи в классе сплайн-функций третьей степени

Как видно из рисунков 3-6, эффективность решений краевой задачи (1), (5) в классе кубических сплайнов заметно выше по сравнению с решениями в классе полиномов и сплайн-функций пятой степени. Использование кубических сплайнов позволяет не только учесть ограничения (6) при построении $\ddot{\varphi}(t)$, но и за 2-3 итерации сформировать законы управления, близкие к оптимальным.

Заключение

Таким образом, в работе рассмотрены бортовые вычислительные алгоритмы переориентации КА из заданного начального в заданное конечное положение, реализованные на КА «Ресурс-ДК» (запущен в 2006 году) и пары «Ресурс-П» (запущены в 2013 и 2014 годах), которые разработаны и изготовлены АО «РКЦ «Прогресс». Приведены динамические характеристики системы ориентации и стабилизации КА, которые должны учитываться при формировании программ управления угловым движением КА. Изложены ключевые особенности бортовых алгоритмов переориентации КА. Приведены результаты моделирования программ управления на участке переориентации КА, полученные как решение поставленной задачи в классе сплайн-функций третьей и пятой степени, демонстрирующие эффективность решений краевой задачи в классе кубических сплайнов.

Список литературы

[1] Аншаков Г.П., Мантуров А.И., Усталов Ю.М., Горелов Ю.Н. Управление угловым движением космического аппарата дистанционного зондирования // Общероссийский научно-технический журнал «Полёт». 2006. №6. С. 12-18.

[2] Горелов Ю.Н., Данилов С.Б., Аншаков Г.П., Мантуров А.И., Усталов Ю.М. Теоретические основы и методы синтеза интегральных программ управления угловым движением космических аппаратов дистанционного зондирования множества районов наблюдения переменного состава на длительных временных интервалах // Сборник докладов XVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – С. 232-244.

[3] Аншаков Г.П., Мантуров А.И., Мочалов В.А., Юрин В.Е. Организация решения целевых задач в бортовых комплексах управления КА зондирования // Сборник докладов «XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам». – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2011. С. 263-269.

[4] Галкина А.С., Мантуров А.И., Пыринов Н.И., Юрин В.Е. Использование вычислительных методов при параметризации программы управления угловым движением в бортовых комплексах управления космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 4 (35). С. 59-68.

[5] Галкина А.С., Мантуров А.И., Рублёв В.И., Юрин В.Е. Анализ точности формирования и реализации программ управления угловым движением космического аппарата при использовании системы спутниковой навигации // Гироскопия и навигация. 2010. № 1. С. 15-25.

[6] Горелов Ю.Н., Курганская Л.В., Мантуров А.И., Соллогуб А.В., Юрин В.Е. К задаче оптимизации программ управления угловым движением космического аппарата дистанционного зондирования Земли // Гироскопия и навигация. 2014. № 1 (84). С. 81-97.

[7] Горелов Ю.Н. К решению задачи синтеза оптимального управления переориентацией космического аппарата при перенацеливании аппаратуры зондирования одним методом последовательных приближений // Известия СНЦ РАН. 2014. Т.16. № 4. С.127-131.

[8] Горелов Ю.Н., Данилов С.Б., Юрин В. Е. Синтез оптимального управления переориентацией космического аппарата одним методом последовательных приближений // В сб.: Труды XVI Всероссийского научно-технического семинара: «Управление движением и навигация летательных аппаратов». Ч. III. Самара: Изд-во СНЦРАН, 2013, - с. 34–40.

[9] Горелов Ю.Н., Юрин В.Е. Об оптимальном управлении переориентацией космического аппарата при перенацеливании аппаратуры зондирования // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2013.Т. 20. Вып. 5.

[10] Занин К.А., Хайлов М. Н.Формирование требований к динамике космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Общероссийский научно-технический журнал «Полёт». 2009. №5. С. 32-37.

[11] Горелов Ю.Н., Юрин В.Е. Об оптимальном многомаршрутном сканировании для космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Известия СНЦ РАН. 2013. Т.15. № 6. С.140-147.

[12] Игошин В. И. Математическая логика и теория алгоритмов. – 2-е изд., стер. – М.: ИЦ «Академия», 2008. – 448 с.

[13] Блатов И.А., Горелов Ю.Н., Мантуров А.И., Пермяков А.В. Формирование множества достижимости для кинематических характеристик углового движения космического аппарата в задачах дистанционного зондирования Земли // Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия. 2004. №4(34). С. 201-214.

[14] Бородин М. С. Построение программных угловых движений космического аппарата дистанционного зондирования / Сборник научных трудов. М.: Российская академия им. К. Э. Циолковского, НПО им. С. А. Лавочкина. 2000. Вып. 2.

Measuring, Control and Diagnostics in Extreme Conditions

Измерения, контроль и диагностика в экстремальных условиях

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ КОДОВ В СИСТЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА

В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, П.Е. Подлипнов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
borovik@iccs.ru
тел: +7 (846) 333-26-77, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *система измерения, радиальные осевые смещения, лопатка сложной формы, предварительная обработка данных, алгоритм детектирования*

Abstract

A new adaptive algorithm for data processing and data compression in systems for measuring of radial and axial displacement of turbine blades with complex shape is offered. This algorithm shows the high efficiency of data compression and the faster data transfer rate to PC.

В работе [1] рассматриваются технические средства и программное обеспечение (ПО) системы измерения радиальных и осевых смещений торцов турбинных лопаток сложной формы на основе применения распределённых кластеров (РК) одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника. Там же отмечается, что в ПО системы реализована двухуровневая обработка измерительной информации. На нижнем уровне (реализован на микроконтроллере (МК)) производится предварительная обработка результатов аналого-цифрового преобразования выходных сигналов ОВТД, включающая в себя анализ массива данных с результатами опроса измерительного канала системы, выделение полезных сигналов, устранение избыточности (сжатие данных), а также передача сжатых данных на верхний уровень в ПЭВМ. На верхнем уровне, в свою очередь, производится поиск экстремальных значений кода, соответствующих моментам прохождения торцами лопаток геометрического центра РК ОВТД [3], расчет искомых координат смещений торцов лопаток [2], а также отображение и архивирование полученных результатов.

Следует отметить, что реализованный в системе [1] алгоритм предварительного анализа и сжатия данных [4] построен на основе пороговой обработки сигналов ОВТД по фиксированному уровню. Алгоритм предполагает исключение из общего массива кодов данных, находящихся в границах диапазона, ограниченного фиксированными верхним и нижним порогами и соответствующих отсутствию контролируемых лопаток в зоне чувствительности ОВТД. Очевидно, что, с учётом широкого диапазона возможного изменения кодов, порог приходится выбирать достаточно малым, а это приводит к низкой эффективности сжатия и, как следствие, к увеличению времени передачи данных в ПЭВМ. В настоящей работе предлагается улучшенная версия алгоритма с адаптивными порогами, свободного от указанных недостатков.

Исходными данными являются коды, полученные после аналого-цифрового преобразования напряжения на выходе измерительной цепи и соответствующие изменениям информативного параметра (индуктивности) ОВТД при прохождении контролируемыми лопатками зон чувствительности датчиков. Огибающая временной развертки кодов представляет собой периодическую функцию с амплитудой, зависящей от координат смещений торцов лопаток и частотой, соответствующей частоте прохождения контролируемыми лопатками ЧЭ ОВТД. В зависимости от используемого метода измерения и с учётом конструктивных особенностей

турбинных лопаток [5, 6] на каждом периоде может наблюдаться до двух локальных экстремумов. В этих условиях эффективен алгоритм детектирования (АД) экстремумов, основанный на применении адаптивного порога, величина которого зависит от амплитудного значения [7], что позволяет более точно выделить окрестность локализации экстремума.

Предлагаемый АД предполагает операции амплитудного детектирования, масштабирующего деления и сравнения кодов. На вход алгоритма, как уже отмечалось, подается исходная последовательность кодов. На каждом периоде, после прохождения точки глобального экстремума, фиксируется величина адаптивного порога на заданном уровне и на спаде сигнала формируется сообщение о том, что был детектирован локальный экстремум. Величина адаптивного порога определяется на основе амплитудного значения с применением коэффициента деления. Изменяя коэффициент деления, который по величине меньше единицы, можно управлять шириной зоны локализации экстремума, а также отфильтровывать импульсные помехи.

Следует отметить, что АД имеет однонаправленное действие и позволяет детектировать границу окрестности только на заднем (по времени, либо индексу массива) фронте зоны экстремума. Поэтому для полной локализации экстремумов применяются два этапа обработки данных. На первом этапе («прямой ход») полного алгоритма, которая осуществляется в реальном времени, программными маркерами помечаются точки, соответствующие детектированным границам зоны экстремума по заднему фронту сигнала, а массив кодов сохраняется в буферной памяти МК. На втором этапе («обратный ход»), осуществляется перебор сохраненного в памяти МК массива с конца в убывающем порядке, и выставляются такие же программные маркеры, соответствующие детектированным границам зоны экстремума, но уже по переднему фронту сигнала. При этом, для дальнейшей обработки в ПЭВМ, передаются только коды внутри локализованных зон.

Необходимо также отметить, что поскольку порог детектирования пропорционален амплитуде импульса, оценка момента времени (номера отсчета), в отличие от алгоритма с фиксированными порогами, устойчива к разбросу амплитуд. Это факт позволяет дополнительно, в процессе работы алгоритма сжатия, вычислять частоту вращения ротора турбомашины.

Список литературы

[1] Беленький Л.Б., Боровик С.Ю., Белопухов В.Н., Кутейникова М.М., Райков Б.К. , Секисов Ю.Н. , Скобелев О.П. Технические средства и программное обеспечение системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и скорости вращения лопаточного колеса // Тр. XV Междунар. конф. Проблемы управления и моделирования в сложных системах. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. –С. 655-662.

[2] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.В., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление, -2013. -№10. -С. 38-46.

[3] В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик Алгоритм поиска экстремальных значений кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Тр. XV Междунар. конф. Проблемы управления и моделирования в сложных системах. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. –С. 650-654.

[4] В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик Алгоритм предварительной обработки данных кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Тр. XV Междунар. конф. Проблемы управления и моделирования в сложных системах, Самара: Изд-во СамНЦ РАН.-2013. –С. 646-649.

[5] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов О.П., Скобелев О.П. Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление, 2013. -№10. -с.38-46.

[6] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы с повышенной чувствительностью и в расширенном диапазоне // Автометрия. -2015. -№3.

[7] А.с. 1550608 SU, МКИ H 03 K 5/153. Устройство для фиксации момента прохождения задним фронтом импульса заданного уровня / Белопухов В.Н., Малов А.Н., Подвигин В.Н. -№ 4332427/24-21; Заяв. 24.11.87; Опубл. 15.03.90, Бюл.№ 10.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСТРЕМУМА ФУНКЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ КОДОВ В СИСТЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
borovik@iccs.ru
тел: +7 (846) 333-26-77, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *система измерения, радиальные и осевые смещения, лопатка сложной формы, аппроксимация экспериментальных данных, поиск экстремума*

Abstract

The descriptions of some algorithms for seeking of codes extremum in the system for measuring of radial and axial displacements of turbine blades with complex shapes of modern gas-turbine engines are given. The algorithms are based on polynomial or parabolic approximation of initial codes array and extremum seeking of received functions.

В работах [1, 2] рассматриваются два варианта методов получения информации о радиальных и осевых смещениях торцов лопаток сложной формы с помощью распределённых кластеров (РК) одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника. В обоих методах информативным принято считать сигнал, соответствующий глобальному минимуму функции изменения индуктивности рабочего ОВТД в РК при прохождении торцом контролируемой лопатки ЧЭ датчика. При этом алгоритм опроса измерительной цепи (ИЦ) с РК из двух ОВТД предполагает подачу импульсов питания, фиксацию изменений индуктивности рабочего ОВТД и преобразование этих изменений в цифровой код с постоянной и максимально возможной частотой.

Очевидно, что при реализации алгоритма прямого поиска экстремальных значений кодов, соответствующих глобальным минимумам функции изменения индуктивности рабочего ОВТД, конечная частота дискретизации АЦП будет приводить к возникновению соответствующей погрешности, которая в максимальной степени будет сказываться на высоких скоростях вращения ротора турбомашины.

Традиционным путём уменьшения указанной составляющей погрешности является восстановление огибающей сигнала путём интерполяционной обработки с последующим нахождением экстремума восстановленной функции. Для этих целей может быть использован подход, рассмотренный в [3] и заключающийся в том, что сначала проводится аппроксимация полученных после предварительной обработки выборок кодов в каналах РК ОВТД с помощью ортогональных полиномов Чебышева I рода, а затем осуществляется локализация глобальных экстремумов полученной полиномиальной функции одной переменной и производится уточнение значений переменной и функции в точке экстремума.

Указанный алгоритм обеспечивает хорошее приближение аппроксимирующей кривой к реальной огибающей сигнала (для метода [1]), однако требует повышенных вычислительных и временных ресурсов для своей реализации. Кроме того, применение полиномиальной аппроксимации для восстановления огибающей сигнала на выходе ИЦ для метода [2] не даёт приемлемых решений в виду особенностей сигнала, а именно наличия двух локальных экстремумов функции изменения кодов АЦП.

В то же время, характер изменения кодов в окрестности глобального экстремума позволяет существенно упростить задачу и перейти от полиномиальной аппроксимации соответствующих выборок кодов к их аппроксимации квадратичной параболой с последующим аналитическим нахождением координат вершины параболы, являющихся координатами искомого экстремума. Данный алгоритм является наиболее универсальным с точки зрения применимости для обоих методов [1, 2], требует существенно меньших временных и вычислительных затрат на его реализацию, однако уступает по точности первому алгоритму. Подобный подход рассматривался в работе [4], где выбор параболической модели восстановления огибающей сигнала ОВТД в зоне экстремума обосновывался как наиболее оптимальный с точки зрения точности и вычислительных затрат на его реализацию.

Исходя из вышесказанного, вычисление экстремальных значений кодов, соответствующих экстремальным значениям выходного напряжения ИЦ с включенными в неё ОВТД, осуществляется в два этапа. На первом проводится локализация окрестности глобального экстремума функции изменения кодов, а затем, на втором этапе, выбранный участок заменяется квадратичной параболой и аналитически находятся координаты её вершины, являющиеся координатами искомого глобального экстремума.

Оценки погрешности дискретизации и вычисления экстремальных значений кодов, полученные на основе ГХ измерительного канала с РК из двух ОВТД, показали достаточно высокую эффективность предлагаемого алгоритма. В частности, использование алгоритма восстановления огибающей сигнала на основе аппроксимации квадратичной параболой и поиска экстремума кодов по восстановленной кривой, позволяет уменьшить погрешность дискретизации на высоких скоростях вращения ротора турбомашины более чем на один порядок по сравнению с алгоритмом прямого поиска экстремума.

Следует также отметить, что в случае повышенных требований к быстродействию системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы, возможно дальнейшее упрощение алгоритмов обработки данных в части отказа от восстановления огибающей кодов на выходе АЦП в программном обеспечении верхнего уровня и переносе определения экстремальных значений кодов на уровень микроконтроллера с управлением частотой преобразования АЦП и использованием операций сравнения целочисленных величин кодов [5]. При этом, очевидно, возможно некоторое ухудшение метрологических характеристик системы.

Список литературы

[1] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов О.П., Скобелев О.П. Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление, 2013. -№10. -с.38-46.

[2] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Автометрия, 2015, №3.

[3] В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик Алгоритм поиска экстремальных значений кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Тр. XV Междунар. конф. Проблемы управления и моделирования в сложных системах. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. –С. 650-654.

[4] Хритин, А.А. Система измерения радиальных зазоров в турбомашинах: Дисс. канд. техн. наук: 05.11.16. -Самара, 1993. – 180 с.

[5] Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Подлипнов П.Е. О повышении производительности системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Тр. XVII Междунар. конф. Проблемы управления и моделирования в сложных системах. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2015 (настоящий сборник).

О ПОВЫШЕНИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК

В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, П.Е. Подлипнов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
borovik@iccs.ru
тел: +7 (846) 333-26-77, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *система измерения, радиальные осевые смещения, обработка данных, сокращение времени передачи данных*

Abstract
The article examines the questions to increase performance of the system for measuring of radial and axial displacements of blades tips in gas-turbine engines. This effect is achieved due to simplification of data processing and transformation it to microcontroller level. It, as a consequence, leads to data transfer time reducing on upper level to PC.

Известна система измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы, используемых в турбинах современных газотурбинных двигателей (ГТД) [1]. В качестве первичных преобразователей в такой системе используются одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) с чувствительным элементом в виде отрезка проводника, способные работать в тяжелых условиях газовоздушного тракта двигателя. Для одновременного измерения радиальных и осевых смещений ОВТД объединяют в кластер, определённым образом располагаемый на статорной оболочке турбомашины. Изменения естественных выходных параметров ОВТД (индуктивностей) преобразуется в измерительной цепи в напряжения, а затем в цифровые коды, которые в виде дискретного во времени входного потока поступают в систему обработки данных, включающую нижний и верхний уровни.

