Посвящается 100-летию академика Бориса Николаевича Петрова

Dedicated to the Centenary of academician Boris Nikolaevich Petrov

Российская академия наук
Самарский научный центр
Институт проблем управления сложными системами

Труды XV Международной конференции

Proceedings of the XV International Conference

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

COMPLEX SYSTEMS: CONTROL AND MODELING PROBLEMS

25-28 июня 2013, Самара, Россия

June 25-28, 2013, 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 XV Международной конференции* (25-28 июня 2013 г. Самара, Россия) /Под ред.: акад. ***Е.А. Федосова***, акад. ***Н.А. Кузнецова***, проф. ***В.А. Виттиха***. -Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. - 708 с.
ISBN 978-5-93424-662-5

В предлагаемом сборнике содержатся труды XV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», распределенные по следующим направлениям: современная теория управления и её приложения (секции - «Оптимальное управление в системах с распределенными параметрами», «Моделирование и управление в сложноструктурируемых системах», «Оптимальное управление в аэрокосмических системах»); интеллектуальные системы управления и обработки информации (секции - «Теория интерсубъективного управления с применением онтологических моделей ситуаций», «Интеллектуальные технологии в сложных системах», «Эргатические системы»); управление и измерение в сложных технических системах (секции - «Управление в сложных технических системах», «Измерения, контроль и диагностика в экстремальных условиях»).

ISBN 978-5-93424-662-5

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук, составление, оформление, 2013
© Все права принадлежат авторам публикуемых работ, 2013

The XV International Conference “Complex Systems: Control and Modeling Problems” (CSCMP’2013), was held on June 25–28, 2013 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 the 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 № 13-08-06038 of Russian Foundation for Basic Research.

The conference reports were presented on the following sections:

- Modern Theory of Optimal Control and its Applications:
  - Optimal Control of Systems with the Distributed Parametres.
  - Modelling and Control in Complex Structured Systems.
  - Optimal Control in Aerospace Systems.
- Intellectual Systems of Information Control and Processing:
  - Theory of Intersubjective Management with Application of Ontological Situations Models.
  - Intellectual Technologies in Complex Systems.
  - Ergatic Systems.
- Control and Measuring in Complex Technical Systems:
  - Control in Complex Technical Systems.
  - Measuring, Control and Diagnostics in Extreme Conditions.

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

XV Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (ПУМСС-2013) проводилась в г. Самаре (Россия) 25-28 июня 2013 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 № 13-08-06038).

На Конференции были представлены доклады по следующим направлениям и секциям:

- Современная теория оптимального управления и её приложения:
  - Оптимальное управление в системах с распределёнными параметрами.
  - Моделирование и управление в сложноструктурируемых системах.
  - Оптимальное управление в аэрокосмических системах.
- Интеллектуальные системы управления и обработки информации:
  - Теория интерсубъективного управления с применением онтологических моделей ситуаций.
  - Интеллектуальные технологии в сложных системах.
  - Эргатические системы.
- Управление и измерения в сложных технических системах:
  - Управление в сложных технических системах.
  - Измерения, контроль и диагностика в экстремальных условиях.

В Конференции приняли участие ученые из университетов и научных учреждений Великобритании, Германии, США, Швейцарии, Чехии, Латвии. Отечественные ученые представляли Российскую академию наук, 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, ИПУСС РАН, г. Самара
4. *Аншаков Г.П.* - член-корреспондент РАН
5. *Васильев С.Н.* - академик РАН
6. *Инден У.* - профессор Кёльнского университета, г. Кёльн, Германия
7. *Кузнецов Н.А.* - академик РАН
8. *Куржанский А.Б.* - академик РАН
9. *Лупи С.* - профессор Падуанского университета, г. Падуя, Италия
10. *Наке Б.* - директор Института электротехнологий Университета им. Лейбница, г. Ганновер, Германия
11. *Новиков Д.А.* - член-корреспондент РАН
12. *Рапопорт Э.Я.* - д.т.н., ИПУСС РАН, г. Самара
13. *Ржевский Г.А.* - профессор Открытого университета, г. Лондон, Великобритания
14. *Руднев В.И.* - директор по науке и технологиям группы компаний «Inductoheat», г. Мэдисон-Хайтс, США
15. *Себряков Г.Г.* - член-корреспондент РАН
16. *Смирнов С.В.* - д.т.н., ИПУСС РАН, г. Самара
17. *Филимонов Н.Б.* - д.т.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва
18. *Шорин В.П.* - академик РАН

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.	*Боровик С.Ю.*	-	д.т.н., ученый секретарь, ИПУСС РАН, г. Самара
4.	*Андреев В.А.*	-	д.т.н., Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара
5.	*Бааке Е.*	-	академический директор Института электротехнологий Университета им. Лейбница, г. Ганновер, Германия
6.	*Гриценко Е.А.*	-	заместитель министра здравоохранения и социального развития Самарской области, руководитель департамента развития информационных технологий и организации социальных выплат
7.	*Дилигенский Н.В.*	-	д.т.н., ИПУСС РАН, г. Самара
8.	*Загорулько Ю.А.*	-	к.т.н., Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН, г. Новосибирск
9.	*Золотухин Ю.Н.*	-	д.т.н, Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
10.	*Ильясов Б.Г.*	-	д.т.н., Уфимский государственный авиационный технический университет
11.	*Клещев А.С.*	-	д.ф.-м.н., Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток
12.	*Кузнецов С.В.*	-	зам. директора ИПУСС РАН, г. Самара
13.	*Лазарев Ю.Н.*	-	д.т.н., Самарский научный центр РАН
14.	*Плешивцева Ю.Э.*	-	д.т.н., ИПУСС РАН, г. Самара
15.	*Скобелев П.О.*	-	д.т.н., НПК «Разумные решения», г. Самара
16.	*Форзан М.*	-	профессор Падуанского университета, г. Падуя, Италия
17.	*Чекалов Л.Л.*	-	к.т.н., ООО «Транс-Мобил-Спедишн», г. Самара

CONTENTS
СОДЕРЖАНИЕ

Plenary Papers
Пленарные доклады

1. *G. Rzevski* 3
Seven Criteria of Complexity and Organisational Design

2. *U. Inden* 4
On the Aspects of Time-Horizons, Risks and Learning in ARUM Project

3. *В.А. Виттих* 9
Принципы построения ситуационных теорий общества

4. *V. Rudnev* 17
Maximizing Flexibility, Controllability and Effectiveness of Induction Heating Systems

5. *О.Н. Граничин* 24
Рандомизация, усреднение и мультиагентные технологии в управлении и извлечении знаний

6. *В.Ф. Меньшиков* 36
Управление риском в социально-экономической системе

MODERN THEORY OF OPTIMAL CONTROL AND ITS APPLICATIONS
СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ И ЕЁ ПРИЛОЖЕНИЯ

Optimal Control of Systems with the Distributed Parametres
Оптимальное управление системами с распределёнными параметрами

1. *Э.Я. Рапопорт, Ю.Э. Плешивцева* 46
Проблемы и методы теории и техники оптимального управления системами с распределёнными параметрами

2. *S. Spitans, E. Baake, A. Jakovics* 55
Coupled Electromagnetic and Hydrodynamic Calculation of Free Surface Dynamics and Turbulent Flow for Induction Melting Applications

3. *В.А. Медникова* 66
Численное моделирование проходной индукционной установки в программном пакете ANSYS

4. *С.Е. Коршиков, И.А. Ткачев* 72
Моделирование полей термических напряжений в процессе индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок

5. *М.Х. Лапицкая* 78
Моделирование процесса индукционного нагрева цилиндрической заготовки в замкнутой системе управления с измерителем состояния

6. *И.П. Болодурина, А.В. Кулешов* 84
Об одном классе задач оптимального управления с интервальной неопределенностью

7. *А.А. Корнев, В.А. Васенин, В.А. Роганов* 91
Современные подходы к исследованию задачи асимптотического управления оптимальным процессом нагрева

8. *И.А. Данилушкин* 98
Использование функций принадлежности выхода нечёткого регулятора для формирования распределённого управляющего воздействия

9. *В.Н. Митрошин, А.С. Нечаев* 104
Модель системы распределённого управления температурой расплава полимера с учётом его реологических особенностей при наложении кабельной изоляции методом экструзии

Modelling and Control on Complex Structured Systems
Моделирование и управление в сложноструктурируемых системах

1. *Н.В. Дилигенский, М.В. Цапенко, А.Н. Давыдов* 112
Методология анализа, многокритериального ранжирования и нормирования показателей обобщённой эффективности научных исследований

2. *А.В. Саушев* 125
Применения аппарата *R*-функций для оценки состояния сложных технических систем

3. *Н.В. Воропаева* 131
Декомпозиция задач управления дискретными разнотемповыми системами

4. *Н.В. Коплярова, Н.А. Сергеева* 136
Непараметрическое моделирование нелинейных динамических систем

5. *А.Ф. Галямов, С.В. Тархов* 142
Структурно-параметрическая оптимизация центра интегрированного обслуживания клиентов

6. *Б.Г. Ильясов, И.Б. Герасимова, Л.Н. Мухамедрахимова* 147
Когнитивная модель творческой личности

7. *А.Д. Тарасов* 153
Математические методы обработки нечеткой информации в задаче оценки защищенности потенциально-опасных объектов

8. *Н.А. Сергеева, Е.А. Чжан* 166
Моделирование сложных систем с зависимыми входными переменными

9. *О.В. Павлов* 173
Динамические модели управления проектами

10. *Б.Г. Ильясов, И.В. Дегтярева, Е.А. Макарова, Р.Р. Валитов* 179
Системное моделирование динамики формирования доходов и расходов населения с учётом их дифференциации

11. *А.З. Асанов, И.Ю. Мышкина* 193
Оценка целесообразности кадровых перестановок на основе нечеткой логики

12. *В.Е. Гвоздев, Н.И. Ровнейко* 200
Сравнительный анализ альтернативных вариантов реализации требований к программному продукту по критерию неопределенности

Optimal Control in Aerospace Systems
Оптимальное управление в аэрокосмических системах

1. *Е.М. Воронов, В.А. Ефремов, С.И. Сычев, К. Любавский, М. Тихонов* 208
Векторная оптимизация сложной трехканальной системы стабилизации летального аппарата в форме равновесно-арбитражного компромисса

2. *А.В. Ванин, Е.М. Воронов, А.А. Карпунин* 217
Оптимизация управления в двухуровневой иерархической многоканальной системе стабилизации – наведения летального аппарата

3. *М.В. Морозова* 224
Оптимальное управление переориентацией космического аппарата при перенацеливании аппаратуры зондирования

4. *В.А. Зеленцов,А.П. Ковалев, В.И. Салухов, В.И. Хименко* 233
Формирование информационно-методического обеспечения функционирования центров обработки космической информации

5. *О.Н. Корсун, В.Н. Тихонов* 239
Анализ особенностей пилотирования современных маневренных самолётов на малых высотах

6. *П.К. Кузнецов, Б.В. Мартемьянов* 245
Метод функционализации в анализе движения изображений

7. *А.В. Лопота, С.А. Половко, Д.Н. Степанов, А.А. Торубаров* 251
Точное определение координат объектов по их телевизионным изображениям методом «встречных измерений»

INTELLECTUAL SYSTEMS OF INFORMATION CONTROL AND PROCESSING
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Theory of Intersubjective Management with Application of Ontological Situations Models
Теория интерсубъективного управления с применением онтологических моделей ситуаций

1. *А.Ю. Нестеров* 264
Понятие и проблема понимания для инженеров и специалистов по искусственному интеллекту

2. *В.А. Виттих* 267
Инструментальная и коммуникативная рациональности акторов

3. *М.М. Матюшин* 274
Использование элементов теории интерсубъективного управления для описания процессов функционирования АСУП пилотируемых космических аппаратов

4. *М.В. Игнатьев* 287
Управление разработкой программного обеспечения с использованием интерсубъективной теории управления

5. *В.П. Офицеров, С.В. Смирнов* 291
Использование V^{TF}-логики для определения формальных контекстов и построения онтологий предметных областей

6. *С.И. Кретов* 298
«Сложные системы» как объект научного исследования

7. *О.В. Карамова* 309
Экономическая наука в контексте классической, неклассической и постнеклассической науки

8. *В.А. Филимонов* 313
Кросс-технологии ситуационного центра как инфраструктура коллективной многодисциплинарной деятельности

9. *Л.Л. Чекалов* 317
Соотношение понятий Знак и Значение в интерсубъективном управлении и описание различных познавательных характеристик субъектов

10. *А.Е. Баранович, Д.Б. Ханковский* 327
Моделирование мышления в интеллектуальных системах: информационно-эволюционный этап развития

11. *Л.Р. Черняховская, Н.И. Федорова, И.П. Владимирова* 339
Онтология методов оптимизации коллективных решений в деловых процессах

12. *Л.Р. Черняховская, А.И. Малахова* 343
Формирование правил принятия решений в управлении проектами по результатам онтологического анализа

13. *И.Д. Виноградов* 350
Построение интегрированных онтологий предметных областей из разнородных источников информации

14. *И.А. Степановская* 355
Концептуальные основы облачной технологии сопровождения распределенных систем ситуационных центров

15. *Н.М. Боргест, С.В. Смирнов* 363
Стартап проекта ОнтоРитор

16. *Л.С. Федосеева, В.Е. Романов, И.М Назаркина* 367
Информационно-аналитическая система – инструмент управления качеством оказания медицинской помощи на амбулаторном этапе

Intellectual Technologies in Complex Systems
Интеллектуальные технологии в сложных системах

1. *П.О. Скобелев* 374
Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени на основе мультиагентных технологий

2. *А.В. Соллогуб, П.О. Скобелев, Е.В. Симонова, М.Е. Степанов, А.А. Жиляев, А.В. Царев* 383
Логика работы агентов в интеллектуальной системе распределенного управления группировкой малоразмерных космических аппаратов

3. *П.О. Скобелев, А.А. Белоусов, С.О. Лисицын, А.В. Царев* 391
Разработка интеллектуальной системы управления грузовыми перевозками для полигона «Восточный»

4. *А.Б. Филимонов, О.А Кромин* 397
Особенности разработки мультиагентных систем на платформе JADE Semantic Agent framework

5. *М.Ю. Охтилев, В.А. Зеленцов, Б.В. Соколов, С.А Потрясаев* 403
Методология и интеллектуальная технология проактивного мониторинга и управления сложными техническими объектами

6. *А.И. Каляев* 409
Об одном способе решения поступающего потока связных задач в мультиагентных GRID

7. *Д.А. Ёлкин, И.А. Минаков, С.И. Вольман* 415
Применение методов извлечения знаний для выявления закономерностей в области оптимизации Интернет-рекламы

8. *В.Ф. Филаретов, А.В. Зуев, А.С. Губанков* 423
Разработка архитектуры интеллектуальной информационно-управляющей системы робототехнического комплекса для механической обработки нежестких композитных изделий сложной формы

9. *К.А. Стуликова, Д.Ю. Полукаров* 429
Правила формирования онтологии области маршрутизации для системы анализа потоков данных междоменной маршрутизации

10. *А.Е. Колоденкова* 433
Стохастическая парадигма учета неопределенности в задачах оценки жизнеспособности проекта

11. *З.В. Апанович* 439
Методы построения жгутов ребер для улучшения понимаемости информации

12. *А.В. Вохминцев, А.В. Мельников* 446
Фактографический анализ полнотекстовых баз данных при мониторинге научно-технической информации

13. *П. Басин, В.Б. Ломакин, М.О. Переверзев* 455
Передовые технологии региональных систем архивирования диагностических изображений (PACS) на примере решения, создаваемого в Самарской области

Ergatic Systems
Эргатические системы

1. *А.В. Пономаренко* 464
Совершенствование интерактивного учебного комплекса МиГ-29 для самолетов 5-го поколения

2. *О.Н. Корсун, И.М. Финаев* 471
Алгоритмическое обеспечение малословарной помехоустойчивой системы автоматического распознавания речевых команд для управления в эргатических системах

3. *С.Ф. Сергеев, Ю.Ю. Заплаткин* 476
Симбиотические отношения в интеллектуальных техногенных средах

4. *А.З. Асанов, Д.Х. Валеев, А.С. Савинков* 483
Современная архитектура бортовых информационно-управляющих систем высокомобильных транспортных комплексов

5. *В.И. Короченцев, А.Н. Розенбаум, И.В. Гарасев* 489
Системный подход к диагностике заболеваний по суммарной электрической активности головного мозга человека

CONTROL AND MEASURING IN COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS
УПРАВЛЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Control in Complex Technical Systems
Управление в сложных технических системах

1. *Н.Б. Филимонов* 496
Полиэдральная парадигма оптимизации процессов управления

2. *А.Б. Филимонов, Н.Б. Филимонов* 500
Синтез координирующего управления на основе аппарата линейно-квадратичной оптимизации

3. *С.А. Белоконь, Ю.Н. Золотухин, К.Ю. Котов, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.А. Соболев, М.Н. Филиппов, А.П. Ян* 506
Управление квадрокоптером AR.Drone при движении по заданной траектории

4. *С.Г. Деришев, Ю.Н. Золотухин, К.Ю. Котов, А.А. Нестеров, М.А. Соболев, Н.П. Сохи, М.Н. Филиппов* 515
О расчёте углов ориентации летательного аппарата вертикального взлёта и посадки

5. *А.Г. Ченцов, М.С. Кошелева* 523
Одна задача маршрутизации перемещений при ограничениях в виде условий предшествования

6. *В.И. Меркулов, Д.А. Миляков, В.С. Чернов* 533
Применение теории оптимального управления при решении задачи траекторного управления наблюдением

7. *Д.Н. Сузанский, В.Ю. Попов* 543
Способ построения опорной траектории движения сложной системы

8. *А.В. Уткин* 548
Синтез неминимально фазовых следящих систем

9. *В.И. Шелехов* 554
Язык и технология автоматного программирования для разработки систем управления

10. *Ю.М. Рассадин* 565
Декомпозиционная процедура синтеза дискретных систем на основе методов разделения движений

11. *А.З. Асанов, В.С. Каримов* 571
Применение компенсационно-наблюдательной схемы при синтезе адаптивной системы управления с запаздываниями по управлению

12. *А.В. Волынская* 577
Исследование способов адаптации сигналов к помехам в интеллектуальном канале телемеханики железнодорожного транспорта

13. *В.Ф. Филаретов, А.С. Губанков* 582
Разработка системы формирования программных сигналов для электроприводов манипулятора

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

1. *А.Н. Жирабок, А.Ю. Суворов* 590
Способ реализации активных методов функционального диагностирования сложных технических систем

2. *В.Б. Гусев, А.М. Анохин* 596
Метод экспресс диагностики технологического процесса с применением параллельных вычислений

3. *Г.В. Безмен, Н.В. Колесов* 603
Применение моделей при диагностировании информационно-управляющих систем

4. *С.В. Кравцов, К.Е. Румянцев* 609
Стратегия позиционирования мобильного робота по данным измерений бортовой системы цифрового стереозрения

5. *В.И. Батищев, И.И. Волков, А.Г. Золин* 615
Синтез фильтров для восстановления смазанных изображений с использованием методов регуляризации

6. *P. Votava, I. Poznyak* 619
Measurement of High Frequency Induction Current in Powerful Induction Systems

7. *М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев* 627
Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика с торцом лопатки сложной формы

8. *М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев* 636
Результаты моделирования электромагнитного взаимодействия чувствительных элементов одновитковых вихретоковых датчиков в составе кластера с торцом лопатки сложной формы

9. *Л.Б. Беленький, А.В. Логвинов, О.П. Скобелев* 642
Преобразователь индуктивностей одновитковых вихретоковых датчиков в цифровой код

10. *В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик* 646
Алгоритм предварительной обработки данных кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы

11. *В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик* 650
Алгоритм поиска экстремальных значений кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений лопаток сложной формы

12. *Л.Б. Беленький, В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев* 655
Технические средства и программное обеспечение системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и скорости вращения лопаточного колеса

13. *Л.Б. Беленький, В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев* 663
Экспериментальные исследования работоспособности и метрологической состоятельности действующего макета системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и скорости вращения лопаточного колеса

14. *В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, Д.В. Рудаков* 670
Синтез аппроксимационных методов и систем оперативного анализа периодических сигналов на основе сравнения мгновенных значений, распределенных в пространстве

15. *В.В. Гучук* 676
Особенности интерфейса программного обеспечения для многоканальной регистрации разночастотных потоков данных

16. *В.А. Засов, М.В. Ромкин* 682
Анализ устойчивости решения задачи разделения сигналов в условиях априорной неопределённости возмущений

Plenary Papers
Пленарные доклады

SEVEN CRITERIA OF COMPLEXITY AND ORGANISATIONAL DESIGN

G. Rzevski

Professor, Complexity Science and Design Group, The Open University, UK
3 Ashbourne Close, London W5 3EF, UK
george@rzevski.net
phone: +447 525 746 106

Key words: *Internet-based market, complexity, organisational structures, organisational design, criteria of complexity*

Аннотация

Анализируются радикальные изменения, происходящие в экономических отношениях между государствами, юридическими и физическими лицами с развитием средств массовых коммуникаций. Фиксируется потребность в новом мышлении при создании организационных структур. Делается вывод о необходимости «проектирования сложности» в организации как залога ее выживания и процветания в сложном окружении. Рассматривается авторский метод проектирования адаптивной и устойчивой организации с учетом семи критериев сложности.

Economic relationships between nations, businesses and individuals have recently experienced a drastic change. The new Internet-based global market interconnects millions of suppliers, customers, middlemen, investors, lenders, borrowers and consumers around the world and enables all participants to negotiate new deals and modify/cancel previously agreed deals with an unprecedented speed and with such a frequency that the market is never given sufficient time to reach the supply-demand equilibrium. Occasionally and unexpectedly, even a small disturbance may cause catastrophic events such as the current global financial crisis. In addition, these dynamic and unpredictable market conditions provide new opportunities for electronic attacks and fraud.

In other words, the new Internet-based Global Market has become *Complex* [1].

Conventional organisational structures with deep management hierarchies, functional divisions and conventional information technology are too rigid for the new market complexity. They cannot respond in real time to frequent and unpredictable disruptive events.

There is a need for a new thinking in organisational design. Novel conditions require new organisational structures, which are *adaptive* (capable of achieving strategic goals under conditions of market uncertainty) and *resilient* (capable of defending itself against electronic attacks and fraud).

The evidence suggests that only complex systems can be adaptive and resilient. The implication is that we have to design complexity into organisations in order to make them capable to survive and prosper in complex environments.

A method for designing adaptive and resilient organisations using seven criteria of complexity developed by the author [2] and proved in many practical applications will be covered in some detail.

References

[1] *Rzevski, G.*, Using Tools of Complexity Science to Diagnose the Current Financial Crisis // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2010. - Vol. 46, No. 2. ISSN 8756-6990.

[2] *Rzevski, G.*, A Practical Methodology for Managing Complexity // Emergence: Complexity & Organization – An International Transdisciplinary Journal of Complex Social Systems. – 2011. –Vol. 13, No. 1-2. - P. 38-56.ISSN 1521-3250.

ON THE ASPECTS OF TIME-HORIZONS, RISK AND LEARNING IN THE ARUM PROJECT

Udo Inden

Research Centre for Knowledge Management and Applications of Intelligent Systems
Cologne University of Applied Sciences, Faculty of Business Administration and Economics
50678, Köln, Claudiusstrasse, 1, Germany
udo-inden@fh-koeln.de

Keywords: *ARUM project, horizons of planning and learning, strategic planning, tactical planning, real-time scheduling*

Аннотация

В статье рассматриваются три взаимопересекающихся горизонта планирования и обучения, на основе которых организованы средства, разрабатываемые в рамках Европейского проекта ARUM: стратегический, тактический и реального времени.

Introduction

The **'time to amortization'** of the investment into a new program like A350 XWB or of a new line of galley appliances is the economic imperative behind the ARUM project: delays in the ramp-up of production invert expected revenue into large additional costs. Reasons of these delays lay in the implementation of the production process as well as in questions which have been overlooked or underestimated beforehand in strategic planning and system design. Whether a multi-billion Euro investment for Airbus or of some millions for MGS/IHF, relative to the size of the firm a failure may become a serious financial threat. Again it is to be admitted that the architecture of ARUM models and solutions need to be open to be extended for further implementation.

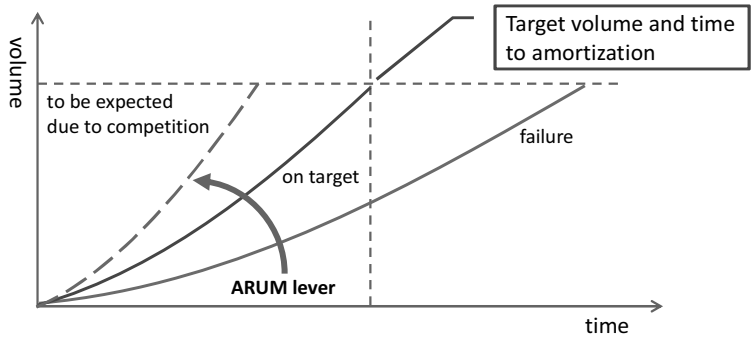


Figure 1 - The Challenge of Small Lot Production

There are three drivers of small lot production: small markets (automotive versus aviation), fragmented large markets (increasing variance of car-models) and the control of market risk (avoiding depreciation on produced stocks by on-demand production and low inventories). The first and the latter case apply to Airbus and MGS/IHF: Capital intensive products and small volumes do not leave the option of on-stock production. But since also learning curves depend on scale, diseconomies of complexity play a larger role in aviation than in automotive industry[1]. Fragmenting car markets leave

[1] Compared to Airbus the complexity and thus diseconomies of MGS/Iacobuccy products and manufacturing are far smaller. But MGS/I depends on the OEM and "risk sharing contracts" do not leave room for "not invented here" attitudes.

options to earn economies of scale on the level of platforms with carry-over parts for 12.000-times the number of cars than Airbus produces air-crafts[2]. Therefore the ARUM lever is about

- a lean management strategy sorting out the daily complexity of details and events, pro-viding "*visibility*", "*self-documentation*" (valid information and reporting about actual states of relevant objects) and "*consistent support of decisions*",
- a persistent program compensating the lack of scale by leveraging the learning curve with intelligent tools and respective ontology models,
- augmenting the scope of system development

This is **addressed by ARUM tools**, organised into three **interconnected horizons of planning and learning: strategic, tactical and real-time**.

Strategic planning

„*Tactic is the doctrine of the use of fighting forces in combat. Strategy is the doctrine of the use of combats for the purpose of war. … The objective of strategy is to win – i.e. to achieve peace.*" [CLA 1832][3]. I.e. strategy provides tactics with aims and budgets that enable implementing the strategy in a way finally making fighting successful.

Addressing "operations strategy and tactics" (the job of the COO: Sales, procurement, production, logistics) requires to be aware of higher ranking market and corporate (financial) strategies elaborating the trade-offs sustainably distinguishing from competition and particularly mark what and what not to do. [POR 1996, P 69] "*Operational effectiveness and strategy are both essential to superior performance … But they work in very different ways. A company can outperform rivals only it can establish a difference that it can preserve*." [POR, P. 61][4]. This is about establishing, structuring and adapting a business model, i.e. these decisions are made ahead of the phase addressed by ARUM. They have to become effective and to be translated into an operations' strategy, tactics and real-time acting (figure 2).

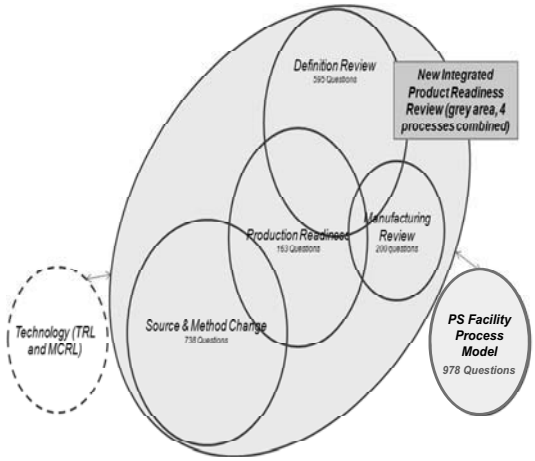


Figure 2 - Product Readiness Review, Rolls Royce Germany Example

[2] Volkswagen produces worldwide 34.500 cars per day [VW 2011], i.e. about 12 Millions a year. Across 10 brands the Transversal Matrix Platform, implemented 2012, reduces the variety of parts and modules by up to 90 % - i.e. accordingly increases the production volumes and with this the learning curves in engineering, production and production development. [VW 2012]

[3] Carl P.G. von Clausewitz (1780–1831), regarded as the originator of the theory of modern strategy and tactics, taught until today in military academies and, with some difference in terminology, in business administration. [translation from German: ui]

[4] The triple of strategy / tactics / real-time ops is a recurrent pattern: Management will identify, structure, evaluate and decide on options, define and allocate responsibility and budget to implement down the was corporate → market → operations → factory …

Lacking for the time being an elaborated use-case from Airbus, a case of Rolls Royce Germany[5] (RRG, Figure 4) may serve as example for a large-scale manufacturing system: In the next four to fife years RRG will undergo a complex parallel exchange of old by new prod-ucts and production tech-nologies, in point of fact a multi ramp-up scenario. In the beginning a so-called "Product Readiness Review" came up with more than 2.200 "questions to be con-sidered". This is the beginning of the managerial process structuring, evaluating and deciding on options to design the operations system (see footnote 7), thus delivering the framework for operations. And it exemplifies how decisions made on higher corporate levels about the market strategy will finally be continued by parallel in- and out-phasing of products and tech-nologies on the operations level.

The "*new product delivery process*" (PDP) of **MGS/Iacobucci use-case** compares. Phase 0 mostly starts with an external request for quotation from the market. With low priority *internal initiatives* may be supported, but actually only energized by the appearance of a *lead-customer*. Obviously at that stage questions about capital and market strategies are answered and now provide the financial and time budget for combats with competition. From here *product definition* (phase 1) starts, defining and answering detailed questions on requirements. Phase 2 translates this into coordinated technical solutions of *product* and of *production*. Phase 3 delivers the formal *certification*. In phase 4 production lines are established and in phase 5, actually the ramp-up phase, the PDP achieves the state of standard manufacturing (assem-bly, control and delivery). Each phase of this waterfall-process starts with collecting, structur-ing and answering new questions – and in case of reason reworking earlier answers.

Identifying and structuring questions obviously is the first but also a recurrent step of strategy building then implemented in tactics and then in doing. **It are the questions that drive the model of the world because any question represents a perceived risk**[6]: poor or wrong answers to questions for sure are a problem. But they only will be recognized by new questions. Thus the likely most serious problems arise from **questions that have not been asked or points of view that have not been considered and tested**[7]. Reasons are, e.g., a lacking awareness about assumptions (implicitness) or self-centered views of experts and the managements in identifying, structuring, evaluating, and planning options of acting. "Black swans" [TAL 2007] or slipped "butterflies" are hidden behind implicitness[8].

Questions and uncertainty about answers are good indicators of the complexity of the scene, too. Reversely: complexity (which is very much driven by scale of interactions) drives the urgency of questioning, the continuous struggle with uncertainty and the principle of leaving "residual risk" to lower instances (the waterfall). Considering that war always is dominated by uncertainty it is not a fortuity that this has been addressed first by a soldier already in the early 19th century while business still was a rather unhurried matter.

Referring to previous theories he says: "*All these approaches to a theory only analytically contribute to the progress of knowledge, but in their synthetic part, instructions and rules al-together are unemployable. They strive for invariables, while in the war everything is vague and any calculus [plan] is to employ variables." ... " Thus it is evident that military acting which that frequently suf-*

[5] The case has been elaborated during the development of the SIMAS-proposal (Simulation as a Service), FP7 FoF-ICT-2013.7.1. Semantic cleansing and prioritising of this list will finally likely leave at least a few hundred questions to be worked off . – On the level of detail showed here the model has been released for use in related research.

[6] "Risk" is the likelihood of a negative or positive impact of an event. The negative connotation is colloquial only.

[7] *"I did just play with the data which had gathered by my fathers' team."* – July 2012 Neil Iabata, the 15 years old son of a French astronomer, turned the theory on the development of galaxies upside down by a discovery, totally unexpected by experts. So Neil became a co-author of the cover story of the January 2013 issue the "Nature" magazine. [IBA, 2013]

[8] Nokia is one of the latest examples of lacking awareness of an undermined position: „One of the most consistent patterns in business is the failure of leading companies to stay at the top of their industries when technologies or market change". [BOW 1995] Bowler and Christiansen argue that these firms are to much focused on current demands of current customers (market strategy) and that accordingly their resources and processes (operations strategy) are too much aligned to expiring positions.

fers from perturbation of plans based on general considerations by unexpected individual events has to be left to talent ...“ Finally he says: “*Knowledge has to become mastery* [deep knowledge].” [CLA 1832, 2nd Book 2nd Chapter, translation: ui]

Modelling, from this point of view, needs to support experiments of thought and simulation-based experimental learning (business games) deepen the understanding of a system's behaviour in its whole to better identify, structure and prove answers to strategic challenges. It also needs explorative learning, searching for open questions and provoking ideas. Effective and easy **adaptiveness** that shortens cycles from *brain to amortisation*, therefore, is the most crucial feature of modelling.

Tactical planning

When the 2.200 questions about the RRD program are structured and management responsibilities are allocated to the For tactical planning the “field of combat”, budgets and general objectives, particularly the time and with this the volume to amortisation, are given. Now it is about optimising the use of these resources to stand, or better, to outsmart competition.

In real-time horizons “optimal” solutions are expected to be valid, i.e., feasible (executable) and conformant (permissible): in view of the downsides of considerable delays **in most cases successful efforts to keep the system running are likely the most cost-effective alternative**. To prepare for this is the task of tactical planning. Assumed that any planning is made with the best **information** available, the **time to practically prepare for operations** limits tactical horizons: Orders need to be contracted (at least to be anticipated by market planning), resources to be procured and delivered, staff to be contracted and trained or holi-day times and shifts are to be planned. And in case of the implementation of a new product also learning curves matter when, e.g., MGS / Iacobuccy needs to deliver a first lot of 20 IHUs – a new product – within 2 months.

Lead-times mark the residual uncertainty, i.e., the contingencies to arrange for. Like in real-time planning, in a static view tactical planning is about optimising the deployment of re-sources for a market period[9]. In a dynamic view tactical planning is about exploiting patterns of operations’ contingencies and criticality – derived from the analysis of real-time operations (based on real data and on simulation) – for properly preparing real-time management to keep operations running. There is also a path of planning “between” static and dynamic views: operations policies which are prepared for action in recurrent and well defined failure scenarios and which are activated in case of specified context variables[10]. An example may be a policy to mitigate a wave of flue to be expected in winters or to strikes. Or: Lufthansa has implemented non-standard processes at major hubs for cases of delayed connecting baggage falling short of standard transfers times.

Real-time scheduling

The **horizon of real-time**[11] is defined by response-times required to make and implement a decision, this is to capture and process information about events and to induce effective action by agents (e.g., staff, machines) while ‘*capturing*’ needs sensors or manual input as well as a connecting system. If in case of a non-conformity event the only eligible replacement is 3 hrs. away, real-time response means “in 3 hrs” – after it became aware. The same applies if a decision takes 3 hrs. or if operations partially halted because re-engineering is required.

This consideration also discovers **the resource available for real-time planning: Discretions to act (DTA) of agents that are qualified to contribute to an appropriate answer to unplanned events**. Response-times are the times it needs to effectively activate DTA. In operations’ systems DTA derive from the interplay of sets of states of object (agent) in relevant dimensions of constraints

[9] This is in full conformity with the Iacobucci new-product process as well as with Airbus standard procedures.
[10] Context-dependent policies have been also tested in the MAS developed in the iC-RFID project.
[11] For principle reasons of physics the term “real-time” is the best possible approximation to a response-time of “0”

like space, organisation, law, etc. In complex systems how-ever most states of objects are not static but change due to continuous flows of events and their propagation through the system:

Resource_#1 allocated to job_A from 0900–1000 hrs. cannot confirm at 0950 to replace resource_#2 that due to an event that fails to start a parallel job_B from 0905–1005 hrs. But at 0951 the state of #1 may have changed to "free" because of the failure or another resource involved in job_A.

In *static view* the focus is on opportunity costs to overcome constraint. In a dynamic view this splits into two aspects: a case-specific one about limits of postponing a decision and a global one about the risk that operations system stall (criticality), a decisive control parameter of complex systems. Coined in physics, criticality defines the scale-free point of phase transi-tion (e.g., from liquid to solid) or the transition from stability into instability. [CHR, 2005] In the meantime this concept has been adapted by many sciences, among others in economics and in business [ONT, 2008] and marks the transition from responsiveness to event to stalling of action. So there is a shift from comparative analysis towards real-time pattern recognition and learning[12] to the advantage of tactical and strategic management: "*We've come to the believe that the core capacity needed for accessing the field of the future is presence*." [SEN, 2004, P. 13]

On Learning-Curves and Training

Simulation-based training can help to overcome the problem of lacking scales. A prominent example comes from aviation industry: flight simulators for pilots. Subject to evaluation against existing training systems ARUM tools can provide effective support of learning on all levels of operations decision making. But since strategic planning anyhow includes intensive sessions of learning, effects are to be expected in tactical planning and in shop-floor operations. Scenarios can be based on lessons learned or also invite users to experiment with own ideas. The latter may also contribute to a Kaizen program.

[12] A potential extension to ARUM technology

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИТУАЦИОННЫХ ТЕОРИЙ ОБЩЕСТВА

В.А. Виттих

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
vittikh@iccs.ru
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *общество, ситуация, ситуационная теория, актор, интерсубъективность, солидарность, консенсус, онтологическая модель ситуации, обществознание*

Abstract

The theory of society deals not with universal ideal objects (as contrasted to natural sciences), but it deals with unique objects-social situations. Each of the situations is apprehended by people (actors) as a kind of problematic state of things that requires them to make and realize decisions to settle the problem up. The situational (problem-oriented) theory of society developed by the heterogenous actors contains knowledge obtained by them in the process of the research of the problem situation. It also includes intersubjective knowledge - a result of agreements between actors achieved in the framework of semantic, empirical, logical, operational and normative intersubjectiveness. On the base of this knowledge actors develop an ontological model of the situation. After experimenting with it the heterogenous actors come to and accept a common ontology, which means that mutual understanding and consensus regarding the ways to solve the problem is attained. The whole set of problem-oriented (situational) and object (disciplinary) – oriented theories forms the theory of society. Each situational theory integrates object-oriented theories ensuring the joint use of them in the scope of one situation. Such theory is built by heterogenous actors performing cognizing and acting functions from inside of the situation in contrast to classical natural sciences where theory is developed by a uniform subject dissociated from the studied object. In social science the man should be kept inside the theory.

Введение

Общество (в широком смысле) определяется «как выделившееся из природы системное образование, представляющее собой исторически изменяющуюся форму жизнедеятельности людей, которая проявляется в функционировании и развитии социальных институтов, организаций, общностей и групп, отдельных индивидов; в узком смысле под обществом нередко понимается исторически конкретный тип социальной системы (например, индустриальное общество) или отдельный социальный организм» [1]. «Общество – группа людей, создававшаяся благодаря целенаправленной и разумно организованной совместной деятельности… Общество покоится на конвенции, договоре, одинаковой направленности интересов» [2].

Люди участвуют в хозяйственной жизни общества (этот вид деятельности изучает экономическая наука), в социальных процессах, протекающих в структурах общества (этим занимается социология), в формировании политико-властных отношений в нём (предмет исследований правовых и политических наук), в поступательном развитии общества (сфера исследований исторической науки) и т.д. Однако, несмотря на имеющуюся дисциплинарную дифференциацию наук об обществе, провести чёткую границу между областями их исследований оказалось чрезвычайно трудно, что стало тормозом на пути развития обществознания. Появился даже термин «дисциплинарный империализм», обозначающий в сфере общественных наук экспансию в соседние области, совершаемую дисциплинами, «достигшими громких успехов, овладевшими новыми, показывающими продуктивность и широту, концептуальными подходами и методическими приёмами» [3]. Но основной проблемой необходимо признать «зави-

симость формирующегося научного обществознания от естествознания. Само отделение «научного» от «ненаучного» в обществознании происходило во многом под влиянием норм и стандартов естествознания» [4].

Дело в том, что в естественных науках для получения объективно-истинных знаний о природе объект исследований отделяется от субъекта и средств наблюдения, т.е. человек изучает объект «со стороны», не влияя на процессы, происходящие в нём. Но подход к познанию действительности «как она есть сама по себе без примеси человеческой субъективности» [5] нельзя механически переносить на общество, которое перестаёт быть обществом, если из него исключить людей. Тем не менее, такой методический приём используется в общественных науках, порождая проблему потери адекватности реальной действительности создаваемых теоретических моделей. В частности, «практика социального анализа и социологии XX века показывает, что попытки строить социальные онтологии, т.е. схемы социального бытия, отвлекаясь от человеческих индивидов как субъектов социального процесса, приводит к серьёзным противоречиям: из теории исчезают люди и их энергия преобразования социальных форм, а социальные системы приобретают качества квазиприродных сил, стоящих над человеческим бытием» [6].

Подобная ситуация характерна и для экономической науки. В работе [7] кризис экономической теории связывается с тем, что «задача построения экономической теории по образу физики видимо невыполнима… Осознание факта кризиса и понимание его природы особенно важно для России. Российское общество и в 1917, и в 1992 гг. отчасти стало жертвой естественнонаучной формы экономического знания, веры в то, что есть источник, где содержится точный и правильный ответ. Теперь наступило разочарование». «Экономическая наука в своём стремлении к объективности отвлекается от индивидной активности и психологической мотивированности в поведении людей. И психология, фиксирующая предмет своих особых исследований, начинает с элементов психики человека, абстрагированных от предметно-содержательных аспектов его деятельности. Социология стремится обнаружить объективные «механизмы» социальных взаимодействий и начинает рассматривать как второстепенные воздействия индивидов на социальные структуры, формы самореализации и самоутверждения людей в обществе» [4].