На нижнем уровне обработки (реализован на микроконтроллере (МК)) производится сбор данных, выделение групп полезных кодов в окрестностях локальных экстремумов для каждой лопатки, сжатие (удаление избыточных кодов) и передача выделенной информации по последовательному каналу на верхний уровень. На верхнем уровне (реализован на ПЭВМ), при помощи методов аппроксимации вычисляются экстремальные значения кодов для каждой лопатки [3], а затем, на основе градуировочных характеристик, определяются искомые координаты смещения торцов контролируемых лопаток в радиальном и осевом направлениях.

Основными недостатками такого процесса обработки являются низкое быстродействие, позволяющее работать лишь в режиме «старт-стоп», а также значительный объем оперативной памяти МК, необходимой для буферизации входного потока цифровых кодов. При этом наибольшие затраты времени расходуются на процессы последовательной передачи данных от нижнего на верхний уровень и на аппроксимацию на верхнем уровне зависимостей кодов от времени на участках прохождения лопатками чувствительных элементов ОВТД с целью дальнейшего определения экстремальных значений кодов, необходимых для расчёта физических значений искомых координат смещений торцов лопаток.

Достичь повышения производительности системы можно за счет упрощения алгоритмов обработки данных и, в частности, определения экстремальных значений кодов на уровне МК непосредственно на потоке входных используя только операции сравнения целочисленных величин кодов. В частности, подобного результата можно добиться, используя алгоритм де-

тектирования локальных экстремумов, основанный на применении адаптивного порога [4], который позволяет в реальном времени в темпе поступления входного потока измерительных данных за один проход выделить окрестности текущего локального экстремума и зафиксировать его амплитудное значение.

В то же время, фактически реализуемый таким образом прямой поиск кодов, соответствующих экстремумам функции изменения индуктивности рабочего ОВТД, из-за конечной частоты дискретизации АЦП будет приводить к возникновению погрешности. Причём указанная погрешность в максимальной степени будет сказываться на высоких скоростях вращения лопаточного колеса в условиях, когда фактическое значение амплитуды попадает на середину периода преобразования АЦП, и, с учётом отсутствия синхронизации опроса АЦП с периодом вращения колеса, будет носить случайный характер.

Оценить указанную погрешность представляется возможным на основе снятых заранее в лабораторных условиях пространственных характеристик изменений кодов при прохождении торцом лопатки зоны чувствительности ОВТД при различных значениях радиальных и осевых смещений. При этом окрестности экстремумов достаточно хорошо аппроксимируются гауссовской кривой. Для указанной модели сигнала в предположении равномерного закона распределения ошибки нахождения абсциссы точки экстремума функции изменения кодов и для заданных скоростей вращения лопаточного колеса и частоты преобразования АЦП могут быть получены выражения плотности вероятности случайной погрешности и интегральная функция распределения вероятности, а также определены математическое ожидание и дисперсия ошибки. Причём указанные расчёты должны быть выполнены для различных скоростей вращения лопаточного колеса и частот преобразования АЦП.

Полученные оценки математического ожидания можно использовать как некоторый критерий для выравнивания метрологических характеристик системы в всём диапазоне допустимых скоростей вращения лопаточного колеса. Другими словами, для заданного значения скорости вращения (которая также вычисляется на уровне МК) следует выбирать частоту преобразования АЦП из условия постоянства математического ожидания случайной ошибки. Подобное упрощение в обработке данных позволит значительно (в десятки раз) сократить объем и время передачи данных на верхний уровень обработки, а также исключить процедуры аппроксимации из состава ПО верхнего уровня. В то же время, следует отметить, что для обеспечения высоких метрологических характеристик системы, частоту преобразования АЦП необходимо повышать.

Список литературы

[1] Беленький Л.Б., Боровик С.Ю., Белопухов В.Н., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Технические средства и программное обеспечение системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и скорости вращения лопаточного колеса // Тр. XV Междунар. конф. Проблемы управления и моделирования в сложных системах. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. –С. 655-662.

[2] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.В., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление, -2013. -№10. -С. 38-46.

[3] В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик Алгоритм поиска экстремальных значений кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Тр. XV Междунар. конф. Проблемы управления и моделирования в сложных системах. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. –С. 650-654.

[4] В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, П.Е. Подлипнов, М.М. Кутейникова Предварительная обработка данных кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы на основе адаптивного алгоритма // Тр. XVII Междунар. конф. Проблемы управления и моделирования в сложных системах. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2015 (настоящий сборник).

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ИССЛЕДОВАНИЙ[1]

С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, П.Е. Подлипнов, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
borovik@iccs.ru
тел: +7 (846) 333-26-77, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *новый метод измерения, радиальные и осевые смещения, лопатки сложной формы, одновитковый вихретоковый датчик, семейство функций преобразования, семейство функций влияния соседних лопаток, повышенная чувствительность, расширенный диапазон*

Abstract

The actual method for measuring of radial and axial displacements of blades tips with complex shape based on the application of the distributed cluster of single-coil eddy-current sensors with sensitive elements made as a conductor strip is analyzed. The new method more sensitive for radial clearances and having extended range of tips axial displacements measuring is proposed. The study results of a new method are presented.

Известен метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы с повышенной кривизной поверхности пера, которые применяются в современных и перспективных газотурбинных двигателях (сечение лопатки плоскостью, перпендикулярной её оси имеет явно выраженную серповидную форму, а плоскостью параллельной оси – *U*-образную за счет выступов боковых поверхностей над «дном» в торцевой части лопатки). Метод предусматривает применение распределенного кластера (РК) из двух одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника. РК ОВТД размещается в хвостовой части лопатки, а ЧЭ обоих датчиков развёрнуты на угол 30÷60° против часовой стрелки относительно направления вращения рабочего колеса. Такое размещение и разворот позволяют избежать эффекта «двоения» эквивалентной индуктивности ЧЭ (связанного с выступами) при прохождении лопатки в зоне чувствительности датчика, а единственный минимум эквивалентной индуктивности каждого из ЧЭ, выполняющих рабочие функции, принимается за информативные значения (при заданных радиальном и осевом смещении) [1, 2].

Известны модели электромагнитного взаимодействия (ЭМВ) ЧЭ с торцевой частью лопатки [3], а также модель дифференциальной измерительной цепи (ИЦ) с РК ОВТД, в которой в качестве исходных данных используются результаты моделирования ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки [4]. Применение обеих моделей обеспечило получение семейств функций преобразования (ФП) в виде зависимостей эквивалентных индуктивностей ЧЭ и цифровых кодов на выходе ИЦ от радиальных и осевых смещений [5, 6], причем результаты моделирования подтверждались результатами экспериментальных исследований [2].

Однако проведенные исследования показали недостаточную чувствительность к изменениям радиальных смещений[2], а также ограниченный диапазон осевых смещений,

[1] Часть работ выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-08-00802)

[2] Радиальные смещения характеризуют важный параметр – радиальные зазоры между торцами лопаток и статором, от которого зависит надежность и экономичность силовой установки.

свойственные существующему методу, что послужило поводом к разработке нового, свободного от указанных недостатков.

В докладе предлагается новый метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы, отличительной особенностью которого является смещение РК ОВТД в сторону головной части контролируемой лопатки, разворот ЧЭ на 60° по часовой стрелке относительно направления вращения, а также использование в качестве информативного параметра минимального значения эквивалентной индуктивности ЧЭ из двух минимумов при прохождении лопаткой зоны чувствительности датчика, выполняющего рабочие функции. Экспериментальные исследования семейств градуировочных характеристик ОВТД в составе РК, показали, что при реализации нового метода, чувствительность к изменениям радиальных смещений увеличивается более чем втрое, а диапазон измерений осевых смещений – в пять раз по сравнению с существующим методом.

На основе разработанных и апробированных ранее модели ЭМВ ЧЭ датчика с лопаткой сложной формы с учётом объёма и кривизны поверхности в её торцевой части [3], модели ЭМВ ЧЭ с контролируемой и соседними лопатками [7], а также модели дифференциальной ИЦ, в которую включены оба ОВТД в составе РК, а в качестве исходных данных используются результаты, полученные на моделях ЭМВ с лопатками [4], были проведены дополнительные исследования нового метода и получены семейства ФП (зависимости эквивалентных индуктивностей ЧЭ (первичных обмоток согласующих трансформаторов) РК ОВТД и цифровых кодов на выходе ИЦ от радиальных и осевых смещений).

На основе полученных семейств ФП были определены семейства функций влияния (ФВ) соседних лопаток, как на эквивалентные индуктивности ЧЭ (выполняющих в РК рабочие и компенсационные функции), так и на цифровые коды на выходе ИЦ (ФВ получены на моделях ЭМВ ЧЭ с контролируемой и соседними лопатками [7]) и модели ИЦ [4]. Вычислительные эксперименты показали, что влияние соседних лопаток существенно, причём решающая роль в этом влиянии принадлежит датчикам, выполняющим компенсационные функции.

Список литературы

[1] Беленький Л.Б., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Способ измерения радиальных зазоров и осевых смещений торцов лопаток рабочего колеса турбины // Патент РФ 2457432. 2012. Бюл. 21.

[2] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов О.П., Скобелев О.П. Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление, 2013. -№10. -с.38-46.

[3] Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика с торцом лопатки сложной формы // Тр. XV Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах»: -Самара: СамНЦ РАН, 2013. -с.627-635.

[4] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Модель измерительной цепи с переменными во времени эквивалентными индуктивностями одновитковых вихретоковых датчиков // Тр. XVI Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах»: -Самара: СамНЦ РАН, 2014. -с.692-696.

[5] Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Результаты моделирования электромагнитного взаимодействия чувствительных элементов одновитковых вихретоковых датчиков в составе кластера с торцом лопатки сложной формы // Тр. XV Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах»: -Самара: СамНЦ РАН, 2013. -с.636-641.

[6] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Результаты моделирования измерительных цепей с одновитковыми вихретоковыми датчиками и приближённым дифференцированием // // Тр. XVI Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах»: -Самара: СамНЦ РАН, 2014. -с.697-703.

[7] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлипнов П.Е., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Влияние соседних лопаток на измерение радиальных зазоров в турбине // Мехатроника, автоматизация, управление, 2015, -№5.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОВИТКОВОМ ВИХРЕТОКОВОМ ДАТЧИКЕ

С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, П.Е. Подлипнов, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
borovik@iccs.ru
тел: +7 (846) 333-26-77, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *одновитковый вихретоковый датчик, согласующий трансформатор, идеализированные модели, переходные процессы, моделирование, экспериментальные исследования, эквивалентные индуктивность и сопротивление*

Abstract

The idealized model for transient research in matching transformer of single-coil eddy-current sensors signals in measuring circuit with pulse supply is offered. The method for estimating of primary equivalent inductance and resistant as the most important parameters of the measuring circuit at the transient beginning, based on comparing and contrasting of calculations and experimental data is suggested.

Известны конструкции одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительным элементном (ЧЭ) в виде отрезка проводника [1, 2], предназначенные для измерения радиальных зазоров (РЗ) между торцами лопаток и статорной оболочкой в компрессоре и турбине газотурбинного двигателя (ГТД). ЧЭ с помощью тоководов (ТВ), представляющих собой два изолированных соосных цилиндра, через установочное отверстие в статорной оболочке вводится в газовоздушный тракт и занимает измерительную позицию на расстоянии 2÷3 мм от торцов лопаток. При этом ЧЭ функционирует в крайне тяжелых условиях [3].

ТВ соединяет ЧЭ с объемным витком (ОВ) согласующего трансформатора (СТ), первичная обмотка которого включена в измерительную цепь (ИЦ) с импульсным питанием. В свою очередь, СТ расположен с внешней стороны статорной оболочки, а потому находится в сравнительно благоприятных условиях, при которых возможно использование ферритового магнитопровода (в турбине эта температура достигает 450°С).

С появлением переднего фронта импульса питания ИЦ в результате электромагнитного взаимодействия (ЭМВ) ЧЭ с торцевой частью лопатки в ней возникают, а затем затухают вихревые токи, вызывая изменения эквивалентной индуктивности ЧЭ и соответствующие изменения индуктивности первичной обмотки СТ. При этом наибольшие изменения наблюдаются в момент появления переднего фронта импульса. В этой связи в ИЦ с ОВТД, как правило, применяется метод измерения, обеспечивающий фиксацию изменений индуктивности по первой производной тока в самом начале переходного процесса («метод первой производной (ПП)» [1, 2]).

Известны и модели ЭМВ ЧЭ с лопаткой компрессора [4], а также с турбинной лопаткой сложной формы с повышенной кривизной поверхности пера [5]. Обе модели построены на основе метода конечных элементов и использования законов Кирхгоффа для контуров и узлов электрических цепей и закона Био-Савара для расчёта индукции магнитного поля и эквивалентной индуктивности ЧЭ, представленной в виде функции времени для искомых РЗ.

Известна также и модель наиболее современного варианта ИЦ, в котором реализован метод ПП [6] (этот вариант в работе [7] назван «ИЦ с приближенным дифференцированием»).

Исходными данными для модели являются результаты моделирования ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки. Однако при определении эквивалентных индуктивности и сопротивления первичной обмотки СТ в модели ИЦ принимались упрощающие допущения, оказавшие серьёзное негативное влияние на достоверность результатов вычислительных экспериментов [8]. Для получения более достоверных данных необходима разработка моделей элементов конструкции ОВТД, в том числе ЧЭ, ТВ и ОВ, в каждом из которых появления импульсного питания сопровождается возникновением вихревых токов и их распределением по сечениям перечисленных элементов, что, в конечном счете, определяет величины эквивалентных параметров. Работы в этом направлении ведутся, но для их завершения требуется время.

Между тем оценка эквивалентных индуктивности и сопротивления первичной обмотки СТ в ОВТД возможна при совместном использовании существенно упрощенных моделей переходных процессов в СТ при импульсном возмущении и экспериментальных исследований. В докладе рассматривается вновь разработанная идеализированная модель передачи импульсного питания через СТ на ЧЭ ОВТД, а также приводится описание модели трансформации индуктивности ЧЭ в первичную обмотку СТ. При этом в моделях приняты существенные упрощающие допущения в отношении *LR*-параметров элементов конструкции датчика.

С помощью разработанных моделей были проведены вычислительные эксперименты, результаты которых сопоставлялись с экспериментальными исследованиями токов, напряжений и эквивалентной индуктивности первичной обмотки СТ, изменяющихся во времени, в т.ч., в начале переходного процесса. Результаты экспериментов продемонстрировали идентичность в характере изменений токов и напряжений во времени с расчетным, однако показали значительное расхождение по значениям, которое связано с несовершенством модели, идеализирующей поведение датчика в переходном процессе, возбуждаемом импульсным напряжением на первичной обмотке СТ. На основе сравнения и сопоставления расчётных и экспериментальных данных были предложены способы оценки эквивалентных индуктивности и сопротивления, которые могут быть использованы в процессе моделирования ИЦ с импульсным питанием.

Список литературы

[1] Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2001. -188 с.

[2] Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / под общ. ред. Скобелева О.П. –М.: Машиностроение, 2011. -298с.

[3] Боровик С.Ю., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Проблемы измерения радиальных зазоров в экстремальных условиях проточной части газотурбинного двигателя и их решение на основе применения одновитковых вихретоковых датчиков // Тр. XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. – Москва: Из-во ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова. 2014. –С. 6928-6937.

[4] Боровик С.Ю., Маринина Ю.В., Секисов Ю.Н. Модель кластерного одновиткового вихретокового датчика на основе метода конечных элементов // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». -2007. -№1(19). – С.76-83.

[5] Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика с торцом лопатки сложной формы // Тр. XV Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». –Самара: СамНЦ РАН, 2013. –С.627-635.

[6] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Модель измерительной цепи с переменными во времени эквивалентными индуктивностями одновитковых вихретоковых датчиков // Тр. XVI Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». –Самара: СамНЦ РАН, 2014. –С.692-696.

[7] Беленький Л.Б., Скобелев О.П. Измерительная цепь с одновитковыми вихретоковыми датчиками и приближенным дифференцированием // Тр. XIV Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». –Самара: СамНЦ РАН, 2012. –С.602-606.

[8] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Результаты моделирования измерительных цепей с одновитковыми вихретоковыми датчиками и приближённым дифференцированием // Тр. XVI Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». –Самара: СамНЦ РАН, 2014. –С.697-703.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ С ОДНОВИТКОВЫМИ ВИХРЕТОКОВЫМИ ДАТЧИКАМИ

С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, П.Е. Подлипнов, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
borovik@iccs.ru
тел: +7 (846) 333-26-77, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *экспериментальные исследования, моделирование, сравнение, стенд, интегрированная модель, параметры настройки.*

Abstract

The features of the experimental researches of input subcircuit of differential measuring circuit are considered. The experiments results are compared with the results of measuring circuit simulation and a conclusion about the simulation veracity is formed as a result of such comparison. The tuning of the model parameters in order to obtain a minimal difference of model and experimental results is suggested.

Одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) с чувствительным элементом (ЧЭ) в виде отрезка проводника предназначены для измерения радиальных зазоров (РЗ) между торцами лопаток рабочего колеса компрессора и турбины газотурбинного двигателя [1, 2], причем ЧЭ размещен непосредственно в газовоздушном тракте в условиях повышенной температуры (более 1000°С в турбине). Чтобы в процессе измерения РЗ уменьшить влияние температурных воздействий на ЧЭ, используется пара идентичных по своим характеристикам ОВТД, первичные обмотки согласующих трансформаторов (СТ) которых включаются в дифференциальную измерительную цепь (ИЦ). Один из датчиков выполняет рабочие, а второй - компенсационные функции.

Наиболее перспективными являются «ИЦ с приближенным дифференцированием» [3], в которых реализуется известный метод первой производной [1, 2]. Прямоугольный импульс питания подается на первичные обмотки СТ, токи в которых ($i_1(t)$ и $i_2(t)$) преобразуются в напряжения ($U_1(t)$ и $U_2(t)$) на выходе преобразователей «ток-напряжение» ($ПТН_1$, $ПТН_2$). Разностное напряжение с выходов ПТН при малой длительности импульса питания (Δt) имеет линейно нарастающий характер ($\Delta U(t)$), а его амплитуда в момент окончания импульса пропорциональна производной тока в первичной обмотке СТ датчика, выполняющего рабочие функции ($\Delta i/\Delta t$, где $\Delta i=i_1-i_2$), а, следовательно, и изменениям индуктивности ЧЭ, связанным с изменениями РЗ.

Известны и модели электромагнитного взаимодействия (ЭМВ) ЧЭ с торцевой частью лопатки сложной формы, применяемой в турбинах [4]. Получены и результаты моделирования в виде изменяющейся во времени эквивалентной индуктивности ($L^{э}_{ЧЭ}(t)$) в ответ на ступенчатое возмущение питания контура ЧЭ, причем в момент возмущения индуктивность скачком уменьшается, а затем (по мере затухания вихревых токов) с увеличением времени ($t\to\infty$) монотонно возрастает и стремится к постоянной величине $L^{э}_{ЧЭ,\infty}$. При отсутствии лопатки индуктивность ЧЭ, выполняющего компенсационные функции остается постоянной во времени и равной $L^{э}_{ЧЭ,\infty}$.

Однако установить достоверность полученных результатов ($L^{э}_{чэ}(t)$), сравнивая результаты моделирования с экспериментальными данными, практически невозможно, если учесть, что полезные изменения $L^{э}_{чэ}(t)$ (связанные с РЗ) по отношению к $L^{э}_{чэ,\infty}$ составляют десятые доли процента, а величина $L^{э}_{чэ,\infty}$ – единицы нГн. Трудности возникают с измерениями и регистрацией трансформированных значений $L^{э}_{чэ}(t)$ в первичную обмотку СТ ($L^{э}_{1}(t)$), что связано с отсутствием соответствующего оборудования промышленного изготовления.

Вместе с тем известна модель дифференциальной ИЦ [5], в которой в качестве исходных данных используются результаты моделирования ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки сложной формы. Но это фактически означает, что модель ЭМВ ЧЭ с торцевой частью лопатки интегрирована с моделью ИЦ (предполагается, что эквивалентные индуктивность и активное сопротивление первичных обмоток СТ скорректированы по результатам количественных оценок, приведенных в работе [6]).

Чтобы установить достоверность результатов моделирования ИЦ предусматривается проведение вычислительных экспериментов на интегрированной модели и сравнение полученных результатов с результатами экспериментальных исследований входной части дифференциальной ИЦ с импульсным питанием, регулируемым по длительности (в сторону её увеличения). Тогда при отсутствии лопатки в зоне чувствительности рабочего ОВТД в течение импульса питания ток $i_1(t)$ будет равен току $i_2(t)$, поскольку эквивалентные индуктивности $L^{э}_{чэ1} = L^{э}_{чэ2} = L^{э}_{чэ,\infty}$, а разностное напряжение с выходов ПТН$_1$ и ПТН$_2$ будет нулевым (ΔU=$U_1(t)$-$U_2(t)$=0).

С появлением лопатки в зоне чувствительности рабочего датчика эквивалентная индуктивность уменьшается, равенство токов $i_1(t)$ и $i_2(t)$ нарушается (крутизна $i_1(t)$ возрастает по сравнению с $i_2(t)$) и на выходах ПТН появляется напряжение $\Delta U(t)$, которое увеличивается, а затем (по мере затухания вихревых токов в лопатке) достигает экстремального значения и возвращается к нулю.

Достоверными результаты моделирования считаются в том случае, если характер изменения разностного напряжения $\Delta U(t)$ идентичен с результатом эксперимента, а различие в экстремальных значениях ($\Delta U_{экстр}$) и соответствующих им моментов времени ($t_{экстр}$) не превышает заданную и приемлемую величину.

Для проведения экспериментальных исследований разработан стенд, который включает входную часть дифференциальной ИЦ с двумя ОВТД, выполняющими рабочие и компенсационные функции, ПТН, а также дополнительное оборудование – цифровой осциллограф промышленного изготовления и ПЭВМ для обработки полученных результатов. Отличительные особенности входной схемы – наличие источника импульсного питания с регулируемой длительностью и амплитудой. Проведены экспериментальные исследования разностного напряжения на выходе ПТН при наличии лопатки в зоне чувствительности ОВТД, выполняющего рабочие функции. Показано, что это напряжение сначала возрастает, достигая экстремального значения, а затем уменьшается по мере затухания вихревых токов в торцевой части лопатки.

Разработана структурная схема интегрированной модели ИЦ, в состав которой входит модель ЭМВ ЧЭ датчика, выполняющего рабочие функции, с торцевой частью лопатки. Исследовано влияние параметров настройки на результаты моделирования. Найдены такие параметры настройки, при которых разностное напряжение с выходов ПТН ($\Delta U(t)$) идентично по характеру изменений во времени разностному напряжению, полученному экспериментально. Показано, что при идентичном характере обеих зависимостей расхождение экстремальных значений $\Delta U_{экстр}$ и соответствующих им моментов времени $t_{экстр}$ не превышает 11%. Полученные сравнительные данные позволяют сделать вывод о достоверности результатов моделирования.

Список литературы

[1] Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2001. -188 с.

[2] Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / под общ. ред. Скобелева О.П. –М.: Машиностроение, 2011. -298с.

[3] Беленький Л.Б., Скобелев О.П. Измерительная цепь с одновитковыми вихретоковыми датчиками и приближенным дифференцированием // Тр. XIV Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». -Самара: СамНЦ РАН. -2012. -С.602-606.

[4] Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика с торцом лопатки сложной формы // Тр. XV Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». -Самара: СамНЦ РАН. -2013. -С.627-635.

[5] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Модель измерительной цепи с переменными во времени эквивалентными индуктивностями одновитковых вихретоковых датчиков // Тр. XVI Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». -Самара: СамНЦ РАН. -2014. -С.692-696.

[6] С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, П.Е. Подлипнов, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев Моделирование и экспериментальные исследования переходных процессов в одновитковом вихретоковом датчике // Тр. XVII Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». -Самара: СамНЦ РАН. -2015 (настоящий сборник).

СИНТЕЗ ДВУМЕРНЫХ ОБРАТНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.И. Батищев[1], И.И. Волков[1], А.Г. Золин[1]

[1]Самарский государственный технический университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
datatech@samgtu.ru
тел: +7 (846) 337-12-74

Ключевые слова: *критерий минимума взвешенной квадратической погрешности, КИХ-фильтр, весовая функция, обратный фильтр, реконструкция изображений.*

Abstract

The article describes the method of constructing inverse not permanent two dimentional digital filters for solving problems of reconstruction of blurred images. As a criterion of adequacy criterion considered complete coincidence and criterion of a minimum weighted quadratic error.

Введение

Современные космические системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), для получения изображений используют съемочные устройства на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). Для правильной работы в режиме накопления светового потока, необходимо, чтобы скорость движения космического аппарата была точно согласована с периодом опроса матрицы. На практике, это условие может нарушаться из-за ошибки вычисления скорости спутника и неточности задания частоты опроса ПЗС-матрицы. В результате возникают смазанные изображения [1].

Параметры смаза могут существенно варьироваться от долей до десятков пикселей и иметь как одну, так и две пространственные составляющие. Кроме того величина смаза на одном изображении может изменяться в некоторых пределах.

В настоящее время известны основные подходы к решению задачи восстановления смазанных изображений, однако их практическое применение связано с различными недостатками конкретных реализаций, поскольку такие задачи относятся к классу обратных некорректно поставленных.

В представленном докладе процесс смаза рассматривается, как результат применения некоторого фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра) к исходному изображению (прямого фильтра). Тогда задача восстановления может быть сформулирована как нахождение обратного фильтра, позволяющего получить изображение, близкое к восстановленному.

На сегодняшний день методология синтеза оптимальных алгоритмов восстановления сигналов разработана достаточно полно. Однако существующие методы либо требуют для своей реализации не всегда доступной априорной информации, либо сталкиваются с вычислительными проблемами, связанными с некорректностью обратных задач и необходимостью использования регуляризующих процедур [2,3].

Предлагаемые далее методы синтеза обратных фильтров предполагают, что весовая функция прямого фильтра является известной. Задача получения параметров смаза рассматривается в [4].

Описание алгоритма

Пусть имеется смазанное изображение

$$(1)\quad y(m_1,m_2)=\sum_{i_1=0}^{N_{01}-1}\sum_{i_2=0}^{N_{02}-1}h_0(i_1,i_2)x(m_1-i_1,m_2-i_2),,$$

представляющее собой исходное изображение $x(m_1,m_2)$, преобразованное с помощью КИХ-фильтра с известной весовой функцией $h_0(i_1,i_2)$. Ставится задача восстановления ряда $x(m_1,m_2)$ по ряду $y(m_1,m_2)$.

Оценку восстановленного ряда будем осуществлять по следующей формуле:

$$(2)\quad x'(m_1,m_2)=\sum_{j_1=0}^{p_1}\sum_{j_2=0}^{p_2}h(j_1,j_2)y(m_1-j_1,m_2-j_2),$$

Задача сводится к оценке весовой функции $h(j_1,j_2)$.

Для решения подставим в (1) вместо $x(m_1,m_2)$ значение $x'(m_1,m_2)$ из (2). В результате получим:

$$(3)\quad y'(m_1,m_2)=\sum_{i_1=0}^{p_1}\sum_{i_2=0}^{p_2}h(i_1,i_2)\sum_{i_1=0}^{N_{01}-1}\sum_{i_2=0}^{N_{02}-1}h_0(i_1,i_2)y(m_1-i_1-j_1,m_2-i_2-j_2),$$

или

$$(4)\quad y'(m_1-v_1,m_2-v_2)=\sum_{j_1=0}^{p_1}\sum_{j_2=0}^{p_2}h(j_1,j_2)D(v_1+j_1,v_2+j_2),$$

где
$$\begin{cases} D(j_1,j_2)=\sum\limits_{i_1=0}^{N_{01}-1}\sum\limits_{i_2=0}^{N_{02}-1}h_0(i_1,i_2)y(m_1-i_1-j_1,m_2-i_2-j_2) \\ j_1=\overrightarrow{0,2p_1} \\ j_2=\overrightarrow{0,2p_2} \end{cases}$$

На наш взгляд, определить весовую функцию обратного фильтра $h(j_1,j_2)$ целесообразно по одному из следующих критериев: совпадения $y(m_1,m_2)$ с $y'(m_1,m_2)$ и минимуму взвешенной квадратической погрешности.

Критерий совпадения

В качестве критерия возьмем точное соответствие исходного смазанного изображения $y(m_1,m_2)$ и восстановленного изображения, обработанного прямым фильтром $y'(m_1,m_2)$.

$$\begin{cases} y'(m_1-v_1,m_2-v_2)=y(m_1-v_1,m_2-v_2) \\ v_1=0,p_1 \\ v_2=0,p_2 \end{cases}$$

С учетом (4), получим следующую систему уравнений:

$$(5)\quad \begin{cases} \sum\limits_{j_1=0}^{p_1}\sum\limits_{j_2=0}^{p_2}h(j_1,j_2)D(v_1+j_1,v_2+j_2)=y(m_1-v_1,m_2-v_2) \\ v_1=\overrightarrow{0,p_1} \\ v_2=\overrightarrow{0,p_2} \end{cases}$$

Решив данную систему уравнений, получаем значения весовой функции обратного (восстанавливающего) фильтра $h(j_1,j_2)$.

Критерий минимума взвешенной квадратической погрешности.

При другом подходе в качестве критерия возьмем минимум взвешенной квадратической погрешности между значениями исходного смазанного изображения $y(m_1,m_2)$ и восстановленного изображения, обработанного прямым фильтром $y'(m_1,m_2)$. Такая погрешность будет вычисляться по формуле:

$$(6)\quad \varepsilon(m_1,m_2)=\sum_{v1=0}^{N_1-1}\sum_{v_2=0}^{N_2-1} f(v_1,v_2)\left(y'(m_1-v_{1_1},m_2-v_2)-y(m_1-v_{1_1},m_2-v_2)\right)^2,$$

Минимум будет обеспечен при условии, что

$$\begin{cases} \dfrac{d\varepsilon(m_1,m_2)}{dh(i_1,i_2)}=0 \\ i_1=\overrightarrow{0,p_1} \\ i_2=\overrightarrow{0,p_2} \end{cases}$$

Из (6) и (4) получаем, что для выполнения этих условий, значения весовой функции $h(i_1,i_2)$ должны оцениваться из следующей системы уравнений:

$$(7)\quad \begin{cases} \sum_{j1=0}^{p1}\sum_{j_2=0}^{p2} h(j_1,j_2)Q_{j_1,i_1}(j_2,i_2)=\Theta(i_{1_1},i_2) \\ i_1=0,p_1 \\ i_2=0,p_2 \end{cases}$$

где:

$$Q_{j_1,i_1}(j_2,i_2)=\sum_{v_1=0}^{N_1-1}\sum_{v_2=0}^{N_2-1} f(v_1,v_2)D(j_1+v_1,j_2+v_2)D(i_1+v_1,i_2+v_2)$$

$$\Theta(i_1,i_2)=\sum_{v_1=0}^{N_1-1}\sum_{v_2=0}^{N_2-1} f(v_1,v_2)D(i_1+v_1,i_2+v_2)y(m_1-v_1,m_2-v_2)$$

Решая систему уравнений (7) относительно $h(j_1,j_2)$, получаем обратный фильтр для восстановления изображения $y(m_1,m_2)$. Свойство системы данной системы:

$$Q_{j_1,i_1}(j_2,i_2)=Q_{i_1,j_1}(i_2,j_2)$$

существенно упрощает ее решение.

Обязательным условием при решении системы (7) является следущее соотношение параметров N_1 и N_2:

$$\begin{cases} N_1\ge p_1+1 \\ N_2\ge p_2+1 \end{cases}$$

Апробация алгоритма

Для апробации алгоритма было взято тестовое изображение со спутниковой системы ДЗЗ, цветовая палитра которого содержит 1024 градации серого. Из исходного изображения были созданы смазанные изображения с различными значениями весовой функции прямого фильтра. Восстановление изображений выполнялось с использованием описанных выше критериев с различными параметрами. В случае использования критерия минимума взвешенной среднеквадратической погрешности, весовая функция принималась равной единице. Относительная серднеквадратическая погрешность (ОСП) восстановления вычислялась по формуле:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum (x(m_1, m_2) - x'(m_1, m_2))^2}{\sum x(m_1, m_2)^2}}$$

Некоторые результаты проведенных экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Параметры восстановления и ОСП

Критерий	N_{01}	N_{02}	p_1	p_2	N_1	N_2	Δ
Полного соответствия	3	3	3	3	-	-	0,0838
			4	4	-	-	0,0896
	5	5	5	5	-	-	0,0962
			6	6	-	-	0,0911
	7	7	7	7	-	-	0,1927
			9	9	-	-	0,1802
Минимума взвешенной квадратической погрешности	3	3	3	3	4	4	0,07961
			5	5	6	6	0,07875
	5	5	5	5	10	10	0,0944
			7	7	8	8	0,0993
	7	7	7	7	8	8	0,131
			9	9	10	10	0,1278

Заключение

В результате исследований были разработаны и апробированы простые в реализации алгоритмы восстановления смазанных изображений. Использование методов адаптивной фильтрации позволяет применять эти методы для реконструкции изображений, имеющих переменные параметры смаза. Проведенные эксперименты показали удовлетворительное качество восстановления изображений. Результаты апробации алгоритмов показали достаточно высокую зависимость качества восстановления от вида функции смаза и неустойчивые решения в некоторых случаях. В дальнейшем планируется проведение работ по увеличению устойчивости решений и улучшению качества восстановления.

Список литературы

[1] Jian-Feng Cai, Hui Ji, Chaoqiang Liu, Zuowei Shen Blind motion deblurring using multiple images//Journal of Computational Physics 228 (2009) 5057–5071.

[2] Батищев В.И., Золин А.Г., Косарев Д.Н, Романеев А.Е. Аппроксимационный подход к решению обратных задач анализа и интерпретации экспериментальных данных // Вестник СамГТУ, сер. Технические науки. 2006, вып. №40, с. 57-65.