Всё это говорит о назревшей потребности в разработке собственной методологии общественных наук, отличной от классической гносеологии естествознания. Например, на базе постнеклассической научной рациональности [8] предлагается развивать социальные [9] и экономические [10] науки. Однако, несмотря на упомянутую острую потребность, конструктивных социально-значимых результатов в области теоретического обществознания не было достигнуто. В данной статье, опираясь на основные положения работы [11], делается попытка в какой-то степени восполнить этот пробел, исходя из следующих соображений.

В общественной жизни человек постоянно сталкивается с множеством проблемных ситуаций, требующих принятия и реализации решений по их урегулированию. Человеческое бытие есть всегда бытие в некоторых ситуациях [12]. Находясь «внутри» объекта – ситуации (а не на позиции «внешнего» наблюдателя, как предполагает естествознание), человек (актор) не только изучает её, но и воздействует на развитие ситуации, т.е. выполняет познавательно-деятельностную функцию, в том числе, коммуницирует с другими акторами, приобретая субъективные и интерсубъективные знания [11]. При этом в процессах принятия индивидуальных или коллегиальных решений учитываются самые разнообразные сведения о сложившейся ситуации – экономические, социальные, правовые, политические, психологические и другие типы знаний, которые «интегрируются» в пределах ситуации. Разработав форму организации такого междисциплинарного знания, можно говорить о ситуационной теории, «радиус действия» которой ограничен рамками уникального идеализированного объекта – ситуации, в отличие от естественнонаучной теории, имеющей дело с универсальными идеализированными объектами природы. Поскольку в общественной жизни всегда присутствует множество ситуа-

ций, соответственно необходимо вести разработку множества ситуационных теорий общества. Рассмотрим основные принципы построения таких теорий.

1 Ситуационные теории

В современной методологии науки выделяются следующие основные компоненты теории [13]:

- эмпирический базис, включающий множество зафиксированных в данной области знания фактов, достигнутых в ходе наблюдений и экспериментов;
- исходную теоретическую основу – совокупность первичных допущений, постулатов, аксиом, общих законов теории, в совокупности описывающих идеализированный объект теории;
- логику теории – множество допустимых в рамках теории правил логического вывода и доказательства;
- совокупность выведенных в теории утверждений с их доказательствами, составляющую основной массив теоретического знания.

Классическая естественнонаучная теория объективна, т.е. существует независимо от индивидуального сознания субъектов – исследователей, создающих эту теорию, и носит «вневременной» характер, будучи не привязанной к каким-то временным рамкам. В науках об обществе, в основе функционирования и развития которого лежат субъективные начала, теория уже не может рассматриваться как форма организации только объективного научного знания, поскольку внеположенный объекту познающий субъект классической гносеологии здесь заменяется актором, который со своей субъективной точки зрения не только познаёт мир, но и творит его [11].

Приобретаемое субъективное знание, значимое и верное (относительно истинное) для одного актора, может иметь ценность и для других акторов, находящихся с ним в общей *проблемной ситуации, которая принуждает акторов коммуницировать и участвовать в принятии совместных решений* для урегулирования ситуации. Тогда, следуя конвенциональной концепции истины А. Пуанкаре, трактующей истину как результат соглашения, может быть достигнута договорённость о признании некоторого субъективного знания истинным для ограниченного круга акторов, объединённых проблемной ситуацией. Такое знание будем называть интерсубъективным [14] (следует отметить, что объективное знание может рассматриваться как верифицированное интерсубъективное знание, признаваемое всем человечеством).

Упорядоченную совокупность субъективных и интерсубъективных знаний, адресованных к конкретной ситуации, определим как ситуационную теорию, а поскольку в человеческом обществе одновременно складывается множество проблемных ситуаций, то правомерно говорить о множестве ситуационных теорий общества. Ситуации развиваются во времени, поэтому *знания должны приобретаться в реальном масштабе времени, т.е. в темпе развития ситуаций.* Здесь уместно упомянуть сформулированный в 20-е годы прошлого столетия теоретиком менеджмента М. Фоллетт «закон ситуаций», согласно которому «различные типы ситуаций требуют различных типов знания» [15].

Таким образом, *ситуация в жизни общества выполняет системообразующую функцию:* формирование каких-либо социальных институтов, организаций и групп начинается с осознания акторами своей принадлежности к той или иной проблемной ситуации, которую они должны совместными усилиями урегулировать. Для этого *акторы должны достичь взаимопонимания и консенсуса*, выполняя, по Ю. Хабермасу, коммуникативные действия [16], т.е. акторы должны быть коммуникативно рациональными [17]. Но им нужна «интеграционная знаниевая платформа», функционирование которой и призвана обеспечить ситуационная теория, создаваемая самими акторами. Иными словами, речь идёт о том, что ещё до принятия каких-либо решений *акторы должны договориться об используемых интерсубъективных знаниях, которые разделяются и признаются всеми акторами,* поскольку в противном случае

нет гарантий возможности достижения ими взаимопонимания и консенсуса. Такие соглашения могут достигаться акторами в рамках следующих типов интерсубъективности [18].

Семантическая интерсубъективность предполагает ясность и общее согласие относительно понятий и построенных из них суждений, т.е. они понимаются всеми одинаково и потому могут употребляться одним и тем же образом.

Эмпирическая интерсубъективность подразумевает, что высказывания, опирающиеся на эмпирические факты, принимаются за рационально обоснованные. При этом нужно иметь возможность ясно понять данные факты, они должны быть обязательно приемлемы и признаны кем-то, т.е. признаётся необходимой обоснованность суждений фактами и наблюдениями.

Логическая интерсубъективность считает рационально обоснованными такие высказывания, которые являются результатом логического вывода. При этом также предполагается понятность, ясность и общая приемлемость.

Операциональная интерсубъективность исходит из воспроизводимости образцов действия или рассуждения. Предполагается, что некоторая последовательность действий всегда ясным и общеобязательно приемлемым образом основана на данном образце. Отдельные элементы такой технологии и их последовательность, составляющие данный образец, понимаются всеми однозначно и в принципе могут быть воспроизведены в том же виде.

Нормативная интерсубъективность предполагает общепринятость норм и правил поведения и оценки. Если некоторая деятельность руководствуется нормами, это также рассматривается как рациональное обоснование. Хотя норма и является одновременно руководством к действию и в операциональном смысле часто не отличается от последнего, но тем не менее со словом «норма» обычно связаны определённые ценностные предпочтения.

Интерсубъективные знания, приобретённые в результате достигнутых соглашений акторов, находящихся в общей проблемной ситуации, упорядочиваются в рамках ситуационной теории, которую можно отнести к проблемно-ориентированным теориям общества, в отличие от предметно (дисциплинарно)-ориентированных теорий (экономических, социальных, политических, психологических и др.).

2 Структура теории общества

Предметно-ориентированные и проблемно-ориентированные теории образуют структуру теории общества, представленную на рисунке 1. Каждая проблемно-ориентированная (ситуационная) теория выполняет «интегрирующую» функцию по отношению к предметно-ориентированным теориям, которые, в свою очередь, могут адаптироваться соответствующими научными работниками (экономистами, социологами, политологами, психологами и др.) к конкретной сложившейся ситуации в обществе. Но ключевую объединяющую роль здесь играют акторы, осознающие свою принадлежность к ситуации, изучающие её и участвующие в принятии совместных решений по урегулированию ситуации, т.е. интерсубъективные *акторы одновременно выполняют функции научных работников (исследователей) и управленцев, принимающих и реализующих решения* [11]. Это обстоятельство является чрезвычайно важным с методической точки зрения, поскольку позволяет совершить *переход от классической научной рациональности к постнеклассической*, которая не отделяет субъекта от объекта (как это делает классическая наука), а, наоборот, учитывает соотнесённость приобретаемых знаний об объекте (ситуации) с индивидуальными особенностями субъекта (актора) и средств его деятельности [8].

Таким образом, в теории общества присутствуют все три вида знаний – субъективные, интерсубъективные и объективные. *Субъективные знания* каждого актора необходимы для того, чтобы, будучи доступными другим акторам, они содействовали достижению взаимопонимания между ними, поскольку акторы являются неоднородными, т.е. имеющими различные точки зрения на процессы, происходящие в обществе. Субъективные знания выражают пред-

метный мир актора, находящийся в его «поле зрения»; на их основе актор постигает смысл сложившейся ситуации. Но приобретены эти персональные знания ещё до появления проблемной ситуации, поэтому они характеризуют её предпонимание актором [11].

Рисунок 1 - Структура теории общества

Интерсубъективные знания – это результаты соглашений акторов относительно пяти типов интерсубъективности, которые были рассмотрены в предыдущем разделе. Эти знания выражают сближение позиций акторов, что очень важно прежде всего для повышения оперативности принимаемых решений. Ведь если каждый актор будет упорно придерживаться своего субъективного взгляда на мир, то процедура принятия совместного решения о способе выхода из проблемной ситуации может продолжаться недопустимо долго. Более того, позиции акторов могут меняться, что должно снова инициировать процесс согласования и находить отражение в интерсубъективных знаниях.

Объективные знания – это знания, взятые из предметно-ориентированных теорий и используемые в какой-либо ситуационной теории (совместно с субъективными и интерсубъективными знаниями) с целью принятия решений акторами.

Для формализации и представления в компьютерах субъективных, интерсубъективных и объективных знаний целесообразно использовать *онтологии* [19]. На основе этих знаний акторами совместно строится *онтологическая модель ситуации* (ОМС), с помощью которой они постигают смысл сложившейся проблемной ситуации. В отличие от онтологий теории, содержащей абстрактные понятия и отношения между ними, в ОМС описываются конкретные объекты реального мира. В первоначально разработанной ОМС отражается понимание задачи акторами, но между ними ещё не достигнуто взаимопонимание относительно путей урегулирования проблемной ситуации [11].

Тогда акторы начинают проводить *эксперименты* с ОМС [20], с одной стороны, отстаивая свои позиции, а с другой – учитывая интересы своих коллег и групповые ценностные ориентиры. В результате постепенной трансформации строится ОМС, разделяемая всеми акторами, в которой, наконец, и *достигается взаимопонимание неоднородных акторов* [11].

Важно иметь в виду, что предпочтения акторов зависят от контекста и характера взаимодействий между ними, а шкалы предпочтений строятся в процессе самих переговоров, не являясь жёстко заданными акторами [21]. Это обстоятельство, ограничивающее применение

классических математических методов при проведении экспериментов с ОМС, приводит к необходимости поиска других методов и инструментальных средств, к числу которых относятся мультиагентные модели и технологии [22, 23].

3 Акторы

Как это следует из предыдущего изложения, фигура актора является ключевой при разработке ситуационных теорий общества и в процессах принятия решений по урегулированию проблемных ситуаций. В то же самое время актор не принадлежит ни к категории профессиональных *научных работников, призванных создавать методы и средства построения ситуационных теорий*, ни к разряду менеджеров, нацеленных на управление деятельностью других людей, навязывая им свою волю. Актор – это новый тип члена общества, рождающийся в процессе перехода от индустриального к информационному обществу и обладающий рядом познавательно-деятельностных умений (навыков), явившихся результатом образования, и человеческих качеств (нравственных, этических и др.), приобретённых надлежащим воспитанием. Это высказывание не следует понимать так, что речь идёт о какой-то элитной, «избранной» части общества. Формирование черт актора должно адресоваться к каждому человеку, главным для которого является *осознание самого себя частью человеческого общества и понимание необходимости активного и солидарного участия в общественной жизни*. И этот человек – актор должен обладать некоторыми особенностями своей «внутренней» организации и «внешнего» поведения в обществе. Рассмотрим основные из них.

Актор, как, впрочем, и любой представитель грядущего информационного общества, *должен обладать навыками исследователя*, которые необходимо начинать приобретать с начальных классов средней школы (как это делается, например, в Великобритании). Причём это касается не только классического естествознания, но и постнеклассической научной рациональности, на базе которой строятся ситуационные теории общества, поскольку каждый человек должен быть готов к совместной работе с другими людьми по урегулированию проблемных ситуаций, возникающих в обществе.

Акторы должны быть солидарными для достижения взаимопонимания и консенсуса. Причём солидарность, по Р. Рорти, понимается как направление мышления (в противовес традиционной объективности) на объединение разнообразных точек зрения не на основе тождества, а в контексте их различия. Ни одна из позиций, объединяющихся на фундаменте солидарности, не претендует на статус единственной, что отличает этот подход от классической научной рациональности, исходящей из представления о возможности и достижимости одного единственно верного решения [24].

Акторы должны уметь вести дискурсивные переговоры. Дискурс – это форма коммуникации, в ходе которой высказывания «другого» тщательно проверяются, понимаются, уточняются, критикуются и, наконец, принимаются или отвергаются. В дискурсе главную роль играет аргумент и запрещается принуждение к согласию [25, 26].

В отличие от менеджеров, для которых главным инструментом управления является «вертикальное» принуждение, насилие, *акторы* используют «горизонтальные» взаимодействия для достижения консенсуса и *являются участниками ненасильственных способов управления (принятия решений).*

Несмотря на наличие индивидуальных убеждений и интересов, неоднородные акторы в своей деятельности должны опираться на *ценности*, разделяемые членами человеческого общества, *являющиеся его нравственным капиталом, без которого общество не может успешно развиваться.* В повседневной практике обычно «основное внимание сосредоточено на итогах, целях, тактических задачах и ориентирах, в то время как этическому значению и ценностному подтексту этих целей и средств их достижения уделяется несравнимо меньшее внимание… Достигнув согласия в отношении разделяемых ценностей, организация получает воз-

можность укрепить свою целостность, обеспечить большую слаженность действий, найти объединяющую основу и улучшить показатели своей деятельности» [27].

Акторы должны действовать на принципах *самоорганизации*, не дожидаясь команд какого-то центрального управляющего органа, а коммуницируя друг с другом и вырабатывая согласованные решения по управлению ситуацией с учётом общих интересов, не забывая и о своих. Неотъемлемыми чертами акторов являются *инициатива, самоотдача, способность к сопереживанию, умение сотрудничать* и многие другие, сходные с характеристиками *демократических лидеров* [27]. Поэтому понятие «актор» близко по смыслу понятию «лидер». Их роднит ещё и то обстоятельство, что они призваны прийти на смену понятию «менеджер», у которого «нет ничего, кроме власти помыкать другими людьми» [27]. Но термин «лидер» в русском языке часто трактуется как «руководитель», «начальник», что делает более предпочтительным использованное понятие «актор».

Таким образом, построение ситуационных теорий общества связывается с решением социальной задачи воспитания акторов – людей, способных не только изучать ситуации, но и конструировать реальность, опираясь не на материальные производительные силы, обеспечивающие преобразование природы человеком, а на «*производительную силу коммуникации*», сплетающую социальную ткань и обеспечивающую её поступательную рационализацию. «Именно коммуникативное действование, в котором *координация планов действия участников осуществляется через механизмы взаимопонимания в среде естественного языка*, обеспечивает воспроизводство общества как «жизненного мира» [28].

Заключение

Теория общества не может быть построена подобно естественнонаучным теориям «на века» как зафиксированная упорядоченная совокупность объективно-истинных знаний, которая если и может трансформироваться, то только в результате смены научной парадигмы. Теория общества имеет дело не с универсальными идеализированными объектами (как, например, механика), а с уникальными идеализированными объектами – ситуациями в обществе, каждая из которых осознаётся людьми – акторами как некоторое проблемное состояние дел, требующее с их стороны принятия и реализации решений для своего урегулирования. Ситуационная (проблемно-ориентированная) теория общества, разрабатываемая самими неоднородными акторами, содержит знания, приобретаемые ими в процессе изучения проблемной ситуации и представляемые в форме онтологий, в том числе интерсубъективные знания – результат соглашений акторов, достигнутых в рамках семантической, эмпирической, логической, операциональной и нормативной интерсубъективностей.

На основе этих знаний акторами создаётся онтологическая модель ситуации (ОМС), в результате экспериментов с которой строится ОМС, разделяемая всеми неоднородными акторами, что свидетельствует о достижении взаимопонимания и консенсуса относительно способа урегулирования ситуации.

Совокупность проблемно-ориентированных (ситуационных) и предметно (дисциплинарно)-ориентированных теорий образует теорию общества, в которой каждая ситуационная теория выполняет «интегрирующую» функцию по отношению к предметно-ориентированным теориям, обеспечивая их совместное использование в пределах одной и той же ситуации. Такая теория строится неоднородными акторами, находящимися «внутри» ситуации и выполняющими познавательно-деятельностные функции, в отличие от классического естествознания, где теория разрабатывается неким «унифицированным» субъектом, дистанцированным от изучаемого объекта. В обществознании человек должен быть сохранён в теории.

Сам термин «теория» созвучен здесь с его платоновским пониманием, изложенным в монографии А.Ф. Лосева [29]. По его мнению, у Платона «термин «теория» представляет собой такое состояние сознания, которое имеет своим предметом организованную, оформленную

действительность и которое аналитически-синтетически конструирует эту действительность на основе непосредственного видения или созерцания. Другими словами, в этом термине мы находим типичное для Платона и всей Античности взаимное слияние непосредственно данной и сознательно-сконструированной предметности». Таким образом, термин «теория» у Платона «не имеет ничего общего с новоевропейским пониманием этого слова» [29].

Список литературы

[1] Новейший социологический словарь. – Мн.: Книжный Дом, 2010.
[2] Философский энциклопедический словарь. – М.: ИНФРА-М, 1997
[3] Розов Н.С. От дисциплинарного империализма – к Обществознанию Без Границ! («Шенгенский» прокет интеграции социальных наук). – Общественные науки и современность, №3, 2009, с. 132-141.
[4] Социальная философия: Словарь. – М.: Академический Проект; Екатеринбург: Деловая книга, 2006.
[5] Кохановский В.П., Лешкевич Т.Г., Матяш Т.П., Фатхи Т.Б. Основы философии науки. – Ростов н/Д: Феникс, 2004.
[6] Современный философский словарь. – Лондон, Франкфурт-на-Майне, Париж, Люксембург, Москва, Минск. – «Панпринт», 1998.
[7] Полтерович В.М. Кризис экономической теории // Экономическая наука современной России, №1, 1998, с. 46-66.
[8] Степин В.С., Горохов В.Г., Розов М.А. Философия науки и техники. – М.: Гардарики, 1996.
[9] Дудина В.И. Социальный метод: от классической к постнеклассической точке зрения // Журнал социологии и социальной антропологии, том II, №3, 1999, с. 57-65.
[10] Карамова О.В. Этапы развития и периодизации российской экономической науки // Экономические науки, №3(88), 2012, с. 56-60.
[11] Виттих В.А. Введение в теорию интерсубъективного управления. – Самара, СамНЦ РАН, 2013.
[12] Зотов А.Ф. Современная западная философия. – М.: Проспект, 2010.
[13] Новая философская энциклопедия (в 4-х томах). – Москва: «Мысль», 2010.
[14] Виттих В.А. Когнитология развивающихся систем // Мехатроника, автоматизация, управление, №10, 2011, с. 45-49.
[15] Карпов А.В. Психология менеджмента. – М.: Гардарики, 2005.
[16] Habermas J. Theorie des Kommunicativen Handelns. Bde 1-2. – F.a.M., 1981.
[17] Виттих В.А. Инструментальная и коммуникативная рациональности акторов. – См. настоящий сб.
[18] Хюбнер К. Истина мифа. – М.: Республика, 1996.
[19] Виттих В.А., Игнатьев М.В., Смирнов С.В. Онтологии в интерсубъективных теориях // Мехатроника, автоматизация, управление, №5, 2012, с. 69-70.
[20] Смирнов С.В. Онтологическое моделирование в ситуационном управлении // Онтология проектирования, №2(4), 2012, с.16-24.
[21] Сапир Ж. К экономической теории неоднородных систем (опыт исследования децентрализованной экономики). – М.: Государственный университет – Высшая школа экономики, 2001.
[22] 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.
[23] Скобелев П.О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление, №12, 2010, с.33-46.
[24] Виттих В.А. Парадигма ограниченной рациональности принятия решений – 1 // Вестник Самарского государственного технического университета (серия «Технические науки»), №3(25), 2009, с.22-31.
[25] Хабермас Ю. Моральное сознание и коммуникативные действия. – СПб.: Наука, 2006.
[26] Соловьёва Е.В. Понятие «общественность» и «коммуникативное действие» Юргена Хабермаса как инструмент анализа социального партнёрства // Вестник Нижегородского универстета им. Н.И. Лобачевского (серия «Социальные науки»), №1, 2009, с. 62-66.
[27] Клок К., Голдсмит Дж. Конец менеджмента и становление организационной демократии. – СПб.: Питер, 2004.
[28] Фурс В. Парадигма критической теории в современной философии: попытка экспликации // Логос, №2, 2001, с.46-75.
[29] Лосев А.Ф. История античной эстетики. Софисты. Сократ. Платон. – М.: Искусство, 1969.

MAXIMIZING FLEXIBILITY, CONTROLABILITY AND EFFECTIVENESS OF INDUCTION HEATING SYSTEMS

V. Rudnev

Inductoheat Inc.,
Madison Heights, Michigan, USA
rudnev@inductoheat.com
phone: +1 (248) 629-5055, fax: +1 (248) 589-1062

Key words: *induction heating, forging industry, optimal control, time-temperature distribution, mathematical modeling, optimization*

Аннотация

В статье рассматриваются проблемы научного обоснования управления процессом индукционного нагрева металла, который на сегодня являет о многих отношениях предпочтительной технологией подготовки металлических заготовок к пластической деформации. Отмечаются некоторые ошибочные представления об изменении температурного поля «поверхность-ядро» в ходе нагрева в реальных производственных условиях. Анонсируется предметно-ориентированное программное обеспечение для расчета теплового режима при индукционном нагреве заготовок.

Introduction

Temperature greatly affects the formability of metals. Heating of billets, bars, slabs, plates and rods through its entire body to temperatures that correspond to the plastic deformation range creates a favorable condition for metal to be subsequently forced by various means into a desired shape. Within this article, the term billet will be used representing a number of similar workpiece shapes, including bars, rods, wires, heavy-wall tubes, etc. There are many ways to heat metals prior to warm and hot forming (i.e., forging, upsetting, rolling, extrusion, etc.) including the use of induction heaters, gas-fired furnaces, infra-red heaters, electric and fuel-fired furnaces, etc.

In recent decades, induction heating has become an increasingly preferable choice for heating metals. This tendency continue to grow at an increasing pace due to an ability of induction heating to create high heat intensity quickly and not just at the surface of the workpiece but within its internal areas as well. This creates favorable condition to quickly achieve required temperature uniformity and lead to low process cycle time (high productivity) with repeatable high quality while using minimum floor space. Practically immediate readiness of induction systems to start production without a necessity of having prolonged warm-up (idle) times is other appreciable advantage of induction heaters compared to alternative processes (e.g., gas furnaces).

Induction heating is more energy efficient and inherently environmentally friendlier than most other heat sources. A considerable reduction of heat exposure also contributes to the environmental friendliness.

Today's forge shops must quickly adjust to a rapidly changing business environment, maximizing process flexibility, and electrical efficiency, yet still satisfy continuously increasing demands for higher-quality products and induction heating addresses these challenges in the most effective way.

Induction heating offers additional attractive features such as

- A measurable reduction of scale and surface decarburization.
- Ability for in-line heating and processing.
- Short start-up and shutdown times. Energy is used when workpiece is being heated. No energy is required to build or maintain furnace temperature. Heating begins when an inductor is energized.

- Readiness for an automatization with lower labor cost.
- Ability to heat in a protective atmosphere, if required.

Billets and bars are heated either fully (Figure 1) or partially either in cut lengths or continuously and are forged in presses, hammers or upsetters.

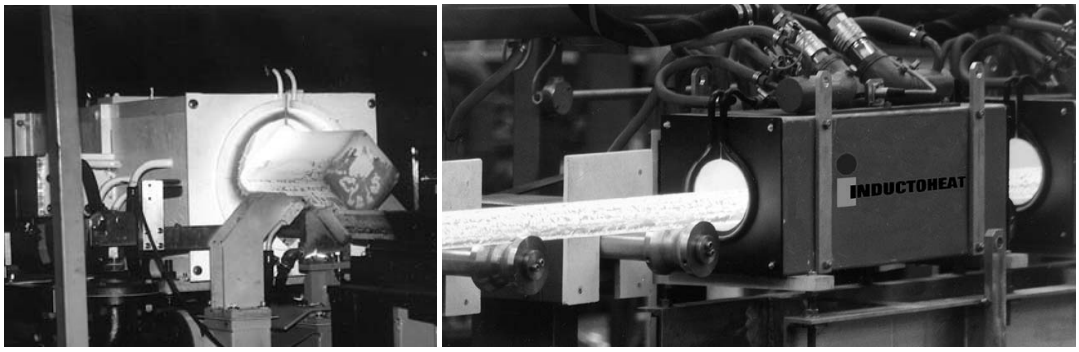


Figure 1 - Examples of in-line multi-coil induction heating systems (Courtesy of Inductoheat Inc.)

The forging industry's drive to more accurate net shaped high quality parts and a necessity in providing more value to the forger's customer is inherently related to the needs of further improving quality of forged parts which relates to developing superior design concepts of induction heaters and process control strategies that optimize all stages involved in the warm or hot forming operation. Modern approach for designing forging processes requires considering induction heating not as a standalone process, but as a part of an integrated system including its all-important elements: the process of induction heating, the change in the billet temperature profile during its transportation from the heater to the metal forming machine and process of plastic deformation itself.

The selection of principal process parameters, such as power, frequency, number of coils and their length is a complex function of the process specifics. Steel billets (including plain carbon, microalloyed and alloy steels), by far, represent the majority of hot-formed billets, although other materials including titanium, superalloys, aluminum, copper, brass, bronze, magnesium, nickel and others are also induction heated for forming.

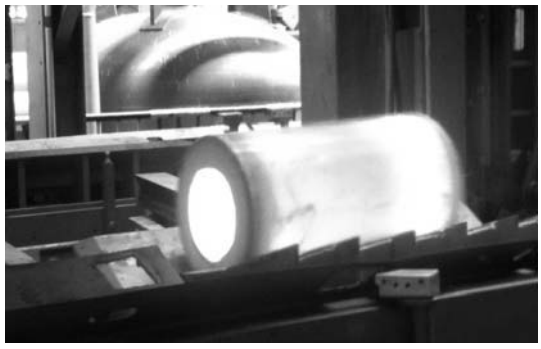


Figure 2 - Non-uniformity of initial heat distribution prior to induction reheating

Usually, the initial temperature of the workpiece prior to induction heating is uniform and corresponds to an ambient temperature. However, there are cases, when an initial temperature is not uniform and poorly defined. Induction heaters installed between continuous casting operation and rolling operation or induction reheating after piercing and prior to extrusion can serve as typical examples of non-uniform initial thermal conditions. Due to the nature of the previous technological operation (including uneven cooling of different areas), the outside surface layers and particularly the workpiece's end and edge areas could become appreciably cooler than the central and internal regions. As an example, Figure 2 shows temperature non-uniformity of pierced stainless steel hollow billet prior to its reheating in induction heater for a subsequent direct extrusion.

Aspects of mathematical modeling

In the last decade, when discussing subjects related to a mathematical modeling and optimization of induction heating, the word "usefulness" has been replaced by a word "necessity". Modern computer modeling is capable to effectively simulate electromagnetic and thermal phenomena. Simulation provides the ability to predict how different, interrelated and non-linear factors may impact the transitional and final thermal conditions and what must be accomplished to improve the effectiveness of the process, determine the most appropriate recipes to optimize a process and serve as a comfort factor when designing new systems.

In recent years finite element method became a dominant numerical simulation tool for a variety of engineering applications. Though finite element method is very effective modeling technique, it cannot be considered as an ultimate computational tool for all induction heating applications. In some cases a combination of different numerical methods (finite-differences, edge elements, boundary elements and others) is more effective, in others FEA is a preferred choice.

Power ratings, frequency range and temperature requirements

The power ratings of induction heating machines range from less than 10kW up to dozens megawatts typically utilizing low and medium frequency (50Hz to 30 kHz). In cases when it is required heating high electrically resistive materials (e.g., Ni-based super alloys, titanium) having relatively small diameters (less than 6mm dia.), applied frequencies are higher being in 70 kHz to 400 kHz range.

The choice of frequency is always a reasonable compromise in induction heating. Too low frequency might result in undesirably large penetration depth that, in turn, might lead to poor coil efficiency due to an eddy current cancellation and have greater impact on presence of sub-surface overheating. When the frequency is too high, an induced current concentrates within a fine surface layer compared to the diameter of the billet requiring long heat times that in progressive induction heating call for longer heating line. Optimal frequency is a complex function of several process features [1, 2].

It is typically required to raise the billet's temperature to a specified level and degree of heat uniformity. The uniformity requirement may include maximum tolerable temperature differentials — "surface-to-core," "end-to-end," and "side-to-side."

Instead of uniform temperature requirements, some applications require developing certain thermal gradients. A longitudinal thermal gradient along the billet's length (profile heating) is often desired when heating billets fabricated from certain metals (for example, pure aluminum and aluminum alloys) prior to direct or continuous extrusion, for example [1]. Taper heated billets having a hot nose and cooler tail compensate for the heat generated during direct extrusion resulting in a desirable condition of an isothermal extrusion.

It is important that the maximum temperature anywhere within the billet does not exceed certain level ensuring that none of the billet's areas are overheated and "hot shortness" as well as steel "burning" does not appear. Taking into consideration that pyrometers can only reliably measure billet's surface temperature at certain spots, there is always a danger to "miss" an overheating of the local or/and sub-surface areas. Therefore, precise temperature control based on a reliable prediction of temperature distribution within the billet using an advanced modeling capability is essential.

A common incorrect assumption

Some practitioners incorrectly assume that with induction billet heating the coldest temperature is always located at the core of the billet and the maximum temperature is always located at its surface. It is also often assumed that overheating does not occur if surface temperature measured by a pyrometer or thermocouple does not exceed the maximum permissible level. Besides that, process

control systems that predict rise of an average temperature and temperatures of surface and core of the billet often assumed to be sufficient to guarantee proper heating providing a comfortable factor for some practitioners. Example of such typically predicted "surface-to-core" temperature profile is shown on Figure 3. However, it is imperative to recognize that under certain but very realistic conditions, the presence of heat losses from billet's surface may shift the temperature maximum further away from the surface marking its location somewhere beneath the billet's surface.

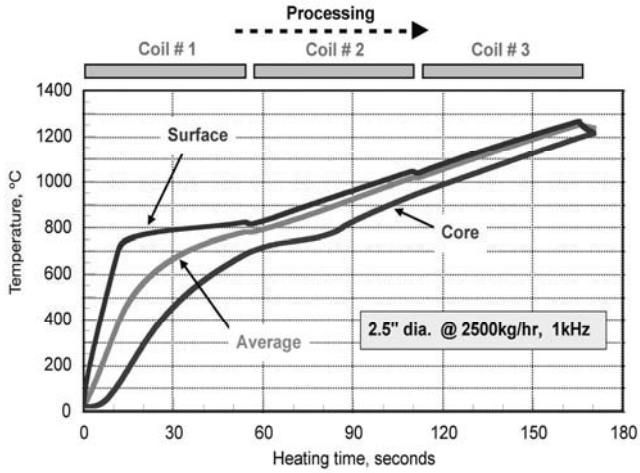


Figure 3 - Conventional "surface-to-core" time-temperature distribution

Study shows [2, 5] that positioning and magnitude of the subsurface temperature surplus and potential steel overheating is a complex function of four major factors: frequency, refractory, final temperature, and power distribution along the heating line.

Lower *frequencies* increase the current penetration depth resulting in more "in-depth" heating and leading to a faster temperature raise at billet's core. This shortens the induction line, but on another hand, under some conditions, it can also increase the subsurface overheating by making it more pronounced and shifting the location of the maximum temperature further away from the surface.

The use of an appreciably thick refractory with improved thermal insulation properties does just the opposite, reducing subsurface over-heating and shifting billet's maximum temperature towards its surface. Increase of the forging temperatures lead to an effect similar to an effect of lowering frequency in regards to a location of maximum temperature and severity of the subsurface heat surplus. An effect of power distribution along the heating line on billet's temperature distribution is more complex. In most publications devoted to progressive induction heating of billets, it is strongly suggested to have a graded (profiled) power distribution along induction line by putting more power at the beginning of the line. Putting more power up-front might sound as a universal "rule of thumb" since it forces more energy into the billet at the front of the heating line, allowing more time to soak into the core and shortening the length of the line. This approach typically utilizes a single inverter that powers several coils with graded number of copper turns or/and series/parallel coil circuit connections.

The problem with this approach, however is that the power distribution along the heating line in some installations cannot be easily modified if the production rate, kind of metal or billet size changes. For example, if the production rate is reduced, a subsurface overheating typically worsens with a conventional induction design potentially negatively affecting the billet's subsurface microstructure. It is also very common to find an appearance of billet-sticking problems to be more pronounced with graded power distribution along induction line when the system runs at a rate slower than the nominal for which it was designed. Since the system puts more energy into the billet in the beginning of the heating line, too much energy soaks down into billet's subsurface area in cases when the line runs slow. The presence of surface heat losses can reverse a traditionally expected radial temperature profile leading to the subsurface temperature being greater than at its surface.

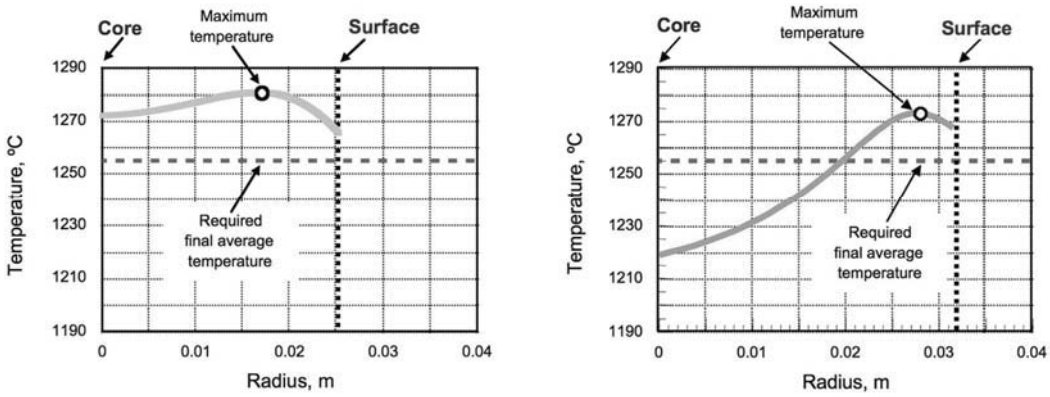


Figure 4 - Final "surface-to-core" temperature profiles when heating 2" (50.8mm) dia. billets at a slower rate (left) utilizing a conventional induction line designed for processing 2.5" (63.5mm) billets at a nominal rate (right) [5]

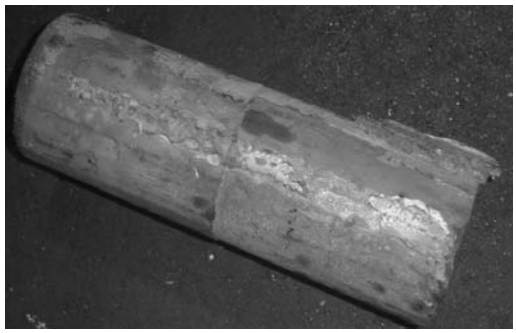


Figure 5 - Billet sticking problem occurred due to subsurface overheating

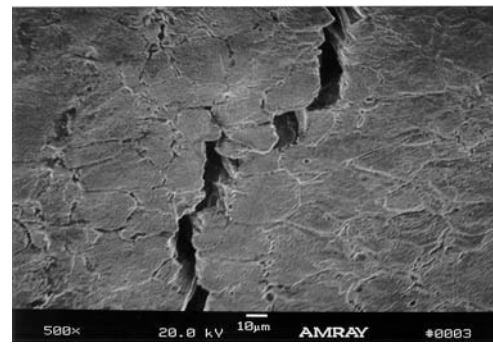


Figure 6 - Grain boundary liquation and intergranular cracking occurred due to poorly controlled subsurface overheating

In many cases, subsurface temperature might be hot enough to cause the billets to fuse together. The effect of subsurface overheating is particularly pronounced when heating smaller size billets at a lower rate using an induction line designed for heating larger billets at a nominal rate. As an example, Figures 4 shows "surface-to-core" profiles when heating 2"(50.8mm) diameter billets (Figure 4, left) at a slower rate utilizing a conventional induction heating line designed for processing 2.5"(63.5mm) billets (Figure 4, right) at a nominal rate (see Figure 3). Note that in both cases the billet's surface temperature that would be recorded by pyrometer is the same. Further reduction in billet's diameters could worsen a severity of subsurface overheating [5].

Further reduction in the billet's diameters could worsen the severity of subsurface overheating that can manifest itself in a billet sticking problem (Figure 5), as well as grain boundary liquation (incipient melting) and intergranular cracking **(**Figure 6).

Besides a potential danger of a premature die wear on hammers and presses, as well as other issues related to altering a quality of forged parts improperly heated billets can raised some safety concerns. Practice shows that when heating large billets at nominal rates, more power should be shifted towards the beginning of induction line. At slower rates however, when heating smaller than nominal size billets it is desirable to use a control strategies that re-distribute power by its shifting towards the end of the induction line.

Taking into consideration that pyrometers can only reliably measure billet's surface temperature, there is always a danger to "miss" an appearance of the sub-surface overheating. Therefore, precise temperature prediction is imperative in order to avoid localized over-heating that is related to "hot shortness" problems due to low melting point residuals and possible variations in the chemistry of given steel.

Superior temperature control

Inductoheat's IHaz™ temperature profile modeling software represents a measurable step in optimizing an entire forging process. This proprietary PC based subject-oriented software provides more detailed information regarding thermal conditions of inductively heated billets than any pyrometer can.

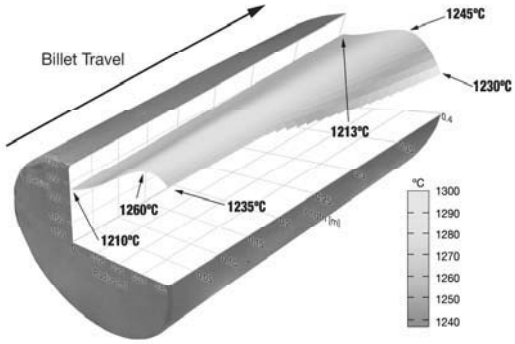


Figure 7. Temperature profile generated by second generation of IHaz™ , v.2.0.

As an example, Figure 7 shows typical temperature profile generated by IHaz™. It is not only an important part of the process control of induction heater, it also offers detailed knowledge regarding thermal conditions of heated billets that can be effectively used in optimization of forging operation and even during designing dies.

The IHaz™ also provides an estimate of the energy usage that is important in determining utility costs when pricing new parts and what should be accomplished to avoid a probability of sub-surface overheating and steps to further improving a quality of inductively heated parts.

INDUCTOFORGE™: A novel induction billet heating technology

The InductoForge™ Billet Heater is Inductoheat's superior modular technology that was specifically developed for the forging industry to optimize induction heating processes (Figure 8). The heater's basic concept is a fairly simple including a time-proven induction power supply with a heavy-duty induction coil mounted on top. These power and coil modules can be combined in-line to form a heater that provides the required production rate. It is easy to add or remove modules to the heating line to match above-discussed changes in production schedule. Each module allows controlling both; power and frequency of each coil along the induction heating line.

While the coil and power module are the basic components of the system, there are several others that complete it. The PLC, HMI (Human Machine Interface) and other controls are mounted on a pendulum so that the operator can position the screen for easy viewing (Figure 9).

A tractor or pinch-roll drive system is mounted on top of this cabinet for pushing the billets through the induction coils. Many of the benefits of the modular construction result from the ability to control each coil individually. Some of those features discussed below:

Superior system flexibility with optimized power and frequency distribution along the heating line related to the specifics of a particular process run. Frequency of each module can be easily modified within 500Hz to 6kHz range to match a demand of the great majority of forged billet sizes maximizing coil electrical efficiency. Superior computer modeling and advanced temperature control of InductoForge™ substantially improves the quality of heated parts assuring enhanced metallurgical structures and selecting a process recipe that minimizes a probability of subsurface overheating.

Figure 8 - Four-module InductoForge induction heater (Courtesy of Inductoheat, Inc.)

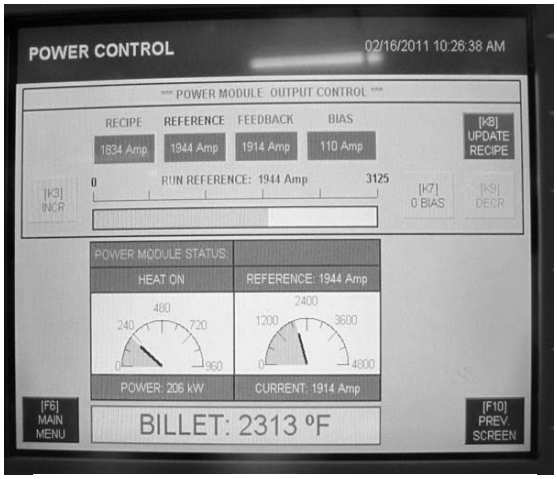


Figure 9 - Power control output screen of InductoForge™ Billet Heater

Unique Static and Dynamic Stand-by and Rapid Start capabilities substantially improve start-up, holding and shutdown process stages. Detailed description of these capabilities can be found at www.inductoheat.com

Temperature Profile Computer Modeling system utilizes the powerful Inductoheat's proprietary software that was specifically developed to optimize performance of induction heating systems based on a set of operating parameters specified by the user, which can be downloaded to a PLC recipe.

Besides superior flexibility InductoForge™ can be 20% more electrically efficient than older, conventionally designed induction systems, particularly when the billet heater is run at reduced production rates. There are virtually no transmission losses between the coil and power supply, because the induction coil sits on top of the power supply. This alone can increase efficiency by more than 5% over conventional induction units in which the power supply is separate from the coil stand.

The InductoForge™ coil utilizes a removable liner with a thermally enhanced design to reduce the thermal losses. This gains an additional 3-5% in efficiency. The advanced mechanical coil design

References

[1] Rudnev, V., Loveless, D., et. al., *Handbook of Induction Heating*. - Marcel Dekker, NY, 2003.

[2] Rapoport, E., Pleshivtseva, Y. *Optimal Control of Induction Heating Processes.* - CRC Press, NY, 2007.

[3] Rudnev, V. *Simulation of Induction Heating Prior to Hot Working and Coating* // ASM Handbook series, vol. 22B: Metals Process Simulation, editors D.U.Furrer and S.L.Semiatin, ASM Int., 2010, p.475 – 500.

[4] Rudnev, V. *Simulation of Induction Heat Treating* // ASM Handbook series, vol. 22B Metals Process Simulation, editors D.U.Furrer and S.L.Semiatin, ASM Int., 2010, p.501-546.

[5] Brown, D., Rudnev, V., Lin, J., Nakagawa, T., *Superior induction heating technologies for modern forge shops* // Proceedings of Japanese Forging Association (JFA), July, 2009.

РАНДОМИЗАЦИЯ, УСРЕДНЕНИЕ И МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ И ИЗВЛЕЧЕНИИ ЗНАНИЙ

О.Н. Граничин

Санкт-Петербургский государственный университет
198504, Санит-Петербург, Университетский пр. 28, Россия
Oleg_granichin@mail.ru
тел: +7 (812) 428-49-10, факс: +7 (812) 428-49-10

Ключевые слова: *рандомизированные алгоритмы, мультиагентные технологии, управление, извлечение знаний*

Abstract

This article is presented the key ideas and applications of the three important tools for system analysis and design, namely, randomization, averaging and multiagent technologies. These tools can largely facilitate the numerical solutions of various estimation, optimization and adaptive control problems, which are typically formulated under limited resources and insufficient data.

Введение

Последние 200 лет были «колыбелью» многих больших и малых революций (рисунок 1). Промышленная революция XIX-начала XX вв. и Первая мировая война породили волну социальных революций, которые если не перевернули, то основательно потрясли мировые устои. Вторая мировая война и послевоенное развитие экономики, исследования в ядерной и микромолекулярной физике, электронике твердого тела и пограничных явлений, создание первых промышленных вычислительных устройств дали толчок индустриальной революции, которая за четверть века подготовила почву для бурного всплеска развития информационных технологий.

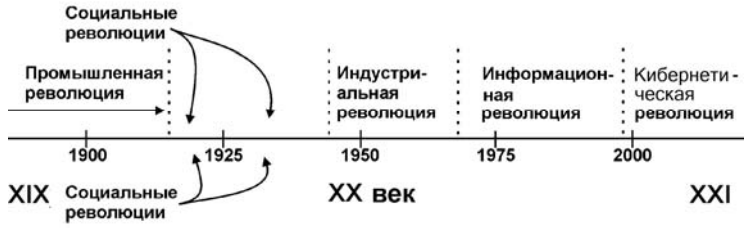


Рисунок 1 – Последовательность революций XIX-XXI вв.

Изобретение компьютера — универсального, многофункционального, электронного автоматического устройства для работы с данными и информацией — привело к тому, что компьютерная техника в современном обществе взяла на себя значительную часть работ, связанных с её обработкой, систематизацией и хранением.

В XXI в. мы наблюдаем новый сдвиг в технологиях, который проявляется в разных аспектах. Если в последней четверти XX в. подчеркивали, что развитие нашего общества находится на стадии урбанизации, индустриальной экономики, технологии массовых продуктов, то сейчас её все больше характеризуют глобализация, экономика знаний, цифровые технологии. Ранее ключевым ресурсом был капитал, сейчас — знания/информация. В распределении материальных объектов превалировали дороги и транспорт, сейчас на передовые позиции выходят

цифровые сети. Ранее фокус был на региональной сфере, сейчас — на глобальной. Факторами успеха были возможности экономии ресурсов и сокращения затрат при масштабировании производства, теперь таким фактором стала адаптивность — способность быстрого ответа в виде эффективного решения на непредсказуемые изменения [1]. При этом за последние полвека стоимость применения цифровых технологий снизилась чрезвычайно сильно в отличие от роста затрат на труд и на использование традиционных механических технологий.

Сейчас человечество делает серьезный шаг к новой реальности: кибернетическому будущему. По многим признакам мы вступили в новую фазу кибернетической революции. На рисунке 1 начало этой фазы показано в конце 90-х годов XX в. Понять суть происходящих изменений нельзя без переосмысления многих аспектов парадигмы «Что такое вычислительное устройство и что такое вычислительный процесс». В ближайшее время должны измениться традиционные представления о том, как устроен компьютер, что такое вычислительная система. Эти процессы принесут изменения в стиль программирования, в то, как будут использоваться вычислительные устройства. Переход к новой парадигме вычислений приведет, наверное, к тому, что архитектура вычислительных устройств «сдвинется» в сторону «набора одновременно работающих асинхронных моделей взаимодействующих динамических систем (функциональных элементов)» [2]. Среди новых характерных черт будущей парадигмы все более отчетливо проступают следующие: стохастичность, гибридность, асинхронность, кластерность (отсутствие жесткой централизации и динамическая кластеризация на классы связанных моделей), мультиагентность [3].

Изменения происходят не только в парадигмах управления техническими устройствами. И в менеджменте на смену идеологии, ориентированной на «культ начальства»: руководитель — «это мыслитель, стратег, учитель» и т.д., а его окружение — лица, которые нуждаются в опеке руководителя, но сами инициативы проявлять не могут, должна прийти более гуманистическая теория организации, учитывающая реальные интересы ее участников. Один из таких новых подходов разрабатывается В.А. Виттихом [4]. Это «теория интерсубъективного управления», которая противопоставляется «бюрократической теории». Теория исходит из того, что резервы повышения эффективности управления следует искать не в модернизации бюрократической машины, а в самих людях, в каждом человеке, в использовании его интеллектуальных и волевых ресурсов на фоне применения новейших технологий поиска, обработки и использования информации. Теория интерсубъективного управления по отношению к классической теории менеджмента имеет совершенно иные — в некотором смысле, противоположные предпосылки. Вместо менеджеров — профессиональных начальников всех рангов — появляются «солидарные акторы», осознающие проблемную ситуацию и на основе объективных данных и партнёрских отношений стремящиеся урегулировать её, соблюдая достигнутые договорённости и не прибегая ни к каким насильственным методам (в том числе, к административному давлению или принуждению). В качестве таких акторов могут выступать граждане, представители органов власти, бизнеса и общественных организаций, у которых, как правило, будут разнообразные и противоречивые интересы, но которые в определенный период времени могут быть связаны общими интересами в достижении общей цели.

В этой статье на основе анализа современного понимания понятий: *информация, сигналы, данные, знания и управление* – выдвигается положение о тесном соединении процессов обработки данных и управления, о ликвидации разграничительных барьеров между ними и приводятся примеры более эффективного решения нескольких «трудных» задач с существенными неопределенностями новыми методами.

1 Информация, сигналы, данные, знания и управление

В XX в. слово «информация» стало термином во множестве научных областей, получив особые для них определения и толкования. Обычно мы рассматриваем информацию как сооб-

щение о том, что что-то произошло, т.е. одна из важнейших ее черт – изменение чего-то (объекта информации). Но информация возникает у кого-то или в чем-то (субъект информации).

На самом деле два крайних термина в заголовке этого раздела неразрывно друг с другом связаны и не могут друг без друга существовать. Ценность информации определяется ее способностью «подтолкнуть» субъекта к определенным действиям, т.е. его способности на основании полученной информации сформулировать некоторое управляющее воздействие. Информация, «не подталкивающая» к действию, – бессмысленна, так же как и бессмысленны какие-то действия без лежащей в их основе информации.

Н. Винер более шестидесяти лет тому назад провозгласил начало эры новой науки «Кибернетики», одним из первых четко подметив, что «информационно-управленческая связь – это существенная часть любых явлений в живой и не живой природе» [5].

Введем для информации обозначение x, а для управления – u. Процесс принятия управленческого решения формализовано может быть записан так

(1) $u = U(x)$,

где $U(\cdot)$ – некоторая функция от x. Часто информацию x отождествляют с вектором состояний исследуемой системы. В этом случае говорят, что соотношение (1) задает обратную связь по состоянию. Реализация управления естественно влияет на информацию, способствуя новым изменениям объекта информации. Сформированное управление u поступает в систему и воздействует на состояние x, во многих случаях изменяя его.

Формализация процесса принятия решений приводит к необходимости определения понятий: сигналы, данные и знания.

Информация проявляет себя через изменения в тех или иных физических или социальных явлениях. Например, у заболевшего человека повышается температура тела. При падении дерева органы слуха фиксируют изменения в окружающих нас звуках, а глаза – изменения в отображаемой картинке. При движении подводной лодки от ее гребных винтов распространяются специфические акустические волны. При приближении самолета и попадании его в зону видимости нашего радара от него отражается посылаемая радаром электромагнитная волна. Социальные изменения проявляются через выборочные опросы, голосования и т.п. Физические и социальные явления и процессы, изменение которых можно зарегистрировать с помощью органов чувств или приборов, называются *сигналами*. Результаты регистрации называются *данными.* Осознание связей между зарегистрированными данными и информацией, а также способы выбора управляющих воздействий в зависимости от той или иной информации будем называть *знаниями*.

Например, регистрация температуры тела человека дала значение более 38,5 градусов Цельсия. Это говорит о том, что пациент болен.

Обозначим через f – сигналы и через y – данные. Схема процесса регистрации сигнала показана на рисунке 2.

Рисунок 2 – Схема регистрации сигнала (получения данных)

Если нам доступны только данные наблюдений, то процесс принятия решения – это выработка управляющего воздействия на основе зарегистрированных данных

(2) $u = U(y)$.

Законы управления такого типа называются обратными связями по наблюдениям.

На практике реальная ситуация осложняется еще и тем, что при получении данных в любом регистрационном устройстве к сигналам добавляются некоторые помехи (ошибки) *v*. Хорошо поставленный эксперимент при тщательном измерении позволяет в некоторых случаях свести ошибки *v* к минимуму: $v \approx 0$. Если первоначально «чистый» эксперимент не поставить, то стараются сделать его таковым с течением времени, т.е. $v \to 0$. В других случаях в задачах о наблюдении физических явлений часто достаточно обоснованно предполагают статистическую природу помех, но возможны осмысленные постановки задачи и при произвольных внешних помехах [6].

В работоспособных системах имеющиеся знания позволяют на основании получаемых данных *y* формировать управляющие воздействия *u*, которые или дают какой-то выигрыш или позволяют как-то скомпенсировать негативную информацию. Без базы знаний постановка задачи о выработке обоснованных управляющих воздействий оказывается почти бессмысленной. Уточнение «почти» включено, т.к. при априорном отсутствии знаний их зачастую можно приобрести с течением времени.

Совокупность накопленных знаний называют *онтологией*.

Знания в онтологию поступают как «извне» в виде постулируемых законов («откровений»), так и формируются «внутри» системы при обработке данных. Процесс извлечения знаний из данных определяет круг задач такой новой бурно развивающейся области как *Data Mining*. В контексте задач управления онтология служит своеобразной базой данных (знаний), из которой выбирается наиболее адекватная текущей ситуации функция управления $U(\cdot)$ (см. рисунок 3).

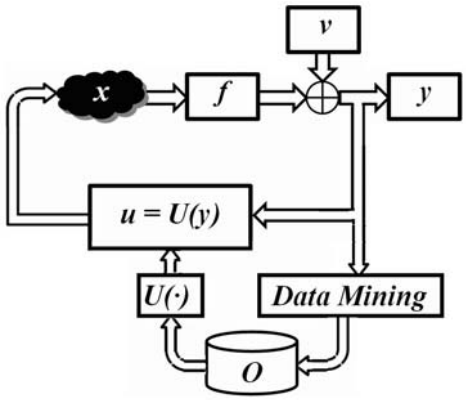


Рисунок 3 – Обратная связь по наблюдениям с помехами и выбор функции управления $U(\cdot)$

Изменение набора знаний со временем очень важная черта, позволяющая адаптироваться к изменяющимся условиям.

2 Соединение процессов обработки данных и управления

Процессы управления и накопления знаний часто являются взаимно противоречивыми. Целью управления обычно является достижение какого-то устойчивого состояния (по возможности не изменяющегося со временем). В этом состоянии «очень мало информации», и, следовательно, невозможно выявить или установить новые связи, значения и т.п. Например, о лежащем в пыли на обочине дороги камне мало что можно узнать при поверхностном осмотре. Его неизменность дает мало информации (характеристик изменений). Камень надо перевернуть, поднять, толкнуть или расколоть для получения какой-то информации. Это приводит к тому, что при синтезе законов управления часто сталкиваются с проблемой недостаточной

вариативности последовательности наблюдений. А.А. Фельдбаум сформулировал известный принцип «дуального управления»: управляющие воздействия должны быть в известной мере изучающими, но, в известной мере, направляющими [7]. Например, если цель адаптивного управления состоит в минимизации отклонения вектора состояния системы от заданной траектории, то это часто приводит к вырожденной последовательности наблюдений, в то время как для успешного проведения идентификации неизвестных параметров системы должно быть обеспечено «разнообразие» наблюдений.

Сложившаяся к настоящему времени парадигма использования вычислительных устройств базируется на исторически сложившемся разделении процессов обработки данных и принятия управленческих решений (после обработки). Основания этого разделения прослеживаются в истории развития средств вычислительной техники. Первоначально компьютеров было мало и они, занимая огромные пространства, требовали специальных условий для эксплуатации. Формировались особые вычислительные центры для объединенного решения в одном месте множества разных задач, причем до сих пор актуальным остается одно из приоритетных направлений развития – создание суперкомпьютеров. Встроенным устройствам традиционно отводилась роль или устройств для сбора данных, или устройств для реализации определенных управляющих воздействий. В некоторых случаях они использовались как регуляторы в простых контурах обратной связи. Суперкомпьютеры брали на себя выполнение задач *Data Mining*.

Но надо четко отдавать себе отчет в применимости этой традиционной парадигмы. В природе и обществе все-таки информационно-управленческие связи являются основой всех явлений и процессов. Искусственно разделяя процессы обработки данных и управления, мы существенно снижаем наши потенциальные возможности использования информационно-коммуникационных технологий.

Надо ли разделять процессы обработки данных и управления?

С начала XXI в. в теории управления заметен всплеск интереса к тематике управления в сетях, коллективному взаимодействию, мультиагентным технологиям и т.п. Это во многом связано с технологическим прогрессом. Сейчас миниатюризация и быстродействие средств вычислительной техники достигли такого уровня, что стало возможным в миниатюрных встроенных системах реального времени использовать вычислительные блоки, соизмеримые по производительности с мощными компьютерами XX в. Все чаще «простые» встроенные устройства заменяются на «интеллектуальные встроенные системы». Новые альтернативы позволяют по-новому взглянуть на *Data Mining*. В литературе все чаще появляются мысли о возрождении науки «Кибернетика» с большой буквы, о появлении «неокибернетики» [8]. Теория управления, начавшись с регуляторов механических систем в XIX в., пройдя к концу XX в. этап глубокой интеграции с цифровыми технологиями обработки данных и принятия решений, фокусируясь в XXI в. на сетях объектов, выступает «собирателем» трех основных компонент прогресса второй половины XX века: теории управления, теории коммуникаций, информатики [9].

Может ли дать какое-то новое качество в обработке данных и извлечении знаний применение кибернетической парадигмы, при которой процессы «добычи знаний» и получения информации будут учитывать неразрывную связь информации и управления (и опираться на нее)?

Да, может!!!

2.1 Эффективность замкнутых стратегий в условиях неопределенностей

Для иллюстрации положительного ответа в [10] рассмотрены несколько примеров повышения эффективности процессов обработки данных и управления при изменении парадигмы. Один из них основан на использовании замкнутых стратегий управления в условиях неопределенностей. Для объекта управления (ОУ) с входами $u(t)$ и выходами $y(t)$, и предположим,

что задано начальное состояние $y(0) = 1$, и динамика объекта при $t = 1,2$ описывается уравнением

$$y(t) + ay(t-1) = u(t-1) + v(t)$$

с неопределенностями $v(t)$ и a двух типов:

- динамические возмущения $v(t)$ неизвестны и ограничены для всех t: $|v(t)| \le 1$, но могут меняться со временем;
- коэффициент модели a также неизвестен и ограничен: $a \in [1;5]$, но он не может изменяться со временем.

Можно выбрать входы $u(0)$ и $u(1)$. Цель – минимизировать $|y(2)|$.

При сравнении качества минимаксной оптимизации

$$J = \sup_{a\in[1;5]} \sup_{|v(1)|\le 1,|v(2)|\le 1} |y(2)| \to \min_{u(0),u(1)} .$$

для двух классов допустимых стратегий управления: программных (всевозможные пары $u(0)$, $u(1)$) и замкнутых (в которых в момент времени $t = 1$ можно использовать наблюдение $y(1)$ и управление $u(0)$), получились два существенно отличающихся ответа $J_{pr}^{opt} = 8,25$ и $J_{cl}^{opt} = 2,125$.

Зависимость качества управления от задания класса неупреждающих стратегий адекватно понимается далеко не во всех публикациях. Если все параметры объекта управления известны и помехи отсутствуют, то множества программных и замкнутых стратегий управления оказываются совпадающими.

2.2 Усреднение наблюдений и рандомизация

Другой пример из [10] показывает возможность получения обоснованных оценок неизвестных параметров системы в условиях произвольных внешних возмущениях в измерениях при допущении возможности активно влиять на результаты измерений, выбирая рандомизированные управления (входы).

В случае больших и сложных систем, состоящих из похожих компонентов, в статистической механике и физике оправдал себя подход Крылова-Боголюбова, основанный на усреднении данных, активно развиваемый, начиная с работ Гиббса, основываясь на теории Лебега. Для большого количества физических и социальных явлений при отсутствии внешних воздействий выполняется гипотеза эргодичности, когда среднее пространственное значение той или иной характеристики различных компонент системы, подсчитанное в определенный момент времени, совпадает со средним временным значением одной из компонент. При этом идеи усреднения хорошо согласуются и с конструкцией многих регистрирующих приборов, принцип действия которых часто заключается в том, что они выдают в результате некоторое среднее значение той или иной характеристики за определенный интервал времени.

Если регистрирующий прибор усредняет поступающие при $t = 1,\ldots, T$ «мгновенные» сигналы $f(t)$ с помехами $v(t)$, то на выходе прибора получаем

$$y = \sum_{t=1}^{T} f(t) + \sum_{t=1}^{T} v(t).$$

При случайной природе помех $v(t)$ и известном среднем значении m в предположении об их независимости, одинаковой распределенности, конечности дисперсии, в силу закона больших чисел теории вероятностей, увеличивая T, можно добиться сколь угодно малой вероятности отличия второго слагаемого в последней формуле от среднего значения помехи. Т.е. по данным y и m можно достаточно точно определить среднее значение сигнала $f(t)$, определяемое первым слагаемым в последней формуле.

Что делать, если помехи $v(t)$ не являются случайными (статистическими)? Например, $v(t)$ – значения неизвестной функции (т.е. произвольные).

В рамках классической парадигмы обработки данных постановка задачи об оценивании среднего значения сигнала регистрируемого на фоне произвольных помех кажется абсурдной, но не из-за ее практической бессмысленности (это очень важная задача), а из-за невозможности ее как-то решить.

Для простоты рассмотрим случай скалярных наблюдений. Модернизируем постановку задачи, включив в модель наблюдений управляющее воздействие (вход) u.

Следуя парадигме неразрывности информации и управлений, будем считать, что регистрируемый сигнал f в момент времени t напрямую определяется текущим входом $u(t)$ и некоторым неизвестным параметром x (неизвестным коэффициентом усиления/ослабления входа)

$$f(t) = x \cdot u(t).$$

Модель наблюдений можно переписать в виде:

(3) $y(t)=x\,u(t)+v(t)$, $t = 1,2,\ldots,T$.

Причем мы можем:

- выбирать входы $u(t)$,
- измерять выходы $y(t)$.

При использовании $u(t) \equiv 1$ получаем традиционную задачу об оценивании неизвестного параметра x, наблюдаемого на фоне помех.

На самом деле с такими постановками задач мы сталкивались уже в школьной программе изучая физические эксперименты, в которых измеряется результат того или иного воздействия на систему. Например, прикладывая к пружине разные усилия, мы получаем разные длины растяжения или сжатия. Но полученные результаты – это не произвольные числа, они определяются характеристиками (параметрами) самой пружины (коэффициентом упругости). Кроме того, на результат влияют и конкретные условия проведения эксперимента, определяемые внешними силами, помехами и т.п. (в частности, трение).

Другой типичный пример из области исследования материалов, или недр, или разнообразных применений дистанционного зондирования показан на рисунке 4. Источник посылает в пространство некоторый сигнал: или поток частиц (электроны, alpha-частицы и т. п.), или волну той или иной природы (акустической или электромагнитной), - причем интенсивность потока можно варьировать и точно измерять (например, мерить величину «ушедшего» заряда). При встрече с мишенью либо сигнал отражается (эхо-акустика, радар и т.п.), либо его взаимодействие с мишенью порождает некоторый новый «отраженный» (может быть и другой природы), интенсивность которого потом измеряется детектором. Требуется определить неизвестный параметр x, который либо равен нулю, что соответствует отсутствию мишени с заданными отражающими свойствами, либо при положительной величине x характеризует те или иные физические характеристики: дальность до мишени, ее размер, отражающие свойства материала и т.п.

Общим в рассмотренных примерах является возможность активного влияния экспериментатора на результат наблюдений (возможность подать «входное воздействие»).

В каком максимально широком классе помех $v(t)$ все-таки реалистично попытаться получить осмысленный ответ в задаче об оценивании неизвестного параметра x?

Естественно при записи уравнения (3) предположить, что второе слагаемое в правой части $v(t)$ включает в себя все неопределенности влияющие на выход $y(t)$, которые никак не связаны с $u(t)$, т.к. $u(t)$ явно входит только в первое слагаемое в правой части (3). Такие помехи будем называть «внешними», подчеркивая их независимость от внутренних входов, подаваемых в систему. Можно ли как-то решить задачу в таком классе неопределенностей?

Поясним схему задачи, используя рисунок 5 Система является «черным ящиком» с входом $u(t)$ и выходом $y(t)$. Система характеризуется неизвестным нам параметром x (в примере с

пружиной x – это коэффициент упругости). Экспериментатор может выбирать воздействия на систему $u(t)$, которые поступают на вход «черного ящика» (в примере с пружиной мы можем растянуть или сжать ее на расстояние $u(t)$). На выходе «черного ящика» к результату добавляется внешняя помеха $v(t)$, которая никак не связана с «внутренними» процессами внутри «черного ящика» (в примере с пружиной выход с помехой – погрешности измерений, вносимые динамометром).

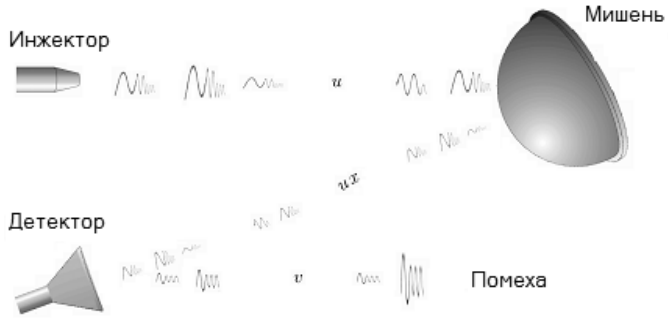


Рисунок 4 – Источник, мишень и детектор отраженного сигнала

Рисунок 5 – Модель наблюдения сигнала с помехой

Уточним задачу. *Требуется* по последовательности входов и выходов $\{u(t), y(t)\}$ определить неизвестный параметр x при отсутствии каких-либо ограничений на последовательность внешних помех $\{v(t)\}$.

Не кажется ли такая постановка задачи абсурдной?

С детерминистской точки зрения – конечно! Не может быть никакого детерминированного алгоритма, дающего хотя бы в каком-то смысле здравый ответ (кроме бессмысленного решения – вся числовая ось). Предложив в качестве ответа любое из чисел или даже какой-то интервал при конечном (или счетном) числе наблюдений, всегда можно будет подобрать такие $v(t)$, что при следующем наблюдении предложенный ответ будет неверным.

Общий алгоритм последовательного оценивания неизвестного параметра x состоит из двух шагов:

1) Выбор входа $u(t)$.
2) Оценивание параметра x на основе полученных данных $u(t)$, $y(t)$ (например, вычисление числовой оценки $\hat{x}$ или множества $\hat{X}$, содержащего x).

Если бы в условиях задачи дополнительно можно было бы предположить случайную (вероятностную) природу помех $v(t)$, то при выполнении условий закона больших чисел можно было бы говорить об оценивании неизвестного параметра x путем простого усреднения данных наблюдения.

Если наблюдения проводить также со случайной помехой, но у которой среднее значение m было бы неизвестно, то результаты усреднения отличались бы от истинного значения x, на неизвестную величину m.

Несмотря на кажущуюся абсурдность постановки задачи оценивания при произвольных внешних помехах, из практических потребностей часто ее все-таки приходится решать.

Альтернативой оказываются *рандомизированные алгоритмы, в которых выполнение одного или нескольких шагов производимых пользователем основано на случайном правиле* (т.е. среди многих детерминированных правил одно выбирается случайно в соответствии с вероятностью P) – см. рисунок 6.

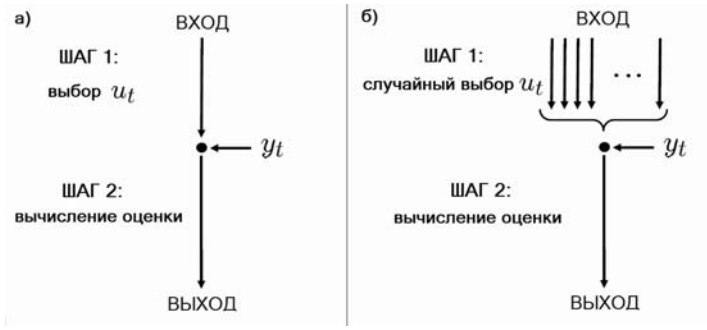


Рисунок 6– Детерминированный (а) и рандомизированный (б) алгоритмы

В зависимости от специфики конкретной задачи вероятность P или является искусственным элементом, вводимым в алгоритм для улучшения разрешимости проблемы, или в рассматриваемой системе могут присутствовать измеряемые случайные элементы. Выбор этой вероятности P является частью конструирования алгоритма.

Рассмотрим следующее правило случайного выбора для первого шага рандомизированного алгоритма последовательного оценивания неизвестного параметра x:

$$u(t) = \begin{cases} +1, & \text{с вероятностью } 1/2, \\ -1, & \text{с вероятностью } 1/2. \end{cases}$$

На втором шаге по известным парам значений ($u(t)$, $y(t)$) формируем величины $\bar{y}(t) = u(t) \cdot y(t)$. Для «новой» последовательности наблюдений справедлива похожая на исходную модель

$$\bar{y}(t) = x \cdot \bar{u}(t) + \bar{v}(t),$$

в которой $\bar{u}(t) = u(t)^2 = 1,$, $\bar{v}(t) = u(t) \cdot v(t)$.

Если $v(t)$ – внешние помехи, то естественно считать, что они независимы с нашим рандомизированным правилом выбора входов на шаге 1. Следовательно,

$$E\bar{v}(t) = Eu(t) \cdot v(t) = Eu(t) \cdot Ev(t) = 0 \cdot Ev(t) = 0,$$

т.е. «в новой модели» наблюдений задача об оценивании неизвестного параметра x, не имевшая решения, превращается при использовании случайного правила выбора входов на шаге 1 рандомизированного алгоритма в «стандартную» задачу об оценивании неизвестного параметра x, наблюдаемого на фоне независимых центрированных помех.

В [10, 11] приведены алгоритмы, обоснования и примеры численного моделирования, дающие при фиксированном малом ($T = 7$) количестве наблюдений доверительные интервалы для x с задаваемой априорно вероятностью p.

Итак, для, казалось бы, абсурдной задачи об оценивании параметра при произвольных внешних помехах, с которой принципиально не может справиться ни один детерминированный алгоритм, внесение рандомизации в процесс выбора входов дает получить вполне осмысленные результаты, позволяя говорить о вероятностной успешности рандомизированного алгоритма с некоторым параметром (вероятностью) p. Достижение успешных результатов с высокой степенью вероятности, в отличие от детерминированного случая, соответствует компромиссу: если полностью гарантированный результат получить невозможно, то лучше иметь какую-то гарантию, чем не иметь ничего.

Конечно, не во всех задачах компромисс возможен. Во многих случаях нужен ответ, гарантированный на 100%. Но, «защищая» рандомизированные алгоритмы, надо отметить, что уровень достоверности p обычно является параметром алгоритма, который может быть настроен пользователем. Параметр p ослабляет понятие детерминированной разрешимости, для которой вероятность успеха может быть только 0 или 1 – образно выражаясь, результат «черный» или «белый». Переходя к рандомизированным алгоритмам, p становится непрерывным параметром, пробегающим интервал [0; 1], задавая тот или иной оттенок «серого».

Замечание. Альтернативный вероятностный подход к решению задачи оценивания – байесовский, при котором присутствующим в системе помехам $v(t)$ априори приписывается вероятностная природа Q, но его невозможно применить при произвольных внешних помехах (в худшем случае), т. к. все выводы имеют вероятностную основу предположений о системе. По смыслу байесовский и рандомизированний подход совершенно различны с практической точки зрения. В байесовском – Q описывает вероятность того или иного значения помехи $v(t)$ по сравнению с другими, т. е. выбор Q является частью модели задачи. В отличие от этого вероятность P в рандомизированном подходе является тем, что мы искусственно выбрали и используем. P существует только в нашем алгоритме, и, следовательно, нет традиционной проблемы плохой модели, как это может случиться с Q при байесовском подходе.

2.3 Мультиагентные технологии

На практике очень часто оказывается, что классические методы решения задач либо неприменимы к реальной жизни (не трудно представить себе, что значит попытаться решить задачу управления предприятием в непредсказуемой динамичной обстановке современного бизнеса), либо они требуют огромных объемов расчетов (для которых не хватит мощности всех современных компьютеров), либо они вовсе отсутствуют. Во многих таких случаях альтернативой оказываются мультиагентные технологии, суть которых заключается в принципиально новом методе решения задач. В отличие от классического способа, когда проводится поиск некоторого четко определенного (детерминированного) алгоритма, позволяющего найти наилучшее решение проблемы, в мультиагентных технологиях решение получается автоматически в результате взаимодействия множества самостоятельных целенаправленных программных модулей — так называемых агентов [12].

Как и в двух предыдущих примерах, одной из важнейших характеристик мультиагентных технологий является отказ от традиционной для информационных технологий парадигмы разделения процессов получения информации и принятия управленческих решений. В случае сложных систем, состоящих из огромного числа взаимодействующих динамических объектов, возможность получения реальной «мгновенной картины мира» можно вообразить себе только теоретически, на практике во время сбора всей необходимой информации «картина мира» может существенно измениться. При мультиагентных технологиях компоненты системы начинают взаимодействовать и реализовывать те или иные управляющие воздействия самостоятельно, не дожидаясь «команды из центра». Оказывается, что во многих практических задачах такая парадигма позволяет эффективно управлять системами в то время, как задача о сборе всей информации может так и оставаться не решенной. В [13, 14] с помощью компьютерного моделирования это показано для задачи планирования загрузки автопарка грузовиков в реальном времени при динамических изменениях, в [15, 16] кроме иллюстративных примеров моделирования для задачи балансировки загрузки узлов динамической сети даны и теоретические оценки оптимальности применения децентрализованной мультиагентной технологии управления загрузкой.

Задачи управления и распределенного взаимодействия в сетях динамических систем привлекают в последнее десятилетие внимание все большего числа исследователей. Во многом это объясняется широким применением мультиагентных систем в разных областях, включая автоматическую подстройку параметров нейронных сетей распознавания, балансировку за-

грузки узлов вычислительных сетей, управление формациями, роение, распределенные сенсорные сети, управление перегрузкой в сетях связи, взаимодействие групп БПЛА, относительное выравнивание групп спутников, управление движением групп мобильных роботов, синхронизации в энергосистемах и др. Для многих распределенных систем, выполняющих определенные действия параллельно, актуальна задача разделения пакета заданий между несколькими вычислительными потоками (устройствами). Подобные задачи возникают не только в вычислительных сетях, но также и в производственных сетях, сетях обслуживания, транспортных, логистических сетях и др. Оказывается, что при естественных ограничениях на связи, децентрализованные стратегии способны эффективно решать такого типа задачи. Решение таких задач существенно усложняется при практическом применении из-за изменчивости структуры связей, обмене неполной информацией, которая, кроме того, обычно измеряется с помехами, а также из-за эффектов квантования (дискретизации), свойственных всем цифровым системам.

Для группы взаимодействующих агентов, обменивающихся с задержкой неполной информацией в дискретные моменты времени, при изменяющейся топологии связей для решения задачи о достижении консенсуса в [15, 16] предложен и обоснован алгоритм стохастической аппроксимации с убывающим размером шага, который позволяет каждому агенту получать информацию о состоянии своих соседей при одновременном снижении воздействия помех. Суть алгоритма – в децентрализованной балансировке. Каждый агент принимает решение о перераспределении заданий «с соседями» только на основании текущей оперативной информации о своей и их загруженности. Типичное время, за которое вся система приходит к «оптимальной загрузке» соизмеримо со временем, которое было бы затрачено на получение всей информации о загруженности сети. При классическом централизованном подходе далее надо было бы решить очень сложную задачу об оптимальном расписании, а потом еще и перераспределить задания, НО ЗА ЭТО ВРЕМЯ новые задания и изменения в окружающей среде (топологии связи) могут сделать всю эту работу напрасной.

Заключение

Призыв: «Быстрее, Выше, Сильнее» в компьютерной области трансформируется в лозунг: «Быстрее, Мощнее, Миниатюрнее»! На самом деле эти противоречивые цели стыкуются в одном: технологии приближаются к созданию «мобильного» искусственного интеллекта. Автор надеется, что детальное и широкое обсуждение новых идей и подходов, изложенных в статье, позволит «проложить» им путь к практическому использованию.

Благодарности

Выражаю признательность В.А. Виттиху и П.О. Скобелеву за плодотворные дискуссии по современным проблемам управления и «добывания» знаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-07-00250-а).

Список литературы

[1] Rzevski, G. Modelling large complex systems using multi-agent technology // In Proc. of 13th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing (SNPD2012), August 8-10, Kyoto, Japan, 2012, pp. 434-437.

[2] Нариньяни А.С. Модель или алгоритм: новая парадигма информационных технологий. Российский НИИ ИИ. 2004.

[3] Граничин О.Н. Характеристики перспективных принципиально новых компьютерных устройств и систем // Механика, управление и информатика. 2011. № 5, с. 147-161.

[4] Виттих В.А. Введение в теорию интерсубъективного управления. — Самара, Самарский научный центр РАН, 2013. — 64 с.

[5] Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. – М.: Наука. 1983.
[6] Граничин О.Н., Поляк Б.Т. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах. – М.: Наука. 2003.
[7] Фельдбаум А.А. О проблемах дуального управления // В кн.: Методы оптимизации автоматических систем. – М.: Наука. 1972.
[8] Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Неокибернетика – возможности и перспективы развития // Докл. на общем пленарном заседании 5-й науч. конф. `Управление и информационные технологии (УИТ-2008), Россия, СПб., 14–16 октября, 2008 г. СПб., 2008, с. 1-15.
[9] Андриевский Б.Р., Матвеев А.С, Фрадков А.Л. Управление и оценивание при информационных ограничениях: к единой теории управления, вычислений и связи // Автоматика и телемеханика. 2010. № 4, с. 34--99.
[10] Граничин О.Н. Обратные связи, усреднение и рандомизация в управлении и извлечении знаний // Стохастическая оптимизация в информатике. 2012. Том 8. Вып. 2, с. 3-48.
[11] Граничин О.Н. Неасимптотическое доверительное множество для параметров линейного объекта управления при почти произвольных помехах // Автоматика и телемеханика, 2012, № 1, с. 24-35.
[12] Виттих В.А., Скобелев П.О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. 2009. Т. 45. № 2, с. 84-86.
[13] Амелина Н., Лада А., Майоров И., Скобелев П., Царев А. Исследование моделей организации грузовых перевозок с применением мультиагентной системы адаптивного планирования грузовиков в реальном времени // Проблемы управления. 2011. № 6.
[14] Granichin O., Skobelev P., Lada A., Mayorov I., Tsarev A. Comparing adaptive and non-adaptive models of cargo transportation in multi-agent system for real time truck scheduling // In: Proc. of the 4th International Conference on Computational Intelligence, pp. 282-285 (Evolutionary Computation Theory and Applications, ECTA'2012, October 5-7, 2012, Barcelona, Spain).
[15] Амелин К.С., Амелина Н.О., Граничин О.Н., Корявко А.В. Применение алгоритма локального голосования для достижения консенсуса в децентрализованной сети интеллектуальных агентов // Нейрокомпьютеры: Разработка, Применение, 2012, № 11, с. 39-47.
[16] Амелина Н.О., Фрадков А.Л. Приближенный консенсус в стохастической динамической сети с неполной информацией и задержками в измерениях // Автоматика и Телемеханика, 2012, № 11, с. 6-30.

Biography

Oleg Granichin was born in 1961 in St. Petersburg, Russia. He has published 60 papers in well-known reviewed scientific journals and more than 80 articles in proceedings of conferences. In 1983 Oleg Granichin graduated from the faculty of mathematics and mechanics of Leningrad University, and in 1985 he has got PhD for his thesis "Minimax optimal and adaptive control of discrete plants". In 2001 he defended at IPC RAS (Moscow) the doctor thesis "Randomized Algorithms of an Estimation and Optimization Under Arbitrary Noises". In 2006 he was awarded the title of Professor.

УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

В.Ф. Меньшиков

Центр экологической политики и культуры России
119991, Москва, ул. Вавилова, 26, Россия
ecopolicy@ecopolicy.ru
тел: +7 (495) 952-24-23, +7 (495) 952-30-07

Ключевые слова: *безопасность, риск, устойчивое развитие, иерархия целей, принципы управления риском*

Abstract

The strategic target of the process is to secure and improve the health state of mankind against the challenges of the environment. Within the frame of this approach the level of security is defined/characterized by the size of the general risk, which consists of the such elements as ecological, socio-economic, technological and many others. Using the concept of the stable development and the hierarchy of the targets we want to formulate the principles which would bring us to more effective management of people's lives and health and preservation of the environment.

Введение: постановка проблемы

В работе рассматривается одна из актуальнейших проблем современного естествознания, а именно формирование системы о закономерностях и состояниях защищенности человека и окружающей его среды от опасностей, обусловленных хозяйственной деятельностью в процессе социально-экономического развития общества. В качестве рабочей гипотезы для решения этой проблемы предлагается использовать разработанный академиком В.А. Легасовым подход, основанный на следующем аксиоматическом суждении:

«***Безопасность*** — состояние защищенности каждого отдельного лица, общества, окружающей человека среды от опасностей, обусловленных - всеми возможными причинами (экологического, социально-экономического, техногенного и т. д. характера).»

Сформулированное в этом подходе на аксиоматическом уровне определение понятия «безопасность» однозначно определяет стратегическую цель процесса повышения безопасности: улучшение состояния здоровья человека при определенных ограничениях на изменения в окружающей его среде, позволяющих удерживать состояния экосистем в максимальной удаленности от границы их неустойчивости (от точки бифуркации). Условие же оптимальности целевой функции (показателей здоровья и функциональных характеристик экосистем) определяется из условия оптимальности распределения ограниченных ресурсов общества, направляемых на снижение существующих рисков.

В рамках такого подхода уровень безопасности определяется величиной общего риска, представляющего совокупность экологического, социально-экономического, техногенного и других видов рисков. Эта совокупность представляет системное объединение, в общем случае не является чисто арифметической, и поэтому может быть значительно выше простой суммы. Так что проблема обеспечения безопасности становится не только научно-технической, но во все большей степени социально-экономической проблемой, требующей для своего решения и учета взаимного влияния и взаимосвязи различных факторов, характеризующих развитие общества. Она требует для своего корректного решения не только идентификации и определения количественных характеристик возможных видов опасности, но и учета всей совокупности социально-экономических законов общественного развития и законов, управляющих действием общества в условиях различных видов опасности, формирования на их основе целей и со-

ответствующих им критериев безопасности, принимающих во внимание изменения предпочтений во времени.

Соответственно, безопасность любой деятельности (любой технический или промышленный проект, законодательное положение, политический акт, программа или разработка и т. д.) для каждого человека и окружающей его среды, а также для общества в целом должна рассматриваться не сама по себе, а на сбалансированной оценке выгод и опасностей этой деятельности, учитывающей все экономические, социальные, экологические последствия ее внедрения. При этом, конечно, необходимо учитывать не только интересы настоящего, но и будущих поколений.

Другими словами, при формировании принципов управления риском с целью обеспечения безопасности человека и окружающей его среды необходимо как обязательное условие учитывать, что управление риском является частью более общего процесса, определяющего стратегию развития общества. Соответственно, исследования направленные на формирование надежных и эффективных показателей уровня безопасности населения и окружающей средвы должны принимать во внимание их зависимость от всей совокупности целей соответствующих им критериев, определяющих общую стратегию развития социально-экономической системы (СЭС). Наиболее разумным способом указанной зависимости является структуризация целей развития СЭС, построение их иерархии и определение роли (уровня в этой иерархии), которую принимают на себя цели, характеризующие безопасность. Этот подход излагается ниже.

Устойчивое развитие: структуризация целей

В данной работе в качестве концепции развития общества рассматривается концепция устойчивого развития, которая является основой Декларации по окружающей среде и устойчивому развитию, выработанной и подписанной на Всемирном Форуме по окружающей среде в Рио-де-Жанейро в 1992 г. [1].