[3] Леонов А.С. Решение некорректно поставленных обратных задач. М.: Либроком, 2010.

[4] Кузнецов П.К., Семавин В.И., Солодуха А.А. Алгоритм компенсации скорости смаза изображения подстилающей поверхности, получаемого при наблюдении Земли из космоса // Вестник Сам. ГТУ, 2005. №37. С. 150-157.

Biography

Vitaly I. Batishchev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, head of the department of "Information Technology"

Igor I. Volkov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor of "Information Technology".

Aleksey G. Zolin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor of "Information Technology".

О ЗАДАЧЕ ГРУППИРОВКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ В СИСТЕМЕ ДИАГНОСТИКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ

О.А. Булыно[1], Д.В. Скворцов[1], Н.А. Сергеева[2]

[1]Сибирский государственный аэрокосмический университет им. М.Ф. Решетнева

[2]ООО «Ар Ди Сайнс»

660062, г. Красноярск, ул. Высотная, д.2, пом. 17, Россия

n.sergeeva@rd-science.com

Ключевые слова: *диагностика электро-радиоизделий, анализ надежности, результаты испытаний, классификация, диагностический неразрушающий контроль.*

Abstract

Some problems of electronic component diagnostics (estimation of the quality or suitability) are discussed. The focus of the paper is on the results analysis of the diagnostic nondestructive testing of various types electrical and electronic equipment (EEE). The necessity of three alternative problem recognition formulation and clusterization of EEE on the test results is established. Optimization problem of reference process in the manufacture of EEE is formulated in order to obtain high-quality products.

Введение

В современных космических аппаратах в составе аппаратуры содержится до 200 тысяч единиц различных изделий электронно-компонентной базы (ЭКБ): интегральных схем, резисторов, транзисторов, реле, конденсаторов, диодов и т.д. Эти элементы должны обеспечивать надежную длительную работоспособность бортовых систем. Отказ ЭРИ в аппаратуре при эксплуатации в составе изделия, невосстанавливаемого в составе функционирующего космического аппарата, приводит к весьма существенным экономическим потерям. Поэтому большое практической значение имеют исследования в области диагностики ЭРИ средствами неразрушающего контроля и последующая аналитическая обработка результатов испытаний.

1 Задача диагностики как задача распознавания образов

Предпосылкой для формулировки задачи диагностики качества электрорадиоизделий изделий (ЭРИ) является их неоднородность. Неоднородность может повлечь к трудностям заключения о надежности, поскольку гистограммы распределений значений результатов тестовых испытаний и результаты измерений вольт-амперных характеристик не вполне соответствуют нормальному закону распределения. В качестве примера на рисунке 1 приведена гистограмма распределений результатов тестов диагностического неразрушающего контроля (ДНК) прямого напряжения (Uпр, мВ) по ужесточенным нормам технических условий (ТУ).

Многомодальность в результатах замеров электрических параметров отмечается часто, общий объем тестовых испытаний может доходить до нескольких сотен тестов согласно разработанным программам испытаний для различных типов электрорадиоизделий, их назначения и условий эксплуатации [1].

Ситуации, когда партия ЭРИ явно распадается на несколько групп (например, вследствие различной структуры кристалла, замены топологической схемы, изменения технологии изготовления ЭРИ и др.) представляются наиболее понятными, в таких случаях состав групп изделий в партии очевиден. На практике бывает и другая ситуация. При анализе данных испытаний наблюдаются некоторые сгущения результатов замеров, вроде бы ничем технически не

обусловленные. Невозможно сразу принять решение о причине такого обособления ЭРИ в группы по результатам тестов, могут выделяться ЭРИ совсем в стороне от основной группы, скорее похожие на выброс.

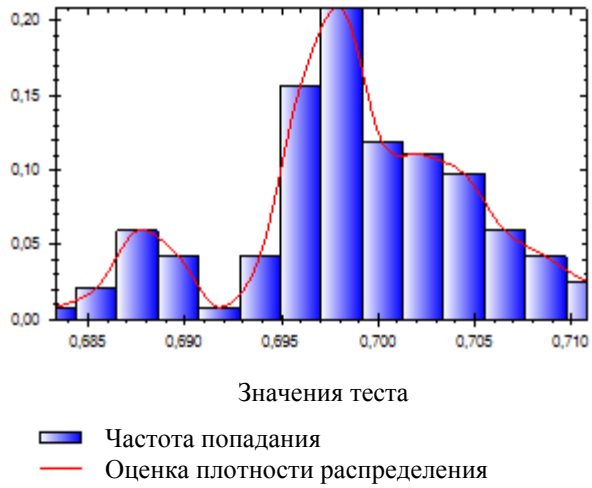


Рисунок 1 – Гистограмма распределений результатов тестов

Анализ подобных результатов может стать более затруднительным, если учесть, что согласно программе испытаний большинство видов изделий проходит электротермотренировку (ЭТТ) с последующим повторным замером всех электрических параметров для выявления скрытых дефектов. И если изначально в партии присутствуют ЭРИ разного качества, то дальнейшие результаты замеров после ЭТТ могут оказаться сильно отличающимися. Тогда выделить надежные элементы становится гораздо сложнее.

Окончательно решение о надежности принимается после анализа дрейфа параметров, измеренных до и после испытаний. Дрейф параметров вычисляется на основе результатов замеров испытаний как разница между значениями до и после ЭТТ с учетом знака. При анализе дрейфа оценивается плотность распределения дрейфа, степень его изменчивости, принимается решение об устойчивости электрических характеристик элементов внешним агрессивным условиям среды.

Для идеального изделия значение дрейфа должно быть близко к нулю. Соответственно изделия, у которых значение дрейфа близко к установленным границам или выходят за них, признается потенциально ненадежным.

Проблема, которая имеет важный прикладной характер, касается возможности выделения групп на основе замеров электрических параметров до ЭТТ, и предварительный прогноз возможного разделения элементов по своим качественным свойства после проведения ЭТТ.

Трудность формулировки задачи группировки изделий заключается в полном отсутствии знания о количестве групп внутри партии изделий и их качественных характеристик [2]. Параметры всех электрорадиоизделий перед проведением дополнительных отбраковочных испытаний проверяются на соответствие нормам технических условий. Только те ЭРИ, параметры которых соответствуют нормам ТУ, допускаются для проведения диагностических испытаний. Все группы ЭРИ заведомо соответствуют нормам ТУ и должны быть признаны одинаково надежными. Поэтому без привлечения дополнительной качественной информации невозможно выработать решающее правило, которое отличало бы группы по степени их надежности.

Пусть некоторое электрорадиоизделие может быть отнесено к той или иной категории качества в соответствии с требованиями регламентирующих документов (ТУ, ГОСТ, ОСТ), предъявляемым к ЭРИ для технических объектов, функционирование которых предполагает длительный срок эксплуатации без проведения текущего ремонта.

Важной спецификой задач диагностики является та особенность, что среди электрорадиоизделий присутствуют «очень хорошие» с точки зрения значений результатов испытаний, «хорошие» и «не очень хорошие». ЭРИ, параметры которых не соответствуют требованиям ТУ, из выборки исключаются. Количество классов может быть различным, но, независимо от их числа, обязательно присутствуют области перемешивания представителей соседних классов. Это элементы множества (ЭРИ), для которых меры принадлежности к каждому из двух соседних классов сравнимы по своим численным значениям. Такие элетрорадиоизделия имеют признаки разных классов, и их множество интерпретируется как некая пограничная область между переходами из класса в класс, где присутствует сильное перемешивание объектов с признаками разных классов. Обоснованным является формулирование трехальтернативной задачи распознавания, с выделением пограничного класса изделий. Результаты диагностики следует использовать для регулирования технологического процесса производства ЭРИ с целью уменьшения области сильного перемешивания элементов различных классов.

2 Задача группировки ЭРИ

Типичным для задач технической диагностики, диагностики состояния технологического процесса или объекта, является наличие облачной структуры в пространстве признаков, определяющей тот или иной класс, что демонстрирует рисунок 3 [3].

Содержание задачи группировки состоит в определении числа групп (кластеров) в классе годных, не бракованных изделий. Пусть качество изделия характеризуется набором переменных $x=(x_1, x_2, \ldots, x_n)$, n − количество признаков, и имеются результаты экспериментов $x_i=(x_{1,i}, x_{2,i}, \ldots, x_{n,i})$, $n=1,\ldots,s$, где s − объем выборки.

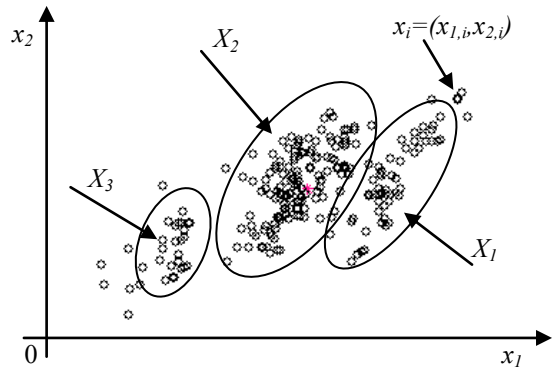


Рисунок 3 – Иллюстрация задачи группировки

В качестве примера на рисунке 3 изображены элементы в пространстве двух признаков (x_1,x_2), $(x_{1,i}, x_{2,i})$ − произвольная точка выборки. Можно видеть

Для построения алгоритма группировки использовалось Евклидово расстояние между объектами по формуле 1:

$$(1)\quad \rho(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{\substack{k=1,\\ i\neq j}}^{n} (x_{k,i} - x_{k,j})^2},\ i, j = 1,\ldots,s$$

Определим подмножества элементов выборки, для которых расстояния между элементами не превышают некоторой наперед заданной величины δ_0: $\rho(x_i, x_j) < \delta_0$, при $i \neq j$. В настоящее время значение δ_0 определяется опытным путем, с учетом специфики данных. В дальнейшем предполагается ввести критерий оптимальности для расчета значения δ_0 исходя из минимизации суммы точек пересечения классов. Точки пересечений классов, множество которых интерпретируется как переходный класс, удаляются из исходного множества точек. Далее воз-

никает задача разбиения на кластеры (классы), основанный на идее объединения в один кластер объектов в областях их наибольшего сгущения. Цель задачи кластеризации − разбить выборку на такое (заранее неизвестное число) кластеров, чтобы сумма расстояний от объектов кластеров до центров кластеров была минимальной по всем кластерам, т.е. выделить группы максимально близких друг к другу объектов, которые в силу гипотезы компактности и будут образовывать кластеры.

3 Результаты обработки экспериментальных данных

Для анализа возможного выделения групп отличающихся по качеству деталей бралась партия диодных сборок. Провелись замеры электрических параметров до ЭТТ согласно утвержденной программе испытаний. Исследование зависимости количества классов от параметров группировки показало достаточно устойчивое деление всей партии на 2 группы. График зависимости приведен на рисунке 3, где видны интервалы значений параметра алгоритма группировки для значений количества групп.

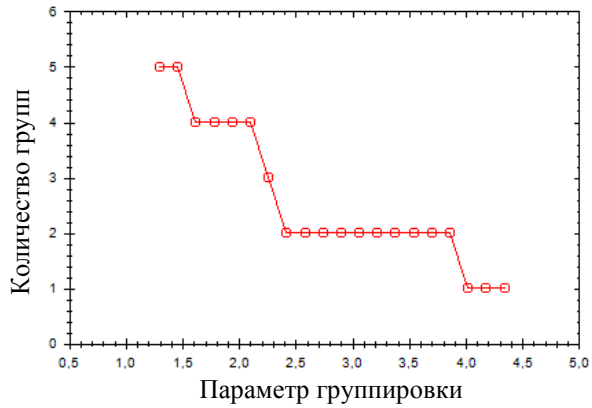


Рисунок 3 – График зависимости количества групп от параметра группировки

Оценки плотностей распределения значений результатов тестов показывают многомодальность, как, например, на рисунке 1, на графиках гистограмм группы объектов четко не выделяются. Группировка по всему набору тестов согласно определенному диапазону значений параметра группировки разделила всю партию изделий на 2 группы по значению тестов до ЭТТ, то есть, до проведения специальных мероприятий по выявлению дефектов в партии изделий. Далее все ЭРИ прошли ЭТТ и снова подверглись замеру электрических параметров согласно плану испытаний и на том же оборудовании. В результате анализа данных после ЭТТ в период времени [2;12] часов после проведения ЭТТ выявилось различие в изменении свойств полупроводниковых материалов, в результате чего поведение изделий значительно изменилось. Т.о. дополнительный анализ изменения свойств полупроводниковых материалов (*p-n* перехода), используемых для производства диодных сборок, после испытания при повышенной температуре среды с подачей на диодную сборку напряжения обратного смещения показал различие качества полупроводника в ЭРИ и выявил 2 группы. То есть в партии присутствовали элементы из разных по качеству полупроводников. И эта разница в качестве полупроводника сказалось на значениях электрических параметров и формированию 2-х групп по результатам тестовых испытаний до ЭТТ. Сравнительный анализ состава групп электорадиоизделий, полученных группировкой результатов до ЭТТ и исследование качества полупроводника после проведения ЭТТ показал совпадение 70%. Замеры электрических параметров являются косвенной характеристикой качества используемого полупроводника. Целесообразно разделить всю партию на 2 группы, выявленные в результате замеров до ЭТТ, форми-

ровать нагрузку при проведении испытаний, и дальнейшие результаты испытаний анализировать по группам. Существенным основанием для анализа партии на наличие групп является тот факт, что ЭРИ, собранные из разного по качественным свойствам материалов, показывают отличающиеся значения тестов, при этом схожие внутри каждой группы, что согласуется с гипотезой о компактности.

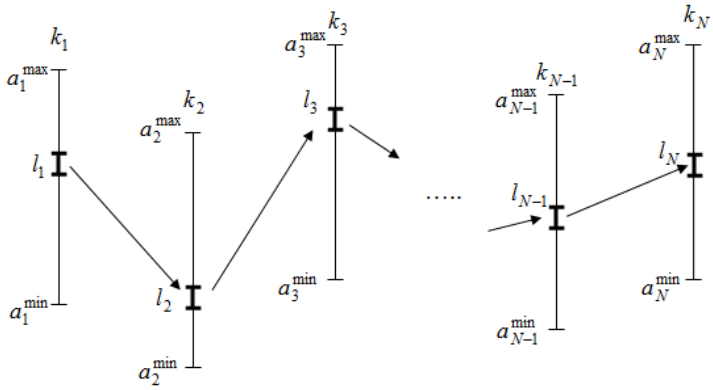
При анализе групп выделились элементы, сильно отличающиеся по своим значениям, типа выброс. Такие элементы выпадали из 2-х основных групп как непохожие ни на одну из них. Решением о надежности таких элементов является результат анализа дрейфа испытаний, если значения дрейфа всех его параметров близко к нулю и находится в пределах установленных норм, оснований считать такой элемент потенциально ненадежным нет. Причина его отличия может оказаться в технологии его производства (другая производственная партия, изменение топологии схемы, качество полупроводника, кристалла и др.). Поэтому отличие элемента от основной массы изделий из партии по замерам тестовых испытаний не указывает на его непригодность в использовании на космическом аппарате или другой неремонтопригодной аппаратуре.

Однако наличие таких деталей указывает на отсутствие стабильного качества производимых изделий, которая связана с нестабильностью технологического процесса и используемых материалов при производстве ЭРИ. Отсутствие стабильности качества продукции касается не только производства компонентной базы, но в данной отрасли оно ощущается наиболее сильно. Если для изделий военной и космической отрасли требования к стабильности производства и качеству повышенные, то для изделий гражданского назначения нормальным на сегодняшний день считается до 80% брака по отдельным компонентам. При этом подавляющая часть довольно крупных предприятий, производящих высокотехнологическую продукцию, вообще никак не осуществляют входной диагностический неразрушающий контроль и с уверенностью не знают, из чего собираются их изделия. В основном на предприятиях предусматривается тестирование только готовых изделий.

Поэтому важнейшей задачей становится развернутая программа исследований для построения системы управления технологическим процессом управления производством ЭКБ на основе математического моделирования и упреждающего прогноза конечного качества готовых изделий. Причем для построения таких моделей использование параметрических структур представляется малоэффективным в силу часто сменяющейся технологии производства, состояния оборудования, качества используемых материалов, изменений в конструкциях деталей. Любое самое незначительное изменение хотя бы одной из вышеперечисленных позиций приведет к рассогласованию параметрической модели и объекта, что сделает ошибочным значение управляющего воздействия и повлечет возврат на этап корректировки структуры модели. Это достаточно длительный период времени. Поэтому применение в таком исследовании непараметрического подхода наиболее обоснованно.

4 Оптимизация технологического процесса в рамках технологического регламента

Для всякого технологического процесса на производстве установлен технологический регламент, утвержденный для конкретного предприятия. Регламент определяет, в каком диапазоне значений должна находиться величина той или иной переменной процесса. Если значение этого параметра оказывается за пределами этого диапазона, то такое положение классифицируется как брак. В некоторых случаях даже соблюдение технологического регламента может привести к выпуску некачественной продукции и даже к браку, имеется в виду проверка качества готовых изделий. Именно этот факт приводит к выводу о том, что для наших производств характерен довольно широкий диапазон изменения значений технологических переменных [4]. Поэтому, часто при соблюдении технологического регламента в итоге получается брак.