Предлагается следующий вариант иерархии целей обеспечения устойчивого развития СЭС. Цель верхнего уровня — «УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ» является исходной. Понятие «устойчивое развитие» есть сокращенная запись цели: «создание условий, обеспечивающих удовлетворение потребностей сегодняшнего дня, не подвергая способность окружающей среды поддерживать жизнь в будущем, т.е. не ставя под угрозу возможности будущих поколений в удовлетворении их потребностей».

Однако невозможно непосредственно измерить устойчивость развития и эта цель лишь очерчивает область заинтересованности. Вследствие этого в варианте иерархии целей, предлагаемом в данной работ главная цель «устойчивое развитие» разделяется на две цели более низкого уровня: «повышение качества жизни» каждого отдельного индивидуума (и, соответственно, населения СЭС в целом) и «обеспечения безопасности» человека и окружающей его среды в рассматриваемой СЭС. При этом, конечно, подцель «обеспечение безопасности» должно включать в себя (как обязательное, аксиоматическое условие) требование к сегодняшнему поколению о том, чтобы обеспечение безопасности человека, живущего сегодня, достигалось с помощью только решений, которые бы не подвергали риску способность окружающей среды обеспечить безопасность человека будущего поколения.

Далее каждая из этих двух целей подразделяются на цели еще более низкого уровня, образуя две ветви в иерархии целей. Цель «обеспечение безопасности» подразделяется на подцели - «здоровье населения» и «качество природной среды», а цель «качество жизни» на подцели - «экономика», «образование», «права человека». Таким образом, в такой структуризации главные цели являются для установления целей более низкого уровня, поскольку выполнение последних является условием достижения целей более высокого уровня.

Для целей, находящихся на нижних уровнях каждой ветви иерархии, гораздо легче сформулировать соответствующие им критерии, необходимые для оценки степени, с которой эти

цели достигаются. Эти критерии целей нижнего уровня и должны рассматриваться как средство формирования критериев целей высшего уровня иерархии.

Цели нижнего уровня, в предлагаемой иерархии целей, обладают относительно большой конкретностью и допускают относительно простой выбор критериев, характеризующих степень, с которой эти цели достигаются. В качестве критериев целей «здоровье населения» и «качество природной среды» предлагается использовать, соответственно, среднюю ожидаемую продолжительность предстоящей жизни (СОППЖ) человека и степень удаленности состояния систем от границы их неустойчивости (от точки бифуркации).

Что же касается формализации таких целей нижнего уровня в иерархии целей, рассмотренной выше, как «экономика», «образование», «права человека», то для их количественной оценки предлагается воспользоваться критериями, которые официально применяет Организация ООН по программам развития (UNDP):

- для цели «экономика»: среднегодовой доход на душу населения;
- для цели «образование»: число лет, отводимом в обществе на приобретение образования среднестатистическим человеком, которое фактически определяет уровень грамотности взрослого населения в рассматриваемом поколении;
- для цели «права человека»: индекс прав человека, который рассчитывается по специальной методике и выражается в относительных единицах в диапазоне 0-1 (0 - полное отсутствие гражданских прав, 1 - их полное удовлетворение).

Структуризация целей позволяет конкретизировать определение понятия об устойчивом развитии, сформулировать его в достаточно формализованном виде, что является необходимым условием для разработки программы действий и принятия решений в этой области. На основе данной структуризации определение термина «устойчивое развитие» дается в следующем виде: «Устойчивое развитие — развитие, обеспечивающее условия для повышения (или, по крайней мере, сохранения на существующем уровне) качества жизни каждого отдельного индивидуума и безопасность человека и окружающей его среды (общества и природной среды)».

Предложенный набор критериев — максимизация экономического благосостояния человека, обеспечение его прав, повышение его уровня образования, характеризующих достижение такой цели как качество жизни человека, и набор критериев — максимизация продолжительность жизни человека и не превышение границ устойчивости систем, характеризующих степень достижения такой цели как обеспечение безопасности человека и окружающей его среды — является достаточно полным с той точки зрения, что он дает полное представление о степени достижения основной цели — обеспечение устойчивого состояния. Эти критерии являются действенными (операциональными), так как они позволяют получить информацию, необходимую для анализа разных СЭС.

Исходя из концепции устойчивого развития и сформулированного выше варианта иерархии целей обеспечения такого развития СЭС, предлагается сформировать принципы, которые позволили бы разработать конкретные меры с целью развития реалистической и практически доступной политики эффективного управления риском для жизни и здоровья людей, а также риском для окружающей среды, обусловленным хозяйственной деятельностью.

Принципы управления риском

Предлагается в основу реализации этой задачи положить следующие принципы управления риском.

1-й принцип

Стратегическая цель управления риском — стремление к повышению уровня благосостояния общества в целом (максимизация общей ожидаемой суммы материальных и духовных благ): любая деятельность, если польза от нее для общества не превышает ущерба от связанного с ней риска, не может быть оправдана ***(оправданность практической деятельности).***

Так как благосостояние характеризуется не только наличием тех или иных благ, но и их доступностью как для общества в целом, так и для отдельной личности, и так как в определенных ситуациях реальной жизнедеятельности интересы личности могут вступать в противоречие с общественными интересами, то стратегический принцип, как обязательное условие, должен быть дополнен следующими положениями

Положение 1А. Деятельность, при которой тот или иной отдельный индивидуум подвергается чрезмерному риску, не может быть оправдана, даже если эта деятельность выгодна для общества в целом.

Положение 1Б. Члены общества добровольно соглашаются на наличие в их жизни определенного, не превышающего чрезмерного уровня риска от той или иной деятельности, внедрение которой может приводить или приводит к ущербу и выгоде для них в пределах традиционных вариаций этих показателей общественного развития. Данное положение в практической жизни соответствует понятию «социально приемлемый риск», т. е. риск, величина которого является допустимой (приемлемой) для общества на данном этапе его исторического развития. Часто его называют как «допустимый уровень риска», оправданный с точки зрения экономических, социальных и экологических факторов и с которым общество в целом готово согласиться ради получения определенных положительных результатов своей деятельности.

Положение 1В. Должны быть предприняты все возможные меры защиты каждой личности от чрезмерного риска. Затраты на меры (денежные компенсации, перемещения населения, создание защитных барьеров и т. д.) включаются в общую сумму затрат на данный проект или вид деятельности и учитываются при оценке полезности для общества в целом при реализации данного проекта или деятельности. При выборе конкретных мер защиты от чрезмерного риска необходимо в обязательном порядке учитывать мнение индивидуума, нуждающегося в такой защите.

2-й принцип

Тактическая цель управления риском - стремление к увеличению среднестатистической ожидаемой продолжительности предстоящей жизни (СОППЖ) населения, в течение которого личность может вести полнокровную и деятельную жизнь в состоянии полного физического, душевного и социального благополучия ***(оптимизация защиты)****. Это важнейший интегральный демографический показатель для любого общества.*

В соответствие с этим принципом предлагается «измерять» безопасность в единицах СОППЖ. Поскольку СОППЖ представляет собой качественный показатель (количество лет жизни), позволяющий поставить процесс управления риском на научную основу. В рамках такого подхода требуется выразить риск для населения от различных технологий или видов деятельности в виде величины сокращения СОППЖ, а выгоду от них в виде продления СОППЖ. Сопоставление этих показателей позволяет количественно оценить величину и характер изменения уровня безопасности от внедрения рассматриваемых технологий или видов деятельности, и определить, как отвечает внедряемая технология другой подцели устойчивого развития - повышению уровня безопасности населения в данной СЭС.

Замечательное определение понятия «цена» дал американский мыслитель, натуралист Генри Давид Торо: «Ценой любой вещи я назову то количество собственной жизни, которое я готов отдать за обладание ею, немедленно или в рассрочку».

Таким образом, тактической целью управления безопасностью является максимизация общей выгоды, получаемой обществом от того или иного вида деятельности, выраженной в величине увеличения СОППЖ для всех возрастов. Естественным критерием в таком процессе управления, определяющим степень достижения цели, должен выступать такой показатель социально-экономического развития, как стоимость продления жизни, позволяющий оптимизировать затраты на снижение различных видов риска.

Наконец, также как и в 1-м принципе, необходимо включить данный принцип ограничение, связанное с тем фактом, что тактической целью управления риском в рассматриваемом

подходе является стремление к увеличению ожидаемой продолжительности предстоящей жизни в обществе для среднестатистического его члена. Это ограничение можно сформулировать в виде положения:

Положение 2А. Максимизация СОППЖ в целом для общества не должна происходить за счет отдельных членов общества.

Практическая реализация этого положения сводится к уменьшению общего риска для общества в целом с обязательным условием устранения неравенства между его членами методом компенсации: если можно определить заранее, кто именно подвергается повышенному уровню риска (но не превышающему чрезмерный уровень) в результате данной деятельности, то этому лицу выплачиваться компенсация, соответствующая величине этого риска.

3-й принцип

Политика в области управления риском будет эффективной и последовательной только в том случае, если в управление риском включен весь совокупный спектр существующих в обществе опасностей и общий риск от них для любого человека и для общества в целом не превышает чрезмерный уровень.

Современная рациональная политика обеспечения безопасности может ставить целью сократить риск от различных предприятий до одного уровня. В условиях ограниченности ресурсов, разумнее уменьшить небольшой риск еще до более низкого уровня, если это легко и дешево достижимо, чем снижать более высокий риск, если это требует значительных затрат.

Важное значение в методах управления региональным риском играет проблема, связанная с учетом экологического взаимодействия между регионами. В связи с этим, была разработана концепция «энвайроментального паритета» для решения проблемы управления трансграничными рисками, связанной с поиском компромиссных решений по снижению угрозы для населения и природы того или иного региона (или целой страны) от источников опасности, обусловленных мирной хозяйственно деятельностью в соседних регионах. Показано, что в огромном количестве сложных экологических ситуаций существуют взаимовыгодные кооперативные соглашения («энвайроментальный паритет»), которые не только выгодны всем партнерам, но и являются эффективными. Существуют справедливые квоты вложений в меры безопасности для этого общего для рассматриваемых партнеров источника опасности. При этом, если какой-нибудь из регионов отступит от условий компромисса, который, конечно, является коллективным решением, то он понесет безусловные убытки: чем точнее каждый из субъектов представит исследователю, формирующему компромисс, свою информацию, тем выгоднее будет для него самого кооперативное соглашение. Возможные ошибки или ложь только снижают эффективность «энвайроментального паритета».

4-й принцип

Политика в области управления риском, как обязательное условие, должна реализовываться в рамках строгих ограничений воздействия на природные экосистемы.

Так как целью безопасности является не только защита здоровья населения, но и защита окружающей среды, то в управление риском для населения необходимо включить и требования по защите окружающей человека природной среды. С этой целью, в первую очередь необходимо определить показатели, которые бы количественно оценили состояние окружающей среды. К таким количественным характеристикам на сегодняшнем уровне наших знаний можно отнести лишь степень удаленности состояния экосистемы от границы ее неустойчивости (точки бифуркации). Необходимо отметить, что состояние экосистемы качественно определяется многими показателями и перевести их в количественную форму даже для основных параметров в данной работе невозможно. Например, необходимо было бы фиксировать число видов, составляющих экосистему, потоки углерода, кислорода, азота и других веществ, темпы образования органики (эффективность фотосинтеза) и т.д. Исходя из этого понятие границы неустойчивости введено в данной работе для дальнейшей дискуссии.

Заслуживает самого серьезного внимание подход, основанный на требовании о минимизации воздействия на объекты биосферы до пределов скорости биологической адаптации полезных растений и животных к изменяющимся условиям существования, в том числе, в определенных случаях, даже путем селекции химически устойчивых видов как крайней меры. Однако, у живой системы скорость адаптации (микроэволюции) разная у разных видов и разная у разных типов экосистем. Надо иметь в виду, что экосистема всегда в динамике, а не застывший объект. Это значит, что искомая граница или порог неустойчивости в каждый следующий момент времени будет иной, т.е. его нельзя определить в статике, как нельзя определить место электрона. Таким образом, только в виде постановочной задачи предлагается, в качестве порога вредного воздействия на экосистемы, принять такое состояние подвергающихся воздействию экосистем, при котором скорость (С1) процессов восстановления пораженных структур в экосистемах соответствует скорости (С2) деструктивных процессов, т.е. состоянию динамического равновесия (С1 = С2).

Приложение в области терминологии

Термины, использованные в статье, соответствуют стандартам, используемым в отечественной нормативной и законодательной сфере.

Безопасность. *Состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от внутренних и внешних угроз.*

Окружающая (человека) среда. *Совокупность на данный момент абиотической, биотической, социальной сред, способных совместно и непосредственно оказывать прямое или косвенное, немедленное или отдаленное воздействие на людей и их хозяйство, на животные, растительные и другие организмы.*

Природная среда. *Совокупность абиотических и биотических факторов, естественных и измененных в результате деятельности человеческого общества, оказывающих влияние на человека и другие организмы.*

Средняя ожидаемая продолжительность предстоящей жизни (СОППЖ). *Среднее количество лет для ожидаемой продолжительности жизни для группы людей, родившихся в один год, при условии, что смертность в каждой возрастной группе остаётся постоянной в будущем.*

Опасность. *Ситуация в окружающей человека среде, в которой при определенных условиях (случайного или детерминированного характера) возможно возникновение факторов, способных привести к одному или совокупности нежелательных последствий для человека и окружающей его среды.*

Риск. *Мера для количественного измерения опасности, представляющая собой векторную (т. е. многокомпонентную) величину, измеряемую, например, с помощью статистических данных или рассчитанную с помощью имитационных моделей, включающую следующие количественные показатели:*

- величину ущерба от воздействия того или иного опасного фактора;
- вероятность возникновения (частоту возникновения) опасного фактора;
- неопределенность в величинах как ущерба, так и вероятности.

Ущерб. *Фактические или возможные экономические и социальные потери:* отклонение здоровья человека от среднестатистического значения, т.е. болезнь или даже смерть; нарушение процесса нормальной хозяйственной деятельности; утрата того или иного вида собственности, и/или ухудшения природной среды, возникающие в результате каких-то событий, явлений, действий.

Управление риском. *Разработка и обоснование оптимальных программ деятельности, призванных эффективно реализовать решения в области обеспечения безопасности*

Главный элемент такой деятельности — процесс оптимального распределения ограниченных ресурсов на снижение различных видов риска с целью достижения такого уровня безопасности населения и окружающей среды, какой только возможен с точки зрения эконо-

мических и социальных факторов. Этот процесс основан на мониторинге и контроле социальной и окружающей среды.

Качество окружающей среды. *Степень соответствия состояния окружающей среды научно обоснованным потребностям человека и других живых организмов.*

Качество жизни. *Совокупность условий, обеспечивающих (или не обеспечивающих) соответствие среды жизни человека его потребностям.*

Понятие «качество жизни» в общем случае, до тех пор пока оно не будет нотифицировано, представляет собой весьма условный, субъективный показатель. Его необходимо уточнить и квантифицировать с помощью системы критериев или одного комплексного критерия, в который могут войти, например, средняя ожидаемая продолжительность предстоящей жизни, общая заболеваемость, жилищные условия, занятость, уровень доходов, образовательный уровень, возможность удовлетворения эстетических, познавательных и других культурных потребностей. Проблема состоит в выборе критериев и придании каждому из них относительного веса, что можно сделать экспертно, но лишь в свете той или иной идеологии, исходя из сложившихся в обществе стереотипов.

В связи с этим представляется важным указать на введенные ООН новые понятия, получившие в последнее время в ее официальных документах широкое использование: «Индекс развития человеческого потенциала» и «Индекс прав человека».

ООН рассматривает эти два понятая в качестве важнейших интегральных показателей («индикаторов»), характеризующих качество жизни в процессе развития общества. Так «Индекс развития человеческого потенциала» используется для сравнительной оценки бедности, грамотности, образования, средней продолжительности жизни и других показателей страны. В его основе комбинация трех показателей:

- ***здоровья (долгожительства),*** в качестве критерия которого используется средняя ожидаемая продолжительность предстоящей жизни. Долгая жизнь увеличивает вероятность для человека максимально развить свои способности и реализовать поставленные цели;
- ***знания (осведомленности),*** в качестве критерия которого используется продолжительность периода времени, отводимого в обществе на образование среднестатистического человека. Знание предоставляет человеку необходимые условия получения информации, позволяющей реализовать свой потенциал оптимальным образом, осуществить успешные экономические преобразования;
- ***уровня потребления,*** в качестве критерия которого используется валовый национальный продукт на душу населения, выраженный в паритетной покупательной способности национальной валюты.

Индекс прав человека расчитывается по специальной методике и выражается в относительных единицах в диапазоне 0 - 1: 0 - полное отсутствие гражданских прав у членов общества, 1- их полное удовлетворение.

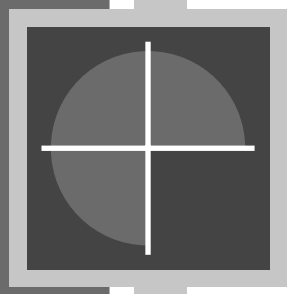
Список литературы

[1] Меньшиков В.Ф. Обеспечение экологической устойчивости для развития России / Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIV Международной конф. - Самара: СамНЦ РАН, 2012.

[2] Кузьмин И.И., Махутов Н.А., Меньшиков В.Ф. Принципы управления риском в социально-экономической системе. Анализ и оценка природного и техногенного риска в строительстве. Минстрой России. - М.: ПНИИС, 1995.

[3] Амосова Т., Азиев Р., Ягодин Г., Меньшиков В. и др. Управление риском в социально-экономических системах: концепция и методы ее реализации. Проблемы безопасности при чрезвычайных обстоятельств. Вып.11. - М.: Миннауки, МЧС, РАН, ВИНИТИ, 1995.

[4] Доклад о человеческом развитии 2011. Устойчивое развитие и равенство возможностей: Лучшее будущее для всех. - http://hdr.undp.org/en/reports/global/hdr2011/download/ru/



MODERN THEORY OF OPTIMAL CONTROL AND ITS APPLICATIONS

СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ И ЕЁ ПРИЛОЖЕНИЯ

OPTIMAL CONTROL
OF SYSTEMS WITH THE DISTRIBUTED PARAMETRES

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ
С РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ТЕОРИИ И ТЕХНИКИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Э.Я. Рапопорт, Ю.Э. Плешивцева

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: *объекты и системы с распределенными параметрами, параметризация управляющих воздействий, альтернансный метод, структурная теория распределенных систем, синтез систем модального управления, аналитическое конструирование агрегированных регуляторов, минимаксная оптимизация стационарных состояний*

Abstract

A special procedure for control action parameterization and the precise method based on it for determining open-loop optimal control algorithms for the systems with distributed parameters under the prescribed tolerance conditions for the deviation from the required final state of the controlled parameter being estimated in the uniform metric is proposed. The method uses the reduction to the problems of semi-infinite optimization, alternance properties of their solutions, and some additional information on fundamental regularities of the subject domain.

The problem of synthesizing automatic controllers for one class of linear plants with distributed parameters is considered from the general point of structural theory of distributed systems. On this basis, methods to construct control algorithms for various modifications of control actions are proposed.

The problem of analytical construction of aggregated automatic controllers for various types of control actions in systems with distributed parameters described by parabolic partial differential equations is considered. Synthesis algorithms based on the proposed forms of aggregated macrovariables are studied.

The minimization problem for deviations of the stationary state of a system with distributed parameters from a desired state estimated in the uniform metric is considered. A constructive method for its solution using a successive parameterization of control and the alternance properties of optimal spatial distributions of the controlled variable is proposed.

Введение

Широкий круг весьма актуальных в самых различных предметных областях задач управления объектами с распределенными параметрами (ОРП), описываемыми уравнениями в частных производных, интегральными или интегро-дифференциальными уравнениями, характеризуется высоким уровнем сложности и глубокой спецификой, порождаемой (в силу пространственной распределенности управляемых величин и управляющих воздействий) бесконечной размерностью пространства состояний ОРП. В настоящее время получен целый ряд фундаментальных результатов, совокупность которых можно охарактеризовать как создание и существенное развитие основ общей теории систем с распределенными параметрами (СРП) [1-6]. Тем не менее, остаются открытыми многие вопросы, связанные с разработкой конструктивных методов и техники решения конкретных задач управления СРП с учетом особенностей предметной области, от которых вынужденно абстрагируется формализм известных теоретических схем.

В настоящей работе рассматриваются некоторые аспекты развития теории управления СРП в указанном направлении.

1 Краевые задачи оптимального управления

Одной из основных проблем в теории управления динамическими системами является разработка конструктивных методик решения задачи оптимального управления (ЗОУ) по переводу системы в требуемое конечное состояние с экстремальным значением выбранного критерия эффективности в условиях заданных ограничений на управляющие воздействия и поведение управляемой величины.

Решение таких ЗОУ связано с рядом известных затруднений, возрастающих с повышением порядка дифференциальных уравнений модели объекта и приобретающих принципиальный характер применительно к бесконечномерным ОРП [1, 2].

В классической двухточечной формулировке ЗОУ ОРП типичные для приложений требования к конечному состоянию ОРП, как правило, либо невыполнимы вследствие неуправляемости объекта относительно этих состояний, либо обеспечиваются в классе технически нереализуемых управляющих воздействий [1, 2, 7, 8]. Известные приближенные методы поиска решений ЗОУ путем исходной дискретизации моделей ОРП могут привести к существенным отклонениям от характеристик оптимального процесса или оказываются неприемлемыми при высоких требованиях к точности моделирования неуправляемого ОРП [8].

Возможный способ преодоления указанных затруднений состоит в переходе к заведомо разрешимой с реализуемыми результатами ЗОУ при заданном целевом множестве конечных состояний с непустой внутренностью в бесконечномерном пространстве состояний ОРП, которое отвечает достижимым значениям практически всегда существующих в прикладных задачах и оцениваемых в соответствующей метрике допусков на отклонение от номинальной точки, фиксируемой положением правого конца фазовой траектории оптимального процесса в исходной двухточечной схеме [8, 10]. Большое значение приобретает при этом проблема построения алгоритмически точных решений подобных бесконечномерных краевых задач, свободных от недостатков приближенных методов, связанных с дискретной аппроксимацией моделей ОРП, которая, кроме всего прочего, может привести к потере сущностных физических свойств объекта, порождаемых пространственной распределенностью управляемых величин [2, 11].

Применительно к указанной выше содержательной постановке ЗОУ ОРП с правым подвижным концом траектории в целом ряде типичных модельных ситуаций оказывается осуществимой с помощью известных аналитических условий оптимальности в совокупности с дополнительной информацией о закономерностях конкретной предметной области регулярная процедура последовательной конечномерной параметризации, непосредственно определяющая программные управляющие воздействия оптимальной структуры в пространственно-временной области их определения с точностью до выбора конкретных значений вектора искомых параметров, размерность которого до однозначно определяется величиной указанных допусков [8-10, 12, 13].

Оптимальные программы компонуются при этом из отдельных участков с известным характером непрерывного изменения управляющих воздействий, претерпевающих конечное число разрывов в точках их «сшивания».

Эти точки вместе с длительностью или пространственной протяженностью программы чаще всего фигурируют в роли ее параметрического представления, приобретая тем самым очевидный физический смысл [8-10, 12].

Тем самым обеспечивается точная редукция рассматриваемой ЗОУ ОРП к соответствующей задаче математического программирования, размерность которой определяется только величинами допусков на отклонение конечного состояния ОРП от заданного в двухточечной схеме [8-10, 12].

Соответствующие формальные постановки сводят ЗОУ ОРП без каких-либо погрешностей в рамках используемых моделей к специальным задачам полубесконечной оптимизации (ЗПО) для конечного числа переменных, в роли которых выступают искомые параметры оп-

тимальных программных управлений, с бесконечным числом ограничений, порождаемых требованием принадлежности конца фазовой траектории оптимального процесса заданному целевому множеству [8-10, 12]. Алгоритмически точные решения подобных задач применительно к оценкам целевых множеств в равномерной метрике могут быть получены альтернансным методом [12, 13], распространяющим на ЗПО известные результаты теории нелинейных чебышёвских приближений. Метод базируется на специальных альтернансных свойствах вектора параметров оптимальных решений ЗПО и дополнительной информации о конфигурации отвечающего этим решениям пространственного распределения результирующего состояния управляемой величины, диктуемой закономерностями предметной области рассматриваемой конкретной задачи.

Согласно альтернансным свойствам, предельно допустимые по абсолютной величине одинаковые значения максимальных отклонений управляемой величины от заданного состояния достигаются в конце оптимального процесса в некоторых точках пространственной области ее определения, общее число которых оказывается равным числу всех искомых неизвестных в исследуемой ЗПО.

Последующая редукция данных равенств на основании дополнительных сведений о пространственной конфигурации результирующего состояния ОРП, зависящего от требуемой точности его равномерного приближения к заданному пространственному распределению, к соответствующей системе уравнений относительно указанных неизвестных, конструируемой по определенной совокупности правил, и последующее ее решение стандартными численными методами исчерпывает решение исходной ЗОУ ОРП.

Самостоятельный интерес представляет при этом возможность попутного вычисления по схеме альтернансного метода фигурирующей в роли дополнительной неизвестной предельно достижимой точности равномерного приближения пространственного распределения конечного состояния ОРП к требуемому в классе управляющих воздействий, однозначно характеризуемых вектором искомых параметров заданной размерности [8-10, 12, 13].

Описываемая схема алгоритмически точного решения краевых задач оптимального управления ОРП апробирована при поиске параметризованных сосредоточенных и пространственно-распределенных управляющих воздействий в задачах оптимизации по ряду технико-экономических критериев различных процессов технологической теплофизики [8-10, 12, 14-17].

По результатам расчета оптимальной программы может быть решена одна из основных для технических объектов задача ее автоматической отработки в замкнутой системе оптимального быстродействия с реализуемыми функциями переключения управляющих воздействий релейной формы, задаваемыми в виде линейной комбинации сигналов обратных связей по неполному измерению управляемой величины в некоторых точках области ее пространственного распределения, число которых должно быть равно числу интервалов постоянства во времени оптимального управления [8, 14].

2 Методы структурной теории распределенных систем в задачах синтеза систем автоматического управления ОРП

Центральная проблема синтеза регуляторов обладает принципиальной спецификой применительно к построению систем автоматического управления (САУ) ОРП. Возникающие здесь особенности по сравнению с системами с сосредоточенными параметрами обусловлены, прежде всего, необходимостью использования сигналов обратной связи по пространственно-распределенному выходу ОРП в целях формирования соответствующих алгоритмов управления, а реализация синтезируемых структур САУ затрудняется сложностями создания требуемых измерительных, наблюдающих и регулирующих устройств.

Большинство задач синтеза САУ для моделей распределенных систем рассматривалось на основе метода динамического программирования в линейно-квадратичных задачах аналитического конструирования регуляторов в идеализированных и реализуемых условиях соответственно полного и неполного измерения управляемых функций состояния [3, 4]. Алгоритмы управления определяются при этом решениями систем нелинейных интегродифференциальных уравнений типа Рикатти, нахождение которых сопряжено со значительными вычислительными трудностями.

Конструктивные подходы к проблеме синтеза САУ ОРП методами теории пространства состояний, пространственно-частотной декомпозиции и построения распределенных регуляторов предложены в [11, 18-21].

Эффективные регулярные методы синтеза линейных САУ ОРП могут быть получены для достаточно широкого круга объектов с различными видами управляющих воздействий на общей основе структурной теории распределенных систем, базирующейся на соответствующих обобщениях понятий передаточных функций и частотных характеристик применительно к распределенным блокам и их соединениям [7, 22].

Представление передаточных функций ОРП и распределенного регулятора в форме их разложения в бесконечный сходящийся в среднем ряд по собственным функциям линейной модели объекта, описываемой типовыми уравнениями в частных производных второго порядка, приводит к структурно-параметрическому синтезу системы управления конечным числом учитываемых временных мод управляемой величины (система модального управления (СМУ) [7, 22].

Задача синтеза системы автоматического регулирования распределенного выхода ОРП с внутренним управляющим воздействием сводится, вследствие ортонормированности собственных функций, к построению СМУ в виде совокупности независимых друг от друга автономных контуров регулирования модальных составляющих выхода ОРП с индивидуальными сосредоточенными регуляторами, объектами управления в каждом из которых являются типовые линейные динамические звенья первого или второго порядка.

Подобные системы обеспечивают заданное поведение управляемых величин в пределах всей пространственной области их определения.

Реализуемые структуры таких СМУ должны содержать, во-первых, устройства вычисления разности заданных и текущих значений регулируемых мод по оценкам состояния ОРП в реальном масштабе времени (анализаторы), и, во-вторых, блоки формирования распределенного управления по их модальным составляющим на выходах сосредоточенных регуляторов (синтезаторы).

Именно с практической реализацией синтезатора связаны основные затруднения при построении распределенного регулятора в СМУ данной структуры.

Типичной для приложений является ситуация, при которой пространственно-временные внутренние управляющие воздействия представляются в форме взвешенной суммы заданных функций пространственных координат, заранее выбираемых из условий возможности их технической реализации, а в роли весовых коэффициентов выступают искомые сосредоточенные управления [7, 22].

В таком случае синтез САУ опять сводится к построению совокупности автономных контуров регулирования отдельных временных мод управляемой функции состояния ОРП, если число регулируемых мод можно принять равным числу синтезируемых сосредоточенных управлений, и можно считать удовлетворительной точность описания всех заданных функций пространственных координат суммой такого же числа первых членов их разложений в ряд по собственным функциям модели ОРП [7, 22].

При этом структура СМУ отличается заведомо реализуемым устройством синтезатора, формирующим распределенное управляющее воздействие на входе ОРП с помощью специализированного вычислительного устройства.

При граничном управлении, распределенном по геометрической границе пространственной области, занимаемой объектом, достижимыми оказываются требуемые реализации функции состояния ОРП только на таких сечениях этой области, в пределах которых совпадают множества значений пространственных аргументов управляемой величины и управляющего воздействия [7, 22].

Системы управления распределенным выходом ОРП в пределах таких сечений опять могут быть выполнены в виде СМУ с автономным регулированием временных мод его разложения в ряд по ортогональной системе функций пространственных координат, являющихся аргументами синтезируемых граничных управлений.

Для пространственно-одномерных ОРП СМУ с сосредоточенным граничным управлением, выполненная с обратными связями по всем учитываемым модам выхода ОРП и общим для всех мод сосредоточенным регулятором, осуществляет связанное регулирование модальных переменных и обеспечивает заданное поведение управляемой величины лишь в одной заранее выбираемой любой точке в пределах заданного отрезка изменения ее пространственного аргумента.

3 Аналитическое конструирование агрегированных регуляторов

Конструктивный подход к задаче синтеза регуляторов для широкого круга типовых, в том числе, нелинейных моделей ОРП связан с переходом от управления непосредственно самими переменными состояния к управлению агрегированными макропеременными, формируемыми в виде некоторых, априори не задаваемых однозначным образом функций фазовых координат и искомых параметров обратной связи [23, 24]. В этих целях предложена процедура точной редукции типовых нелинейных уравнений в частных производных параболического типа, моделирующих поведение ОРП, к нормальной форме описания объекта бесконечной системой нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка специального вида, которая обеспечивает последующее использование технологии аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), развитой применительно к подобному представлению моделей объектов с сосредоточенными параметрами в конечномерном пространстве состояний [25, 26]. Полученная система дифференциальных уравнений бесконечного порядка может быть аппроксимирована с любой требуемой точностью ее укороченной конечномерной подсистемой.

Агрегированные макропеременные формируются в виде специальных нелинейных зависимостей от бесконечномерного вектора переменных состояния ОРП в расширенном фазовом пространстве, образуемом дополнением структуры объекта малоинерционными динамическими звеньями с «условными» управляющими воздействиями на их входах [25, 26].

В терминах макропеременных описываются уравнения создаваемых в структуре синтезируемой САУ желаемых притягивающих инвариантных многообразий, представляющих собой целевые множества в фазовом пространстве переменных состояния, на которых должны быть обеспечены требуемые показатели качества процесса управления. В итоге ставится задача аналитического конструирования регуляторов, реализующих двухэтапную организацию алгоритмов управления – асимптотически устойчивые, обладающие необходимыми свойствами движения модели объекта сначала из произвольного начального состояния к притягивающему многообразию, а затем вдоль него к началу координат фазового пространства, отождествляемому с переходом к установившемуся режиму работы САУ.

Динамика изменения макропеременных описывается дифференциальными уравнениями первого порядка, решения которых заведомо принадлежат устойчивому подсемейству экстремалей переменного в фазовом пространстве сопутствующего типичного квадратичного функционала качества.

Предлагаемые формы макропеременных, во-первых, обеспечивают субоптимальный по изменяющимся в фазовом пространстве критериям оптимальности характер процессов управ-

ления ОРП на первом из указанных этапов, удовлетворяя типичным требованиям достижения максимального быстродействия или минимизации стандартного квадратичного функционала качества, соответственно, на больших или малых расстояниях от притягивающего многообразия. Во-вторых, при этом автоматически обеспечивается учет ограничений на управляющие воздействия, и, в-третьих, формируются простейшие линейные по учитываемым фазовым координатам, асимптотически устойчивые алгоритмы пропорционального регулирования при движении к положению равновесия вдоль притягивающего многообразия.

Подстановка в уравнения движения представляемых в выбранной форме макропеременных их полных производных, вычисляемых на уравнениях предлагаемой нелинейной модели ОРП, приводит к функциональным уравнениям, разрешаемым относительно искомых алгоритмов управления с обратной связью применительно к широкому классу пространственно-временных или сосредоточенных, внутренних или граничных управляющих воздействий [26].

Предлагаемый выбор нелинейных макропеременных в большинстве случаев приводит к возможности существенного упрощения структуры агрегированных регуляторов, которая с малой погрешностью сводится к типовым системам пропорционального с ограничениями регулирования переменных состояния ОРП с коэффициентами передачи обратных связей, обеспечивающими асимптотическую устойчивость положения равновесия нелинейной замкнутой САУ [26]. В целом ряде характерных для приложений ситуаций подобные САУ могут быть построены в виде многосвязных систем регулирования конечного числа сосредоточенных выходов ОРП в некоторых точках пространственной области определения управляемой величины.

4 Минимаксная оптимизация стационарных состояний ОРП

В рассмотренных выше задачах построения САУ ОРП самостоятельный интерес приобретает малоизученная проблема определения рассматриваемых в качестве задающих воздействий технически реализуемых стационарных состояний объекта с распределенными параметрами (СС ОРП), которые обеспечивают приближение с допустимой погрешностью к требуемому пространственному распределению управляемой величины в типичных для приложений условиях неуправляемости ОРП относительно этого распределения или невозможности его точного достижения практически осуществимыми техническими средствами [27, 28].

Эта проблема имеет также большое значение с точки зрения оптимального проектирования объектов с распределенными параметрами, к основным аспектам которого, по существу, сводится отыскание реализующих подобные стационарные состояния пространственно-распределенных управляющих воздействий.

Применительно к типовым пространственно-одномерным моделям стационарного состояния ОРП параболического типа со смешанными краевыми условиями, описываемым обыкновенными дифференциальными уравнениями второго порядка по пространственной переменной, задача сводится к определению сосредоточенного граничного или распределенного внутреннего управляющих воздействий, минимизирующих оцениваемую в равномерной метрике ошибку (величину минимакса) приближения стационарного пространственного распределения управляемой величины к требуемому [27, 28].

В такой задаче может быть определен класс достижимых при граничном управлении функций, описывающих требуемые стационарные состояния объекта, и найдены оптимальные по величине минимакса значения граничного управления в случае, когда эти состояния не принадлежат указанному классу [28].

Более сложной оказывается задача минимаксной оптимизации с распределенным внутренним управлением в характерных условиях неуправляемости объекта относительно требуемого СС ОРП, в частности, по типичной причине его несогласованности с граничными условиями модели ОРП [28].

Переход от минимаксной задачи к эквивалентной задаче с интегральным функционалом качества и фазовым ограничением [29] с последующим применением стандартной процедуры принципа максимума Понтрягина приводит в условиях неуправляемости ОРП к оптимальному управлению в форме кусочно-постоянной (релейной) функции пространственной координаты, принимающей только свои предельно допустимые значения [27, 28].

Тем самым, с учетом заданных граничных условий модели СС ОРП обеспечивается его параметрическое представление с точностью до числа и координат точек переключения, а также одного дополнительного параметра, характеризующего реализуемое стационарное состояние ОРП [28].

В частности, подобная процедура фиксирует отвечающую условиям энергетического или материального баланса в стационарном состоянии объекта максимальную величину управляющего воздействия, которая обычно задается в качестве априорной информации в задачах управления динамическими режимами функционирования ОРП.

Решение параметризуемой указанным способом задачи минимаксной оптимизации СС ОРП при заданном числе точек переключения оптимального управления обладает альтернансными свойствами [12], согласно которым в данном случае точки альтернанса одновременно являются точками отражения от допустимой границы в исходной формулировке задачи с фазовыми ограничениями.

При известной форме кривой пространственного распределения управляемой величины, зависящей от числа точек переключения оптимального управления и определяемой на основании фундаментальных закономерностей предметной области, альтернансные свойства искомого управляющего воздействия сводят рассматриваемую задачу к решению известными численными методами нелинейной системы уравнений, замкнутой относительно всех искомых параметров СС ОРП [12].

Достижимая при этом величина минимакса стремится к нулю с неограниченным возрастанием числа переключений управляющего воздействия вместе с неограниченным возрастанием требуемой величины его максимума [28], и следовательно, практически можно получить лишь приближенное решение рассматриваемой задачи минимаксной оптимизации при заданной предельно допустимой ненулевой погрешности равномерного приближения к требуемому СС ОРП, или при заданной предельно допустимой величине максимума управляющего воздействия.

Заключение

Предложены и обоснованы некоторые возможные конструктивные подходы к решению ряда базовых прикладных задач оптимального управления сложными системами с распределенными параметрами с учетом специфических особенностей предъявляемых в приложениях требований и дополнительной информации о фундаментальных закономерностях предметной области оптимизируемых процессов.

Разработанный метод последовательной параметризации управляющих воздействий позволяет найти алгоритмически точные (в рамках рассматриваемых математических моделей) технически реализуемые алгоритмы оптимального программного управления объектами с распределенными параметрами в зависимости от допустимой величины погрешности равномерного приближения конечного пространственного распределения управляемой величины к заданному состоянию.

Конструктивная вычислительная технология реализации метода может быть использована применительно к решению широкого круга прикладных задач оптимизации СРП, представляющих самостоятельный интерес.

Модели и методы структурной теории распределенных систем позволяют предложить регулярные процедуры синтеза замкнутых систем автоматического управления широким кругом

ОРП применительно к управляющим воздействиям различных типов, в том числе, с учетом ограничений на характер их пространственного распределения, формируемых по заданным условиям его реализации.

Максимальными возможностями по обеспечению требуемого поведения выходной величины объекта обладают САУ с распределенными параметрами, отличающиеся совпадением областей изменения пространственных аргументов управляющего воздействия и управляемой функции состояния ОРП. В таком случае для целого ряда объектов синтез САУ сводится к построению автономных контуров регулирования амплитуд всех учитываемых гармоник разложения распределенного выхода ОРП в бесконечный сходящийся в среднем ряд по подходящей ортонормированной системе функций пространственных координат.

Применительно к описанию ОРП бесконечными системами обыкновенных дифференциальных уравнений относительно коэффициентов разложения управляемой величины в подобный ряд, на задачи синтеза САУ объектами с распределенными параметрами параболического типа с пространственно-временными и сосредоточенными, внутренними и граничными управляющими воздействиями могут быть распространены эффективные методы аналитического конструирования автоматических регуляторов в системах управления агрегированными макропеременными.

Выбор предлагаемых нелинейных зависимостей макропеременных от фазовых координат, учитывающих ограничения на управляющие воздействия и требования к переменному характеру критерия оптимального процесса управления в пределах фазового пространства системы, приводит к алгоритмам синтеза, близким к реализуемым в типовых системах пропорционального с ограничениями регулирования как для линейных, так и нелинейных моделей объекта.

Предложен алгоритмически точный метод определения технически реализуемых управляющих воздействий, обеспечивающих достижение максимальной при заданных ограничениях точности равномерного приближения к требуемому стационарному состоянию ОРП, в том числе, в условиях неуправляемости объекта относительно этого состояния. Метод использует последовательную параметризацию управляющих воздействий с помощью аналитических условий оптимальности, процедуру точной редукции к задаче минимаксной оптимизации и специальный способ ее решения, базирующийся на альтернансных свойствах искомых экстремалей.

Полученные результаты апробированы при решении широкого круга задач управления процессами технологической теплофизики.

Список литературы

[1] Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1965.

[2] Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1975.

[3] Сиразетдинов Т.К. Оптимизация систем с распределенными параметрами. М.: Наука, 1977.

[4] Дегтярев Г.Л., Сиразетдинов Т.К. Теоретические основы оптимального управления упругими космическими аппаратами. М.: Машиностроение, 1986.

[5] Лурье К.А. Оптимальное управление в задачах математической физики. М.: Наука, 1975.

[6] Лионс Ж.-Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными. М.: Мир, 1972.

[7] Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2005.

[8] Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2009.

[9] Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Алгоритмически точный метод параметрической оптимизации в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // Автометрия, 2009, т.45, №5. С. 103-112.

[10] Плешивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я. Метод последовательной параметризации управляющих воздействий в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // Известия РАН. Теория и системы управления, 2009. №3. С. 22-33.
[11] Бутковский А.Г. Структурная теория распределенных систем. М.: Наука, 1977.
[12] Рапопорт Э.Я. Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации. М.: Наука, 2000.
[13] Рапопорт Э.Я. Альтернансный метод в задачах полубесконечной оптимизации / В сб. «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.
[14] Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. М.: Металлургия, 1993.
[15] Rapoport E., Pleshivtseva Yu. Optimal Control of Induction Heating Processes. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2007.
[16] Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012.
[17] Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление нелинейными объектами технологической теплофизики // Автометрия, 2012. Т.48. №5. С. 3-13.
[18] Рей У. Методы управления технологическими процессами. М.: Мир, 1983.
[19] Андреев Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами. М.: Наука, 1976.
[20] Коваль В.А. Спектральный метод анализа и синтеза распределенных управляемых систем. Саратов: СГТУ, 1997.
[21] Першин И.М. Синтез систем с распределенными параметрами. – Пятигорск, 2002.
[22] Рапопорт Э.Я. Структурно-параметрический синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами // Изв. РАН. Теория и системы управления, 2006. №4, с. 47-60.
[23] Колесников А.А. Последовательная оптимизация нелинейных агрегированных систем управления – М.: Энергоатомиздат, 1987.
[24] Колесников А.А. Синергетическая теория управления. –М.: Энергоатомиздат, 1994.
[25] Рапопорт Э.Я. Управление макропеременными в системах с распределенными параметрами // Тр. Международной мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2010). Пленарный доклад. С.Петербург: ОАО «Концерн «Электроприбор», 2010. С.1-8.
[26] Рапопорт Э.Я. Аналитическое конструирование агрегированных регуляторов в системах с распределенными параметрами // Известия РАН. Теория и системы управления, 2012. №3. С. 38-54.
[27] Рапопорт Э.Я. Управление стационарными состояниями в системах с распределенными параметрами // Материалы IV Всероссийской мультиконфекренции по проблемам управления (МКПУ-2011). – Москва – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2011. Т.2. С. 126-128.
[28] Рапопорт Э.Я. Минимаксная оптимизация стационарных состояний в системах с распределенными параметрами // Известия РАН. Теория и системы управления, 2013, №2. С. 3-18.
[29] Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления. М.: Наука, 1986.

COUPLED ELECTROMAGNETIC AND HYDRODYNAMIC CALCULATION OF FREE SURFACE DYNAMICS AND TURBULENT FLOW FOR INDUCTION MELTING APPLICATIONS

S. Spitans[1,2], E. Baake[1], A. Jakovics[2]

[1]Leibniz University of Hannover, Institute of Electrotechnology
30167, Hannover, Wilhelm-Busch-Str. 4, Germany
spitans@etp.uni-hannover.de, baake@etp.uni-hannover.de
phone: +49 (0) 511-762-5116, +49 (0) 511-762-3248, fax: +49 (0) 511-762-3275

[2]University of Latvia, Laboratory for Mathematical Modelling of Environmental and Technological Processes
LV-1002, Riga, Zellu Str. 8, Latvia
Andris.Jakovics@lu.lv
phone: +371 6703-3780, fax: +371 6703-3781

Key words: *numerical simulation, EM induction furnace, EM levitation, turbulent flow, free surface*

Abstract

За счет внешнего сопряжения рассчетных программ *ANSYS Classic*, *ANSYS CFX* и *ANSYS Fluent* была реализована численная модель для расчета ЭМ индуцированного течения со свободной поверхностью в индукционных печах. Модель адаптирована к случаю ЭМ левитации и обобщена на трехмерный случай с LES описанием турбулентности.

Расчитанные стационарные формы свободной поверхности сравнены с результатами других моделей и экспериментальными измерениями в классических индукционных печах и установках ЭМ левитационной плавки, посчитанная динамика сопоставлена аналитической оценке периода колебаний свободной поверхности расплава в индукционной печи с тиглем.

Модель применена для поиска конфигурации ЭМ поля в установке левитационной плавки, при которой возможна левитация образцов большей массы. Результаты расчета левитации расплава в горизонтальном и перпендикулярном ЭМ поле выявили характерные особенности процесса и оказались в хорошем соответствии с экспериментом.

Introduction and former research

Induction furnaces that ensure contact less control of EM stirring, molten metal free surface and temperature are widely applied in metallurgical industry. Requirements for the free surface shape and behavior are dedicated by the different tasks of particular technological process. Meanwhile, the dynamics of free surface might be complicated by the reciprocal interaction between free surface shape, EM field and flow pattern, as well as notably unsteady due to the switch between the furnace power regimes, mean flow instability and turbulence.

Since free surface control is significant for processing of metallic materials, the development of models that consider free surface dynamics remains relevant.

Advanced multiphysical processes like energy and mass transfer, crystallization and homogenization of alloying particles are calculated nowadays in 3D with fixed hydrostatic steady free surface shape and précised LES turbulence [1].

Free surface dynamics of EM levitated melt, flow and energy transfer in 2D consideration, as well as crystallization processes with free surface behavior in EM induction furnaces were successfully simulated using simplified two-parameter turbulence models [2].

The results of 3D numerical calculation of liquid droplet dynamics in a high DC magnetic field were published recently [3].

However, at the present moment there is no approach developed for 3D calculation of multi-physical processes in EM induction equipment with consideration of free surface dynamics and application of LES description for turbulent flow. The previous investigations revealed that in case of ICF with two characteristic mean flow vortexes only the LES model gives comparable results to experimental measurements [1].

The free surface oscillation period in axisymmetric ICF is estimated analytically [4]. In this simplified case the Lorentz force is considered radial and constant and the typical oscillation period T is fully dependent on the crucible geometry (1)

$$T_{theor} = 2\pi r_0^{0.5} \left(\lambda_1 \cdot g\right)^{-0.5} \cdot \tan\left(\lambda_1 \cdot h_0 / r_0\right), \quad (1)$$

where r_0 is crucible radius, h_0 is initial filling and $\lambda_1 = 3.83$ - Bessel function J_1 solution.

The results of eq. (1) validation by comparison to experimental data exposed a good agreement for the case of small amplitude oscillations [4].

1 Model formulation

1.1 Model assumptions

Due to harmonic EM field and induced currents, the Lorentz force can be decom-posed into a steady and harmonic part that oscillates with double frequency

$$\vec{f}_{Lor} = \left\langle \vec{f}_{Lor} \right\rangle + \vec{\tilde{f}}_{Lor} \cdot \cos\left(2\omega t + \varphi\right), \quad (2)$$

where ω is an angular frequency of EM field and φ is a phase.

Because of greater inertia times of melt in comparison to the EM field timescale ($\omega/(2\pi) > 50$ Hz), only the steady part of the Lorentz force is taken into account.

Let us consider the non-dimensional frequency $\hat{\omega}$ that shows the relation between the induced and external EM field, and magnetic Reynolds number Re_m that gives the ratio of the flow generated and external EM field

$$\hat{\omega} = \omega \sigma \mu_0 r_0^2 \text{ and } Re_m = \sigma \mu_0 r_0 v_0 . \quad (3)$$

Combining $\hat{\omega}$ and Re_m it can be shown that in typical case of induction furnace

$$\hat{\omega} / Re_m = \omega r_0 / v_0 >> 1, \quad \omega / \left(2\pi\right) > 50 \text{ Hz}, \quad r_0 \approx 1 \text{ m}, \quad v_0 \approx 1 \text{ m/s} \quad (4)$$

generated EM field by the flow is insignificant in comparison to induced one.

Assuming no free charge in the system and neglecting displacement currents (no EM wave radiation) the reduced Maxwell equation system in addition with simplified Ohms law (no EM field generation by the flow) is used for harmonic analysis in *ANSYS Classic* and the Lorentz force distribution in melt at particular instant free surface shape is obtained.

In the HD part of calculation the Navier-Stokes equation for incompressible fluid is solved in *ANSYS Fluent*. In typical cases of ICF the Reynolds number

$$Re = r_0 v \rho / \eta > 10^3 \quad (5)$$

indicates on developed turbulent flow, thus k-ω SST or LES turbulence is used.

Volume of Fluid (VOF) numerical technique is applied for calculation of two-phase flow dynamics. In VOF technique the phase distribution is represented with a scalar volume fraction field $F(x_i, y_i, z_i, t)$. In particular case, $F = 1$ when mesh element contains only primary phase (melt) and $F = 0$ when element contains secondary phase (air). When phase surface crosses element - $0 < F < 1$. For phase dynamics additional transport equation is solved

$$\partial F / \partial t + \vec{v} \cdot \nabla F = 0 \quad (6)$$

and free surface is reconstructed as isosurface of $F = 0.5$.

Volume density of surface tension force is calculated as

$$\vec{f}_\gamma = -\gamma \left(\nabla \cdot \vec{n}\right) \vec{n} \delta_\gamma , \quad (7)$$

where γ is surface tension coefficient, $\vec{n}$ is free surface normal and δ_γ is Delta function that ensures that surface tension force is located only at free surface.

1.2 Model technical implementation

Calculation of free surface dynamics of EM induced metal flow is arranged by means of *ANSYS Classic* for EM calculation, *ANSYS Fluent* for two-phase flow calculation, *ANSYS CFX* for post-processing and external coupler - a batch file.

Initial free surface shape of molten metal, as well as every instant shape obtained with HD calculation is written into a file. This file contains free surface keypoint (KP) numbers, KP coordinates and series of KP number sequences that indicate the order of free surface KP connection for definition of elementary polygons.

Transferring free surface KPs and elementary polygons from *CFX-Post* to *ANSYS Classic* a self written filtering procedure is performed in order to avoid generation of degenerate surface polygons that have great edge length ratios and cause problems in *ANSYS Classic* volume mesher. Hence, filtered free surface consisting of elementary triangular non-degenerate areas is obtained and the finite element mesh for EM problem is constructed.

Then the distribution of harmonic EM field is calculated for the fixed free surface shape. The coordinates of alloy mesh element centroids, as well as the values of Lorentz force density components, are retrieved and written into a file.

In the beginning of the transient HD calculation the Lorentz force density is interpolated on the *Fluent* finite volume mesh and used as mechanical momentum source in two-phase flow equations. Then the calculation of unsteady flow is performed for sufficiently small time interval for which the slight change of free surface shape is insignificant for the Lorentz force distribution.

Unphysical air acceleration due to inevitably diffused interface in VOF formulation is damped by regular air velocity reinitialization in a small distance from the melt free surface. Such technical trick allowed to ensure a stable calculation of free surface dynamics for the case of highly pronounced EM skin-effect.

By the end of HD calculation a new transient free surface state is obtained and written into a file. The recalculation of Lorentz force distribution upon the new free surface shape is performed further and the repeat of the whole calculation loop ensures fully automatic free surface dynamics computation.

2 Model verification

2.1 2D calculation of steady state free surface in ICF

The first verification of developed numerical approach is performed by comparison between a steady state meniscus shape experimental measurements in big laboratory scale ICF [1], [5] our 2D calculation results and results of 2D steady simulation of O. Pesteanu [6] (fig. 1, a).

Distribution of the Lorentz force (0 - 0.1 MN/m^3), steady flow (0 - 25 cm/s) with characteristic two torroidal vortex and calculated meniscus shape in comparison to experiment [1] and 2D calculation [6] proves a good agreement obtained.

The weak point of this verification is insignificant meniscus height in comparison to initial filling. Imprecision in geometry or material properties might lead to insensible deviations of meniscus shape in respect to initial filling that in the scale of meniscus height can reach several times.

Hence, experimental measurements of meniscus heights above initial filling (by E. Baake) in small laboratory scale ICF [5] were used for the next verification of model. Due to the smaller furnace size and greater inductor turn linear density it was possible to achieve greater power densities

that ensured prominent melt squeeze by the EM field and greater meniscus heights in respect to initial filling.

Calculated quasi steady flow pattern (0 - 55 cm/s) and Lorentz force density distribution (0 - 2.5 MN/m^3), as well as meniscus shape in comparison to the experimental data of meniscus height above initial flat free surface are shown in Figure 1, b-d. Experimental measurements are marked by the ticks, while the ticks vertical lines correspond for the measurement errors due to the turbulence and mean flow instability that caused free surface fluctuations.

The calculated meniscus is in good agreement with experiment and obtained discrepancies are below the measurement error. Regardless of meniscus heights are comparable to initial filling these experiments are unable to show the agreement between the real and calculated meniscus shape. Therefore, experimental measurements of highly pronounced meniscus shapes were used for the further model verification.

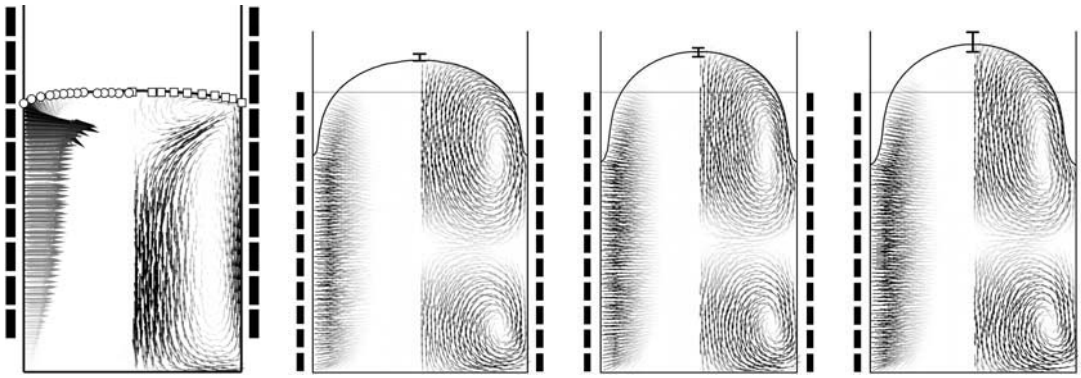


Figure 1 – Lorentz force distribution (left), steady flow (right) and meniscus shape obtained by 2D model in comparison to (a) - experimental measurements [1] (circles - on the left) and calculation [6] (squares - on the right) in big ICF and (b), (c), (d) - experimental measurements of meniscus heights (ticks) above initial filling (horizontal line) in small ICF at three different power regimes

2.2 Quasi 3D calculation of steady state free surface shape in IFCC

Experimental measurements of aluminum melt free surface shape in industrial scale IFCC were used [5], [7]. The furnace model consisted of copper crucible wall divided on 26 sections with a short circuit ring in the lower part, unsectioned copper bottom and copper inductor with five turns (Figure 2, a).

On account of the symmetry of setup the EM calculation was performed only for one section considering azimuthal inhomogeneity of EM field due to the sectioned crucible (Figure 2, b). Air gap of 1 mm was ensured between the melt, the bottom and the crucible walls due to the great electrical resistivity of the skull that appears in the contact regions between the melt and water-cooled crucible.

Meanwhile, the HD calculation was performed on a mesh with one element resolution of section in azimuthal direction that ensured azimuthal averaging of the Lorentz force for the 2D axisymmetric approximation.

The comparison between the measured [7] and calculated free surface shapes of melt in IFCC at different initial fillings and power regimes revealed a fine correlation between the model prediction and experiment (Figure 2, c-g). Measured and calculated free surface profiles, as well as Lorentz force distribution and velocity patterns sketch the good agreement for performed comparison and approve accuracy of developed numerical approach.

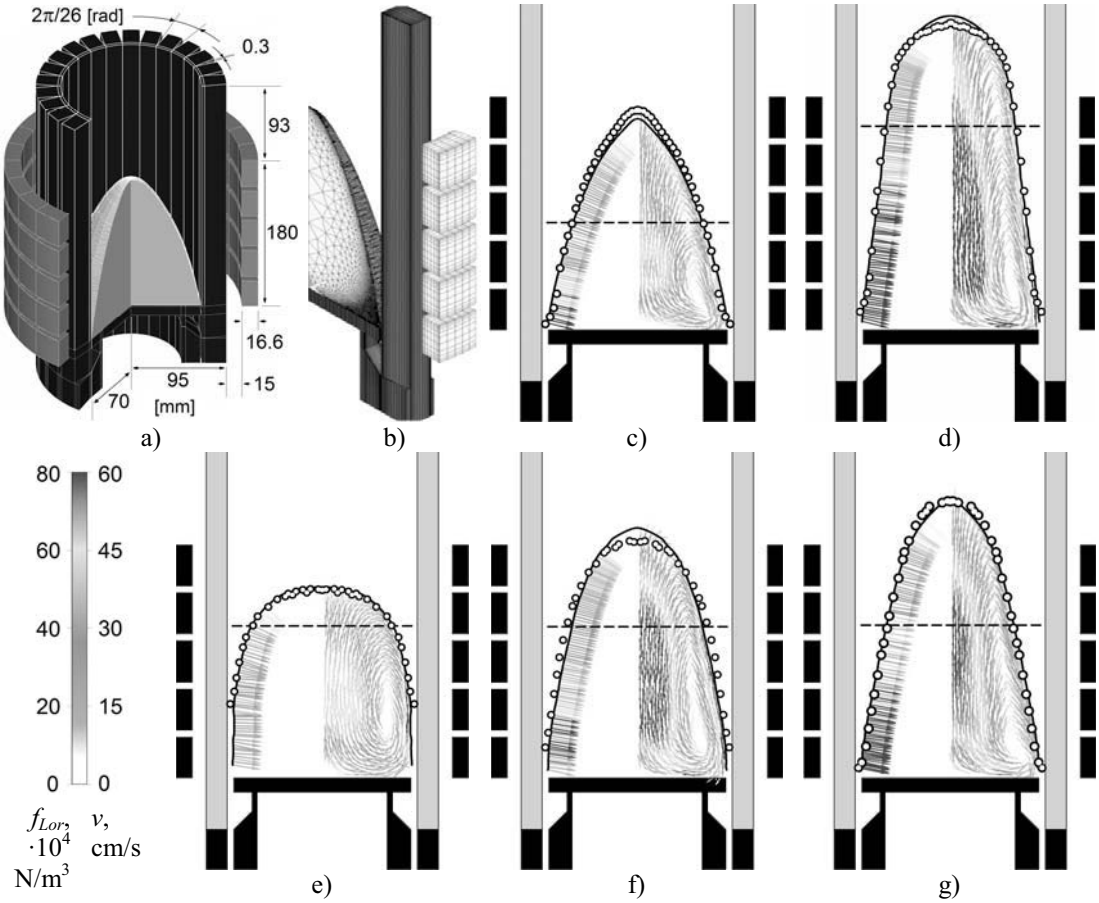


Figure 2 – Geometry of IFCC with sectioned crucible [7] (a) and mesh for EM calculation (b). As well as measured (points) [7] and calculated (bold line) steady free surface shapes, Lorentz force distributions (on the right) and steady flow patterns (on the left) for different initial fillings (dashed line) and power regimes

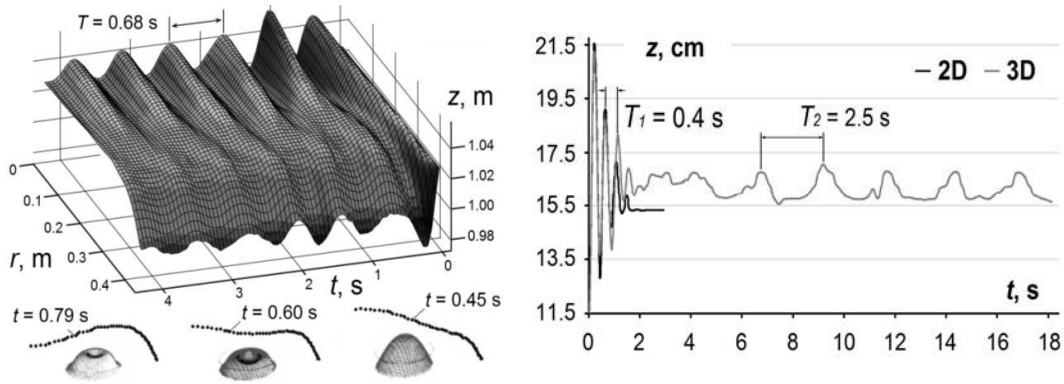
2.3 Analytic verification of free surface oscillation period in ICF

At the moment no experimental data is available for validation of calculated free surface dynamics in ICF, however, numerical results can be compared to analytical estimation of small amplitude free surface oscillations (1) [4].

For this purpose an industrial type ICF adopted from [4] with crucible that is already filled with molten aluminum is considered and it is assumed that at initial time moment of t = 0 s the furnace instantly reaches its operating state.

The dynamics of free surface profile sketches free surface regular oscillations and proves that the discrepancy between the numerically obtained oscillation period T_{calc} = 0.68 s and analytical approximation of small deviations T_{theor} = 0.676 s is less than 1%. Moreover, the calculated instant free surface states are in good qualitative agreement with calculation [4] (Figure 3, a).

For the further validation big ICF from [1] is considered. It is assumed that cylindrical crucible is filled with melt (zero velocity and flat free surface) and at t = 0 s inductor is instantly fed with AC current of I_{ef} = 5 kA.

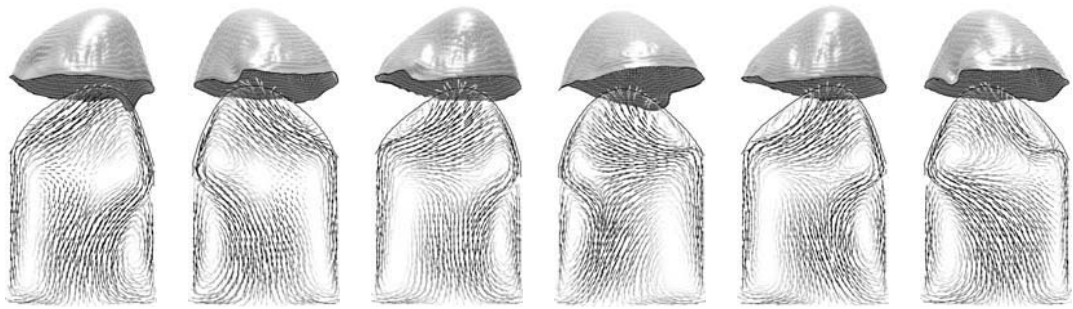


a) b)

Figure 3 – (a) - 2D calculation results for free surface profile dynamics in industrial type ICF and meniscus shape comparison to calculation [4]; (b) - free surface point oscillations along cylindrical crucible z axis obtained with 2D and 3D models in big ICF with I_{ef} = 5 kA

The first 2 s of flow calculated with 2D and 3D models (Figure 3, b) indicate on similar behavior of free surface point oscillations on the symmetry axis. Moreover, the period of these damping free surface oscillations (T_1 = 0.4 s) is in good agreement with analytical estimation (T_{theor} = 0.39 s) according to (1) [4].

The next 4 s correspond for the flow transition to a steady state and approxima-tely from t = 6 s the developed turbulent flow starts to oscillate with periodical reallocation of torroidal vortexes. Free surface shape, EM field and melt flow interaction leads to meniscus staggering with a period of T_2 = 2.5 s (Figure 3, b).



t = 10.2 s t = 12.3 s t = 13.9 ms t = 15.4 s t = 17.4 s t = 19.8 s

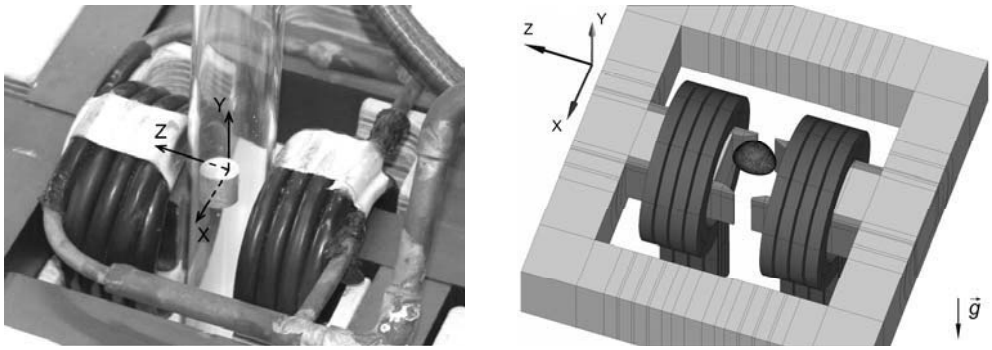
Figure 4 – Instant flow patterns (0 - 0.75 m/s) and free surface shapes obtained with 3D calculation for the case of big ICF operating at I_{ef} = 7 kA

Higher meniscus height and maximal velocity values, as well as the same low frequency quasi steady state free surface oscillations, are obtained for the case of greater inductor current I_{ef} = 7 kA in big ICF (Figure 4).

Model accuracy for the free surface small amplitude oscillations has been proved. Investigations of meniscus low frequency oscillations at a quasi steady state regime in ICF form further plans of research.

2.4 3D calculation of steady state free surface shape in single-frequency EM levitation melting furnace

The laboratory scale single-frequency EM levitation melting furnace with a pair of water-cooled coaxial inductor coils and a ferrite yoke is considered [6]. Quartz tube is placed in the air gap between yoke ends and inductor coils in order to prevent the unexpected contact between the molten metal and furnace parts. For particular experimental configuration the isosurface of magnetic induction is saddle-shaped with local minimum at $z = 0$ along z axis and local maximum at $x = 0$ along x axis. Hence, the position of EM levitated sample is unstable and it is pushed to the quartz tube wall (Figure 5, a). In order to stabilize the sample on the y axis four magnetic material teeth are introduced along yoke ends (Figure 5, b).



a) b)

Figure 5 – EM levitation of solid aluminum cylinder that touches quartz tube walls in EM levitation melting setup without additional magnetic material teeth [6] (a) and model of modified setup with introduced magnetic material teeth and stabilized molten aluminum (b)

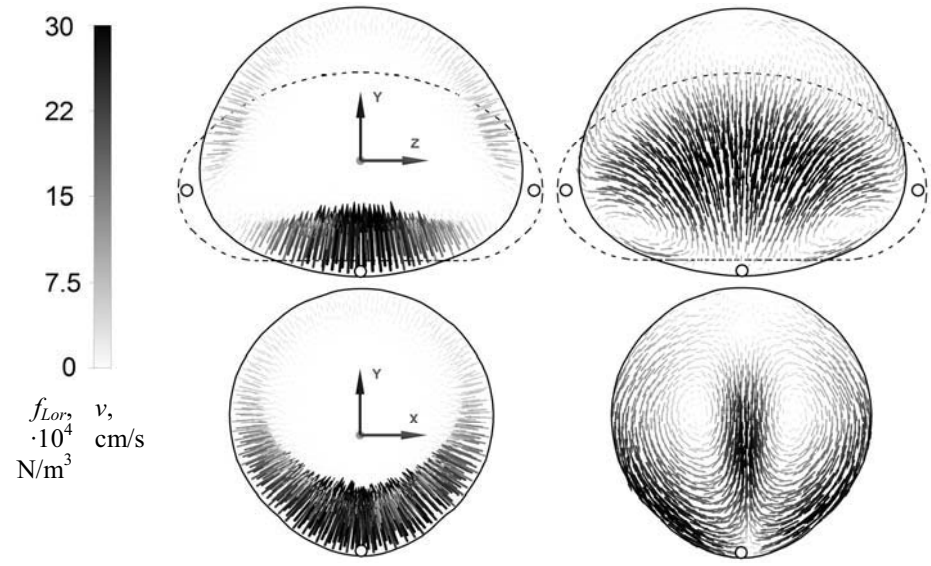
In the beginning of calculation the drop is given a spherical shape and zero velocity. It is placed a few millimeters above its experimentally observed state.

The comparison between 3D calculation results, experimental measurements [6] and 2D steady calculation [6] are presented in Figure 6. It can be noticed that droplet shapes obtained with both models are in good agreement with experiment. Lorentz force distribution and steady flow pattern on cross-sections illustrate the quasi steady state in 3D calculation of EM levitation (Figure 6).

The qualitative comparison between experiment photo [6] and picture of numerical model also reveals good agreement for the droplet shape (Figure 7).

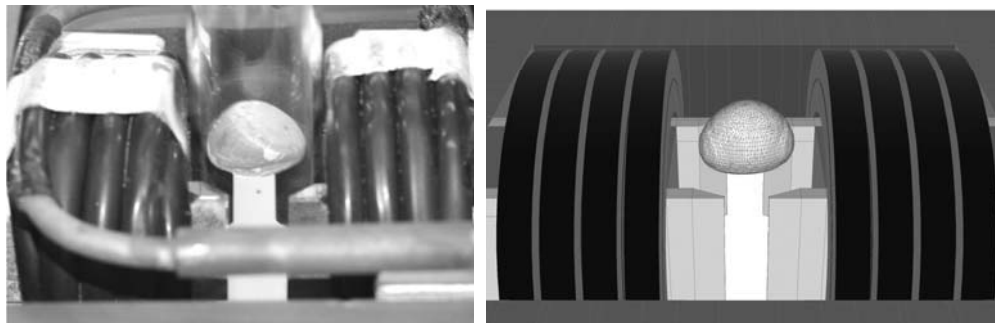
The nature of the droplet shape is analyzed. Alternate current in inductor generates alternate EM field that due to the great magnetic permeability of ferrite is mainly concentrated in the yoke. In the air gap region magnetic field lines spread and due to the skin effect flow around conductive droplet from one yoke end to another. In the regions where magnetic field lines separate at the surface of the drop (singularity regions) the minimum of Lorentz force is expected due to the small magnetic field component parallel to the free surface. Meanwhile, maximum of Lorentz force is obtained at the bottom of the drop due to the greater field intensity and dominating field component along free surface. The following Lorentz force distribution contributes to the stretching of the drop along magnetic field lines. In some time curvature radiuses of droplet singularity regions become small enough and growing contribution of surface tension effects will stop the droplet stretching.

For the greater masses of levitated droplets the particular single-frequency horizontal EM field will contribute to the droplet shapes that are stretched along EM field lines. In the meantime, the length of the droplet is limited due to the diameter of quartz tube, distance between inductor coils or yoke ends.



(a) (b)

Figure 6 – 3D calculation results for (a) - Lorentz force distribution, (b) - steady flow pattern and free surface shape (bold line) in comparison to 2D calculation [6] (dashed line) and experimental measurements (circles)



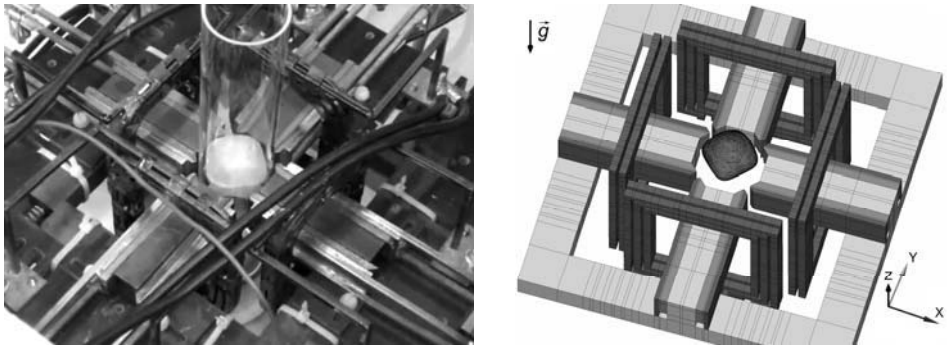
a) b)

Figure 7 – Qualitative comparison between (a) - experimentally observed [6] and (b) - numerically simulated levitation in single-frequency EM field

3 Model application for EM levitation scale-up

In order to increase the EM levitated droplet weight, it is considered to install additional orthogonal horizontal EM field by means of the technical realization presented in Figure 8. The modified setup consists of two separate pairs of water-cooled coaxial inductor coils with orthogonal axis orientation that generate horizontal and perpendicular EM fields. In order to obtain greater magnetic induction in the region of levitating droplet the EM field is conducted by the yoke ends and looped in the outer yoke. Magnetic material teeth are arranged along yoke ends in order to redistribute the EM field and stabilize molten metal sample on z axis.

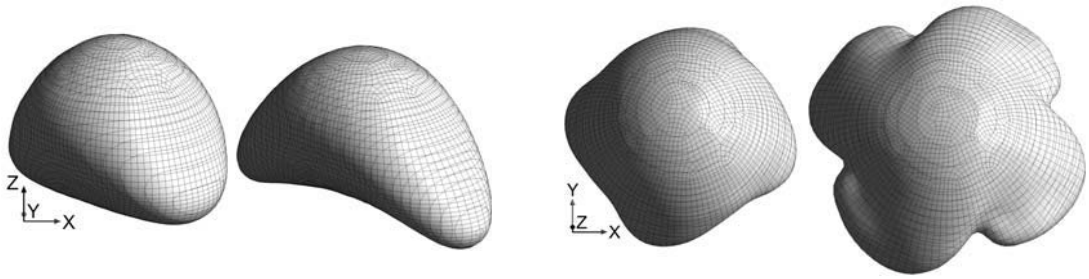
In the beginning of simulation the molten aluminum droplet (m = 33 g) has a spherical shape and zero velocity. Both inductor coil pairs are fed with an alternate current of the same frequency and two marginal cases are considered: the phase shift between coaxial coil pairs is $\varphi = 0$ and $\varphi = \pi/2$.



a) b)

Figure 8 – (a) - experimental installation [6] and (b) - numerical model of EM levitation melting setup with two orthogonal horizontal EM fields

When the phase shift between coaxial coil pairs is $\varphi = 0$ the generated EM field has only one dominant component along $x = -y$ which determines the droplet stretching in the same direction (Figure 9, a). The simulation shows that for increased droplet mass the length of stretched droplet is also enlarged and curvature radius of two singularity regions reduced, because the melt leakage in these regions is still prevented mainly by the surface tension. This leads to an undesirable situation when the droplet touches the wall of quartz tube.



t = 20 ms t = 35 ms t = 38 ms t = 70 ms

a) b)

Figure 9 – Dynamics of molten aluminum shape in two-frequency EM levitation melting setup when $f_1 = f_2$ and a phase shift between orthogonal inductors is $\varphi = 0$ (a) and $\varphi = \pi/2$ (b) (clockwise rotational field)

In the second case, when the phase shift between coaxial coil pairs is $\varphi = \pi/2$ the clockwise rotational EM field is obtained. Despite the azimuthal component of induced Lorentz force is small in comparison to radial and axial components the velocity of flow increases rapidly and at t = 70 ms azimuthal velocity already reaches the value of v = 1.5 m/s at free surface. With such rapidly increasing rotation due to the centrifugal force the droplet radius in xy plane grows and it leads also to undesirable contact between the droplet and quartz tube wall (Figure 9, b). The droplet gains such great rotational velocity because it starts to rotate as a solid body and during this rotation it loses momentum only because of friction with air that has several magnitudes lover viscosity and density. Meanwhile, when there is no sensible azimuthal Lorentz force component the flow can have azimuthal velocity comparable to the radial and axial velocity components that are limited due to the molecular and turbulent viscosity of liquid metal.

In order to levitate greater charge mass the EM fields of two non-interacting frequencies f_1 and f_2 must be applied for the case of setup presented in Figure 8 [6].

3D numerical results of the Lorentz force and steady flow on cross-sections of the drop in two-frequency EM levitation furnace are obtained (Figure 10).

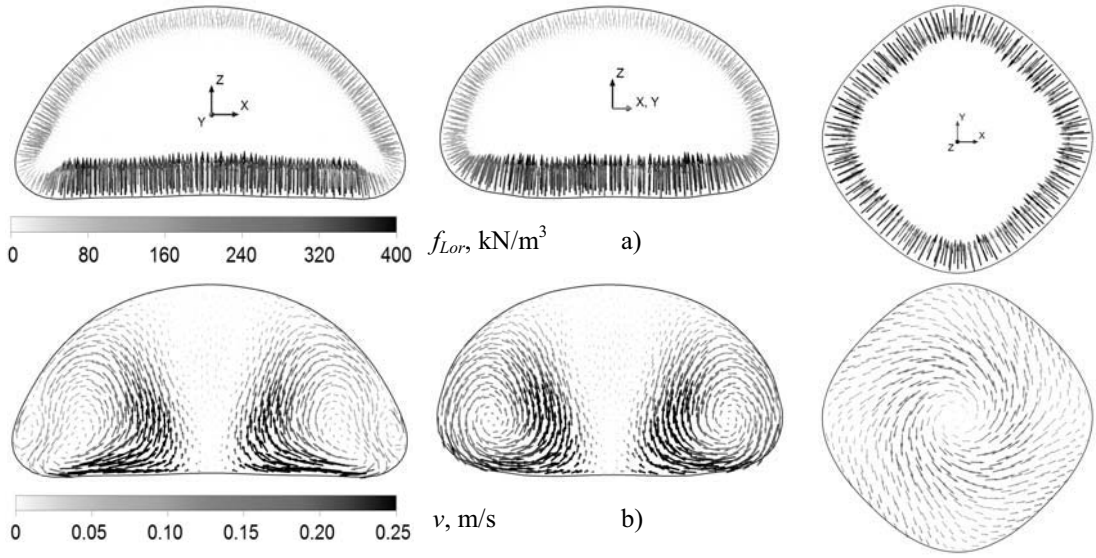
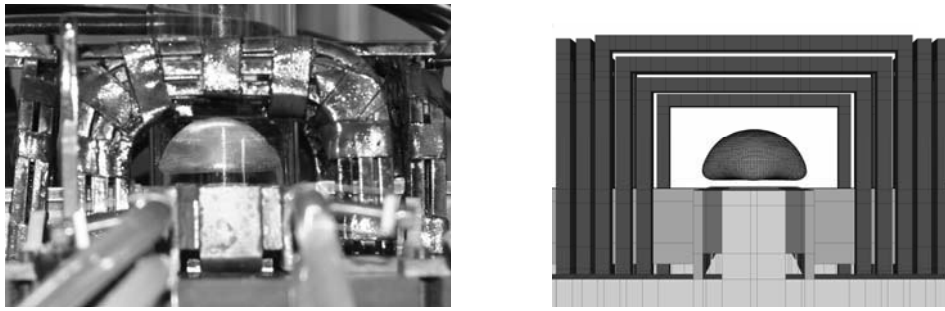


Figure 10 – 3D calculation results on cross-sections of molten aluminum drop for free surface shape, Lorentz force distribution (a) and steady flow (b) in two-frequency EM levitation melting setup

From the distribution of the Lorentz force it can be clearly noticed that in particular orthogonal non-interacting two-frequency EM field the undesirable singularity of force in the regions of EM field line separation is reduced, hence smaller droplet dimensions are obtained in *xy* plane. The stability of the quasi steady state shape over time, the flat bottom of droplet and a "square" profile in *xy* plane is in good correlation with experiment. Meanwhile, the distribution of the Lorentz force, complete force domination at the bottom and local maximums on the top surface right above singularity regions, contributes to a formation of one large torroidal vortex and a tiny flow recirculation (Figure 10, b, *xz* plane). Moreover, despite that the Lorentz force has no sensible azimuthal component the flow in *xy* plane arranges itself in one slow vortex around *z* axis. Presumably, this effect is caused by asymmetry introduced by consideration of inductor coils of a spiral shape, however, requires a deeper investigation.

The comparison between experiment photo and picture of numerical model also reveals a good agreement for the levitating droplet shape (Figure 8 and Figure 11).



a) b)

Figure 11 – Experimentally observed [6] (a) and numerically simulated (b) EM levitation

Conclusions

2D model for coupled free surface and liquid metal flow numerical calculation in EM field is developed. The model is adjusted for the case of EM levitation, extended on 3D consideration and can be used with LES turbulence approach.

The comparison of our k-ω SST calculation results to appropriate experimental measurements and results of other models for the steady state free surface in induction furnaces at different regimes and EM levitation melting setup, as well as comparison of free surface oscillation period to analytical estimation, revealed good correlation and approved accuracy of implemented model.

Using experimental data and developed numerical approach the new method for drip- and leakage-free EM levitation melting of metallic samples with greater weights and stabilized positions proposed by O. Pesteanu *et. al.* [6] has been successfully validated. It is planned to tailor the design of setup and configuration of EM field in order to meet the conditions for stable EM levitation of industrial-scale molten metal charge and reproduce it in experiment.

Acknowledgements

Current research was performed with financial support of the ESF project of the University of Latvia, contract No. 2009/0138/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/004. The authors thank the German Research Association (DFG) for supporting this study under the Grant No. BA 3565/3-1. The authors would like to acknowledge the great scientist prof. Ovidiu Pesteanu (*1945-†2012) for development of particular EM levitation technology, contribution and support in this research.

Literature

[1] Kirpo M. Modelling of turbulence properties and particle transport in recirculated flows // Ph. D. Thesis, University of Latvia, Riga, 2008.

[2] Bojarevics V., Harding R., Pericleous K., Wickins M. The development and experimental validation of a numerical model of an induction skull melting furnace // *Met. Mat. Trans. B Ser.*, 35, pp. 785-803, 2004.

[3] Easter S., Bojarevics V., Pericleous K. Numerical modelling of liquid droplet dynamics in microgravity. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 327 012027, 2011.

[4] Hegewaldt F., Buligins L., Jakowitsch A. Transient bath surface bulging at energization of an ind.-type CF. *Elektrowärme int.*, 1, pp. 28-42, 1993.

[5] Spitans S., Jakovics A., Baake E., Nacke B. Numerical modelling of free surface dynamics of melt in an alternate EM field. Part I: implementation and verification of model. *Met. Mat. Trans. B Ser.*, DOI: 10.1007/S11663-013-9809-9, pp. 1-13, 2013.

[6] Pesteanu O., Baake E. The multicell VOF method for free surface simu-lation of MHD flows. Part I: Mathematical model and Part II: Experimental verifications and results. *ISIJ International*, 51(5), pp. 707-721, 2011.

[7] Westphal E. Elektromagnetisches und thermisches Verhalten des Kaltwand-Induktions-Tiegelofens. Dr-Ing. Dissertation, Dusseldorf, 21(210), 1996.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОДНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКИ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ ANSYS

В.А. Медникова

ФГБОУ ВПО Самарский Государственный Технический Университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
kotlveronika@yandex.ru
тел: +7 (846) 332-42-34

Ключевые слова: *численное моделирование, индукционная нагревательная установка непрерывного действия, объекты с распределенными параметрами, температурное распределение, ANSYS*

Abstract

Two-dimensional FEM analysis model of the continuous induction heating process is considered. The model is based on the simulation algorithm developed at the Institute of Electrotechnology, Leibniz University (Hannover) for engineering simulation software ANSYS. The main steps of the algorithm include creating geometry of induction heating system, mesh generation, input data description, electromagnetic and thermal analysis. Some results for the simulation of the steel cylindrical billets heating have been obtained and compared with results based on FLUX model simulation.