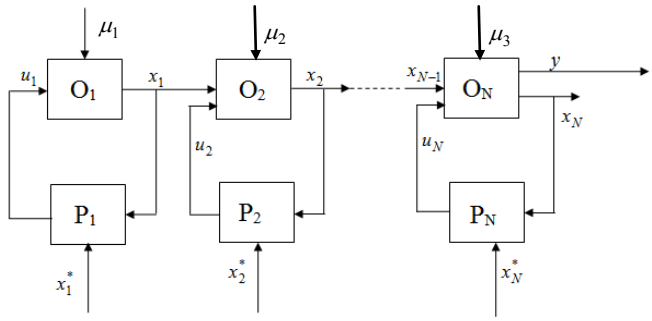
k_i, $i=1,...,N$– контролируемые параметры процесса; a_i^{min}, a_i^{max}, $i=1,...,N$– минимальная и максимальная границы диапазона допустимых значений параметров, определяемые технологическим регламентом; l_i, $i=1,...,N$ – истинная область значения параметра.

Рисунок 4 – Диапазоны значений параметров технологического регламента

Пусть параметр k_1 (например, температура) принял определенное значение из области $l_1 \in [\ a_1^{min}, a_1^{max}]$. Это значение может определяться качеством продукта, поступившего на обработку. Заметим, что область l_1 много меньше всего интервала $[\ a_1^{min}, a_1^{max}]$. При этом параметр k_2 (к примеру, давление), статистически зависимый от показателя k_1, также принимает определенное значение из области $l_2 \in [\ a_2^{min}, a_2^{max}]$. Подобный факт имеет место и для всех остальных показателей k_i, $i=1,...,N$. Исходя из этого, можно заключить, что для рационального ведения процесса необходимо для каждого показателя k_i определить область $l_i \in [\ a_i^{min}, a_i^{max}]$, исходя из значений k_{i-1}, где $i=2,...,N$. Область значения показателей k определяется рамками технологического регламента. Представляется целесообразным осуществление технологического процесса проводить в соответствии со следующим правилом: если на i-ом переделе получены значения переменных, принадлежащих интервалу l_i, то на $(i+1)$-ом интервале соответствующие технологические переменные принадлежат не всему интервалу $[\ a_i^{min}, a_i^{max}]$, а его подобласти $l_{i+1} \in [\ a_{i+1}^{min}, a_{i+1}^{max}]$.

Задачу оптимизации технологического процесса в рамках технологического регламента возможно решать двумя путями. Первый состоит разработке более жесткого технологического регламента. Практически реализовать такое решение возможно только на предприятиях с высоким уровнем культуры производства, а это в большей степени определяется квалификацией работающих и их отношением к делу.

Второй путь состоит в том, чтобы следовать имеющемуся технологическому регламенту, но оптимизировать режим ведения процесса с учетом фактически проведенной технологической операции на предыдущем этапе [4]. Такой путь позволяет существенно повысить качество выпускаемой продукции и уменьшить потери при производстве без капитальных затрат. Для этого необходима разработка и внедрение интеллектуальной адаптивной системы управления (ИАСУ) класса APC (Advanced Process Control) оптимизации технологических режимов «внутри» технологического регламента. На рисунке 5 представлен традиционный принцип управления технологическими этапами, как он имеет место сегодня на предприятиях.



O_i – объекты, P_i – регуляторы, x_i^* – задающее воздействия, x_i – выходные переменные этапа, u_i – управляющие воздействия на i-ом этапе, μ_i – неуправляемые воздействия на i-ом этапе, y – вектор характеристик качества конечного продукта.

Рисунок 5 – Схема управления последовательным технологическим процессом

Компоненты вектора y определяют стоимость полученного продукта. Недостатком подобной схемы является трудность определения задающих воздействий. На практике чаще всего они достаточно редко меняются, и это изменение полностью зависит от опыта оператора.

Заключение

Разработанные алгоритмы позволяют выделить группы изделий электронной техники с разными качественными свойствами. Для формирования более детальной методики анализа данных испытаний и совершенствования алгоритмов группировки требуется проведение объемных исследований на исторических выборках, когда уже известно качество распознавания, и объединение данных всех видов контроля. Возможно использование результатов анализа групп для дальнейшего прогнозирования поведения объектов в будущих испытаниях. Анализ результатов тестов указывает на значительный разброс диапазонов значений параметров, что свидетельствует о нестабильном качестве производства ЭРИ. На пути решения этой проблемы возникает задача разработки математических моделей производства компонентной базы на основе непараметрических алгоритмов идентификации и управления по данным различных видов контроля используемых материалов, состояния оборудования и технологического процесса, режимов производства и итогового качества готовых изделий.

Список литературы

[1] Данилин Н.С., Нуров Ю.Л. Диагностика и контроль качества изделий цифровой микроэлектроники. – М.: изд-во стандартов, 1990. - 176с.
[2] Загоруйко Н.Г. Методы распознавание и их применение. М.: изд.-во «Сов. Радио», , 1972. - 206с.
[3] Коплярова Н.В., Орлов В.И., Сергеева Н.А., Федосов В.В. О непараметрических в задаче диагностики электрорадиоизделий// Журнал «Заводская лаборатория. Диагностика материалов»– Москва: изд-во «Тест-ЗЛ» - С. 73-77.
[4] Медведев, А.В. Теория непараметрических систем. Процессы // Вестник Сибирского аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева №3 (29) − Красноярск, изд-во СибГАУ, 2010 - С. 4-9.

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ АДАПТИВНОГО КОРРЕКТОРА СИГНАЛОВ СИНУСНО-КОСИНУСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

М.А. Габидулин, П.А. Тупиков

Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики
119454, Москва, пр. Вернадского, 78, Россия
gabidulin_ma@mail.ru
тел: +7 (495) 434-73-74

Ключевые слова: *синтез, анализ, погрешности, адаптивный корректор сигналов, растровые синусно-косинусные преобразователи перемещений*

Abstract
Synthesis and provides basic calculation relations block-modular structures adaptive corrector of signals of raster resolvers for small and medium-IS integration, based on the specified accuracy and speed correction.

Введение

Создание эффективных методов и средств повышения точности цифровых преобразователей перемещений, используемых в качестве измерительных элементов различных автоматических систем, является в настоящее время и в перспективе одной из актуальных и технически сложных задач [1, 2].

В этом отношении наибольшие возможности имеют фотоэлектрические преобразователи, отличающиеся технологичностью и прецизионностью в изготовлении и универсальностью в применении. Однако их точность в значительной мере определяется погрешностями растровых синусно-косинусных преобразователей (СКП), используемых в качестве первичных преобразователей.

В целом, проблему повышения точности растровых СКП решают комплексным применением конструктивно-технологических, структурных и алгоритмических методов [1-3].

Конструктивно-технологические методы являются основными, но в силу ограниченных возможностей не решают проблему. Поэтому их задачей является обеспечение необходимых условий для эффективного применения структурных и алгоритмических методов, основанных на структурной и/или временно́й избыточности.

В структурных методах избыточность обусловлена организацией равномерно смещенных каналов весового суммирования для фильтрации пространственных гармоник погрешности. Однако дополнительные каналы усложняют устройство и привносят погрешности [4], а их взаимодействие с основными причинами существенно снижает эффект компенсации погрешности. Поэтому, как правило, число каналов не превышает 4-х и ограничивается оптимизацией на их основе считывающих систем с использованием секторных и бессекторных растровых сопряжений [5].

В алгоритмических методах информация о погрешности извлекается из функциональной зависимости синусно-косинусных сигналов на периоде пространственной фазы и экстраполяции полученных результатов на следующий ее период. Поэтому их применение не требует усложнения конструкции СКП, образцовых мер и обеспечивает адаптивную коррекцию погрешности в рабочих условиях. Однако для их реализации требуется разработка эффективных алгоритмов коррекции и соответствующих аппаратурных и/или программных средств [6].

Постановка задачи

В [6] изложен метод адаптивной коррекции неравенства амплитуд, неортогональности и постоянных составляющих сигналов растровых СКП, введением временно́й избыточности, суть которого состоит в извлечении информации о погрешности нахождением их экстремумов на периоде и экстраполяцией результатов на следующий период.

Сигналы СКП при наличии неравенства амплитуд, неортогональности и постоянных составляющих представлены в виде

(1) $U_s = U_{ms}\sin(\varphi + \Delta\varphi_s) + \Delta U_s,\ U_c = U_{mc}\sin(\varphi + \Delta\varphi_c) + \Delta U_c,$

где $U_{ms,c}$ – амплитуды сигналов, $\Delta\varphi_{s,c}$, $\Delta U_{s,c}$ – фазовые сдвиги, постоянные составляющие.

Согласно методу для коррекции неравенства амплитуд и постоянных составляющих необходимо вычислить полуразности и полусуммы $U_{\mathbf{max}s,c}$ и $U_{\mathbf{min}s,c}$. Затем из $U_{s,c}$ для устранения постоянных составляющих вычесть вычисленные полусуммы, а полученные разности для устранения неравенства амплитуд поделить на вычисленные полуразности.

Установлено, что для нахождения экстремумов предпочтителен способ с опросом сигналов $U_{s,c}$ в дискретные моменты времени $t_n = nT$, где T – шаг дискретизации, и сопоставлением полученных цифровых отсчетов с целью поиска экстремальных значений в пределах текущего периода пространственной фазы. При этом вычисления корректирующих воздействий для устранения постоянных составляющих и неравенства амплитуд проводятся в цифровой форме, а их коррекция и последующая коррекция неортогональности суммо-разностной обработкой в аналоговом или в цифровом виде. Это обеспечивает коррекцию при произвольных скоростях и не нарушает принцип унификации аппаратуры (с аналоговыми линиями связи между СКП и АЦП пространственной фазы).

Таким образом, без учета погрешностей аппаратурной реализации в процессе непрерывного слежения за величиной $U_{s,\mathrm{c}}$ в пределах периода определяются коды их экстремумов

(2) $N_{\max s,c} = \frac{1}{q}\left(U_{ms,c} + \Delta U_{s,c}\right),\ N_{\min s,c} = \frac{1}{q}\left(\Delta U_{s,c} - U_{ms,c}\right),$

где q – шаг квантования АЦП.

На основе (2) определяются значения кодов постоянных составляющих $N_{\mathrm{п}\,s,\,c}$ и амплитуд $N_{\mathrm{a}\,s,\,c}$, используемые для коррекции на следующем периоде сигналов СКП,

(3) $N_{\mathrm{п}s,c} = \frac{N_{\max s,c} + N_{\min s,c}}{2} = \frac{\Delta U_{s,c}}{q},\ N_{\mathrm{a}\,s,c} = \frac{N_{\max s,c} - N_{\min s,c}}{2} = \frac{U_{ms,c}}{q}.$

С помощью ЦАП, имеющих шаг квантования, равный шагу квантования АЦП, коды $N_{\mathrm{п}\,s,\,c}$ преобразуются в напряжения

(4) $U_{\mathrm{п}s,c} = qN_{\mathrm{п}s,c} = \Delta U_{s,c}.$

Эти напряжения вычитают из исходных сигналов $U_{s,\mathrm{c}}$, а полученные разности делят на величины, пропорциональные кодам соответствующих амплитуд $N_{\mathrm{a}\,s,\,c}$, формируя тем самым искомые скорректированные сигналы

(5) $\mathrm{U}_{\mathrm{к}s} = K_0' \frac{U_s - \mathrm{U}_{\mathrm{п}s}}{N_{\mathrm{a}\,s}} = K_0 \sin(\varphi + \Delta\varphi_s),\ \mathrm{U}_{\mathrm{к}c} = K_0' \frac{U_c - \mathrm{U}_{\mathrm{п}c}}{N_{\mathrm{a}\,c}} = K_0 \cos(\varphi + \Delta\varphi_c),$

где K_0' – коэффициент пропорциональности, определяемый параметрами усилителя с регулируемым коэффициентом усиления, осуществляющего операцию деления, $K_0 = K_0' q$.

Таким образом, при синусоидальной форме сигналов и идеальном выполнении операций (2)-(5) метод коррекции неравенства амплитуд и постоянных составляющих не обладает методической погрешностью и позволяет полностью компенсировать медленно изменяющиеся от периода к периоду вариации амплитуд и постоянных составляющих.

Далее сигналы $U_{к\,s,\,c}$ обрабатываются с целью коррекции их неортогональности сумморазностным способом согласно уравнениям

(6) $U'_{кs} = U_{кs} + U_{кc}$, $U'_{кc} = U_{кc} - U_{кs}$.

При этом в результате обработки (6) возникает неравенство амплитуд сигналов $U'_{кs,c}$:

$$U'_{кs,c} = 2K_0 \frac{\cos}{\sin}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Delta\varphi_c - \Delta\varphi_s}{2}\right)\frac{\sin}{\cos}\left(\varphi + \frac{\pi}{4} + \frac{\Delta\varphi_c + \Delta\varphi_s}{2}\right),$$

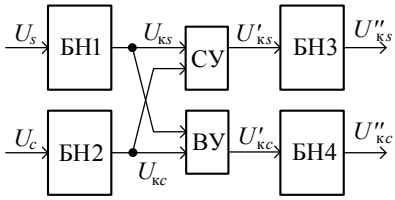
зависящее от величины исходной неортогональности сигналов СКП, которое устраняется повторным применением алгоритма (2)-(5). На основании разработанного алгоритма предложена обобщенная структурная схема устройства коррекции. Отмечается, что исходная структура может быть реализована в аналоговом, аналого-цифровом и цифровом вариантах и что возможности совмещения аппаратуры и функций ее блоков значительно увеличиваются с переходом от аналоговой к аналого-цифровой и цифровой структурам, реализуемых аппаратно и/или программно-аппаратно.

Однако эти возможности детально не изучены, что препятствует их практическому использованию.

Воспользовавшись подходами, изложенными в работе [6], поставим задачу синтеза блочно-модульной структуры адаптивного корректора на ИС малой и средней степени интеграции, основных расчетных соотношений по выбору параметров и их допустимых отклонений, исходя из заданной точности коррекции и быстродействия.

Синтез блочно-модульной структуры адаптивного корректора

Согласно алгоритму (2)-(6) необходимо разработать корректирующее устройство, позволяющее адаптивно компенсировать медленно изменяющиеся от периода к периоду вариации амплитуд, постоянных составляющих и неортогональности сигналов СКП и сформировать на выходе синусно-косинусные сигналы, имеющие одинаковые и неизменные амплитуды, не имеющие постоянных составляющих и сдвинутые друг относительно друга на четверть периода.



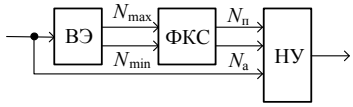
БН1-4 – блоки нормализации;
СУ, ВУ – суммирующее, вычитающее устройства.

Рисунок 1 – Структурная схема адаптивного корректора

С этой целью выберем аналого-цифровой вариант (рис.1) на основе жесткой логики без совмещения блоков, предполагающий поиск экстремумов опросом сигналов и вычисление корректирующих воздействий для устранения постоянных составляющих и неравенства амплитуд в цифровой форме, а их коррекцию и последующую коррекцию неортогональности сумморазностной обработкой в аналоговом виде. Это позволяет достичь высокой статической и динамической точности (при обоснованном выборе шага дискретизации по времени).

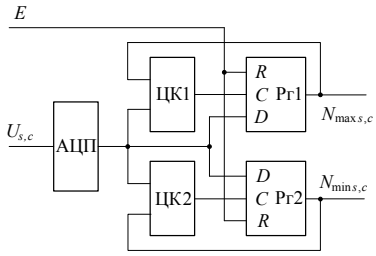
Блоки БН1,2 осуществляют коррекцию постоянной составляющей и неравколебаний амплитуд сигналов СКП $U_{s,c}$ по алгоритму (2)-(5). Откорректированные сигналы $U_{кs,c}$ поступают в устройства СУ и ВУ с целью коррекции неортогональности согласно (6), а вновь воз-

никшее при этом неравенство амплитуд сигналов $U'_{\text{к}s,c}$ корректируется блоками БН3,4 повторным применением алгоритма (2)-(5). На выходе устройства формируются полностью скорректированные сигналы $U''_{\text{к}s,c}$.



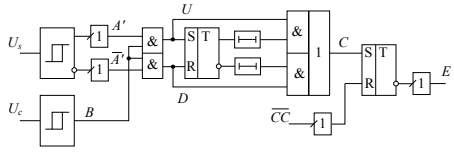
ВЭ – выделитель экстремумов;
ФКС – формирователь корректирующих сигналов; НУ – нормализующее устройство.

Рисунок 2 – Структурная схема БН



ЦК1,2 – цифровые компараторы;
Рг1,2 – регистры кодов локальных максимума и минимума на текущем периоде.

Рисунок 3 – Структурная схема ВЭ



Us, Uc – синусный, косинусный сигналы СКП; A, B – сигналы компараторов; $A', \overline{A'}$ – импульсы в моменты скачков $A, \overline{A}$ $0 \to 1$; U, D – импульсы приращений на $\pm$ период; C, $\overline{CC}$ – импульсы фиксации пройденного периода и окончания АЦ-преобразования.

Рисунок 4 – Функционально-логическая схема УУ

Блоки БН1,2 (рис.2) выполнены идентично и каждый из них состоит из выделителя экстремумов ВЭ согласно (2), формирователя корректирующих сигналов ФКС (кодов) $N_{\text{а}}$ и $N_{\text{п}}$, пропорциональных амплитуде и постоянной составляющей, согласно (3) и нормализующих устройств НУ, осуществляющих коррекцию входного сигнала блока согласно выражений (4)-(5).

Блоки БН3,4 устроены аналогично, но в них отсутствуют каналы коррекции постоянных составляющих.

Блок ВЭ (рис. 3) работает следующим образом. Импульсный сигнал E сбрасывает Рг1,2, подготавливая их к поиску экстремумов на следующем периоде. Этот сигнал формируется устройством управления УУ (рис.4), которое представляет собой формирователь импульсов единичных приращений, выдающий один импульс на период сигналов СКП с подавлением первого импульса после реверса, поскольку он соответствует лишь частично пройденному периоду. В процессе прохождения периода компараторы ЦК1,2 формируют импульсы, если коды АЦП оказываются больше или меньше кодов в Рг1,2, тем самым изменяя их содержимое.

Блок ФКС состоит из цифровых сумматора ЦС и вычитателя ЦВ.

В устройстве НУ (рис.5) блоки ЦАП, УЦАП и У выполняют коррекцию согласно (4)-(5). Обновление информации в Рг1,2 производится по окончании периода импульсом E непосредственно перед сбросом регистров в ВЭ.

Рассмотрим основные соотношения по выбору параметров блоков ВЭ, НУ в случае реализации корректора на основе 10-12-разрядных АЦП последовательных приближений (АЦП ПП) [7,8], построенных на ИС регистра последовательных приближений К155 ИР17, ЦАП серий К572, 594, 1108 и прецизионного компаратора КР597 СА3.

Для этого найдем функцию преобразования АЦП, исходя из уравнения для токов на инвертирующем входе компаратора

(7) $I_{\text{цап}} + I_{\text{см}} + I_{\text{вх}} = 0$,

где $I_{\text{цап}}$, $I_{\text{см}}$, $I_{\text{вх}}$ – суммируемые токи;

(8) $I_{\text{цап}} = \dfrac{U_{\text{оп}} N}{2^n R}$, $I_{\text{см}} = -\dfrac{U_{\text{см}}}{R_{\text{ос}} + R1}$, $I_{\text{вх}} = \dfrac{U_{\text{вх}}}{R2}$; $R1,2$ – резисторы цепи подачи напряжения смещения $U_{\text{см}}$ и входного напряжения $U_{\text{вх}}$;

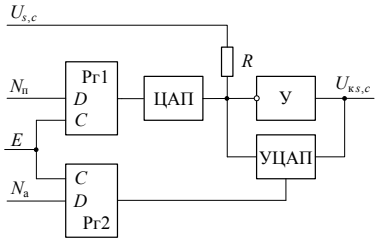
$R_{\text{ос}} = R$, $U_{\text{оп}}$, R – сопротивление обратной связи, опорное напряжение и характеристическое сопротивление матрицы *R-2R* ЦАП; n – количество разрядов ЦАП.

Полагая $U_{\text{оп}} = U_{\text{см}} = U_{\text{п}}$ и разрешая (7) относительно N с учетом (8), имеем

(9) $N = 2^n R\left(\dfrac{1}{R + R1} - \dfrac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{п}} R2}\right)$.

Для АЦ-преобразования двуполярного напряжения $U_{\text{вх}}$ следует обеспечить:

(10) $N = \begin{cases} 2^n, \text{ если } U_{\text{вх}} = -U_{\text{п}}, \\ 0, \text{ если } U_{\text{вх}} = +U_{\text{п}}. \end{cases}$



Рг1,2 – регистры текущих значений кодов $N_{\text{п}}$, $N_{\text{а}}$; ЦАП, УЦАП–ЦАП и умножающий ЦАП с токовыми выходами; У – инвертирующий усилитель.

Рисунок 5 – Структурная схема НУ

Отсюда находим $R1 = R$, $R2 = 2R$.

Аналогично производим выбор резисторов $R1,2$ блока НУ, в котором непосредственно производится коррекция амплитуды и постоянной составляющей. Для этого запишем уравнение для токов на инвертирующем входе ОУ:

(11) $I_{\text{п}} + I_{\text{ос}} + I_{\text{вх}} = 0$,

где $I_{\text{цап}}$, $I_{\text{см}}$, $I_{\text{вх}}$ – суммируемые токи;

(12) $I_{\text{п}} = \dfrac{U_{\text{п}} N_{\text{п}}}{2^n R} - \dfrac{U_{\text{п}}}{R + R1}$ – выходной ток ЦАП коррекции постоянной составляющей;

(13) $I_{\text{ос}} = -\dfrac{U_{\text{вых}} N_{\text{а}}}{2^n R}$ – выходной ток ЦАП коррекции амплитуды;

(14) $I_{\text{вх}} = \dfrac{U_{\text{вх}}}{R2}$ – ток от источника напряжения $U_{\text{вх}} = U_{s,c}$; $N_{\text{п}}$, $N_{\text{а}}$ – коды коррекции постоянной составляющей и амплитуды.

Подставляя (12)-(14) в (11), получим уравнение $U_{\text{п}}\left(\dfrac{N_{\text{п}}}{2^n R} - \dfrac{1}{R + R1}\right) + \dfrac{U_{\text{вх}}}{R2} + U_{\text{вых}} \dfrac{N_{\text{а}}}{2^n R} = 0$,

разрешив которое находим выходное напряжение блока НУ:

(15) $U_{\text{вых}} = -\dfrac{2^n R}{N_{\text{а}}}\left(\dfrac{U_{\text{вх}}}{R2} + U_{\text{п}}\left(\dfrac{N_{\text{п}}}{2^n R} - \dfrac{1}{R + R1}\right)\right)$.

Для обеспечения балансировки схемы УЦАП при отсутствии постоянной составляющей во входном сигнале (т.е. $N_{\text{п}} = 2^{n-1}$) и $U_{\text{вх}} = 0$ должно выполняться равенство $U_{\text{вых}} = 0$. Отсюда из (15) находим, что $R1 = R$.

Значение $R2$ выбираем из условия компенсации постоянной составляющей. Полагая, что входной сигнал содержит только постоянную составляющую $U_{\text{вх}} = U_{\text{п}}$ (т.е. $N_{\text{п}} = 0$), из (15) с учетом $R1 = R$, находим $R2 = 2R$.

Для обеспечения точности необходимо подбирать $R1,2$ блоков ВЭ и НУ с точностью не хуже 0,1%.

Выбор ИС ЦАП определяется требуемой точностью и быстродействием коррекции [6].

Так, шаг дискретизации отсчетов T, обуславливающий динамическую погрешность ВН $\delta U_{\mathbf{min}s,c} = -\delta U_{\mathbf{max}s,c} = \dfrac{(\omega T)^2}{8}$, где ω – круговая частота сигналов $U_{s,c}$, оценивается выражением $T = t_{\text{ац}} + t_{\text{в}}$, где $t_{\text{ац}}$ – время преобразования в АЦП; $t_{\text{в}} = t_{\text{к}} + t_{\text{р}}$ – время, затрачиваемое на обработку в выделителе ВЭ; $t_{\text{к}}$ – время задержки цифрового компаратора, $t_{\text{р}}$ – время записи в регистр.

Время преобразования АЦП составляет 1-100 мкс. Величина $t_{\text{в}}$ лежит в пределах от 0,1 мкс (для ТТЛ микросхем) до 2,5 мкс (для КМОП микросхем) в случае 12-разрядного устройства.

Следовательно, для АЦ-структур алаптивного корректора с АЦП ПП достижимы минимальные значения шага дискретизации $T_{\min} \approx 1-3\,\text{мкс}$.

Анализ погрешностей адаптивного корректора

Рассмотрим погрешности, вносимые АЦП блока ВЭ и которые являются основными источниками остаточной погрешности компенсации постоянной составляющей, неравенства амплитуд и неортогональности фаз пространственных сигналов, представив (9), полагая $R1 = R$, $R2 = 2R$, в виде

(16) $N = \dfrac{U_{\text{п}} - U_{\text{вх}} + \Delta U_{\text{ацп}}}{q}$, где $U_{\text{вх}}, U_{\text{п}}$ – входное и опорное напряжения;

$\Delta U_{\text{ацп}} = \Delta U_{\text{и}} + \Delta U_{\text{кв}}$ – погрешность АЦП; $\Delta U_{\text{и}}, \Delta U_{\text{кв}}$ – инструментальная и квантования погрешности; $q = \dfrac{2U_{\text{п}}}{2^n}$, $\Delta U_{\text{кв}} \le \pm\dfrac{q}{2}$. С учетом (16) выражения для кодов максимумов и минимумов (2) будут иметь вид

(17) $N_{\max s,c} = \dfrac{1}{q}\left(U_{\text{п}} - \Delta U_{s,c} + U_{ms,c} + \Delta U_{\max s,c}\right)$, $N_{\min s,c} = \dfrac{1}{q}\left(U_{\text{п}} - \Delta U_{s,c} - U_{ms,c} + \Delta U_{\min s,c}\right)$,

где $\Delta U_{\mathbf{max}s,c}$, $\Delta U_{\mathbf{min}s,c}$ – погрешности АЦ-преобразования значений максимумов и минимумов синусного и косинусного сигналов.

Отсюда, подставляя (17) в (3), находим, что коды постоянных составляющих $N_{\text{п}s,c}$ и удвоенной амплитуды $N_{\text{а}s,c}$ определяются следующим образом:

(18) $N_{\text{п}s,c} = \dfrac{U_{\text{п}} - \Delta U_{s,c}}{q} + \dfrac{\Delta U_{\max s,c} + \Delta U_{\min s,c}}{2q}$, $N_{\text{а}s,c} = \dfrac{2U_{ms,c}}{q} + \dfrac{\Delta U_{\max s,c} - \Delta U_{\min s,c}}{q}$.

Согласно выражению (5) с учетом (15) сигналы на выходах ЦАП коррекции амплитуды и постоянной составляющей описываются выражениями:

(19) $U'_{s,c\text{к}} = -\dfrac{2^{n-1}}{N_{\text{а}s,c}}\left(U_{s,c} + U_{\text{п}}\left(\dfrac{N_{\text{п}s,c}}{2^{n\text{-}1}} - 1\right)\right)$.

Подставив в (19) выражения (1), (18) и учитывая, что $q=\frac{2U_{\text{п}}}{2^n}$, и пренебрегая членами высших порядков малости, имеем

(20) $U'_{s,c\text{к}} \approx -\frac{U_{\text{п}}}{2}\left(\left(1-\frac{\delta U_{\max s,c}-\delta U_{\min s,c}}{2}\right)\begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix}\left(\varphi+\Delta\varphi_{s,c}\right)+\frac{\delta U_{\max s,c}+\delta U_{\min s,c}}{2}\right)$,

где $\delta U_{\mathbf{max}s,c}=\frac{\Delta U_{\mathbf{max}s,c}}{U_{ms,c}}$, $\delta U_{\mathbf{min}s,c}=\frac{\Delta U_{\mathbf{min}s,c}}{U_{ms,c}}$.

Представив выражение выходных сигналов блока коррекции неортогональности (6) в виде $U''_{\text{к}s,c}=k_{\text{п}}\left(U'_{\text{к}c,s}\pm U'_{\text{к}s,c}\right)$, где $k_{\text{п}}$ – коэффициент передачи СУ и ВУ, и принимая во внимание (19)-(20), получим

(21) $U''_{s,c\text{к}} \approx -k_{\text{п}}\frac{U_{\text{п}}}{2}\left(\sqrt{2}\left(1-\frac{\delta_{\text{а}s}+\delta_{\text{а}c}}{2}\pm\frac{\Delta_s-\Delta_c}{2}\right)\begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix}\left(\varphi+\frac{\pi}{4}\pm\frac{\delta_{\text{а}s}-\delta_{\text{а}c}}{2}+\frac{\Delta_s+\Delta_c}{2}\right)\pm\delta_{\text{п}s}+\delta_{\text{п}c}\right)$,

где $\delta_{\text{а}s,\text{с}}=\frac{\delta U_{\mathbf{max}s,c}-\delta U_{\mathbf{min}s,c}}{2}$, $\delta_{\text{п}s,\text{с}}=\frac{\delta U_{\mathbf{max}s,c}+\delta U_{\mathbf{min}s,c}}{2}$, $\Delta_{s,c}=\Delta\varphi_{s,c}$.

Для нормализации амплитуд сигналов (21) найдем коды их максимумов без учета погрешности АЦ-преобразования. Согласно выражению (9) выходной код АЦП может быть представлен в виде $N=\frac{2U_{\text{вх}}}{q}$. Здесь учтено, что $R1=\infty$ и $R2=R$. Тогда с учетом (21) коды максимумов $N_{\text{а}s,c\text{к}}$ будут выражены следующим образом:

(22) $N_{\text{а}s,c\text{к}}=k_{\text{п}}\frac{U_{\text{п}}}{q}\left(\sqrt{2}\left(1-\frac{\delta_{\text{а}s}+\delta_{\text{а}c}}{2}\pm\frac{\Delta_s-\Delta_c}{2}\right)\pm\delta_{\text{п}s}+\delta_{\text{п}c}\right)$.

Исходные выходные сигналы блока коррекции $U_{s,c\text{к}}$ формируются на выходах ЦАП коррекции амплитуды. Выходной сигнал данного ЦАП с учетом (15) можно представить в виде $U_{\text{вых}}=-\frac{2^{n-1}U_{\text{вх}}}{N_{\text{а}}}$. Подставляя в данное выражение вместо $U_{\text{вх}}$ и $N_{\text{а}}$ значения $U''_{s,c\text{к}}$ и $N_{\text{а}s,c\text{к}}$ в соответствии с (21)-(22) и полагая $k_{\text{п}}=1$, получим:

(23) $U_{s,c\text{к}} \approx \frac{U_{\text{п}}}{2}\left(\left(1-\frac{\delta_{\text{п}c}\pm\delta_{\text{п}s}}{\sqrt{2}}\right)\begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix}\left(\varphi''\pm\frac{\delta_{\text{а}s}-\delta_{\text{а}c}}{2}\right)+\frac{\delta_{\text{п}c}\pm\delta_{\text{п}s}}{\sqrt{2}}\right)$, где $\varphi''=\varphi+\frac{\pi}{4}+\frac{\Delta_s+\Delta_c}{2}$.

Для нахождения фазовой погрешности Δ сигналов $U_{s,c\text{к}}$ представим их в виде:

(24) $U_{s,c\text{к}}=U\begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix}\left(\varphi''+\Delta\right)$, где U – произвольная амплитуда.

Домножив выражения (24) соответственно на $\cos\varphi''$ и $-\sin\varphi''$, и сложив результаты, получим $U_{s\text{к}}\cos\varphi''-U_{c\text{к}}\sin\varphi''=U\sin\Delta$.

Отсюда, полагая $U\approx\frac{U_{\text{п}}}{2}$, находим

(25) $\Delta \approx \frac{\delta_{\text{п}s}+\delta_{\text{п}c}}{\sqrt{2}}\cos\varphi''-\frac{\delta_{\text{п}c}-\delta_{\text{п}s}}{\sqrt{2}}\sin\varphi''-\frac{\delta_{\text{п}s}}{\sqrt{2}}\sin 2\varphi''+\frac{\delta_{\text{а}s}-\delta_{\text{а}c}}{2}\cos 2\varphi''$.

Произведем анализ полученного выражения (25). Величины отклонений $\delta U_{\mathbf{max}s,c}$, $\delta U_{\mathbf{min}s,c}$ могут принимать независимо друг от друга любые значения в пределах $\pm\delta U_{\mathbf{max}s,c}$.

Необходимо оценить максимальную величину фазовой погрешности Δ при наихудшем сочетании указанных отклонений и фазы φ''.

Для этого преобразуем (25) к виду $\Delta = \frac{1}{2\sqrt{2}}\left(\delta U_{\mathbf{max}s} f_1 + \delta U_{\mathbf{min}s} f_2 + \delta U_{\mathbf{max}c} f_3 + \delta U_{\mathbf{min}c} f_4\right)$,

где $f_1 = \mathbf{sin}\,\varphi'' + \mathbf{cos}\,\varphi'' - \mathbf{sin}\,2\varphi'' + \frac{\sqrt{2}}{2}\mathbf{cos}\,2\varphi''$, $f_2 = \mathbf{sin}\,\varphi'' + \mathbf{cos}\,\varphi'' - \mathbf{sin}\,2\varphi'' - \frac{\sqrt{2}}{2}\mathbf{cos}\,2\varphi''$,

$f_3 = -\mathbf{sin}\,\varphi'' + \mathbf{cos}\,\varphi'' - \frac{\sqrt{2}}{2}\mathbf{cos}\,2\varphi''$, $f_4 = -\mathbf{sin}\,\varphi'' + \mathbf{cos}\,\varphi'' + \frac{\sqrt{2}}{2}\mathbf{cos}\,2\varphi''$.