Введение

В настоящее время на стадии разработки, проектирования и исследования сложных технических систем применение современных средств компьютерного моделирования является необходимым и бесспорно одним из наиболее эффективных способов исследования управляемых процессов. В научно-исследовательских, проектных и производственных организациях различных отраслей отечественной промышленности широко используется современное программное обеспечение CAE (Computer Aids Engineering). CAE позволяет не только выполнить качественное моделирование технологических систем различного уровня сложности, но и исследовать отклик этих систем на внешние воздействия, то есть получить пространственно-временные распределения полей различной физической природы, в том числе взаимосвязанных тепловых и электромагнитных полей, полей механических деформаций, скоростей, потенциалов, давлений и т.п.

Проходные индукционные нагревательные установки (ИНУ) с непрерывной выдачей заготовок, широко применяемые на практике для индукционного нагрева металлов перед последующей обработкой давлением, являются сложными техническими объектами, в которых протекают физические процессы электромагнитной и тепловой природы [1]. Учитывая сугубо нелинейные зависимости электромагнитных и теплофизических параметров процесса индукционного нагрева от температуры и сложный характер теплообмена, точное количественное описание ИНУ может быть получено только численными методами [2].

Наиболее распространенным численным методом расчета электромагнитных и тепловых полей является метод конечных элементов (МКЭ), основанный на решении взаимосвязанной системы уравнений Максвелла и Фурье [3]. Современный рынок программных средств предлагает большое разнообразие конечно-элементных пакетов для расчета электромагнитных и тепловых процессов. Инструменты, разработанные производителями программных продуктов, существенно различаются спецификой их применения в предметных областях, степенью ав-

томатизации расчетных процедур, используемым математическим аппаратом, быстродействием, пользовательским интерфейсом, языками программирования и др.

Явным лидером среди универсальных многоцелевых программных комплексов является наукоемкий программный пакет ANSYS. В данной статье описана численная нелинейная модель тепловых и электромагнитных полей в проходной индукционной печи непрерывного действия, разработанная в конечно-элементном программном пакете ANSYS. Рассмотрены основные этапы алгоритма моделирования, разработанного в Институте Электротехнологий Университета им. Лейбница (г. Ганновер): построение геометрии индукционной нагревательной системы, генерация сетки, задание электромагнитных, теплофизических свойств материалов. Представлены некоторые результаты, полученные при моделировании процесса сквозного нагрева стальных цилиндрических заготовок в проходном индукционном нагревателе.

Моделирование процесса непрерывного индукционного нагрева металла в программном пакете ANSYS

Процесс нагрева массивных металлических заготовок перед последующими операциями обработки давлением (прессование, штамповка, ковка и т.д.) может быть описан как объект с распределенными параметрами (ОРП). Функция состояния данного ОРП представляет собой изменяющееся во времени и по объему нагреваемой заготовки температурное поле, характеризующееся ярко выраженной пространственной неравномерностью. Пространственно-временное распределение температуры по объему заготовки в процессе индукционного нагрева описывается весьма сложной системой уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитного и температурного полей. Решение данной системы уравнений может быть получено только численными методами. Эти методы широко и успешно используются на практике в различных задачах расчетов электромагнитных и температурных полей [4]. В работе задача численного моделирования решалась в универсальном наукоемком конечно-элементном программном пакете ANSYS. Основные исходные данные для моделирования процесса непрерывного нагрева стальных цилиндрических заготовок приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Исходные данные для численного моделирования ИНУ

Длина индуктора, мм	1 800
Длина активной секции индуктора, мм	1 300
Заданная температура заготовки, °С	1 250
Температура окружающей среды, °С	20
Начальная температура заготовки, °С	20
Частота питающего тока, Гц	1 000
Число витков	30
Внутренний диаметр катушки индуктора, мм	180
Геометрические параметры витка, мм	30×20
Расстояние между витками, мм	10
Диаметр заготовки, мм	100
Материал заготовки	Сталь

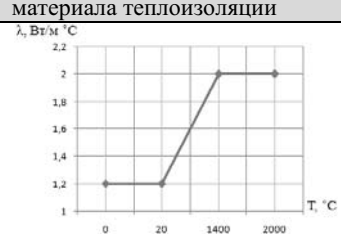
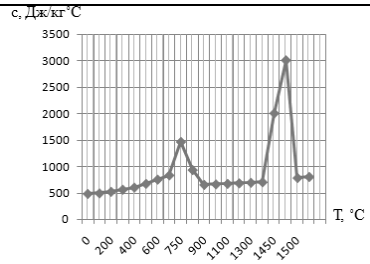
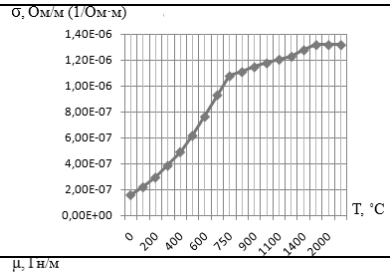
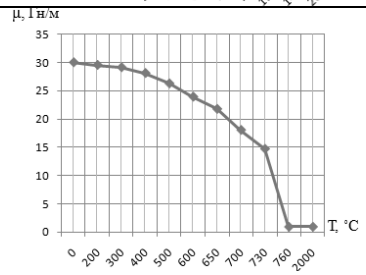
В таблице 2 приведены теплофизические параметры материалов заготовки и теплоизоляции.

Алгоритм моделирования представлен на рисунке 1. На первом этапе моделирования происходит построение геометрии индукционной нагревательной системы и создание конечно-элементной сетки. На следующем этапе происходит моделирование пошагового алгоритма движения заготовок в индукторе.

При численном моделировании непрерывных процессов индукционного нагрева физический процесс заменяется достаточно большим числом временных шагов [5]. Для этого в спе-

циальном файле прописывается общее количество шагов, величина шага по времени, текущее время на каждом шаге процесса (сумма предыдущих шагов), скорость движения заготовок и напряжение на индукторе.

Таблица 2 - Теплофизические параметры материалов заготовки и теплоизоляции

Параметр	Теплофизические параметры материала заготовки	Теплофизические параметры материала теплоизоляции
λ, теплопроводность, Вт/м· °С		
γ, плотность, кг/м3	7800	2500
c, теплоемкость, Дж/кг·°С		400
σ, электропроводность, Ом/м (1/Ом*м)		-
μ, магнитная проницаемость, Гн/м		1

Электромагнитный и тепловой расчет последовательно проводятся на каждом шаге моделирования. Для осуществления данных расчетов в модели итерационно запускаются файлы для электромагнитного и теплового расчета, в которых задаются параметры сетки, свойства материалов и граничные условия для расчета. Распределение Джоулевого тепла в заготовке, рассчитанное в ходе электромагнитного анализа, используется в качестве входного воздействия для теплового анализа, которое обеспечивает моделирование тепловых процессов в течение времени выполнения шага.

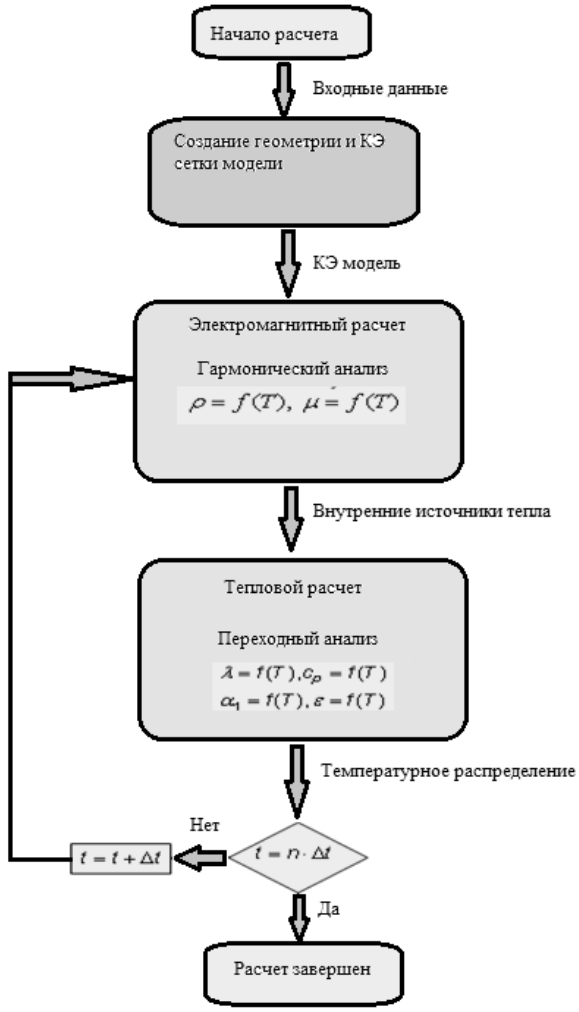


Рисунок 1 – Алгоритм моделирования

Электромагнитный расчет на каждом шаге процесса нагрева осуществляется в зависимости от температуры заготовки и свойств материала на предыдущем шаге. Тепловой анализ включает в себя моделирование тепловых потерь за счет конвекции и излучения. Итерационная расчетная процедура завершается при выполнении условия достижения конечного времени процесса. После завершения расчета генерируются выходные файлы, содержащие следующую информацию:

- изменение температуры в центре заготовки при ее продвижении в ИНУ;
- изменение температуры на поверхности заготовки при ее продвижении в ИНУ;
- температурное распределение по радиусу заготовки на выходе из активной секции ИНУ;
- температурное распределение по радиусу на выходе из пассивной секции ИНУ;
- температурное распределение по радиусу в сечении с максимальной температурой, достигаемой в процессе нагрева;
- температурное распределение по радиусу в сечении с минимальной температурой, достигаемой в процессе нагрева.

На рисунках 2-4 представлены зависимости, иллюстрирующие некоторые результаты расчетов для представленных в таблицах 1-2 исходных данных.

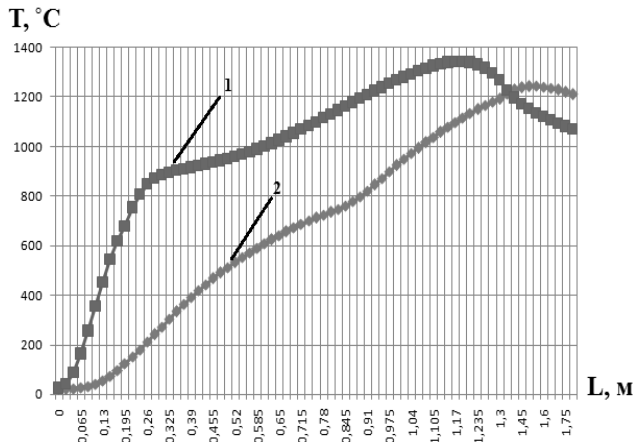


Рисунок 2 - Изменение температуры по длине ИНУ:
1- температура на поверхности заготовки; 2- температура в центре заготовки

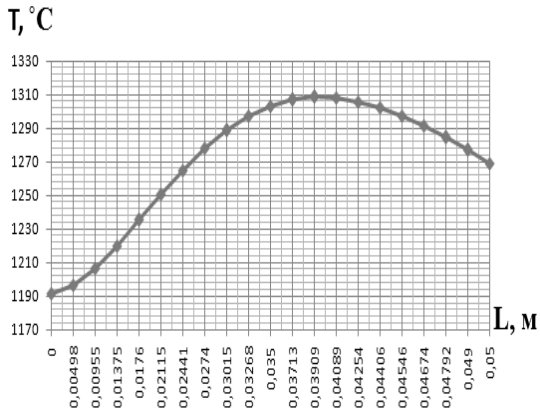


Рисунок 3 - Температурное распределение по радиусу на выходе из активной секции ИНУ

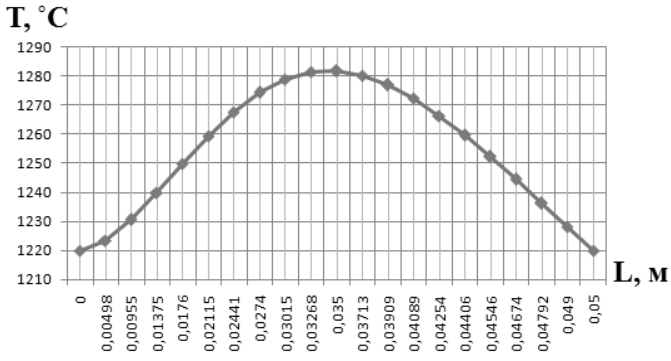


Рисунок 4 - Температурное распределение по радиусу на выходе из пассивной секции ИНУ

Результаты, полученные при моделировании в программном пакете ANSYS, сравнивались с расчетами модели, реализованной в специализированном программном пакете FLUX. Сравнительный анализ позволяет сделать вывод о качественном совпадении закономерностей изменения температурных полей в переходных и стационарных режимах нагрева заготовок при незначительном количественном отклонении температур, связанном, в основном, с различными способами задания исходных данных в программных пакетах ANSYS и FLUX [6]. Дальнейшие исследования и верификация модели подтверждают возможность её использования для адекватного описания отдельного класса процессов индукционного нагрева. Кроме того, данная модель является ориентированной на использование в итерационных процедурах решения задач оптимального проектирования ИНУ и управления многомерными температурными полями в процессе непрерывного индукционного нагрева.

Заключение

В универсальной программной системе конечно-элементного анализа ANSYS разработана численная модель процесса непрерывного индукционного нагрева. В ходе моделирования проведено совместное решение электромагнитной и тепловой задач с учетом зависимости теплофизических свойств материала в процессе нагрева при наличии тепловых потерь за счет конвекции и излучения.

Разработанная проблемно-ориентированная модель позволяет исследовать физические закономерности изменения температурных полей в переходных и стационарных режимах сквозного нагрева металлических заготовок перед обработкой давлением.

Модель позволяет проводить анализ распределения температурных полей по радиусу заготовки на выходе из индуктора (пассивной и активной секции); на поверхности и в центре по длине индуктора, в сечениях с максимальной и минимальной температурой в процессе нагрева.

Данная модель может быть использована в оптимизационных процедурах как для решения задач оптимального управления многомерными температурными полями в процессе непрерывного индукционного нагрева, так и для оптимального проектирования ИНУ.

Список литературы

[1] Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

[2] Handbook of Induction Heating / Rudnev V., Loveless D., Cook R., Black. M., Marcel Dekker Inc., New York, 2003.

[3] Сегерлинд Л. Применение методов конечных элементов. – М: Мир, 1979. – 270 с.

[4] Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. - М.: Наука, 2012.

[5] K. Blinov, A. Nikanorov, B. Nacke, M. Klöpzig. Numerical simulation and investigation of induction through-heaters in dynamic operation mode. COMPEL The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. Selected papers from the Heating by Electromagnetic Sources Symposium 2010, HES 2010, ISSN 0332-1649, Volume 30, Number 5, 2011, pp. 1539-1549.

[6] Плешивцева Ю.Э, Шарапова О.Ю., Медникова В.А. Сравнительный анализ программных продуктов ANSYS И Cedrat FLUX на примере моделирования проходной индукционной нагревательной установки [Текст]// XII Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» – Самара, 2011. - С. 78-84.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

С.Е. Коршиков[1], И.А.Ткачев[2]
[1]Филиал ООО «РН-Информ» в г. Самара, ул. Куйбышева, 145, оф. 734, Россия
тел. +7 (846) 205-90-77
[2]ФГБОУ ВПО Самарский Государственный Технический Университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
stepankor2310@rambler.ru
тел: +7 (846) 332-42-34

***Ключевые слова**: термические напряжения, индукционный нагрев, моделирование, компоненты напряжений, метод конечных элементов*

Abstract
The paper presents FEM-based approach to simulation of thermal stresses fields during induction heating of steel cylindrical billets.2D electromagnetic-thermal-structural ANSYS model has been developed and tested. The results of thermal stresses fields modeling for selected study case of heating process are presented.

Введение

В связи с повышением цен на основные энергоносители (газ, нефть) в последнее время наблюдается тенденция к расширению использования электротехнологических процессов обработки металлов, таких как, например, индукционный нагрев.

Широкое применение термической обработки металлов при индукционном нагреве обусловлено простотой технологии, высоким качеством термически обработанных изделий, возможностью автоматизации процессов и высокими эргономическими свойствами оборудования.

В настоящее время все более широкое применение находят индукционные нагревательные установки (ИНУ) периодического и непрерывного действия. В ИНУ всех типов нагрев осуществляется за счет возбуждения электромагнитным полем индуктора внутренних источников тепла в загрузке [1,2].

Моделирование процесса индукционного нагрева металлов позволяет оценить поведение материала, оптимально спроектировать нагревательную установку, выбрать режимы её работы для обеспечения наилучшего качества выпускаемой продукции. Значительное количество работ посвящено моделированию и оптимальному управлению процессами индукционного нагрева, но большая их часть рассматривает в качестве управляемой величины температурное поле внутри заготовки без учета поведения поля термомеханических напряжений в ней. При превышении предела упругости материала, в нем происходят различные структурные превращения, что может приводить к образованию брака, в частности, трещин в заготовках.

В процессе нагрева в материале могут возникать как упругие, так и упруго-пластические деформации. В первом случае связь между напряжениями и деформациями описывается линейным законом Гука. Во втором случае, когда значения напряжений превышают некоторое характерное для материала значение, определяющее предел текучести, происходит переход материала в пластическое состояние и тогда закон Гука уже не позволяет охарактеризовать поведение деформаций и напряжений. Условие, которому должны удовлетворять напряжения в некоторой точке тела, чтобы в ней появились первые остаточные деформации, называется

условием пластичности. Некоторые условия перехода материалов из упругого состояния в пластическое состояние описано в [3].

В данной работе предлагается подход к моделированию процесса индукционного нагрева, позволяющий учесть технологического ограничения на термические напряжения. Соответствующий алгоритм моделирования процесса индукционного нагрева стальных заготовок реализуется на базе универсального программного пакета конечно-элементного анализа ANSYS [4,5].

1 Моделирование процесса индукционного нагрева металла в среде ANSYS

В процессе моделирования решаются следующие задачи:

- электромагнитная задача – для моделирования электромагнитных полей, создаваемых индукционной установкой;
- тепловая задача – для моделирования температурного поля внутри нагреваемой заготовки;
- упругопластичная задача – для моделирования полей термических напряжений, возникающих вследствие неравномерного нагрева заготовок, как по длине, так и по поперечному сечению.

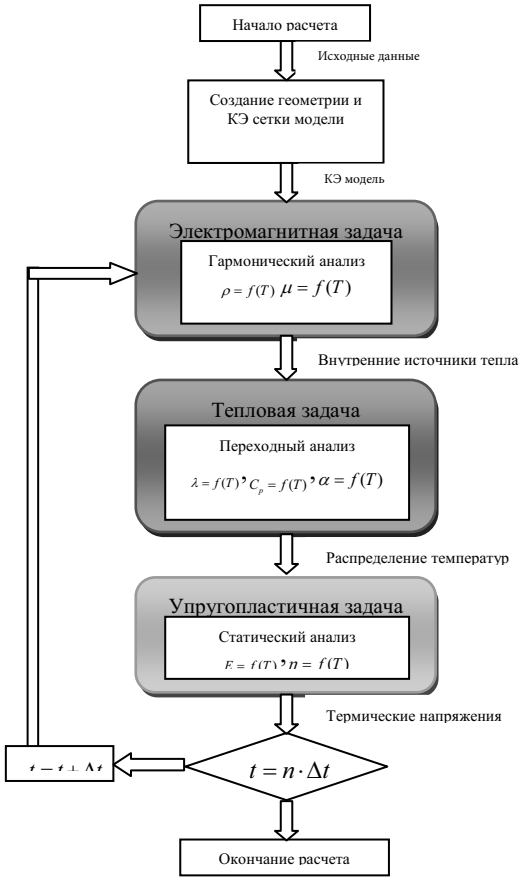


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма моделирования процесса индукционного нагрева

На рисунке 1 представлена блок-схема алгоритма моделирования процесса индукционного нагрева.

Решение задачи начинается с построения геометрии индукционной нагревательной системы и создания конечно-элементной сетки. Затем решаются взаимосвязанные электромагнитная, тепловая и упругопластическая задачи, каждая из которых включает в себя следующие этапы:

- задание свойств материалов;
- задание граничных условий для расчета;
- непосредственно решение задачи и получение решения.

Результатом решения электромагнитной задачи является распределение внутренних источников тепла в нагреваемой заготовке, используемые в качестве нагрузки в тепловом анализе, в котором также задаются граничные условия, условия радиационного и конвективного теплообмена между заготовкой, индуктором и окружающей средой. В результате решения тепловой задачи рассчитывается температурное распределение по объему нагреваемой заготовки. Затем осуществляется переход к упругопластичной задаче, результатом решения которой является распределение температурных напряжений в заготовке.

Поскольку рассматриваемая задача формулируется как осесимметричная, в результате её решения имеется полный набор компонент напряжений для анализа.

Таким образом, мы имеем связанную *электромагнитно-тепло-упругопластичную* задачу, решаемую численным методом с использованием программного пакета ANSYS.

Описанный алгоритм моделирования был положен в основу разработки модели процесса непрерывного индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок. Геометрия и конечно-элементная сетка индукционной нагревательной системы представлены на рисунке 2 и рисунке 3.

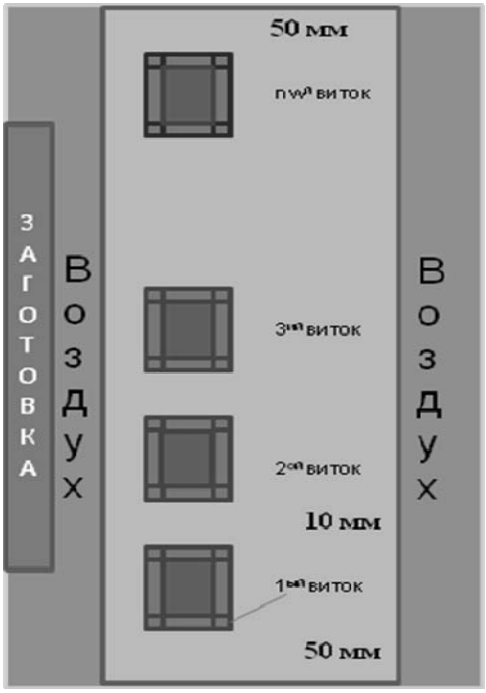


Рисунок 2 – Геометрия индукционной нагревательной системы

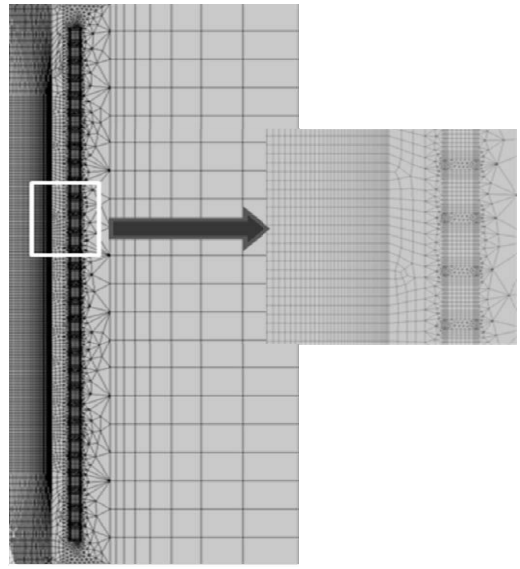


Рисунок 3 – Конечно-элементная сетка индукционной нагревательной системы

Исходные параметры для моделирования:

- Диаметр заготовки – 100 мм;
- Форма заготовки – цилиндрическая;
- Длина заготовки – 800 мм;
- Длина печи (индуктора) – 1,2 м;
- Напряжение на индукторе – 500 В;
- Частота – 1000 Гц;
- Материал заготовок – Сталь 45;
- Количество витков – 30.

В качестве исходных данных для моделирования задаются следующие свойства материала в виде нелинейных температурных зависимостей: для электромагнитного анализа – удельное сопротивление, магнитная проницаемость; для теплового анализа – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, коэффициент линейного температурного расширения;

для прочностного анализа – модуль Юнга, коэффициент Пуассона, билинейная модель пластичности [6].

2 Моделирование тепло-прочностной задачи индукционного нагрева

Решение взаимосвязанных электромагнитной и тепловой задач рассмотрено в работах [7, 8].

Рассмотрим подробнее задачу термопластичности, решение которой необходимо для анализа термонапряженного состояния.

В расчете для определения эквивалентных напряжений применяется критерий наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения, который хорошо согласуется с опытными данными для изотропных материалов. В данном случае критерий возникновения пластического состояния для металлов (критерий пластичности Губера-Мизеса) имеет вид:

$$\sigma_{экв} = \sqrt{\frac{1}{2}\left[(\sigma_1 - \sigma_2) + (\sigma_2 - \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3)\right]} \le \sigma_T \quad (1),$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - главные напряжения, Па; σ_T - предел текучести материала, который для рассматриваемого материала составляет 220 МПа.

В результате решения задачи термопластичности получены распределения полей температур и термических напряжений, представленные на рисунке 4.

А) Б)

Рисунок 4 – Результаты моделирования тепло-прочностной задачи
(А - поле температур, Б – поле термических напряжений)

С точки зрения механики деформируемого твердого тела в поставленной задаче реализуется плоско-деформируемое состояние образца. Использование теории малых упруго-пластических деформаций позволяет рассмотреть билинейную модель пластичности с изотропным упрочнением с независящими от температуры параметрами материала (модуль Юнга и коэффициент Пуассона).

Для более детального анализа термических напряжений, рассмотрим срединное сечение заготовки. Изменение температуры в центре и на поверхности заготовки в указанном сечении представлено на рисунке 5.

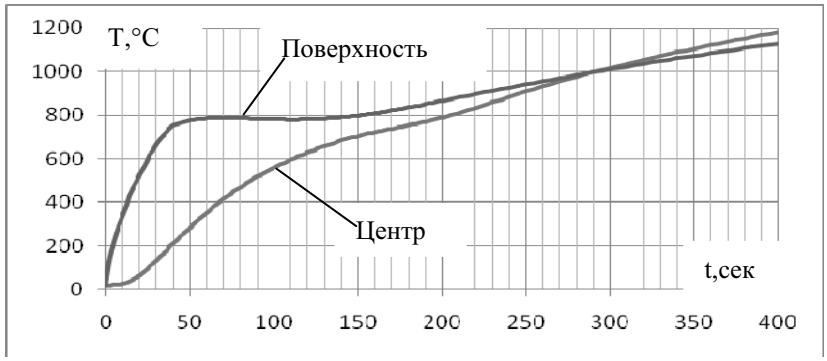


Рисунок 5 – Температура в срединном сечении в процессе нагрева

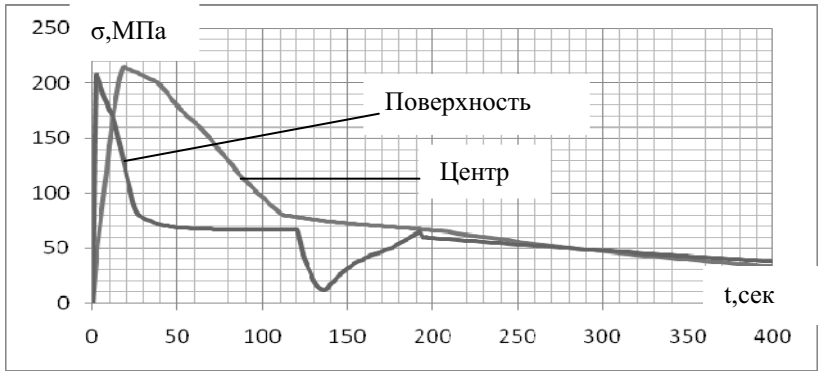


Рисунок 6 – Эквивалентные по Мизесу термические напряжения в процессе нагрева в срединном сечении

На рисунке 6 представлено изменение термических напряжений в срединном сечении заготовки в двух точках: на поверхности и в центре. На графике виден некоторый «провал» кривой термонапряжений на поверхности заготовки при переходе температуры через точку Кюри. Для объяснения данного явления следует рассмотреть изменение всех компонент термонапряжений в процессе нагрева, входящих в формулу для эквивалентных по Мизесу напряжений. На рисунке 7 представлено изменение компонент термических напряжений в процессе нагрева. Как видно из рисунка, при переходе температуры через точку Кюри, поверхностный слой заготовки имеет равномерное температурное поле. При этом осевая и окружная компоненты термических напряжений на поверхности переходят через ось абсцисс и обращаются в нуль, а эквивалентное термонапряжение становится равным радиальной составляющей, значение которой близко к нулю.

Из полученных результатов видно, что при интенсивном нагреве максимальное значение термических напряжений наблюдается на начальном этапе нагрева, а затем при более равномерном распределении температуры по сечению заготовки величина их значительно уменьша-

ется. Важно отметить, что в приведенном примере максимальное значение термонапряжений не превышает предела прочности для данного материала, который составляет 450МПа, но в то же время значительно превышен предел прочности, что подтверждает необходимость учета технологических ограничений на термонапряжения при формировании алгоритмов управления процессами индукционного нагрева.

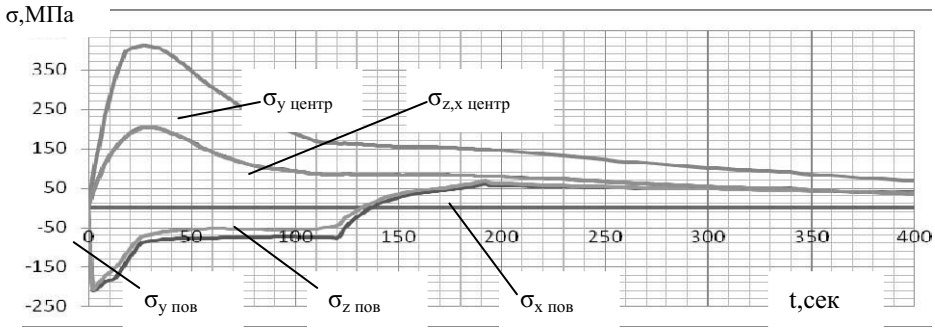


Рисунок 7 – Изменение компонент термических напряжений в процессе нагрева в срединном сечении заготовки

Заключение

В работе предлагается подход к моделированию полей термических напряжений в процессе индукционного нагрева металла с использованием программного пакета конечно-элементного анализа ANSYS. Полученные результаты моделирования процесса нагрева стальных цилиндрических заготовок демонстрируют качественное соответствие известным физическим закономерностям и существующим данным натурных и численных экспериментов.

Описанная модель может быть использована не только для моделирования процесса индукционного нагрева, но и для оптимального управления и проектирования индукционной установки.

Список литературы

[1] Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Металлургия, 1993. – 279 с.

[2] А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов и др. Установки индукционного нагрева –Л.: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1981. – 326 с.

[3] Термопрочность деталей машин/ Под общ. ред. И. А. Биргера, Б. Ф. Шорра, М.: Машиностроение, 1975. – 455 с.

[4] Сегерлинд Л. Применение методов конечных элементов. – М: Изд-во «Мир», 1979 г.

[5] Release 11.0 Documentation for ANSYS.

[6] Марочник сталей и сплавов. Под ред В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989.

[7] K. Blinov, A. Nikanorov, B. Nacke, M. Klöpzig. Numerical simulation and investigation of induction through-heaters in dynamic operation mode. COMPEL The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. Selected papers from the Heating by Electromagnetic Sources Symposium 2010, HES 2010, ISSN 0332-1649, Volume 30, Number 5, 2011, pp. 1539-1549.2 статья

[8] E. Baake, K. Blinov, S. Korshikov, O. Sharapova. Numerical simulation of multi-physics dynamic processes in induction heating systems granted by German Academic Exchange Service (DAAD) Проблемы управление и моделирования в сложных системах: Труды XII Международной конференции. – Самара: СНЦ РАН, 21-23 июня 2010. – с. 88-93.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ С ИЗМЕРИТЕЛЕМ СОСТОЯНИЯ

М.Х. Лапицкая

Самарский государственный технический университет

443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия

postman@samgtu.ru

тел: +7 (846) 278-44-00

Ключевые слова: *метод конечных интегральных преобразований, объект с распределенными параметрами, критерий оптимальности, температурное поле, удельная мощность внутренних источников тепла, замкнутая система, измеритель состояния*

Abstract

This paper considers the problem of modeling radial distribution temperature field of steel billet during optimal induction heating process in feed-back system. Radius average value of temperature field during the process represents feed-back control signal, and control action is power of internal heat sources with fixed in advance their distribution along spatial coordinate *x*.

Введение

В данной работе с помощью метода конечных интегральных преобразований моделируется оптимальный процесс периодического индукционного нагрева в системе с обратной связью. Такие системы управления позволяют реализовать с допустимой погрешностью автоматическую отработку оптимальной программы управления $F^*(x,t)$ в реальных условиях ограниченной неопределенности характеристик объекта с распределенными параметрами (ОРП) и воздействия различных возмущений. Однако, для построения таких систем необходимо иметь полную информацию об управляемой величине $\Theta(x,t)$, что является невыполнимым из-за невозможности использования бесконечного числа измерительных устройств во всех точках пространственной области, занимаемой объектом, вследствие этого сигнал с выхода измерителя $\Theta_u(x,t)$ всегда отличается от измеряемой функции [1]. В работе рассматривается случай, когда сигналом обратной связи служит сигнал с выхода измерителя, характеризующий среднее значение температурного поля по радиусу заготовки.

1 Постановка задачи управления

В данной работе рассматривается процесс периодического индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки, температурное поле, которой в процессе управления описывается в отклонениях от невозмущенного состояния $\Theta(x,t)=0$ уравнением теплопроводности Фурье следующего вида:

$$(1)\quad \frac{\partial\Theta(x,t)}{\partial t}=a\frac{\partial^2\Theta(x,t)}{\partial x^2}+\frac{a}{x}\frac{\partial\Theta(x,t)}{\partial x}+\frac{1}{c\gamma}F(x,t);\ 0<x<R,\ t>0;$$

с граничными:

(2) $\lambda \dfrac{\partial \Theta(R,t)}{\partial x} = 0$

(3) $\dfrac{\partial \Theta(0,t)}{\partial x} = 0$

и начальными условиями

(4) $\Theta(x,0) = \Theta_0(x);\ x \in [0,R],$

где λ - коэффициент теплопроводности, c - удельная теплоемкость, γ - плотность, a - коэффициент температуропроводности. Отклонения от заданного состояния $\Theta(x,t) = 0$ возникают за счет ненулевых начальных условий.

В роли управляющего воздействия выступает удельная мощность внутреннего тепловыделения $F(x,t)$, которая в данном случае представлена в следующем виде:

(5) $F(x,t) = \varphi_y(x) F(t)$,

где $F(t)$ – сосредоточенное управляющее воздействие, представляющее собой активную мощность, поглощаемую в единице объема нагреваемого тела, а $\varphi_y(x)$ - заранее фиксируемая функция пространственного распределения внутренних источников тепла, определяемая по формуле [2]:

$$\varphi_y(x) = \hat{\xi} \frac{ber'^2 \hat{\xi}\, x/R + ber'^2 \hat{\xi}\, x/R}{ber\hat{\xi}\, ber'\hat{\xi} + bei\hat{\xi}\, bei'\hat{\xi}}$$

где $\hat{\xi} = R\sqrt{2\pi f \mu_a \sigma}$, $f = 50$ Гц - частота питающего индуктор тока, μ_a - абсолютная магнитная проницаемость, σ - удельная электропроводность.

В рассматриваемом случае информация об объекте исчерпывается сигналом с измерителя, характеризующим среднее значение температурного поля $\Theta(x,t)$ на участке $[0,R]$, а процесс измерения является безынерционным. В этом случае сигнал с выхода измерителя можно представить в следующем виде[3]:

(6) $\Theta_u(t) = \int_0^R G_u^*(x)\, \Theta(x,t)\, dx$,

где $G_u^*(x) = \dfrac{1}{R}$ - функция Грина измерителя.

В качестве критерия качества рассматривается функционал вида:

(7) $I = \int_0^\infty S\, dt \to \mathbf{min},$

где

(8) $S = \int_0^R \int_0^R \omega_1(x,\xi)\Theta(x,t)\Theta(\xi,t)\, dx d\xi + \int_0^R \omega_2 F^2(\Theta(x,t))\, dx.$

где $\omega_1(x,\xi)$ и ω_2 – весовые коэффициенты. То есть подынтегральная функция в критерии оптимальности представляет собой взвешенную сумму интегральных квадратичных ошибок приближения управляемой величины на всем протяжении процесса управления к невозмущенному состоянию $\Theta(x,t) = 0$ и энергетических затрат, оцениваемых величиной интеграла от квадрата управляющего воздействия по области его определения [3].

2 Решение задачи

Алгоритм оптимального по критерию (7) управления для рассматриваемого процесса с линейными обратными связями по наблюдаемым сигналам $\Theta_u(t)$ имеет следующий вид [3]:

$$(9)\quad F^*(t) = -\frac{Z}{Rc\gamma\omega_2 \int\limits_{x_0}^{x_1} \varphi_y^2(x)\,dx} \left(\int\limits_{x_0}^{x_1} \varphi_y(x)\,dx \right) \Theta_u(t).$$

где Z некоторая константа, являющаяся решением уравнения следующего вида

$$(10)\quad Z\,L\left(G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)\right) + \omega_1(x,\xi) - \frac{Z^2 G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)}{\omega_2 (c\gamma)^2} \int\limits_{x_0}^{x_1} G_u^*(\eta)^2\,d\eta - \frac{Z^2 a^2 G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)}{\lambda^2} \left(G_u^*(x_1)\right)^2 = 0,$$

где η - переменная интегрирования, а оператор $L\left(G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)\right)$ имеет следующий вид:

$$(11)\quad \begin{aligned} L(G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)) &= \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[a\,G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)\right] - \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{a}{x} G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)\right] + \\ &+ \frac{\partial^2}{\partial \xi^2}\left[a\,G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)\right] - \frac{\partial}{\partial \xi}\left[\frac{a}{\xi} G_u^*(x)\,G_u^*(\xi)\right] \end{aligned}$$

При неполном измерении состояния температурное поле в оптимальном процессе определяется уравнением вида [3]:

$$(12)\quad \begin{aligned} \Theta(x,t) &= \int\limits_0^R \Theta_0^{(0)}(\xi)\,G(x,\xi,t)\,d\xi - Z \frac{\int\limits_0^R \varphi_y(x)\,G_u^*(x)\,dx}{c\gamma\omega_2 \int\limits_{x_0}^{x_1} \varphi_y^2(x)\,dx} \times \\ &\times \frac{1}{c\gamma} \int\limits_0^t \int\limits_0^R G(x,\xi,t-\tau)\,\varphi_y(\xi) \left[\int\limits_0^R G_u^*(\eta)\,\Theta^*(\eta,\tau)\,d\eta \right] d\xi\,d\tau. \end{aligned}$$

Для решения уравнения (11) и моделирования распределения температурного поля в оптимальном процессе нагрева использовался метод конечных интегральных преобразований. Данное преобразование определяется соотношением следующего вида:

$$(13)\quad \overline{\Theta}(\mu,t) = \int\limits_{x_0}^{x_1} \Theta(x,t)\,\varphi(\mu,x)\,r(x)\,dx,$$

с заранее неизвестными ядром $\varphi(\mu,x)$, параметром μ и весовой функцией $r(x)$

Для того, чтобы после применения конечного интегрального преобразования вида (14) уравнение объекта (1) не содержало в пространстве изображений операций дифференцирования по пространственной переменной x, необходимо, чтобы ядро преобразования $\varphi(\mu,x)$ являлось решением уравнения:

$$(14)\quad a\frac{d^2\varphi(\mu,x)}{dx^2} + \frac{a}{x}\frac{d\varphi(\mu,x)}{dx} = -\mu^2\varphi(\mu,x),$$

а весовая функция определялась выражением $r(x) = x/a$

Это требование позволяет исключить производные по x в уравнении объекта (1) в пространстве изображений.

Далее, для того чтобы преобразованное в соответствии с (13) уравнение (1) содержало в своей правой части только изображения Θ, $F(x,t)$,производных $\partial\Theta/\partial t$ необходимо, чтобы ядро $\varphi(\mu,x)$ удовлетворяло однородным граничным условиям, соответствующим (2), (3) :

(15) $\dfrac{d\varphi(\mu,0)}{dx}=0;$

(16) $\lambda\dfrac{d\varphi(\mu,R)}{dx}=0$.

Краевая задача (15)-(17) имеет отличные от тождественного нуля решения только при определенных вещественных значениях параметра μ^2, которые называются собственными значениями или собственными числами.

Каждому собственному числу соответствует одна собственная функция $\varphi_n(\mu_n,x)$, $n=1,2,...,$ определяемая решением задачи (14) - (16) с точностью до постоянного множителя, который можно выбирать из соображений удобства нормирования $\varphi_n(\mu_n,x)$ [4].
Общие решение уравнений (14) определяется следующим выражениям:

(17) $\varphi_n(\mu_n,x)=D1J_0(\dfrac{\mu_n}{\sqrt{a}}x)+D2Y_0(\dfrac{\mu_n}{\sqrt{a}}x)$

где $J_0(z)$ функция Бесселя первого рода нулевого порядка, $Y_0(z)$ функция Бесселя второго рода нулевого порядка.

Далее необходимо найти значения коэффициентов $D1$, $D2$, и μ_n. Подставив в выражение (15) общее решение для $\varphi_n(\mu_n,x)$, после некоторых преобразований получим, что равенства (15) выполняются при любых коэффициентах $D1$, $D2$. Для удобства примем значения $D1=1$, $D2=0$.
Далее, используя замену следующего вида

(18) $\mu_n^2=\dfrac{a\eta_n^2}{R^2}$, $n=0,1,2,...,$

запишем граничное условие (16) в виде уравнения:
(19) $J_1(\eta_n)=0.$
Тогда собственные функции будут иметь следующий вид:

(20) $\varphi_n(\mu_n,x)=J_0\left(\eta_n\dfrac{x}{R}\right)$, $n=0,1,2,...$

Для дальнейшего решения необходимо вместо $D1=1$ принять $D1=1/E_n$ т. е

(21) $\varphi_n(\mu_n,x)=\dfrac{1}{E_n}\varphi_n^*(\mu_n,x)$

где $\varphi_n^*(\mu_n,x)$ есть решение (14) - (16) с единичным множителем, а E_n^2 - квадрат нормы собственных функций, который определяется по формуле:

(22) $E_n^2=\int_0^R\left[\varphi_n^*(\mu_n,x)\right]^2r(x)\,dx, n=0,1,2,...$

Таким образом, система $\{\varphi_n\}$ становится ортонормированной.

Представляя функцию состояния $\Theta(x,t)$ рассматриваемого объекта ее разложением в сходящийся в среднем ряд по ортонормированной с весом системе собственных функций:

$$(23)\ \Theta(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \overline{\Theta}_n(\mu_n,t)\ \varphi(\mu_n,x),$$

где $\overline{\Theta}(\mu,t)$ - моды разложения.

и аналогично представляя функцию Грина объекта $G(x,\xi,t-\tau)$ в виде:

$$(24)\ \ G(x,\xi,t-\tau) = \sum_{k=1}^{\infty} G_k^*(\mu_k,t-\tau)\ \varphi_k(\mu_k,x)\ \varphi_k(\mu_k,\xi) r(\xi),$$

где известные функции $G_k^*(\mu_k,t)$ определяются выражениями

$$(25)\ G_n^*(\mu_n,t) = \exp\left(-\mu_n^2 t\right)$$

Подставив в (12) выражения (23) – (25) и ограничившись учетом конечного числа N мод выхода объекта, после некоторых преобразований можно прийти к системе уравнений описывающей поведение мод объекта

$$(26)\ \frac{d\overline{\Theta}_k^*}{dt} + \mu_k^2 \overline{\Theta}_k^* + \sum_{v=1}^{N} P_{kv}\overline{\Theta}_v^* = 0,\ \ \overline{\Theta}_k(\mu_k,0) = \overline{\Theta}_0^{(0)}(\mu_k),\ k = \overline{1,N}\ ,$$

где P_{kv} определяются следующим выражением:

$$(27).\ P_{kv} = Z\frac{(c\gamma)^2 \int_0^R \varphi_y(x) G_u^*(x)\,dx}{\omega_2 \int_0^R \varphi_y^2(x)\,dx} \int_0^R \varphi_y(\xi)\varphi_k(\mu_k,\xi) r(\xi)\,d\xi \int_0^R G_u^*(\eta)\varphi_v(\mu_v,\eta)\,dx$$

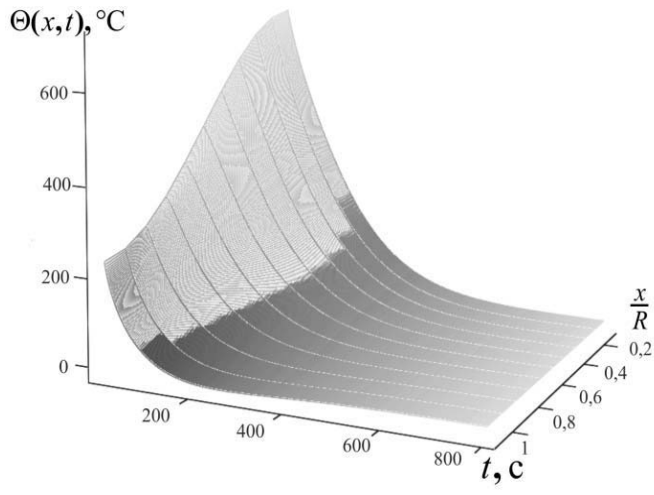


Рисунок 1 – Изменение температурного поля в оптимальном процессе нагрева

На рисунке 1 показано поведение температурного поля в оптимальном процессе нагрева при косинусоидальном начальном распределении температуры по радиусу $R = 0{,}075$ м заготовки

$$\Theta_0(x) = \Theta_0\left[1 + 0{,}5\cos\left(\pi\frac{x}{R}\right)\right],$$

$\Theta_0 = 470\,^{\circ}\text{C}$, для значений $N = 10$,

$\lambda = 30{,}5\ \text{Вт/м}\,^{\circ}\text{C}$,

$a = 0{,}055\cdot 10^{-4}\ \text{м}^2/\text{с}$,

$\mu_a = 1{,}26\cdot 10^{-6}\ \text{Гн/м}$,

$\sigma = 8{,}2\cdot 10^5\ \text{См/м}$, весовой коэффициент $\omega_2 = 3\cdot 10^{-11}$.

На рисунке 2 представлено изменение температурного поля во времени в точках $x = 0$ и $x = R$ и сигнала выхода измерителя $\Theta_u(t)$. Рисунок 3 представляет изменение сосредоточенного управляющего воздействия во времени.

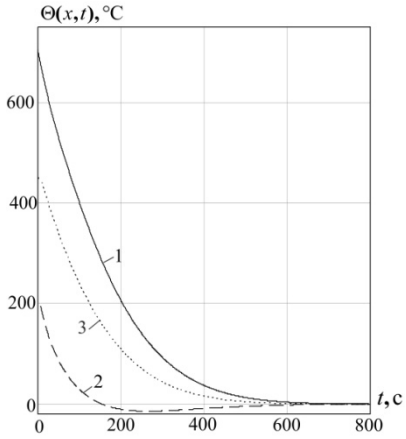


Рисунок 2 – Изменение во времени температуры в различных точках:
1 – $x = 0$, 2 – $x = R$, 3 – $\Theta_u(t)$ в оптимальном процессе нагрева

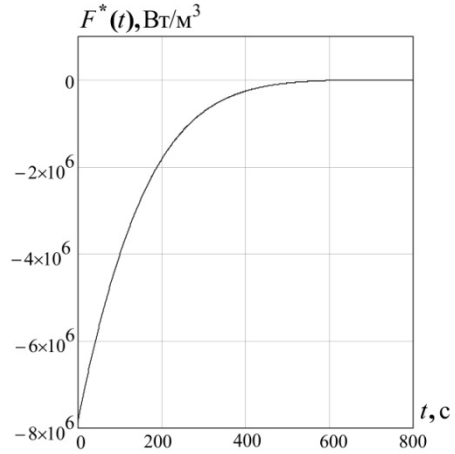


Рисунок 3 – Зависимость управляющего воздействия от времени в оптимальном процессе нагрева

Заключение

В результате работы смоделировано поведение температурного поля в оптимальном по критерию (7) процессе нагрева в системе с обратными связями. Оптимальное управление с обратной связью по среднему значению температуры обеспечивает нагрев с погрешность менее 1 °С за время 800 с.

Список литературы

[1] Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами: Учеб. пособие / Э.Я. Рапопорт. – М.: Высш. шк., 2005. 292 с.: ил.

[2] Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. Рапопорт Э.Я. – М.:Металлургия, 1993. – 279 с.

[3] Рапопорт, Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами: Учеб. пособие / Э.Я. Рапопорт. – М.: Высш. шк., 2008. – 675 с.: ил.

[4] Рапопорт, Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами: Учеб. пособие/ Рапопорт, Э.Я. – М.: Высш. шк., 2003 - 299 с.

О ПРОСТРАНСТВЕ ИНТЕРВАЛЬНЫХ ВЕКТОРОВ И НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ ЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В НЕМ

И.П. Болодурина, А.В. Кулешов

Оренбургский государственный университет
460352, Оренбург, пр. Победы, 13, Россия
prmat@mail.osu.ru
тел: +7 (987) 349-65-27

Ключевые слова: *интервальный анализ, интервальная неопределенность, динамические системы с интервальной неопределенностью, множество достижимости*

Abstract

In this paper the transition from a dynamical system with interval uncertainty to a system with interval phase vector. Introduce the space of interval vectors, formulated the concept of a dynamical system in this space.

Give a proof of convexity and compactness of the reachable set of linear interval dynamic system.

Введение

Задача об управлении линейной системой с интервальной неопределенностью в общем виде формулируется следующим образом. Построить такое управление $u(t) \in \Omega \subset R^m$, которое будет приводить, если это возможно, в некоторое множество $G \subset R^n$ систему

(1) $\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + h(t).$

Здесь коэффициенты $A(t)$, $B(t)$, $h(t)$ являются неизвестными функциями, которые лежат в пределах интервалов с известными границами $\left[\underline{A}(t), \overline{A}(t)\right]$, $\left[\underline{B}(t), \overline{B}(t)\right]$, $\left[\underline{h}(t), \overline{h}(t)\right]$, считается известным положение системы в начальный момент времени $x(t_0) = x^0$.

В данной работе излагается идея, согласно которой само понятие неопределенности становится частью системы. А именно, предположим, что рассматриваемая модель (1) характеризует движение объекта, координаты которого заданы неточно. С этим легко согласиться, поскольку погрешности измерений и вычислений присутствуют всегда. Значит, в модели (1), помимо неизвестных $A(t)$, $B(t)$, $h(t)$, также неопределенным является и $x(t)$. Причем характер неопределенности $x(t)$ должен быть интервальным, что следует из интервальной же неопределенности коэффициентов. Таким образом, при сделанном предположении, в левой части уравнения (1) находится производная от интервальной функции. А такая конструкция не существует для модели (1). Преобразуем исходную модель так, чтобы она имела содержательный смысл для интервального фазового вектора.

Для этого введем пространство интервальных векторов, зададим в нем метрику и отношение порядка и сформулируем необходимые определения.

1 Пространство интервальных векторов

Рассмотрим пространство IR^n векторов, составленных из интервалов $\mathbf{x}_i = \left[\underline{x}_i, \overline{x}_i\right]$ с действительными границами $\underline{x}_i, \overline{x}_i \in R$, $i = \overline{1,n}$. Следуя принятой в интервальном анализе термино-

логии, перейдем к обозначениям $\mathrm{x} = \begin{pmatrix} [x_{1,0} - \Delta x_1, x_{1,0} + \Delta x_1] \\ \dots \\ [x_{n,0} - \Delta x_n, x_{n,0} + \Delta x_n] \end{pmatrix}$, где $x_{i,0} = \frac{\underline{x_i} + \overline{x_i}}{2}$, $\Delta x_i = \frac{\overline{x_i} - \underline{x_i}}{2}$, $i = \overline{1,n}$. Значит интервальный вектор $\mathbf{x} \in IR^n$ определяется парой действительных векторов: $x_0 \in R^n$ - вектором центров и $\Delta x \in R^n$ - вектором полудлин компонент интервального вектора $\mathbf{x}$. Поэтому далее, где это необходимо, наряду с подробной записью, для сокращения будем писать $\mathbf{x} = (x_0, \Delta x)$.

Будем выделять полужирным начертанием интервалы и интервальные векторы, а обычным - числа и числовые векторы. Интервальным нуль-вектором **O** будем называть интервальный вектор с нулевым вектором центров и нулевым вектором полудлин.

Обычным способом [1] определим на IR^n операции умножения вектора на число, сложения и скалярного умножения векторов.

1) $\forall \mathbf{x} \in IR^n,\ \forall \lambda \in R,\ \lambda\mathbf{x} = \begin{pmatrix} [\lambda x_{1,0} - \lambda\Delta x_1, \lambda x_{1,0} + \lambda\Delta x_1] \\ \dots \\ [\lambda x_{n,0} - \lambda\Delta x_n, \lambda x_{n,0} + \lambda\Delta x_n] \end{pmatrix};$

2) $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in IR^n,\ \mathbf{x} + \mathbf{y} = \begin{pmatrix} [x_{1,0} + y_{1,0} - \Delta x_1 - \Delta y_1, x_{1,0} + y_{1,0} + \Delta x_1 + \Delta y_1] \\ \dots \\ [x_{n,0} + y_{n,0} - \Delta x_n - \Delta y_n, x_{n,0} + y_{n,0} + \Delta x_n + \Delta y_n] \end{pmatrix};$

3) $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in IR^n,\ \mathbf{x}^T\mathbf{y} = \left[\sum_{i=1}^{n} \min_{\bullet \in \{+,-\}, * \in \{+,-\}} (x_{i,0} \bullet \Delta x_i)(y_{i,0} * \Delta y_i), \sum_{i=1}^{n} \max_{\bullet \in \{+,-\}, * \in \{+,-\}} (x_{i,0} \bullet \Delta x_i)(y_{i,0} * \Delta y_i) \right];$

2 Метрика и отношение порядка в пространстве интервальных векторов

Зададим расстояние $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}): IR^n \times IR^n \to R$ следующим образом:

(2) $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in IR^n,\ \rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^{n} |y_{i,0} - x_{i,0}| + \sum_{i=1}^{n} |\Delta y_i - \Delta x_i|.$

Не трудно убедиться, что (2) является метрикой в IR^n. Для $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z} \in IR^n$ аксиомы метрики

- $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \geq 0,\ \rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \Leftrightarrow \mathbf{x} = \mathbf{y};$
- $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \rho(\mathbf{y}, \mathbf{x});$
- $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq \rho(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \rho(\mathbf{z}, \mathbf{y})$

выполняются в силу свойств модуля действительного числа. Значит IR^n - метрическое пространство с метрикой (2).

Определим отношение порядка на IR^n с использованием показателя интервального неравенства [2]. Сначала приведем этот показатель для скалярных интервалов, а затем расширим это понятие на n-мерный случай. Показатель интервального неравенства есть действительная функция пар интервалов: $r(\mathbf{x} \leq \mathbf{y}): IR \times IR \to R,$ которая характеризует степень выполнения неравенства $\mathbf{x} \leq \mathbf{y}$ и имеет вид

(3) $r(\mathbf{x} \leq \mathbf{y}) = \frac{y_0 - x_0}{\Delta y + \Delta x}.$

Если $r(\mathbf{x} \leq \mathbf{y}) \geq 1$, это означает, что интервал $\mathbf{x}$ целиком лежит левее интервала $\mathbf{y}$.

Если $r(\mathbf{x} \le \mathbf{y}) \ge 0,$ то центр интервала $\mathbf{x}$ лежит левее центра интервала $\mathbf{y}$.

Если $r(\mathbf{x} \le \mathbf{y}) \ge -1,$ это означает, что хотя бы одна точка интервала $\mathbf{x}$ лежит левее какой-нибудь точки интервала $\mathbf{y}$.

Если $r(\mathbf{x} \le \mathbf{y}) \le -1,$ это означает, что интервал $\mathbf{x}$ целиком лежит правее интервала $\mathbf{y}$.

Отношение порядка между интервальными векторами будем считать определенным, если отношения порядка для всех n пар компонент $r(\mathbf{x_i} \le \mathbf{y_i}),\ \ i = \overline{1,n}$ одного знака. При этом

$$\mathrm{Rel}(\mathbf{x} \le \mathbf{y}) = |\underline{r}_i| sign(\underline{r}_i),$$

где $\underline{r}_i = \min_i r(\mathbf{x_i} \le \mathbf{y_i})$. В противном случае отношение порядка будем считать неопределенным. Например, если все интервалы $\mathbf{x_i}$ лежат левее соответствующих интервалов $\mathbf{y_i}$, то показатель интервального неравенства $\mathrm{Rel}(\mathbf{x} \le \mathbf{y}) \ge 1$ и равен наименьшему из показателей неравенств для соотношений соответствующих координат. Но если хотя бы один интервал $\mathbf{x_i}$ лежит правее соответствующего интервала $\mathbf{y_i}$, а все остальные - левее, то отношение $\mathbf{x} \le \mathbf{y}$ не определено, и $\mathrm{Rel}(\mathbf{x} \le \mathbf{y})$ не существует.

С использованием понятий расстояния и отношения порядка, сформулируем некоторые необходимые в дальнейшем определения.

Определение 1. Множество $K \subset IR^n$ называется ограниченным, если для $\forall \mathbf{x} \in K,\ \exists \mathbf{M} \in IR^n : \mathrm{Rel}(\mathbf{x} \le \mathbf{M}),\ \mathrm{Rel}(-\mathbf{M} \le \mathbf{x})$ одновременно определены и больше 1.

Определение 2. Множество $K \subset IR^n$ называется замкнутым, если для $\forall \varepsilon \in R^+,\ \exists \mathbf{x}, \mathbf{y_1} \in K:\ \ \rho(\mathbf{x}, \mathbf{y_1}) < \varepsilon,\ \exists \mathbf{y_2} \in K:\ \ \rho(\mathbf{x}, \mathbf{y_2}) < \varepsilon.$

Здесь и далее R^+ означает множество положительных действительных чисел.

Ограниченные замкнутые множества в IR^n будем называть компактными в IR^n.

Определение 3. Множество $K \subset IR^n$ называется выпуклым, если для $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in K,$ $\forall \lambda \in [0,1]:\ \ \lambda \mathbf{x} + (1-\lambda)\mathbf{y} \in K.$

3 Предел и производная в пространстве интервальных векторов

Будем говорить, что на компактном множестве $T \subset R$ задана n-мерная интервальная функция $\mathbf{f} : R \to IR^n$ действительной переменной $t \in T$, если $\forall t \in T \quad \exists \mathbf{f}(t) \in IR^n$. В рамках данной работы будем рассматривать интервальные функции только такого типа. Переменную t будем интерпретировать как время.

Понятие предела в IR^n следует ввести таким образом, чтобы оно имело тот же смысл, что и в пространстве действительных чисел. Будем говорить, что последовательность векторов $\mathbf{x_i} \in IR^n$ сходится к интервальному вектору $\hat{\mathbf{x}} \in IR^n$, если соответствующие последовательности центров $x_{i,0}$ и полудлин Δx_i сходятся, соответственно, к $\hat{x}_{i,0}$ и $\Delta \hat{x}_i$. Для интервальных функций имеем:

Определение 4. Интервальный вектор $\mathbf{A} \in IR^n$ является пределом интервальной функции $\mathbf{f}(t)$ при $t \to t_0,$ если $\forall \varepsilon \in R^+,\ \exists \delta(\varepsilon) \in R^+:\ \ \ \forall t \in T,\ \ |t - t_0| < \delta,\ \ \rho(\mathbf{f}(t), \mathbf{A}) < \varepsilon.$

По аналогии с действительным анализом, будем использовать обозначение $\lim_{t \to t_0} \mathbf{f}(t) = \mathbf{A}.$

Под понятием приращения функции на отрезке времени будем понимать интервал, характеризующий расстояние между значениями функции в начальный и конечный моменты времени. Для его введения удобно воспользоваться записью $\mathbf{f}(t)=(f_0(t),\Delta f(t))$.

Определение 5. Приращением функции $\mathbf{f}(t)$ на отрезке времени $[t_1,t_2]$ назовем величину $\boldsymbol{\delta}\mathbf{f}(t_1,t_2)=(f_0(t_2)-f_0(t_1);|\Delta f(t_2)-\Delta f(t_1)|)$.

Таким образом, приращение функции $\mathbf{f}(t)$ на $[t_1,t_2]$ есть интервальный вектор, центр которого есть приращение действительной центральной функции $f_0(t)$, а полудлина - приращение действительной функции полудлины $\Delta f(t)$. Таким образом, если $\mathbf{f}(t_1)$ совпадает с $\mathbf{f}(t_2)$, то соответствующее приращение есть $\mathbf{O}$, то есть нулевой интервальный вектор.

Определение 6. Производной функции $\mathbf{f}(t)$ в точке t_0 назовем предел $\dot{\mathbf{f}}(t_0)=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\boldsymbol{\delta}\mathbf{f}(t_0,t_0+\Delta t)}{\Delta t}$, если он существует.

Разобьем отрезок времени $[t_0,T]$ точками $t_1,t_2,...,t_N=t$, при этом $\Delta t_i=t_i-t_{i-1},\ i=\overline{1,N}$.

Определение 7. Интегралом интервальной функции $\mathbf{f}(\tau)$ на отрезке $[t_0,t]$ называется предел, если он существует, вида $\lim\limits_{\Delta t_i\to 0}\sum\limits_{i=1}^{N}\mathbf{f}(t_i)\Delta t_i$. По аналогии с действительным анализом, будем писать $\int\limits_{t_0}^{t}\mathbf{f}(\tau)d\tau$.

Лемма 1. *Предел интервальной функции равен интервалу с предельными границами.*

Доказательство. Покажем, что $f_0(t)\underset{t\to t_0}{\to}A_0,\ \Delta f(t)\underset{t\to t_0}{\to}\Delta A$.

По определению предела имеем $\forall\varepsilon\in R^+,\ \exists\delta(\varepsilon)\in R^+:\quad \forall t\in T,\ |t-t_0|<\delta,\ \rho(\mathbf{f}(t),\mathbf{A})<\varepsilon$.

Отсюда, используя (2), получим $\sum\limits_{i=1}^{n}|f_{i,0}(t)-A_{i,0}|+\sum\limits_{i=1}^{n}|\Delta f_i(t)-\Delta A_i|<\varepsilon$. Так как в левой части последнего неравенства сумма $2n$ неотрицательных величин, то каждая из этих величин $|f_{i,0}(t)-A_{i,0}|<\varepsilon$, $|\Delta f_i(t)-\Delta A_i|<\varepsilon$, а это и означает, что $\lim\limits_{t\to t_0}f_{i,0}(t)=A_{i,0},\ \lim\limits_{t\to t_0}\Delta f_i(t)=\Delta A_i,\ i=\overline{1,n}$.

Лемма доказана.

Следствие 1. *Производная интервальной функции есть интервальная функция, границами которой являются производные границ исходной функции.*

Следствие 2. *Интеграл интервальной функции есть интервальная функция, границами которой являются интегралы границ исходной функции.*

В дальнейшем нам понадобится понятие непрерывного отображения.

Определение 8. Будем говорить, что функция $\mathbf{f}(t)$ непрерывна в точке $t_0\in T$, если $\forall\varepsilon\in R^+,\ \exists\delta(\varepsilon)\in R^+:\ \forall t\in T,\ |t-t_0|<\delta,\ \rho(\mathbf{f}(t),\mathbf{f}(t_0))<\varepsilon$.

4 Динамическая система в пространстве интервальных векторов

Рассмотрим в IR^n динамическую систему

(4) $\dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t)+\mathbf{B}(t)u(t)+\mathbf{h}(t)$,

где $\mathbf{x}(t):T\to IR^n$, $\mathbf{A}(t),\mathbf{B}(t),\mathbf{h}(t)$ - интервальные матричные функции размерностей $n\times n$, $n\times m$, $n\times 1$ с элементами $\mathbf{a_{i,j}}(t)$, $\mathbf{b_{i,k}}(t)$, $\mathbf{h_i}(t)$, $i,j=\overline{1,n}$, $k=\overline{1,m}$ - интервальными функциями

типа $T \to IR$ с известными непрерывно дифференцируемыми границами. Управляющее воздействие $u(t) \in \Omega,\ u : T \to R^m$ является детерминированной функцией, поскольку считается, что ее значение однозначно определяется управляющей стороной. Ω будем считать постоянным выпуклым компактным множеством.

Пусть известно состояние системы (4) в некоторый момент времени t_0, который будем считать начальным,

(5) $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}^0,$

где $\mathbf{x}^0$ - интервальный вектор с известными конечномерными границами.

Определение 8. Множеством достижимости [3] системы (4), (5) в момент времени $t \in T$ назовем множество $P(t_0, \mathbf{x}^0, t, \Omega)$ правых концов траекторий $\mathbf{x}(t)$, выходящих из $\mathbf{x}^0$ с учетом всевозможных допустимых реализаций управлений $u(\tau) \in \Omega,\ t_0 \le \tau < t$. Далее будем писать кратко $P(t)$.

Теорема 1. *Множество достижимости $P(t)$ системы (4) с начальным условием (5) при сделанных предположениях является компактным выпуклым в IR^n множеством.*

Доказательство. Для доказательства данной теоремы, в отличии от ее аналога в действительном анализе [4], важным является свойство непрерывной зависимости траектории $\mathbf{x}(t)$ от выбора последовательности управлений $u(\tau),\ t_0 \le \tau < t$. Покажем, что при любом малом $\varepsilon \in R^+$, найдется такое $\delta(\varepsilon) \in R^+$, что любым δ-близким управлениям будут соответствовать ε-близкие траектории в смысле расстояния (2). Выберем две последовательности управлений $u(\tau),\ \tilde{u}(\tau) \in \Omega\ \ t_0 \le \tau < t,$ такие, что $\tilde{u}(\tau) = u(\tau) + \xi(\tau),$ где $\|\xi(\tau)\| < \delta(\varepsilon)$. Соответствующие им траектории обозначим $\mathbf{x}(t),\ \tilde{\mathbf{x}}(t)$. Разобьем отрезок $[t_0, t]$ N точками $t_1, t_2, ..., t_N = t$ с интервалами $\Delta t_1, \Delta t_2, ..., \Delta t_{N-1},\ \Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ и запишем значения траекторий $\mathbf{x}(t),\ \tilde{\mathbf{x}}(t)$ в этих точках.

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}^0;$$
$$\mathbf{x}(t_1) = \mathbf{x}^0 + \Delta t_1 \left(\mathbf{A}(t_0)\mathbf{x}^0 + \mathbf{B}(t_0)u(t_0) + \mathbf{h}(t_0)\right);$$
$$\dots$$
$$\mathbf{x}(t_k) = \mathbf{x}(t_{k-1}) + \Delta t_k \left(\mathbf{A}(t_{k-1})\mathbf{x}(t_{k-1}) + \mathbf{B}(t_{k-1})u(t_{k-1}) + \mathbf{h}(t_{k-1})\right);$$
$$\dots$$
$$\tilde{\mathbf{x}}(t_0) = \mathbf{x}^0;$$
$$\tilde{\mathbf{x}}(t_1) = \mathbf{x}^0 + \Delta t_1 \left(\mathbf{A}(t_0)\mathbf{x}^0 + \mathbf{B}(t_0)u(t_0) + \mathbf{B}(t_0)\xi(t_0) + \mathbf{h}(t_0)\right) = \mathbf{x}(t_1) + \Delta t_1 \mathbf{B}(t_0)\xi(t_0);$$
$$\dots$$
$$\tilde{\mathbf{x}}(t_k) = \tilde{\mathbf{x}}(t_{k-1}) + \Delta t_k \left(\mathbf{A}(t_{k-1})\tilde{\mathbf{x}}(t_{k-1}) + \mathbf{B}(t_{k-1})u(t_{k-1}) + \mathbf{B}(t_{k-1})\xi(t_{k-1}) + \mathbf{h}(t_{k-1})\right) = \tilde{\mathbf{x}}(t_k) + \Delta t_k \mathbf{B}(t_{k-1})\xi(t_{k-1}) =$$
$$= \mathbf{x}(t_k) + \Delta t_1 \mathbf{B}(t_0)\xi(t_0) + \dots + \Delta t_k \mathbf{B}(t_{k-1})\xi(t_{k-1});$$

…

Переходя к пределу при $\max_i \Delta t_i \to 0,\ \ N \to \infty,$ получим, что

(6) $$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}^0 + \int_{t_0}^{t} \left(\mathbf{A}(\tau)\mathbf{x}(\tau) + \mathbf{B}(\tau)u(\tau) + \mathbf{h}(\tau)\right) d\tau,$$

(7) $\tilde{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t) + \int_{t_0}^{t} \mathbf{B}(\tau)\xi(\tau)d\tau,$

то есть, $\mathbf{x}(t)$ отличается от $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ на величину $\int_{t_0}^{t} \mathbf{B}(\tau)\xi(\tau)d\tau$. Тогда, используя определение расстояния (2) и лемму 1, имеем:

(8) $\rho(\mathbf{x}(t), \tilde{\mathbf{x}}(t)) = \sum_{i=1}^{n} \lim_{\Delta t_i \to 0} \sum_{k=1}^{N} \sum_{j=1}^{m} \left| b_{k,j,0}(t_i)\xi_j(t_i) \right| \Delta t_i + \sum_{i=1}^{n} \lim_{\Delta t_i \to 0} \sum_{k=1}^{N} \sum_{j=1}^{m} \left| \Delta b_{k,j}(t_i)\xi_j(t_i) \right| \Delta t_i.$

Выберем $\delta(\varepsilon)$ таким образом, чтобы таким образом, чтобы каждая из сумм в правой части (8) была меньше $\frac{\varepsilon}{2}$. Тогда $\rho(\mathbf{x}(t), \tilde{\mathbf{x}}(t)) < \varepsilon$. Значит $\mathbf{x}(t)$ непрерывно зависит от $u(\tau),\ t_0 \le \tau < t.$

Покажем теперь ограниченность множества достижимости системы (4), (5) в смысле определения 1. Рассмотрим интеграл в правой части формулы (6). В силу леммы 1, он в каждый момент времени $t \in T$ является интегралом от непрерывных функций $a_{i,j,0}(t),\ \Delta a_{i,j}(t),\ b_{i,k,0}(t),\ \Delta b_{i,k}(t),\ h_{i,0}(t),\ \Delta h_i(t),\ i, j = \overline{1,n},\ k = \overline{1,m}.$ Значит, этот интеграл является интервалом с непрерывными границами, которые, следовательно, ограничены. Тогда найдется такой интервал $\mathbf{M}$, обе границы которого по модулю больше, чем границы рассматриваемого интеграла. Учитывая, что $\mathbf{x^0}$ - заданный измеримый интервал, имеем, что $\mathrm{Rel}(\mathbf{x}(t) < \mathbf{M}) > 1$ и $\mathrm{Rel}(-\mathbf{M} < \mathbf{x}(t)) > 1$, значит $P(t)$ ограничено.

Покажем замкнутость множества $P(t)$. Предположим, $P(t)$ открыто. Значит, для $\mathbf{x}(t) \in P(t)$ найдется такая окрестность ширины $\varepsilon \in R^+$, что все точки этой окрестности входят в $P(t)$. Рассмотрим управление $\tilde{u}(\tau)$ такое, что $\forall u(\tau) \in \Omega,\ \|u(\tau)\| \le \tilde{u}(\tau)$. Такое управление можно выделить в силу компактности Ω. Пусть управлению $\tilde{u}(\tau)$ соответствует некоторая траектория $\tilde{\mathbf{x}}(t) \in P(t)$. Так как $P(t)$ открыто, то оно содержит все точки некоторой окрестности $\tilde{\mathbf{x}}(t) \in P(t)$. То есть, $\exists \varepsilon \in R^+ :\ \rho(\tilde{\mathbf{x}}(t), \mathbf{x}(t)) < \varepsilon,\ \mathbf{x}(t) \in P(t)$. А каждой из этих траекторий $\mathbf{x}(t)$, в свою очередь, соответствует некоторое управление $u(\tau) \in \Omega$, которое, в силу непрерывности отношения управлений и траекторий, принадлежит окрестности $\tilde{u}(\tau)$. А это противоречит замкнутости Ω. Значит $P(t)$ замкнуто.

Покажем выпуклость $P(t)$. Пусть [5] $\mathbf{x_1}(t),\ \mathbf{x_2}(t)$ - некоторые траектории в $P(t)$, а $u_1(\tau),\ u_2(\tau),\ t_0 \le \tau < t$ - соответствующие им управления из Ω. Покажем, что $\lambda\mathbf{x_1}(t) + (1-\lambda)\mathbf{x_2}(t)$ принадлежит $P(t)$ при $\lambda \in [0,1]$. Для каждого λ определим управления $u_\lambda(\tau) = \lambda u_1(\tau) + (1-\lambda)u_2(\tau)$. Траектория $\mathbf{x}_\lambda(t)$, соответствующая каждому из $u_\lambda(\tau)$, имеет вид

(9) $\mathbf{x}_\lambda(t) = \mathbf{x^0} + \int_{t_0}^{t} (\mathbf{A}(\tau)\mathbf{x}_\lambda(\tau) + \mathbf{B}(\tau)(\lambda u_1(\tau) + (1-\lambda)u_2(\tau)) + \mathbf{h}(\tau))d\tau.$

Используя рассуждения, аналогичные доказательству непрерывности отношения $u(\tau)$ и $\mathbf{x}_\lambda(t)$, получим, что $\mathbf{x}_\lambda(t) = \lambda\mathbf{x_1}(t) + (1-\lambda)\mathbf{x_2}(t) \in P(t)$.

Теорема доказана.

Теорема 1 является важнейшим инструментом при дальнейших рассуждениях, а именно, при обосновании необходимого условия оптимальности. Кроме того, она имеет самостоятельный интерес, потому, как свойство выпуклости и компактности множества достижимости применяется при численном решении задач динамики методами динамического программирования и экстремального прицеливания.

Заключение

В данной работе рассматриваются динамические системы с интервальной неопределенностью. Изложенный аппарат позволяет избавиться от понятия неопределенности как таковой путем преобразования фазового вектора в вектор интервалов. Предложен аппарат математического анализа интервальных векторов и функций, определены понятия предела и непрерывности интервальных функций, введено понятие интервальной динамической системы.

Основной результат заключается в доказательстве теоремы о компактности и выпуклости множества достижимости линейной интервальной динамической системы.

Список литературы

[1] Хансен Е., Уолстер Дж.У. Глобальная оптимизация с помощью методов интервального анализа // М. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2012. -- 516 с..

[2] Ащепков Л. Т., Давыдов Д. В. Показатель интервального неравенства: свойства и применение // Вычислительные технологии. Том 11, № 4, 2006. С. 13 - 22.

[3] Болодурина И. П., Кулешов А.В. Применение методов искусственного интеллекта для решения задач динамики // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной конференции, 26-28 ноября 2012 г.: Ч. 2. - Воронеж : Изд.-- полиграф. центр ВГУ, 2012. - С. 41-45.

[4] Ли Э. Б., Маркус Л. Основы теории оптимального управления // Наука, М., 1972, 576 с.

[5] Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления // М.: Высшая школа, 2003.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ЗАДАЧИ АСИМПТОТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫМ ПРОЦЕССОМ НАГРЕВА

А.А. Корнев[1], В.А. Васенин[1], В.А. Роганов[2]

[1]МГУ им. М.В. Ломоносова,
119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы,
kornev@mech.math.msu.su

[2]НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
119192, Москва, Мичуринский проспект, 1

Ключевые слова: *численная стабилизация, уравнение теплопроводности, предметно–ориентированный язык*

Abstract

This article focuses on the use of a promising method for the quasi-optimal control of process heating/cooling of the inhomogeneous medium. Heating/cooling can be done with use of outer as well as inner boundary of the given medium region.

Введение

Задача обеспечения оптимального температурного режима в неоднородной среде при наложенных ограничениях на управление (например, на допустимую температуру и мощность нагрева внешней границы) всегда привлекала внимание технологов из различных областей. Целью данной статьи является расширение относительно нового класса методов для решения задач асимптотического управления процессом нагрева/охлаждения неоднородной теплопроводящей области как с внутренней, так и внешней части границы. Исходная задача стабилизации сводится к проектированию заданного начального распределения температуры на сильно устойчивое линейное многообразие решений, заданное в пространстве всех допустимых начальных температур для построенной специальным образом расширенной задачи. Соответствующее многообразие обеспечивает требуемую скорость процесса стабилизации для расширенной задачи, а след найденной функции температуры на границе исходной области является искомым граничным управлением.

Таким образом, построение управляющих краевых условий, обеспечивающих стабилизацию решения с требуемой скоростью, реализуется за два шага. Во-первых, начальная функция температуры продолжается в расширенную область. Во-вторых, полученная функция изменяется вдоль некоторого подпространства допустимых смещений только в области продолжения так, что найденная начальная функция температуры принадлежит сильно устойчивому многообразию. В работе предлагаются два новых алгоритма построения расширенной задачи.

Найденное в рамках данного подхода управление формально является только квазиоптимальным, однако полученные алгоритмы допускают естественное обобщение не только на широкий класс уравнений, например, нелинейные уравнения типа Навье-Стокса, но также на задачи стабилизации по начальным данным и по внешнему воздействию. Результаты расчетов показывают, что предложенные модификации позволяют строить различные семейства функций управления, а разрабатываемый предметно–ориентированный язык описания постановки задачи — легко выбирать управления с учетом различных ограничений.

1 Постановка задачи

Будем считать, что для всех рассматриваемых далее задач процесс изменения температуры $u(t, x)$ в заданной области, $\omega \subset R^n$, $1 \le n \le 3$, описывается с требуемой точностью стандартным уравнением параболического типа:

$$(1)\quad \begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla u) + f, \\ u = u(t,x), f = f(x), k = k(x), \\ t \ge 0, x \in \omega, u(0,x) = a(x), u(t)\big|_{\partial\omega} = \theta(t). \end{cases}$$

Рассмотрим следующую задачу: по заданной начальной температуре $u(0,x) = a(x)$ и конечной температуре $b(x)$ найти такую граничную функцию $\theta(t)$ из некоторого допустимого класса T, что при увеличении t норма $\|u(t,x) - b(x)\|_{L_2(\omega)}$ стремится к нулю с наивысшей асимптотической скоростью. Для простоты изложения будем считать, что функция $b(x)$ является решением стационарного уравнения

$$-\nabla \cdot (k \nabla b) = f, \quad x \in \omega, \quad b\big\|_{\partial\omega} = \theta(x).$$

Задача о нагреве является известной задачей оптимального управления, а ее решение для одномерного случая изложено в книге [1]. В данной работе для многомерного случая граничное управление будем строить на основе алгоритма стабилизации по краевым условиям, предложенного и обоснованного на дифференциальном уровне А.В. Фурсиковым, а также на основе его различных аналогов (см. [2,3,4] и цитируемую в данных работах литературу). Отметим, что данный подход естественно обобщается не только на широкий класс нелинейных уравнений, но и на различные типы задач стабилизации.

Процесс построения управляющего краевого условия состоит из следующих шагов. Выпишем уравнение для разности температур $h(t,x) = b(x) - u(t,x)$:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla h), \quad h\big\|_{\partial\omega} = \vartheta(x) - \theta(x), \quad h(0,x) = b(x) - a(x)$$

и построим в некоторой области $\Omega = \omega \cup \overline{\omega}$ соответствующую расширенную задачу:

$$(2)\quad \begin{cases} \dfrac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla H), x \in \Omega, \\ H(0,x) = A(x), H\big\|_{\partial\Omega} = 0. \end{cases}$$

Функции $K(x)$ и $A(x)$ определим в результате продолжения функций $k(x)$ и $h(0,x)$ из ω в $\overline{\omega}$:

$$(3)\quad K(x) = \begin{cases} k(x), x \in \omega, \\ \overline{K}(x), x \in \overline{\omega}. \end{cases} \qquad A(x) = \begin{cases} h(0,x), x \in \omega, \\ \overline{A}(x), x \in \overline{\omega}. \end{cases}$$

Здесь коэффициент $\overline{K}(x)$ можно задать либо некоторой константой, близкой к $k(x)$, либо (см. далее) выбрать с учетом имеющихся ограничений на управляющую функцию $\theta(x)$. Для фиксированного $\overline{K}(x)$ начальное условие $\overline{A}(x)$ найдем в результате решения следующей задачи:

$$\nabla \cdot (\overline{K} \nabla (\overline{A})) = 0, \quad \overline{A}\big\|_{\partial\overline{\omega}} = 0.$$

Отметим, что данное продолжение имеет естественную физическую аналогию, но является математическим приемом и не требует инженерной реализации. Зададим т.н. подпространство $\mathfrak{L}$ допустимых смещений:

$$\mathfrak{L} = \left\{ l(x) : l \in L_2(\Omega), l\big|_{\omega} \equiv 0 \right\},$$

и определим такую поправку $l \in \mathfrak{L}$, что решение расширенной задачи (2) с начальным условием $H(0,x) = A(x) + l(x)$, стремится к нулю с требуемой скоростью. Основой для нахождения $l(x)$ является следующее известное утверждение.

Лемма.

Пусть $\xi_i(x), i = 1,2,...$ — полная система ортогональных собственных функций задачи

$$-\nabla \cdot (K(x)\nabla \xi(x)) = \lambda \xi(x), \quad x \in \Omega, \quad \xi(x)\big|_{\partial\Omega} = 0$$

упорядоченных в соответствии с возрастанием собственных чисел $0 < \lambda_i \le \lambda_{i+1}$. Пусть начальное условие для уравнения (2) имеет вид

$$H(0,x) = \sum_{i=i_n+1}^{\infty} \alpha_i \xi_i(x), i_0 \ge 0$$

т.е.

(4) $$H(0,x) \in H_ = span < \xi_i(x), i = i_0 + 1, i_0 + 2, ... > ,$$

где $span <>$ обозначает линейную оболочку соответствующих векторов. Тогда для решения $H(t,x)$ верна оценка:

$$\left\| H(t) \right\|_{L_2(\Omega)} \le \delta(t) = e^{-\gamma_0 t} \left\| H(0,x) \right\|_{L_2(\Omega),} \gamma_0 = \lambda_{i_0+1}$$

Отсюда получаем, что след полученной функции H на границе $\partial\omega$ позволяет найти управляющие краевые условия $\theta(t)$ для задачи (1) из условия $\vartheta(x) - \theta(t,x) = H(t,x)\big|_{\partial\omega}$. В этом случае имеем $u(x.t) \equiv b(x) - H(x,t)$ на ω, т.е. найденное управление обеспечивает требуемое условие стабилизации $\left\| u(t) - b \right\|_{L_2(\omega)} \le \delta(t)$.