Покажем, что величина Δ достигает абсолютного экстремума только при крайних максимальных/минимальных значениях $\delta U_{\mathbf{max}s,c}$, $\delta U_{\mathbf{min}s,c}$.

В самом деле, пусть Δ достигла экстремума (например, максимума в функции φ''). В этом случае она может быть максимизирована путем увеличения тех отклонений, знак функции f при которых положителен, и уменьшения тех отклонений, знак функции при которых отрицателен. Увеличение и уменьшение производится до ограничений $\pm\delta U_{\mathbf{max}}$.

Следовательно, поиск максимальной по модулю величины Δ сводится к поиску абсолютного экстремума выражения

$$\Delta = \frac{\delta U_{\mathbf{max}}}{2\sqrt{2}}\left(\pm f_1 \pm f_2 \pm f_3 \pm f_4\right).$$

Произведенный поиск для всех сочетаний знаков функций f дал следующее значение максимума $\Delta_{\mathbf{max}}$:

$$\Delta_{\mathbf{max}} = \frac{3\sqrt{3}\delta U_{\mathbf{max}}}{2\sqrt{2}} \approx 1.83\delta U_{\mathbf{max}}.$$

В результате исследований получены основные расчетные соотношения по выбору параметров блочно-модульной структуры адаптивного корректора на ИС малой и средней степени интеграции, исходя из заданной точности коррекции и быстродействия, которые могут быть служить основой для последующей разработки на базе программируемых аналоговых и логических интегральных схем.

Это позволит значительно снизить энергопотребление, массу и габариты и стоимость и улучшит эксплуатационные характеристики.

Список литературы

[1] Высокоточные преобразователи угловых перемещений/ Э.Н. Асиновский, А.А.Ахметжанов, М.А. Габидулин и др.; Под общ. ред. А.А.Ахметжанова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128с.

[2] Домрачев В.Г. и др. Схемотехника цифровых преобразователей перемещений: Справоч. пособ./ В.Г. Домрачев, В.Р. Матвеевский, Ю.С. Смирнов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 392с.

[3] Габидулин М.А. Потенциальная точность фотоэлектрических цифровых преобразователей перемещений на основе растровых синусно-косинусными интерполяторами с учетом технологических ограничений// Искусственный интеллект. – Донецк, Украина: Изд-во “Наука і освіта”. 2010. №3. Раздел 6. Интеллектуальные робототехнические системы. – С. 570-582.

[4] Косинский А.В. и др. Аналого-цифровые преобразователи перемещений/ А.В. Косинский, В.Р. Матвеевский, А.А. Холомонов. – М.: Машиностроение, 1991. – 224с.

[5] Габидулин М.А. Анализ и синтез считывающих систем растровых синусно-косинусных преобразователей перемещений// Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 6. – С. 39-50.

[6] . Габидулин М.А. Экстремальный метод повышения точности фотоэлектрических цифровых преобразователей перемещений// Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 6. – С. 13-22.

[7] Федорков Б.Г., Телец В.А. Микросхемы ЦАП и АЦП: Функционирование, параметры, применение. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320с.

[8] Коломбет Е.А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов. – М.: Радио и связь, 1991. – 376с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

А.М. Грузликов, Н.В. Колесов, М.В. Толмачева
ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
kolesovnv@mail.ru
тел: (812) 233-37-64

***Ключевые слова**: дискретно-событийная модель, распределенная вычислительная система, тестовое диагностирование*

Abstract
The synthesis of discrete-event model of a distributed computing system is considered. The model reflects the events of the information exchange between software modules of the system. It is designed to form a test sequences that detect faults in these information exchanges.

Введение

Настоящий доклад посвящен вопросам разработки средств диагностирования (СД) для распределенных вычислительных систем (РВС), состоящих из совокупности функционально связанных локальных систем. В РВС исполняется набор программных модулей (ПМ), произвольно размещенных по локальным системам и обменивающихся данными по их готовности, т.е. асинхронно. Для таких систем разработка СД является достаточно сложной проблемой из-за высокой размерности задачи, параллельного характера вычислений и множественности причин возникновения нарушений [1]. Целью настоящей работы является рассмотрение вопросов синтеза диагностической модели РВС, которую можно отнести к классу дискретно-событийных [2–4], когда работа системы представляется на языке последовательностей некоторых событий. В данном случае такими событиями являются события информационного обмена (приема и выдачи информации) между ПМ системы.

Ниже исследуются вопросы синтеза диагностической модели РВС, ориентированной на решение проблемы тестового диагностирования. При этом в каждый программный модуль анализируемого системы вводится избыточность, что позволяет применять подход не только на этапе отладки, но и на этапе функционирования системы по прямому назначению. Вводимая избыточность по существу представляет собой событийную модель, вычисляемую параллельно с основной программой.

1 Постановка задачи

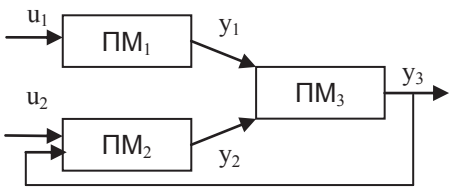


Рисунок 1 - Информационный граф системы

Сначала для пояснения сути рассматриваемого подхода обратимся к примеру информационного графа некоторой гипотетической системы S (рис. 1).

В системе реализуются три функционально связанных программных модулей (ПМ): $ПМ_1$, $ПМ_2$, $ПМ_3$, которые могут быть размещены как на разных процессорах системы, так и на одном. Каждый из ПМ на основе входных данных (u_1 – для $ПМ_1$, u_2 и y_3 – для $ПМ_2$, y_1 и y_2 – для $ПМ_3$) формирует выходные (y_1, y_2 и y_3 соответственно).

СД формируют для системы тестовые данные, дополняя ими входные данные для $ПМ_1$ и $ПМ_2$, и анализирует выходную реакцию S ($ПМ_3$). В каждом из ПМ – $ПМ_1$, $ПМ_2$ и $ПМ_3$ – реальные информационные слова обрабатываются штатными алгоритмами. Параллельно с этим тестовые информационные слова обрабатываются специальными алгоритмами f_{d1}, f_{d2} и f_{d3}, реагирующими на события приема/выдачи информации, а результаты их обработки выдаются в составе выходных данных. Поскольку механизм обмена реальными и тестовыми данными в системе является общим, возникает возможность по наблюдаемым в процессе работы тестовым результатам делать вывод о наличии или отсутствии в обменах рассматриваемых нарушений – изменений множеств участвующих в конкретных обменах ПМ.

Таким образом, проблема состоит в соответствующем подборе тестовых данных и алгоритмов их обработки в ПМ. Далее рассматривается лишь вторая задача в предположении, что алгоритмы построения тестов известны, например, по работе [1]. В определенном смысле алгоритм обработки тестовых данных является событийной моделью алгоритма обработки реальных данных, а значит, и моделью системы.

Напомним алгоритм синтеза модели системы, приведенный в [5]. Алгоритм поставляет динамическую периодически нестационарную модель. Он состоит из двух этапов и справедлив для любого графа межмодульных информационных связей. Динамический характер модели позволяет воспользоваться известными алгоритмами построения тестов [1]. Результирующая модель представляет собой совокупность независимых цепей, составленных из динамических звеньев. При ее формировании на первом этапе создается структура модели. Для этого по информационному графу диагностируемой системы отыскивается множество вычислительных путей, составляющих покрытие его ребер. Затем с каждым из этих путей в модели системы сопоставляется цепь из такого числа динамических звеньев М, через сколько ПМ проходит данный путь.

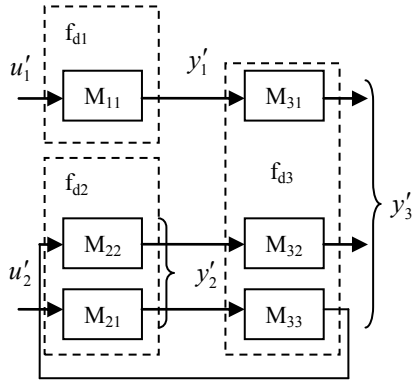


Рисунок 2 - Структура модели для системы S

После описанных построений модель системы представляется совокупностью независимых цепей, а задача диагностирования может быть сведена к диагностированию отдельных цепей. Такой подход рассматривается в первой части настоящей статьи. Модель для рассматриваемого примера, состоящая из независимых цепей, приведена на рис. 2.

На втором этапе формирования модели определяется вид динамических звеньев $M_{i,j}$ $i=\overline{1,n},\ j=\overline{1,m_i}$ (m_i – число звеньев в модели $ПМ_i$). При этом основополагающим является тот факт, что искомая динамическая модель системы далее используется для построения тестов. Известно [1], что процедура построения тестов упрощается, если модель системы, во-первых, линейна, а во-вторых, управляема и наблюдаема. Отсюда можно сформулировать требование к звеньям цепей модели. Они должны быть линейны, т.е.

$$(1)\quad x_{i,j}(t+1)=f_{i,j}x_{i,j}(t)+g_{i,j}u_{i,j}(t),\quad y_{i,j}(t)=h_{i,j}x_{i,j}(t)\quad i=\overline{1,n},\ j=\overline{1,m_i},$$

$x_{i,j}(t), u_{i,j}(t), y_{i,j}(t)$ – векторы состояния, входа и выхода соответственно для *i*-го звена в модели *j*-го ПМ. Кроме того, звенья должны быть таковы, чтобы модель системы была бы управляема и наблюдаема. С учетом того, что модель системы, представляется набором цепей

независимых цепей, выбор звеньев должен гарантировать наблюдаемость и управляемость только для отдельно взятой цепи.

Динамическое описание цепи получается по следующим правилам. Используется вектор состояния $x(t)$, составленный из векторов состояния звеньев $x_i(t)\quad i=\overline{1,L}$, входящих в эту цепь, а с помощью матриц $F(j),G(j),H(j)$ описывается перенос информации между ПМ и СД в каждом *j*-м информационном обмене. Тогда

(2) $x(t+1)=F(j)x(t)+G(j)u(t),\quad y(t)=H(j)x(t)\quad j=\overline{1,L+1}$,

Эти уравнения описывают *L*-1 межзвенных обменов и два обмена с СД (прием и выдача информации). Матрицы в этих уравнениях зависят от номера такта (номера обмена), т.е. модель нестационарна. Более того, она периодически нестационарна, т.к. из-за периодичности входного потока процессы обработки данных в системе периодические.

Типовые структуры матриц сеансов имеют следующий вид. Для сеанса передачи информации из звена ПМ_i в звено ПМ_j :

$$(3)\quad x\ (t+1)=\begin{bmatrix} x_1(t+1)\\ x_2(t+1)\\ \dots\\ x_i(t+1)\\ \dots\\ x_j(t+1)\\ \dots\\ x_L(t+1)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} E & & & & & & & \\ & E & & & & & & \\ & & \dots & & & & & \\ & & & E & & & & \\ & & & & \dots & & & \\ & & & g_jh_i & & f_j & & \\ & & & & & & \dots & \\ & & & & & & & E\end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1(t)\\ x_2(t)\\ \dots\\ x_i(t)\\ \dots\\ x_j(t)\\ \dots\\ x_L(t)\end{bmatrix}.$$

В приведенном уравнении нулевые элементы матрицы динамики опущены.

При приеме информации от СД срабатывает модель только одного принимающего ПМ_j ($H(j)=0$). В результате уравнение имеет следующий вид:

$$(4)\quad x\ (t+1)=\begin{bmatrix} x_1(t+1)\\ \dots\\ x_j(t+1)\\ \dots\\ x_L(t+1)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} E & & & \\ & \dots & & \\ & & f_j & \\ & & & \dots\\ & & & E\end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1(t)\\ \dots\\ x_j(t)\\ \dots\\ x_L(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 0\\ \dots\\ g_j\\ \dots\\ 0\end{bmatrix}u(t)\ ,$$

где u – тестовая информация от СД.

При выдаче информации в СД с выходного ПМ_s ($G(j)=0$) не срабатывает модель ни одного ПМ. В результате уравнение имеет следующий вид:

$$(5)\quad x\ (t+1)=\begin{bmatrix} x_1(t+1)\\ \dots\\ x_s(t+1)\\ \dots\\ x_L(t+1)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} E & & & \\ & \dots & & \\ & & E & \\ & & & \dots\\ & & & E\end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1(t)\\ \dots\\ x_s(t)\\ \dots\\ x_L(t)\end{bmatrix},\ y(t)=\begin{bmatrix}0 & \dots & h_s & \dots & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1(t)\\ \dots\\ x_s(t)\\ \dots\\ x_L(t)\end{bmatrix}.$$

2 Условия наблюдаемости и управляемости модели со слиянием цепей

Применение описанной выше модели распределенной системы может в некоторых случаях потребовать передачи через канал обмена большого количества информации, что не всегда допустимо. В таких ситуациях целесообразно воспользоваться приемом, заключающимся в обработки нескольких массивов одним звеном (слияние вычислительных путей). Такой вариант отражен на рис. 3. Здесь массивы m_1 и m_2 обрабатываются звеном M_{31}, звено M_{32} исключается.

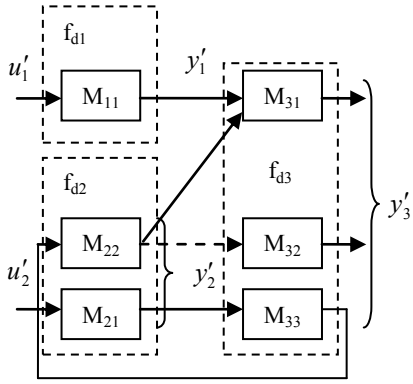


Рисунок 3 - Модель со слиянием вычислительных путей

Рассмотрим условия наблюдаемости и управляемости для модели со слиянием цепей. Предварительно напомним о допущениях, принятых при использовании периодически нестационарной динамической модели. Главное допущение заключается в том, что допускается различие во временном позиционировании внутренних и, как следствие, выходных событий обработки информации в данной модели и в реальной системе, что не является препятствием для проведения диагностирования. В результате при формировании модели цепи оно позволяет считать, что разные порции информации обрабатываются не параллельно, а строго последовательно. В модели со слиянием цепей мы считаем, что последовательно обрабатываются не только разные порции информации, но и одна и та же порция информации в разных цепях, подвергшихся слиянию.

Будем считать, что все звенья реализованы в строчной наблюдаемой форме:

$$(6)\quad f=\begin{bmatrix} \alpha_{m-1} & \alpha_{m-2} & \dots & \alpha_1 & \alpha_0 \\ 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & \dots & & \\ & & & 1 & 0 \end{bmatrix},\quad g=\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\quad h=\begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где f – $(m\times m)$-матрица, g – $(m\times 1)$-матрица, h - $(1\times m)$-матрица, $\alpha_i \quad i=\overline{0,m-1}$ - коэффициенты характеристического многочлена матрицы f. Причем $\alpha_0\neq 0$, т.к. в дальнейшем предполагается, что f – неособенная. Если $\alpha_0=0$ последний столбец является нулевым, а, значит, матрица особенная. Заметим, что $\alpha_0=1$ и определитель $|f| = 1$, т.к. рассматривается двоичное поле.

Осуществим переход к стационарной модели, рассматривая систему на последовательности $\gamma_{\text{г}}$, период которой заканчивается сеансом приема информации от СД .

Утверждение 1. Для любой периодически нестационарной системы S^{m}, которая:

1. состоит из p скалярных цепей, сходящихся в одном скалярном звене (h_0, f_0, g_0) размерности m_0, при этом l-я цепь содержит L_l звеньев $\{(h_{l,i}, f_{l,i}, g_{l,i}) \quad i=\overline{1,L_l}\},\quad l=\overline{1,p}$
2. описывается моделью

(7) $x(t+1) = F(j)x(t) + G(j)u(t), y(t) = H(j)x(t), j = \overline{1, L_\Sigma + 1}, L_\Sigma = 1 + \sum_{l=1}^{p} L_l$,

3. имеет на периоде функционирования один сеанс приема информации от СД, описываемый для некоторой последовательности $\gamma_г$ матрицами $F(\gamma_r(L_\Sigma + 1))$, $G(\gamma_r(L_\Sigma + 1)), H(\gamma_r(L_\Sigma + 1))$, и один сеанс выдачи информации в СД, описываемый матрицами $F(\gamma_r(L_\Sigma)), G(\gamma_r(L_\Sigma)), H(\gamma_r(L_\Sigma))$, существует стационарная система $\hat{S}^m$

(8) $x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad y(k) = Cx(k),$

которая при любой входной последовательности формирует выходные последовательности, совпадающие с последовательностями цепи на $\gamma_г$. При этом k – периоды системы (7),

$$A = F_{П}(\gamma_r) = \prod_{i=1}^{L_\Sigma + 1} F(\gamma_r(L_\Sigma - i + 2)), \quad B = G(\gamma_r(L_\Sigma + 1)),$$

$$C = H(\gamma_r(L_\Sigma))F^{-1}(\gamma_r(L_\Sigma))F^{-1}(\gamma_r(L_\Sigma + 1))A = H(\gamma_r(L_\Sigma))A.$$

В справедливости данного утверждения можно убедиться, записав выражение, связывающее состояние модели в начале периода последовательности $\gamma_г$ с состоянием в конце периода и выходом модели.

Утверждение 2. Если звенья цепи описываются моделью (1), в которой матрицы имеют вид (3), и при этом матрицы сеансов имеют вид (3) – (5), то матрица A системы (8) неособенная и имеет вид:

(9) $$A = \begin{bmatrix} A_{\gamma_{г,1}} & & & & \\ & A_{\gamma_{r,2}} & & & \\ & & \cdots & & \\ & & & A_{\gamma_{r,p}} & \\ R_{1,0} & R_{2,0} & \cdots & R_{p,0} & f_0^p \end{bmatrix},$$

где матрица $A_{\gamma_{r,l}}$ соответствует l-й цепи.

В справедливости данного утверждения можно убедиться, непосредственно перемножая матрицы сеансов. Поскольку все матрицы $A_{\gamma_{г,i}}$, $j = \overline{1, l}$, а также матрица f_0^p неособенные, то неособенная и матрица A. Степень p вхождения матрицы f_0 в выражение (9) объясняется тем, что звено слияния срабатывает p раз за период (p раз принимает информацию).

Утверждение 3. Стационарная система $\hat{S}^m$ (8) есть слияние p стационарных цепей в одном звене $(\bar{h}_0, \bar{f}_0, \bar{g}_0)$ размерности m_0 с матрицами $\bar{f}_0 = f_0^p$, $\bar{g}_0 = [f_0^{p-1} g_0 \quad f_0^{p-2} g_0 \quad \cdots \quad g_0]$, $\bar{h}_0 = [f_0^p]_m$ - последняя m-я строка матрицы f_0^p. При этом l-я цепь содержит L_l звеньев $(\bar{f}_i, \bar{g}_i, \bar{h}_i)$, где $\bar{f}_i = f_i$, $\bar{g}_i = g_i = [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0]^T, i = \overline{1, L_l}$, $\bar{h}_1 = [0 \quad \cdots \quad 0 \quad 1]$, $\bar{h}_i = h_i f_i = [0 \quad 0 \quad \cdots \quad 1 \quad 0]$, $i = \overline{2, L_l}$.

Структура со слиянием цепей системы $\hat{S}^m$ следует из структуры матрицы (9).

Утверждение 4. Стационарная система $\hat{S}^m$ наблюдаема и управляема, если

1. все ее цепи и звено $(\bar{h}_0, \bar{f}_0, \bar{g}_0)$, $\bar{f}_0 = f_0^p$, $\bar{h}_0 = [f_0^p]_{\mathrm{m}}$ - m-я строка матрицы f_0^p, $\bar{g}_0 = [f_0^p g_0 \quad f_0^{p-1} g_0 \quad \ldots \quad f g_0]$ наблюдаемы и управляемы,

2. характеристические многочлены $\varphi_{\mathrm{f_{l,i}}}$ матриц $f_{l,i}$ звеньев $i = \overline{1, \mathrm{L}_l}$, $l = \overline{1, p}$ неприводимы,

3. многочлены $\{\varphi_l \mid \varphi_l = \prod_{i=1}^{L_l} \varphi_{f_{l,i}} \quad l = \overline{1, p}\}$ и характеристический многочлен $\varphi_{f_0^l}$ матрицы f_0^l взаимно просты,

4. $\partial \varphi_{f_0^l} < \partial \varphi_{f_{l,i}}$, $l = \overline{1, p}$, $i = \overline{1, L_l}$.

Для получения условий наблюдаемости и управляемости любой периодически нестационарной системы со слиянием цепей $\tilde{S}^{\mathrm{m}}$ следует доказать теперь уже достаточно очевидные утверждения.

Утверждение 5. Если система (8) наблюдаема (управляема), то система (7) γ_{r}-наблюдаема (γ_{r}-управляема).

Таким образом, условия наблюдаемости и управляемости (утверждение 4), сформулированные для стационарной системы, являются также и условиями γ_{r}-наблюдаемости и γ_{r}-управляемости для нестационарной.

Утверждение 6. Если периодически нестационарная система S^{m} γ_{r}-наблюдаема и γ_{r}-управляема, и все матрицы динамики этой цепи неособенные, то она полностью наблюдаема и управляема.

γ_{r}-наблюдаемость цепи позволяет определить по ее выходу состояние x_i, в котором система находится в момент времени, совпадающий с началом последовательности γ_{r}. Однако благодаря неособенности всех матриц динамики можно, зная x_i, определить не только любое последующее, но и любое предшествующее ему состояние, что свидетельствует о полной наблюдаемости системы. Воспользовавшись принципом двойственности, к аналогичному выводу можно придти и в отношении управляемости.

Заключение

В настоящем докладе рассмотрены вопросы синтеза дискретно-событийной диагностической модели распределенной вычислительной системы. Изложенные выше результаты определяют возможность получения более рациональных версий модели, нежели описанная в первой части данной статьи. Для этой версии формулируются достаточные условия наблюдаемости и управляемости.

Список использованных источников

[1] Колесов Н.В., Толмачева М.В., Юхта П.В. Системы реального времени. Планирование, анализ, диагностирование. СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014. 185 с.

[2] Cassandras C.G., Lafortune S. Introduction to discrete event systems. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. – 2008., p. 848.

[3] Cabasino M.P., Giua A., Seatzu C. Discrete Event Diagnosis Using Petri Nets // ICINCO09: 6th Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics (Milano, Italy), July 2009.

[4] Грузликов А.М., Колесов Н.В., Скородумов Ю.М., Толмачева М.В. Нестационарные динамические модели в задачах диагностирования вычислительных систем реального времени // Изв. РАН. ТиСУ. 2014. № 6. С. 94–104.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СОСЕДНИХ ЛОПАТОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ НА ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ЕГО УМЕНЬШЕНИЕ

Б.К. Райков, П.Е. Подлипнов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
pepodlypnov@yandex.ru
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *градуировка одновитковых вихретоковых датчиков, влияние соседних лопаток, методика градуировки, погрешность градуировки, экспериментальная оценка погрешности*

Abstract

The modeling results of adjacent blades effect on conversion functions of the cluster of eddy-current single-coil sensors and on conversion functions of measuring circuits, as well as a method for the reducing of this effect are considered. The description of the method implementation on a base of controlled and adjacent blades simulator is given.

В системах измерения радиального зазора (РЗ) между торцом лопатки и статорной оболочкой газотурбинного двигателя (ГТД) при помощи одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника [1,2], в том числе в системах, реализующих кластерные методы, для измерения текущих значений РЗ используют функции преобразования, полученные экспериментально, т.е. градуировочные характеристики (ГХ). При этом применяемая методика получения ГХ предусматривает использование при градуировке одной контролируемой лопатки и не учитывает влияние соседних лопаток на ЧЭ рабочих и компенсационных датчиков.

Однако в современных и перспективных турбинах авиационных ГТД шаг установки лопаток может быть невелик и в линейном выражении соизмерим с длиной ЧЭ. Это означает, что соседние лопатки будут оказывать влияние на полезные изменения индуктивности ЧЭ, причём это влияние может оказаться весьма существенным.

В работе [3] рассматривается модель электромагнитного взаимодействия (ЭМВ) ЧЭ обоих ОВТД в составе распределенного кластера с контролируемой и соседними лопатками, основой которой является существующая модель ЭМВ ЧЭ датчика с торцом контролируемой турбинной лопатки с учётом её формы и объёма [4].

С помощью модели[3] установлено, что наличие рядом с контролируемой лопаткой соседних уменьшает индуктивность датчика, как в положении рабочего, так и компенсационного. При этом на датчик, находящийся в положении компенсационного, влияние соседних лопаток больше. Данная модель показывает существенное влияние соседних лопаток уже при шаге 26 мм, в связи с чем, в [3] была разработана методика градуировки, предусматривающая использование не одной, а пяти лопаток, применяемых в реальной турбине. Однако какое-либо описание экспериментальных исследований, подтверждающих эффективность разработанной методики, в литературе отсутствует.

В докладе приведено описание эксперимента по оценке влияния соседних лопаток, реализующего разработанную ранее методику и предусматривающего применение имитатора рабочего колеса в виде плоской платформы, на которой, в свою очередь, расположены имитаторы контролируемой и соседних лопаток сложной формы с повышенной кривизной поверх-

ности (имитаторы лопаток выполнены из немагнитной нержавеющей стали). Получены семейства ГХ в виде зависимостей индуктивности первичной обмотки согласующего трансформатора ОВТД, а также цифровых кодов на выходе измерительной цепи [5] от радиальных и осевых смещений с учетом влияния соседних лопаток и без него (применительно к методам измерений радиальных и осевых смещений [6,7]).

На основе полученных ГХ даны количественные оценки влияния соседних лопаток, и показана возможность его устранения

Благодарности

Выражаем благодарность М.П. Андрианову за изготовление имитаторов лопатки и помощь в проведении эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-08-00802).

Список литературы

[1] Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. – Самара: Самарский НЦ РАН, 2001.–188 с.

[2] Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / под общ. ред . Скобелева О.П. – М.: Машиностроение, 2011. -298с.

[3] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлипнов П.Е., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Влияние соседних лопаток на измерение радиальных зазоров в турбине // Мехатроника, автоматизация, управление, 2015, №5.

[4] Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика с торцом лопатки сложной формы // Тр. XV Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». -Самара: СамНЦ РАН, –2013. –С .627-635.

[5] Беленький Л.Б., Скобелев О.П. Измерительная цепь с одновитковыми вихретоковыми датчиками и приближенным // Тр. XIV Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». -Самара: СамНЦ РАН – 2012. –С.602-606.

[6] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов О.П., Скобелев О.П.Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – №10. – С.38-46.

[7] Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подлипнов П.Е., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. // Тр. XVII Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». -Самара: СамНЦ РАН, – 2015 (Настоящий сборник).

Author index

Индекс авторов

А

Акутина А.Ю., 161

Алексеев А.О., 287

Алексеева И.Е.,287

Амеличкин А.В., 167

Арпентьева М.Р., 174

Асанов А.З., 503, 555

Б

Бакланов Е.В., 138

Банникова А.В., 439

Батищев В.И., 690

Бахшиев А.В., 401

Беляев А.М., 147

Белопухов В.Н., 677, 679, 681

Бесова Л.С., 97

Бленда Н.А., 304

Блинова Д.В., 590

Боев С.Ф., 192

Боргест Н.М., 181

Борзунов С.В., 539

Боровик С.Ю., 677, 679, 681, 683, 685, 687

Булыно О.А., 694

В

Валеев Д.Х., 503

Ванин А.В., 561

Васильев И.А., 571

Васильев С.Н., 10

Васильева П.Н., 107

Вахтин А.А., 539

Ведерникова М.М., 115

Векшина А.Б., 515

Виноградов Г.П., 311

Виноградов И.Д., 320

Виттих В.А., 26, 195, 200, 202

Владимирова И.П., 406

Власова О.О., 577

Волков И.И., 690

Волынская А.В., 583

Воронин Ю.А., 311

Воронов Е.М., 561

Вохминцев Д.А., 571

Г

Габидулин М.А., 701

Галиуллина А.Ф., 414

Гвоздев В.Е., 414, 590

Герасимов Б.Н., 508
Глущенко А.И., 347
Горбунов Д.В., 202
Горелова Г.В., 326
Горемыкина Г.И., 161
Грудцына Л.Ю., 215
Грузликов А.М., 709
Губанов Н.Г., 220, 370

Д

Дегтярева И.В., 354
Демидович В.Б., 445
Демьянов Д.Н., 332
Дмитриев А.Я., 338
Димитров Л.В., 596
Донсков А.В., 126

Е

Евдокименков В.Н., 515
Еременко Ю.И., 347
Ефтонова Т.А., 354

Ж

Жмудь В.А., 596

З

Зеленов Д.А., 138
Золин А.Г., 690
Зюзин Б.Ф., 311

И

Иванова Д.Н., 147
Иванова О.А., 604
Ильясов Б.Г., 226, 354, 609

К

Казанская Д.Н., 69, 97
Карамзина А.Г., 226
Каримов В.С., 555
Карпов А.А.,522
Карпунин А.А., 561
Ким Р.В., 515
Кимлык А.А., 220
Ковалёв С.П., 167
Колесов Н.В., 709
Колоденкова А.Е., 326
Коплярова Н.В., 454, 615
Корнеева А.А., 647
Корнет М.Е., 655
Коробкин В.В., 326
Кочетков С.А., 621
Кочкаров А.А., 192
Крючков Б.И., 522
Кубышкин В.А., 460
Кургалин С.Д., 539
Кустова М.Н., 232
Кутейникова М.М., 677, 679, 683, 685, 687

Л

Ларин Е.А., 627
Лахин О.И., 147
Лившиц М.Ю., 265, 627
Любавский К.К., 561

М

Майоров И.В., 79, 88
Макарова Е.А., 354
Малахова А.И., 406, 414
Мальцева Т.В., 363
Марин В.А., 232
Мастяева И.Н., 161
Матюшин М.М., 138
Машунин Ю.К., 635
Медведев А.В., 439, 454
Мельников А.В., 304
Меркулов В.И., 472, 475
Миляков Д.А., 472
Митрошкина Т.А., 338
Михов Е.Д., 647, 655
Моисеева Т.В., 202
Молокова Н.В., 363
Мышкина И.Ю., 215

Н

Назаркина И.М., 262
Нестеров А.Ю., 528
Носков А.И., 147

П

Павлов О.В., 238
Павлова Д.В., 97
Подлипнов П.Е., 677, 681, 683, 685, 687, 715
Полещенко Д.А., 347
Попков В.В., 244
Попов В.Ю., 604
Постнов С.С., 460
Постнова Е.А., 460
Прилепский В., 88
Пудовинникова Л.Ю., 262

Р

Рагузин А.С., 370
Райков Б.К., 683, 685, 687, 715
Рамзаев В.М., 252
Рапопорт Э.Я., 481
Рассадин Ю.М., 621
Растворова И.И., 445
Ровнейко Н.И., 414
Родькин А.А., 376

С

Сабитов И.И., 609
Савинков А.С., 503
Садовский П.А., 475

Саитова Г.А., 609
Самодов И.О., 472
Сапожников И.В., 583
Саркисов В.Г., 257
Секисов Ю.Н., 683, 685, 687
Семёнова В.А., 382
Сергеев С.Ф., 531
Сергеева Н.А., 661, 694
Скворцов Д.В., 694
Скобелев П.О., 35, 79, 192
Скобелев О.П., 683, 685, 687
Скурский Ю.А., 115
Смирнов В.С., 382
Смирнов С.В., 202, 382
Соколов Н.Л., 138
Спирин А.И., 115
Станиловская В.И., 147
Степановская И.А., 394
Ступин Д.Д., 192
Сузанский Д.Н., 604

Т

Толмачева М.В., 709
Тупиков П.А., 701
Туровский Я.А., 539

У

Ульянов С.А., 10
Усов, 522

Ф

Фазлетдинова Ю.Р., 226
Федосеева Л.С., 262
Филимонов А.Б., 491
Филимонов Н.Б., 491

Х

Хаймович И.Н., 252
Хацаюк М.Ю., 445

Ц

Цапенко М.В., 265
Царева О.О., 604
Целуйко В.В., 401

Ч

Чекалов Л.Л., 275
Черняховская Л.Р., 406, 414
Чжан Е.А., 454, 661
Чумак В.Г., 252

Ш

Шелудько Л.П., 627
Шепилов Я.Ю., 69, 88, 97
Шишов А.В., 97

Ю

Юрин В.Е., 667

B

Baixeras J.R.N., 45

Barbosa J., 52

C

Chepegin V., 45

K

Klíma M., 58

Krasnov D.V., 547

L

Leitão P., 52

M

Madsen B., 69

Mařík V., 58

Marín C.A., 64

N

Nacke B., 421, 427, 433

Neumeyer J., 421

Nikanorov A., 427, 433

P

Pleshivtseva Yu., 427

R

Rapoport E., 427

Rzevski G., 3

Rusu D., 45

S

Schlesselmann, D., 433

Schülbe H., 421

U

Utkin A.V., 547

V

Vrba P., 58

W

Wajid U., 64

Научное издание

Труды XVII Международной конференции

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

22-25 июня 2015, Самара, Россия

Редакторы:

академик Е.А. Федосов

академик Н.А. Кузнецов

профессор В.А. Виттих

Proceedings of the XVII International Conference

COMPLEX SYSTEMS: CONTROL AND MODELING PROBLEMS

June 22-25, 2015, Samara, Russia

Editors:

academician E.A. Fedosov

academician N.A. Kuznetsov

professor V.A. Vittikh

Подписано в печать 02.05.2015.
Формат 70x100/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Объем 59,8 усл. печ. л. Тираж 500 экз. Заказ № .

Отпечатано в типографии ООО «Офорт».
443080, г. Самара, ул. Революционная, 70, литера П.
Тел.: 372-00-56, 931-98-59.
E-mail: ofort-samara@mail.ru.