Таким образом, достаточно продолжить (если это возможно) начальную функцию $h(0,x)$ из области ω в область $\overline{\omega}$ так, что выполняется условие (4). Для указанного подпространства допустимых смещений $\mathfrak{L}$, состоящего из множества функций, равных нулю в области ω , подобное продолжение неединственно. В некотором смысле оптимальным (гарантирующим единственное решение с минимальной нормой специального вида) является выбор

$\mathfrak{L}^m = span < e_i(x), i = 1,...,i_0 >$, где

$$e_i(x) = \begin{cases} 0, x \in \omega, \\ \overline{\xi}_i^{(m)}(x), x \in \overline{\omega}. \end{cases}$$

а функции $\overline{\xi}_i^{(m)}(x)$ являются решениями задач:

$$-\nabla \cdot (\overline{K}(x)\nabla \overline{\xi}_i^m) = \xi_i(x), i = 0,...,i_0 x \in \overline{\omega}, \qquad \overline{\xi}_i^m(x)\big|_{\partial\omega} = 0 .$$

При этом в искомом разложении $l(x) = \sum_{i=1}^{i_0} c_i e_i(x)$ коэффициенты могут быть определены из условий ортогональности $(A(x) + l(x), \eta_i(x)) = 0$, $i = 1,...,i_0$, где

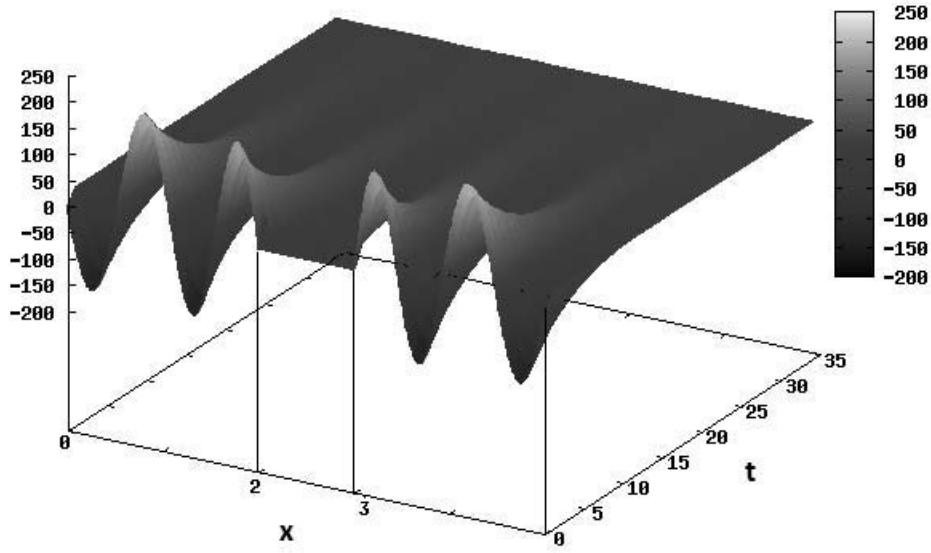
$$H_^{\perp} = span < \eta_i(x), i = 1,...,i_0 > \perp H_$$

Для рассматриваемой задачи (3) система ξ_i ортонормальна, следовательно, можно задать $\eta_i(x) \equiv \xi_i(x)$. В случае уравнений с несимметричным оператором для нахождения $\eta_i(x)$ достаточно решить сопряженную к (3) задачу на собственные значения. Отметим, что с увеличением i_0 растет не только значение показателя γ_0 в оценке $\delta(t) \le Ce^{-\gamma_0 t}$, но и норма поправки $l(x)$ и, как следствие, начальная ошибка $C = \|A + l\|_{L_2(\Omega)}$. В результате к заданному моменту времени t_1 величина $\|H(t_1)\|_{L_2(\Omega)}$ может как уменьшиться, так и увеличиться. Основным определяющим фактором скорости роста нормы поправки l в зависимости от величины i_0 является угол между подпространствами $\mathcal{L}^0$ и $H_$. А так как его величина стремится к нулю при увеличении i_0, то норма $\|A + l\|_C$ стремится к бесконечности. При этом, см.[4], для больших значений i_0 задача построения $l(x)$ из условий (4) численно неустойчива. Таким образом, на структуру управления влияют следующие параметры — размер и вид области $\overline{\omega}$, степень гладкости m подпространства $\mathcal{L}^m$, значение коэффициента $\overline{K}$. За счет изменения данных параметров можно существенно влиять на структуру управляющей функции θ и на динамику процесса стабилизации. Для подпространства $\mathcal{L}^0$ рассмотренный алгоритм продолжения обеспечивает оптимальность построенной поправки в пространстве $L_2(\Omega)$, однако, найденная в результате функция $H(0,x) = A + l$, обычно существенно разрывна, поэтому полученное управление $\theta(t)$ имеет большую производную. Для построения гладкой функции $H(0,x)$ и, как следствие, более плавного управления $\theta(t)$, необходимо выбирать $m \ge 1$, (для большинства рассматриваемых нами задач интерес представляли значения *m=1, 2, 3,* иногда *m=4, 5*). Выбор гладкого базиса $\mathcal{L}^m$ и увеличение области Ω во многих случаях позволяют найти управление с требуемыми свойствами. Однако, например, для задачи о нагреве тела за счет внутренних элементов, область расширения $\overline{\omega}$ совпадает с нагревательным элементом, поэтому имеет малый размер. В этом случае угол между подпространствами $\mathcal{L}^m$ и $H_$ близок к нулю, и только для *m=1* удается получить некоторое сглаживание управления.

Дополнительный сглаживающий эффект удается обеспечить за счет уменьшения коэффициента $K(x)|_{\overline{\omega}}$. Это приводит к замедлению скорости распространения тепла, уменьшению скорости стабилизации и, как следствие, к сглаживанию полученной управляющей функции. Однако, следует отметить, что малый коэффициент $K(x)|_{\overline{\omega}}$, оказывая положительный эффект на начальном временном отрезке стабилизации $t \in [0, t_0]$, в дальнейшем при $t > t_0$ излишне замедляет процесс стабилизации. Поэтому разумно применение следующего комбинированного подхода: в момент времени $t = t_0$ расширенная задача для уравнения (1) решается повторно для полученной функции $a(x) = u(t_0, x)$ и некоторого заново выбранного коэффициента $K(x)|_{\overline{\omega}} \ge k(x)|_{\omega}$. В результате обеспечивается гладкость функции управления на первом этапе и высокая скорость стабилизации в дальнейшем.

2 Численные результаты

В качестве примера приведем результаты численных расчетов по охлаждению до нулевой температуры равномерно нагретых до 30°C медных стержня и квадратной пластины с внешней границы с точностью не ниже 0,5°C. Расчеты проводились по чисто неявной по времени схеме. По пространству использовалась конечно–элементная стандартная аппроксимация второго порядка на треугольной сетке.



Реальный стержень соответствует $x \in [2,3]$. Отметим, что высокоамплитудные колебания происходят только в виртуальной расширенной подобласти $x \in [0,2] \cup [3,5]$. Искомое граничное управление задают функции $U(t,2)$ и $U(t,3)$.

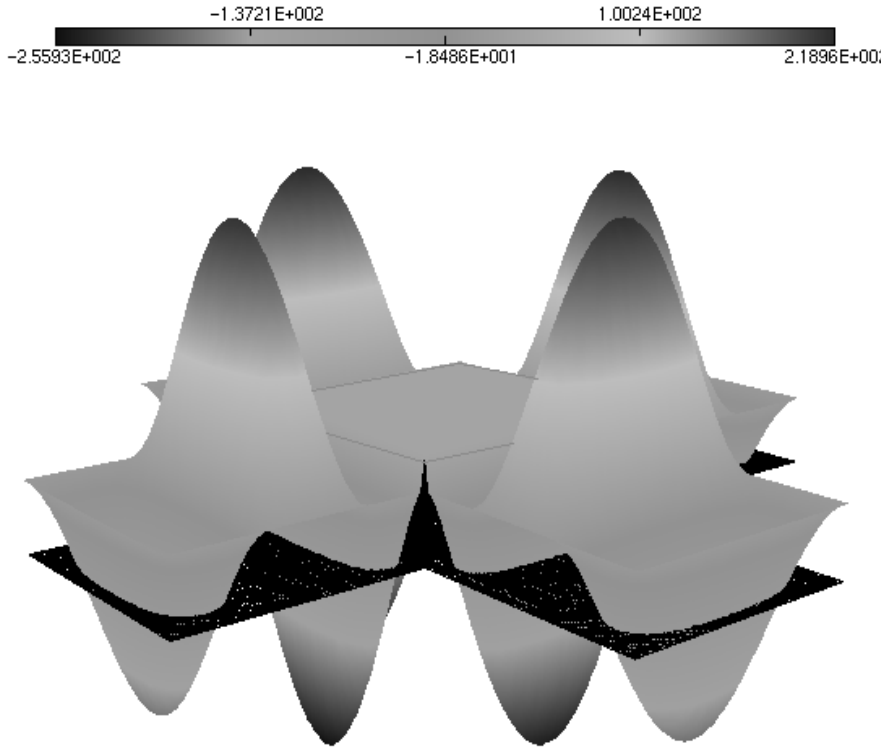
Рисунок 1 – Динамика функции температуры $U(t,x)$ в расширенной области $\Omega \times T$ в одномерном случае (к задаче о наискорейшем охлаждении стержня).

3 Направления и перспективы развития

Дальнейшая оптимизация управления может проводиться путем проведения серии численных расчетов (многовариантного перебора) с использованием суперЭВМ с массивно-параллельной архитектурой. Здесь имеется богатое поле для исследования различных стратегий управления поиском оптимальных параметров конфигурации (таких, например, как размещение нагревательных элементов), начиная с простых комбинаций случайного поиска и градиентного спуска и заканчивая параллельными модификациями методов типа Нелдера-Мида.

Адаптация численного алгоритма для суперЭВМ необходима и в случае решения задачи стабилизации трехмерных течений жидкости, поскольку в этом случае требуется значительно больше вычислений по вышеприведенной схеме. Практическая ценность данного метода напрямую зависит от того, насколько масштабные задачи управления удастся при этом эффективно решать.

К современным вычислительным комплексам предъявляются высокие требования с точки зрения удобства использования, а также безопасности самих суперЭВМ, на которых производится расчет. Для решения этих задач к расчетному коду можно реализовать Web-интерфейс, а саму расчетную конфигурацию (геометрию пластины, функцию температуропроводности и параметры варьирования) задавать при помощи несложного предметно-ориентированного языка. Это позволит предоставить широкий доступ к расчетному коду всем заинтересованным лицам. Кроме удобства использования такая схема посредством валидации (проверки корректности) на уровне предметно-ориентированного языка позволит удовлетворить также и определенные требования по безопасности, которые неизбежно возникают при использовании дорогостоящих суперкомпьютерных установок.



Здесь центральный квадрат ω соответствует реальной пластине. Процесс охлаждения всей области Ω с указанным начальным распределением температуры обеспечивает квазиоптимальный по скорости выход на требуемую нулевую температуру в области Ω и, в том числе, в интересующей нас подобласти ω. Таким образом, функция $U(t)\big|_{\partial\omega}$ задает искомое граничное управление, обеспечивающее квазиоптимальное охлаждение пластины ω.

Рисунок 2 – Вид начальной функции $U(t=0,x,y)$, полученной в результате продолжения в расширенную область Ω типа крест (к задаче о наискорейшем охлаждении пластины).

Заключение

Проведенные расчеты показали, что варьирование коэффициента температуропроводности $K(x)\big|_{\overline{\omega}}$, области продолжения $\overline{\omega}$ и степени гладкости m подпространства допустимых смещений $\mathring{C}^m$, позволяет строить семейства функций управления и находить граничные условия с учетом ограничений. В рамках указанного подхода найденное управление является только квазиоптимальным, однако полученные результаты переносятся на алгоритмы стабилизации по краевым условиям, правой части, начальным данным для широкого класса нелинейных уравнений [1, 3, 4].

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 12-01-00960.

Список литературы

[1] Васильев Ф.П. Методы оптимизации. М.: Факториал Пресс, 2002.
[2] Ведерникова Э.Ю., Корнев А.А. К задаче о нагреве стержня //Вестник МГУ. Сер. 1. Математика, механика, 2013.
[3] Fursikov A.V., Kornev A.A. Feedback stabilization for Navier-Stokes equations: Theory and Calculations// Mathematical Aspects of Fluid Mechanics. Lecture notes series, Cambridge University Press. 2012. p. 130–172.
[4] Чижонков Е.В. Об операторах проектирования для численной стабилизации // Вычислительные методы и программирование. 2004. N.5. С. 161-169.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИИ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ВЫХОДА НЕЧЁТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЁННОГО УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

И.А. Данилушкин

Федеральное бюджетное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, Россия
rector@samgtu.ru
тел: +7 (846) 278-44-00, факс: +7 (846) 278-44-00

Ключевые слова: *нечёткий регулятор, функция принадлежности, объект с распределёнными параметрами, распределённое управляющее воздействие, модальное представление*

Abstract

The problem of synthesis of fuzzy control system at a plant with distributed parameters is discussed. An approach to the construction of a fuzzy controller based on a modal representation of the plant with distributed parameters is analyzed. Time modes of spatially distributed signal of mismatch are considered as the linguistic variables. The membership function of fuzzy logic controller output is used as a spatially distributed control signal.

Введение

Применение модального представления при синтезе систем автоматического управления некоторыми классами объектов с распределёнными параметрами [1–5], позволяет перейти к рассмотрению объекта управления в виде бесконечной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В практических случаях системы управления строятся с учётом ограниченного числа временных мод. Ортогональность собственных функций модального представления объектов с распределёнными параметрами позволяет рассматривать каждую временную моду как независимый канал управления объектом с сосредоточенными параметрами, для которого применим хорошо разработанный аппарат синтеза систем автоматического управления.

В работе предлагается подход к синтезу системы автоматического управления объектом с распределёнными параметрами на базе аппарата нечёткой логики [6–8]. В качестве лингвистических переменных нечёткого представления объекта выступают временные моды его модального представления. Особенность подхода также заключается в отказе от процедуры дефаззификации нечёткого вывода за счёт использования в качестве области определения лингвистической переменной нечёткого вывода, области пространственного распределения контролируемого параметра.

1 Модальное представление объекта управления

При построении систем модального управления используется аналитическое решение дифференциального уравнения в частных производных, описывающего объект с распределёнными параметрами. Для нахождения аналитического решения чаще всего приходится прибегать к упрощению математической модели объекта: рассмотрению канонической формы области пространственного распределения, использованию линеаризованного представления, упрощению граничных условий краевой задачи. Такое упрощение оправдывается использованием принципа управления с обратной связью, который позволяет компенсировать количественные неточности модели при её адекватности на качественном уровне.

В качестве математической модели объекта управления с распределёнными параметрами рассматривается одномерное уравнение теплопроводности относительно распределённой управляемой величины $Q(x,t)$,

(1) $\dfrac{\partial Q(x,t)}{\partial t} = a\dfrac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2} + \beta \cdot Q(x,t) + U(x,t)$, $x_L < x < x_R$, $t > 0$, $a, \beta = const$,

с однородными граничными условиями второго рода

(2) $\dfrac{\partial Q(x_L,t)}{\partial x} = 0$, $\dfrac{\partial Q(x_R,t)}{\partial x} = 0$,

и начальным распределением температуры

(3) $Q(x,0) = 0$.

Модель (1)–(3) описывает поведение температурного поля в протяжённом тонком стержне. Потери с торцов стержня пренебрежимо малы. Потери с боковой поверхности стержня в окружающую среду с нулевой температурой учитывается слагаемым $\beta \cdot Q(x,t)$, $U(x,t)$ – распределённое по длине стержня управляющее воздействие.

Решение уравнения (1)–(3) может быть представлено в виде

(4) $Q(x,t) = \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_n(\lambda_n, x) \cdot z_n(\lambda_n, t)$; $\qquad z_n(\lambda_n,t) = \int_{x_L}^{x_R} Q(x,t) \cdot \varphi_n(\lambda_n, x)\, dx$.

Здесь $z_n(\lambda_n, t)$ – временные моды разложения решения в ряд по собственным функциям $\varphi_n(\lambda_n, x)$ задачи (1)–(3), $n \in \{0, 1, 2, ...\}$, λ_n – собственные числа. Для собственных функций выполняется условие ортонормированности:

(5) $\int_{x_L}^{x_R} \varphi_i(\lambda_i, x) \cdot \varphi_j(\lambda_j, x)\, dx = \begin{cases} 1, & при \quad i = j; \\ 0, & при \quad i \neq j. \end{cases}$

При построении системы модального управления задаются желаемым распределением контролируемого параметра $Q^*(x,t)$. Сигнал отклонения контролируемого параметра от желаемого распределения в каждый момент времени, $e(x,t) = Q^*(x,t) - Q(x,t)$, раскладывается в ряд по собственным функциям решения задачи с помощью модального анализатора, на выходе которого формируется вектор временных мод отклонения $\mathbf{e}(t) = [e_i(t)]_K$, где K – количество учитываемых мод,

(6) $e_i(t) = \int_{x_L}^{x_R} e(x,t) \cdot \varphi_i(\lambda_i, x)\, dx$, $\quad i \in \{0, 1, 2, ..., K-1\}$.

2 Синтез нечёткого регулятора

Элементы вектора $\mathbf{e}(t)$ выступают в роли входных лингвистических переменных нечёткого контроллера [5]. При этом им может быть определён удобный для человеческого восприятия понятийный смысл, описывающий пространственное температурное распределение:

- $e_0(t)$ – средняя температура стержня;
- $e_1(t)$ – разность температур между правым и левым концами стержня;

- $e_2(t)$ – разность температур между серединой стержня и его концами;
- и т.д.

Фаззификация каждой из временных мод отклонений осуществляется по единому принципу:

- для каждой временной моды определяется весовой коэффициент $1/w_i$ и рассчитывается ограниченная оценка временной моды отклонения:

$$(7)\quad \hat{e}_i(t) = \begin{cases} -1, & при \quad e_i(t) < -w_i; \\ e_i(t)/w_i, & при \quad -w_i \le e_i(t) \le w_i; \\ 1, & при \quad w_i < e_i(t). \end{cases}$$

- определяются термы «положительное отклонение» (*P*), «отрицательное отклонение» (*N*). Функции принадлежности терм $m(e_i)$ представлены на рисунке 1. Для них выполняется условие нормировки:

$$(8)\quad m_N(e_i) + m_P(e_i) = 1.$$

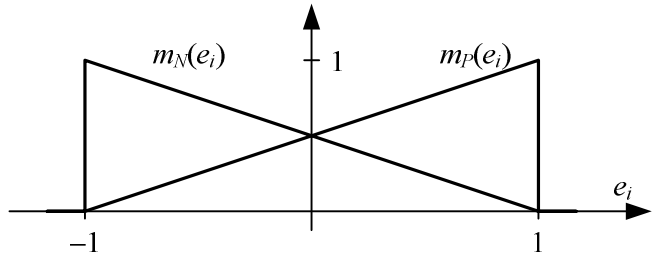


Рисунок 1 – Функции принадлежности терм лингвистических переменных «временная мода отклонения»

После определения лингвистических терм-множеств для каждой из лингвистических переменных, может быть сформирована база правил нечёткого регулятора. В работе исследовалась возможность построения нечёткого регулятора, у которого область определения функции принадлежности нечёткого вывода совпадает с областью определения пространственной переменной математической модели объекта. В качестве функций принадлежности нечёткого множества $B = \{B_j\}$, $j \in \{1, 2, ..., M\}$, являющегося результатом нечёткого вывода, использовались функции принадлежности типа одноэлементных множеств (синглетонов) [6], равномерно распределённые по области $[x_L, x_R]$. Здесь *M* – количество терм выходной лингвистической переменной *B*. Функции принадлежности $m_{B_j}(x)$ задаются выражением

$$(9)\quad m_{B_j}(x) = \begin{cases} 1, & при \quad x = x_j; \\ 0, & иначе; \end{cases} \qquad x_j = x_L + (j-1)\cdot\frac{x_R - x_L}{M-1}, \quad j \in \{1, 2, ..., M\}.$$

База правил нечёткого вывода формируется исходя из следующих решений:

- нечёткий вывод делается по каждой входной лингвистической переменной независимо;
- результирующая функция принадлежности формируется с использованием оператора неограниченной суммы с последующим нормированием.

Такой подход обеспечивает сокращение общего количества правил.

Базы правил нечёткого регулятора для случая *K*=3, *M*=7 приведены в таблицах 1–3. Прочерк в соответствующей ячейке говорит о том, что терма выходной переменной в данном случае не активизируется. При разработке правил руководствовались следующими предположениями.

Если средняя температура меньше заданной (значение отклонения $\hat{e}_0(t)$ положительное), то необходимо активизировать все термы нечёткого вывода. Если средняя температура больше заданной, то ни одна из терм не активизируется.

Если перепад температур между правым и левым концами стержня меньше заданного (значение отклонения $\hat{e}_1(t)$ положительное), то активизировать термы нечёткого вывода, расположенные ближе к x_1. Если перепад температур между правым и левым концами стержня больше заданного, то активизировать термы, расположенные ближе к x_0.

Если середина стержня нагрета недостаточно (значение отклонения $\hat{e}_2(t)$ положительное), то активизировать термы нечёткого вывода, расположенные в середине отрезка $[x_L, x_R]$. При отрицательном отклонении (перегрев середины), то активировать термы нечёткого вывода, расположенные по краям отрезка $[x_L, x_R]$.

Таблица 1 – База правил нечёткого регулятора для $\hat{e}_0(t)$

		B						
$\hat{e}_0(t)$	P	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7
	N	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 2 – База правил нечёткого регулятора для $\hat{e}_1(t)$

		B						
$\hat{e}_1(t)$	P	–	–	–	–	–	B_6	B_7
	N	B_1	B_2	–	–	–	–	–

Таблица 3 – База правил нечёткого регулятора для $\hat{e}_2(t)$

		B						
$\hat{e}_2(t)$	P	–	–	B_3	B_4	B_5	–	–
	N	B_1	B_2	–	–	–	B_6	B_7

Степень активизации каждой из терм лингвистической переменной нечёткого вывода определяется выражением

$$m_{ji}(x_j) = m_{B_j}(x) \cdot m(e_i(t)),$$

где $m_{ji}(x)$ – функция принадлежности логического вывода B_j для *i*-той входной лингвистической переменной.

Результирующая функция принадлежности $m_{res}(x_j)$ определяется выражением

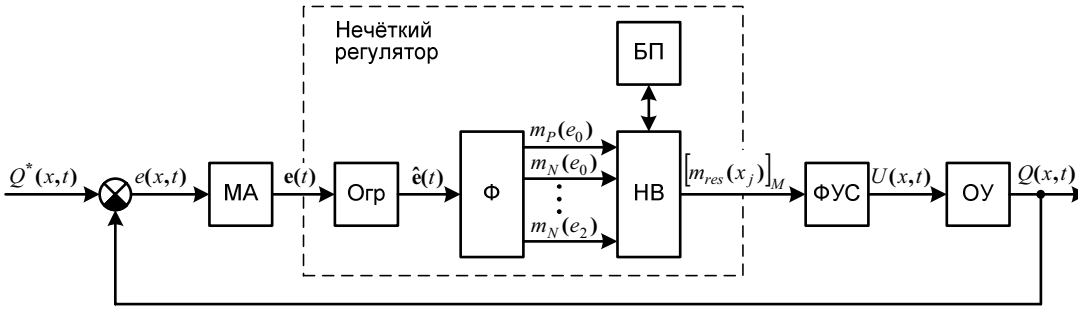
$$(10)\quad m_{res}(x_j) = \frac{1}{K}\sum_{i=0}^{K-1} m_{ji}(x_j), \quad j \in \{1, 2, ..., M\}.$$

Формально, функция $m_{res}(x)$ определена на отрезке $[x_L, x_R]$, однако при $x \neq x_j$ она равна нулю из-за использования одноэлементных множеств при формировании локальных выводов.

Выражение (10) обеспечивает расчёт управляющего воздействия в *j*-той точке пространственного распределения управляющего сигнала. В зависимости от возможностей реализации распределённого управления, рассчитанные в фиксированных точках значения, могут использоваться для управления мощностью отдельных секций нагревателя, либо для получения пространственной аппроксимации распределённого сигнала.

3 Структура системы автоматического управления

Структурная схема системы модального управления на базе нечёткого регулятора представлена на рисунке 2. Желаемое распределение контролируемого параметра $Q^*(x,t)$ сравнивается с текущим его состоянием $Q(x,t)$. Рассогласование $e(x,t)$ поступает на вход модального анализатора, который реализует расчёт компонент вектора временных мод отклонения $\mathbf{e}(t)$, согласно (6). Рассчитанный по (7) в блоке-ограничителе вектор ограниченных оценок временных мод отклонения $\hat{\mathbf{e}}(t) = \left[\hat{e}_i(t)\right]_K$ поступает на вход блока фаззификации, в котором рассчитываются значения функций принадлежности для каждой моды. На основе базы правил (таблицы 1–3) и выражений (9), (10) формируется функция принадлежности нечёткого вывода, которая определяет нормированные значения распределённого управляющего воздействия в фиксированных точках x_j пространственной координаты. Вектор значений $\left[m_{res}(x_j)\right]_M$ поступает на блок формирования управляющего сигнала. Здесь, в зависимости от аппаратных возможностей реализации распределённого управления, рассчитывается управляющее воздействие $U(x,t)$, которое поступает на вход объекта управления.



МА – модальный анализатор; Огр – ограничитель входных сигналов; Ф – фаззификация; НВ – нечёткий вывод; БП – база правил; ФУС – формирование управляющего сигнала; ОУ – объект управления

Рисунок 2 – Структура системы модального управления на базе нечёткого регулятора с формированием распределённого управляющего воздействия

4 Расчёт временных мод ошибки

На практике пространственное распределение контролируемого параметра заменяется совокупностью сосредоточенных сигналов в нескольких контролируемых точках по пространственной координате объекта. Тогда для нахождения коэффициентов модального представления сигнала рассогласования возможно применение следующего способа [1], [9].

Для каждой контролируемой точки с координатой $\hat{x}_n$, согласно (4), можно записать:

$$(11)\quad e\left(\hat{x}_n,t\right) = \sum_{i=0}^{K} \varphi_i(\hat{x}_n)\cdot e_i(t) = Q^*(\hat{x}_n,t) - Q(\hat{x}_n,t)\ ,\quad n \in \left\{1, 2, \ldots, K+1\right\}.$$

Если ввести обозначения

$$(12)\quad \mathbf{\Phi} = \begin{Vmatrix} \varphi_0(\hat{x}_1) & \varphi_1(\hat{x}_1) & \ldots & \varphi_K(\hat{x}_1) \\ \varphi_0(\hat{x}_2) & \varphi_1(\hat{x}_2) & \ldots & \varphi_K(\hat{x}_2) \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \varphi_0(\hat{x}_{K+1}) & \varphi_1(\hat{x}_{K+1}) & \ldots & \varphi_K(\hat{x}_{K+1}) \end{Vmatrix};\qquad \boldsymbol{\theta} = \begin{Vmatrix} Q^*(\hat{x}_1,t) - Q(\hat{x}_1,t) \\ Q^*(\hat{x}_2,t) - Q(\hat{x}_2,t) \\ \ldots \\ Q^*(\hat{x}_{K+1},t) - Q(\hat{x}_{K+1},t) \end{Vmatrix},$$

то равенство (12) можно записать в виде:

(13) $\mathbf{\Phi e} = \mathbf{\theta}$.

Если точки $\hat{x}_n$ выбраны надлежащим образом, матрица $\mathbf{\Phi}$ будет невырожденной, и решение уравнения даётся простым обращением $\mathbf{\Phi}$:

(14) $\mathbf{e} = \mathbf{\Phi}^{-1}\mathbf{\theta}$.

Решение системы (13) избавиться от операции интегрирования по пространственной переменной. Таким образом упрощается структура модального анализатора (см. рисунок 2).

Заключение

Предложенный в работе подход к построению систем модального управления на базе нечёткого регулятора с формированием распределённого управляющего воздействия позволяет на основе интуитивного восприятия поведения объекта управления разрабатывать системы управления объектами с распределёнными параметрами. Полученный регулятор обладает широкими возможностями по параметрической настройке. Существует возможность варьирования весовыми коэффициентами временных мод рассогласования, изменение количества терм входных и выходных лингвистических переменных. Кроме того, компактный вид базы правил обеспечивает наглядное представление условий активизации терм выходной лингвистической переменной и удобное их изменение при необходимости. Дополнительную гибкость в настройке придаёт возможность изменения координат расположения для одноэлементных множеств, описывающих функции принадлежности терм лингвистической переменной нечёткого вывода.

Список литературы

[1] Рей У. Методы управления технологическими процессами: Пер. с англ.– М.: Мир, 1983.

[2] Бутковский А.Г. Структурная теория распределённых систем. – М., Наука, 1977.– 320 с.

[3] Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределёнными параметрами: Учеб. пособие/Э.Я. Рапопорт. – М.: Высш. Шк., 2003. – 299с.

[4] Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами: Учеб. пособие/ Э.Я. Рапопорт. – М.: Высш. Шк., 2005. – 292 с.

[5] Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высш. Шк., 2009. – 680 с.

[6] Данилушкин И.А., Колпащиков С.А. Управление объектами с распределёнными параметрами с использованием аппарата нечёткой логики// Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIII Международной конференции (15-17 июня 2011 г. Самара, Россия).– Самара: Самарский НЦ РАН, 2011. С. 115–120.

[7] Пегат А. Нечёткое моделирование и управление [Текст] / А. Пегат; пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011.– 798 с.

[8] Методы робастного, нейро-нечёткого и адаптивного управления: Учебник / Под ред. Н.Д. Егупова; изд. 2-е, стереотипное.– М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002.– 744 с.

[9] Данилушкин И.А. Распределённая система управления термоциклическими испытаниями элементов газотурбинных двигателей на специализированных стендах// Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». Выпуск 13: Самара, 2001. С. 50–57.

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА С УЧЕТОМ ЕГО РЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИ НАЛОЖЕНИИ КАБЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИИ

В.Н. Митрошин, А.С. Нечаев

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
nechaev-as@mail.ru, auts@samgtu.ru
тел: 8 (846) 337-09-01, 8 (846) 337-07-00

Ключевые слова: *экструдер, зона дозирования, расплав полимера, температура, объект с распределенными параметрами, модель, система распределенного управления*

Abstract
In this paper we have a model of change in temperature of the melt of low density polyethylene in a single-screw extruder in a dispensing zone with the internal heat sources as an object with distributed parameters. Based on this model, a distributed system was synthesized automatically control the temperature of the polymer melt in a dispensing zone.

Введение

Автоматическое управление сложными непрерывными многооперационными технологическими процессами в настоящее время является актуальной задачей современной теории управления. Таким процессом, в полной мере, можно считать изолирование токопроводящей жилы методом экструзии.

Построение системы автоматического управления технологическими параметрами данного процесса является крайне сложной задачей, поскольку он представляет собой систему из большого числа составляющих различной природы [1]: вращение шнека, параметры гранул полимера, температура полимера на выходе экструдера, длина ванн охлаждения и температура воды в них и др. Поэтому для получения готовой продукции, удовлетворяющей требуемым показателям качества, необходимо задавать жесткие требования к технологическим показателям процесса. Данное высказывание представляется особенно актуальным применительно к процессу наложения изоляции на токопроводящую жилу при производстве высокочастотных кабелей связи типа LAN-кабель и коаксиальный кабель. Это объясняется ярко выраженной зависимостью электрических параметров кабелей от частоты передаваемого по ним высокочастотного сигнала [2]. Стоит также отметить, что построение системы оптимального управления рассматриваемой технологической линией экспериментальным путем является долгим и дорогостоящим процессом, ввиду чего весьма актуальна задача построения модели данной системы и определение параметров настройки регуляторов с ее помощью.

Температура расплава полимера на выходе экструдера является одним из основных параметров технологического процесса, который необходимо контролировать. Именно от нее зависит степень пористости вспененной изоляции, определяющая электрическую проницаемость изоляции, возникновение избыточной напряженности между молекулами полимера, вызывающей быстрое старение изоляции, ее отслоение от жилы и механическую непрочность кабеля и т.д.

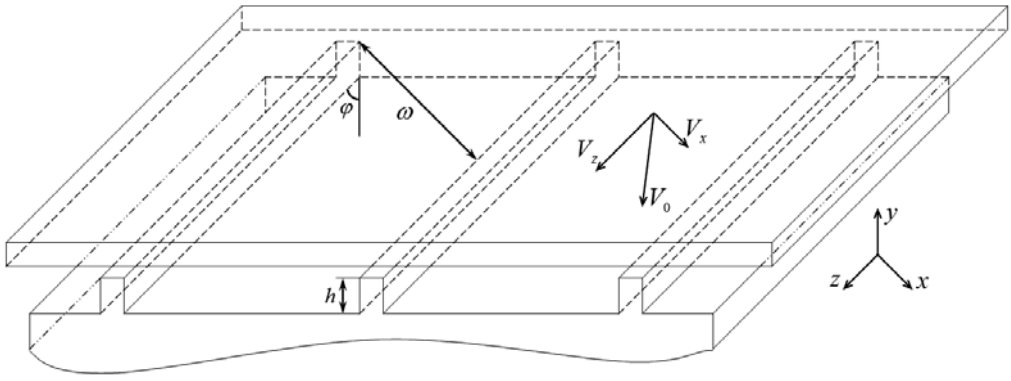
Формирование температуры расплава происходит на протяжении всего времени пребывания материала в экструдере, однако именно в зоне дозирования устанавливается конечная температура полимера.

1 Моделирование объекта управления

Для создания системы оптимального управления каким-либо объектом необходимо определить его модель, отражающую его основные особенности. В нашей работе объектом управления будем считать изменение температуры расплава полимера на выходе зоны дозирования.

Ввиду особенностей устройства экструдера температура расплава полимера меняет свое значение по мере прохождения его от начала зоны до кабельной головки и зависит как от внешних тепловых потоков, подведенных омическими нагревателями через цилиндр, так и от внутренних источников тепла, вызванных аномалией вязкости и наличием продольного и циркуляционного течений расплава в канале шнека. В связи с этим при описании данного объекта необходимо рассматривать зависимость его состояния не только от времени, но и от пространственных координат, то есть представлять его как объект с распределенными параметрами.

Из геометрии экструдера для описания течения расплава полимера следует описывать в радиальных координатах, однако, для наглядности и простоты представления модели воспользуемся декартовой системой координат, предварительно развернув шнек и цилиндр на плоскости, как показано на рисунке 1. Это вполне допустимо, поскольку в зоне дозирования одночервячного экструдера, специализированного для переработки полимеров, отношение внешнего диаметра шнека к внутреннему диаметру цилиндра близко к единице, а кривизной торцов винтового канала можно пренебречь, в связи с ее малой величиной в этой зоне [3], что дает достаточно точное описание течения расплава полимера в прямоугольных координатах. Стоит также указать, что в данном случае совершенно безразлично, движется ли шнек относительно плоскости цилиндра, или же цилиндр движется относительно шнека.



ω – ширина канала; h – глубина канала; φ – угол захода червяка; V_0 – линейная скорость перемещения поверхности цилиндра относительно червяка; V_x, V_z – скорости разложения V_0 по осям x и z соответственно.

Рисунок 1 – Развернутая модель зоны дозирования

Математическую модель расплава полимера можно получить, используя универсальное уравнение тепломассопереноса в условиях распределенности параметров, в виде

$$\rho C\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\upsilon_x\frac{\partial T}{\partial x}+\upsilon_y\frac{\partial T}{\partial y}+\upsilon_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)=$$

(1) $$=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\tau_{xx}\frac{\partial \upsilon_x}{\partial x}+\tau_{yy}\frac{\partial \upsilon_y}{\partial y}+\tau_{zz}\frac{\partial \upsilon_z}{\partial z}+$$
$$+\tau_{xy}\left(\frac{\partial \upsilon_x}{\partial y}+\frac{\partial \upsilon_y}{\partial x}\right)+\tau_{xz}\left(\frac{\partial \upsilon_x}{\partial z}+\frac{\partial \upsilon_z}{\partial x}\right)+\tau_{yz}\left(\frac{\partial \upsilon_y}{\partial z}+\frac{\partial \upsilon_z}{\partial y}\right).$$

В уравнении (1) ρ – плотность расплава полимера; C – теплоемкость расплава; T – температура; λ – коэффициент теплопроводности расплава; υ_i, при $(i = x, y, z)$ – проекция скорости расплава на соответствующие оси; τ_{ij} – тензоры напряжений сдвига, определяемые как $\tau_{ij} = \eta_a \cdot (\partial \upsilon_i / \partial j)$, $(i, j = x, y, z)$, где η_a – эффективная вязкость расплава полимера.

При переработке полимера в зоне дозирования также примем такие допущения, как:

1) среда является несжимаемой;
2) поля скоростей и температур изменяются вдоль оси z намного меньше, чем по двум другим осям;
3) течение в направлении оси y существует только в непосредственной близости к стенкам канала;
4) вследствие большого отношения ширины винтового канала ω к его глубине h можно предположить, что на некотором расстоянии от стенок канала скорости υ_x и υ_z не зависят от x;
5) температура вдоль ленточного нагревателя экструдера меняется практически линейно, т.е. $(\partial^2 T / \partial z^2) \approx 0$.

Они позволяют значительно упростить выражение (1) и привести его к виду, представленному формулой (2).

(2) $$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t}=-\overline{V}_z\frac{\partial T(z,t)}{\partial z}+\frac{1}{\rho C}\cdot\Phi,$$

где Φ есть функция диссипации, являющаяся внутренним источником тепла, вызванного эффектом межмолекулярного трения полимера при течении расплава полимера в канале шнека, представляемая формулой (3):

(3) $$\Phi=\mu_0\cdot\mathbf{exp}\left[-b\left(T(z,t)-T_0\right)\right]\cdot\frac{1}{\rho h}\left[\left(\frac{\partial \upsilon_x}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial \upsilon_z}{\partial y}\right)^2\right]^{\frac{n+1}{2n}},$$

$T(z,t)$ – текущая температура по продольной координате; $\overline{V}_z$ – средняя скорость движения расплава полимера вдоль канала шнека; μ_0 – значение ньютоновской вязкости расплава; b – температурный коэффициент вязкости; T_0 – температура приведения; n – индекс течения.

В виду того, что подвод тепла к расплаву осуществляется извне ленточными нагревателями через цилиндр экструдера, выражение (2) преобразуется к виду (4):

(4) $$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t}=-\overline{V}_z\frac{\partial T(z,t)}{\partial z}+\frac{1}{\rho C}\cdot\Phi+\frac{\alpha}{\rho C h}\left[T_{ц}(z,t)-T(z,t)\right],$$

где $T_{ц}(z,t)$ – температура цилиндра экструдера; α – коэффициент теплоотдачи между полимером и цилиндром.

Для численного моделирования данного объекта следует найти его передаточную функцию. Используя алгоритм нахождения передаточной функции для объекта с распределенными параметрами [4], представленного формулой (4), получим:

$$W(z,p)=\frac{k_0}{T_0 p+1}\left[1-\exp\left(-\frac{z}{T_0\cdot\overline{V}_z}\right)\cdot\exp\left(-\frac{z}{\overline{V}_z}p\right)\right]. \quad (5)$$

Здесь z – значение продольной координаты, определяемое местом измерения температуры расплава полимера; k_0 и T_0 соответственно, коэффициент усиления и постоянная времени, определяющие реологические особенности расплава полимера в зоне дозирования экструдера.

Выражение (5) справедливо, если принять температуру цилиндра экструдера равномерно распределенной по длине зоны нагрева. Этот момент крайне важен, поскольку при различных тепловых потоках, идущих от соседних нагревателей, структура передаточной функции (5) сохраняется, однако числовые параметры существенно будут отличаться.

2 Моделирование системы распределенного управления

Анализ конструкций экструзионных линий для наложения кабельной изоляции позволяет сделать вывод о том, что минимальное число нагревателей в зоне дозирования равно двум. В некоторых случаях, например, при переработке полимеров с высокой температурой плавления и большой теплоемкостью, число нагревателей может достигать восьми.

На практике, чаще всего, регулирование температуры расплава полимера на выходе экструдера осуществляется управлением мощностью последней зоны нагрева. Однако в ряде случаев такой способ регулирования является малоэффективным в связи с довольно высокой инерционностью процесса нагрева и охлаждения. Такие случаи могут возникать, например, при смене партии сырья, имеющей отличные от предыдущей теплофизические характеристики, при резком и значительном изменении температуры подаваемого материала, при быстрой смене температурного режима цехового помещения и т.п. Эти изменения требуют использования быстродействующего управляющего воздействия, такого как, например, изменение скорость вращения шнека, однако данный способ несет в себе ряд принципиальных трудностей регулирования других параметров технологического процесса.

Нами предлагается решение данной задачи путем регулирования температуры расплава полимера на выходе экструдера управлением мощностью нагрева двух последних тэнов, что в большинстве случаев представляется возможным. Поскольку нагреватели имеют четкие геометрические формы и явное распределение по длине цилиндра экструдера, то ставится задача построения автоматической системы распределенного управления температурой расплава полимера, оптимального по минимизации отклонения регулируемой величины от заданного значения при воздействии внешних возмущающих факторов.

Согласно источнику [5] построение адекватной системы автоматического управления базируется на условиях управляемости и наблюдаемости объекта.

Рассматриваемый объект можно считать управляемым, поскольку по технологии процесса нагрева полимера в экструдере возможно выбрать такое управляющее воздействие, которое в определенных пределах способно, при наличии внешних возмущений, перевести объект из некоторого начального состояния в требуемое конечное.

Что касается наблюдаемости, то в нашем случае, для выполнения данного условия, достаточно измерять температуру на выходе зоны нагрева одним датчиком, располагающимся как можно глубже в цилиндре экструдера. Это обусловлено наличием циркуляционного течения полимера в канале шнека, что делает расплав однородным по всему сечению.

Физические и геометрические параметры зоны дозирования позволяют утверждать, что:

6) в первом приближении цилиндр экструдера при мгновенном изменении электрической мощности на нагревателе можно описать апериодическим звеном первого порядка, с ко-

эффициентом усиления и постоянной времени, зависящими от свойств металла и толщины цилиндра;

7) так как нагреватели расположены в относительной близости друг от друга и расплав полимера, проходя расстояние между нагревателями, не успевает существенно изменить своей температуры, между первым и вторым нагревателем можно провести четкую температурную границу и определить краевые условия;
8) поскольку расплав полимера, подвергшись воздействию на участке с первым нагревателем, переходит на участок со вторым нагревателем, то структурная схема зоны дозирования будет представлять собой последовательное соединение звеньев, описывающих первую и вторую зоны нагрева.

На основании вышесказанного и полученной передаточной функции объекта нами была синтезирована система автоматического управления температурой расплава полимера с контролем двух последних зон нагрева цилиндра экструдера. Анализ системы был осуществлен с использованием пакета *MatLab Simulink*. Модель данной системы приведена на рисунке 2.

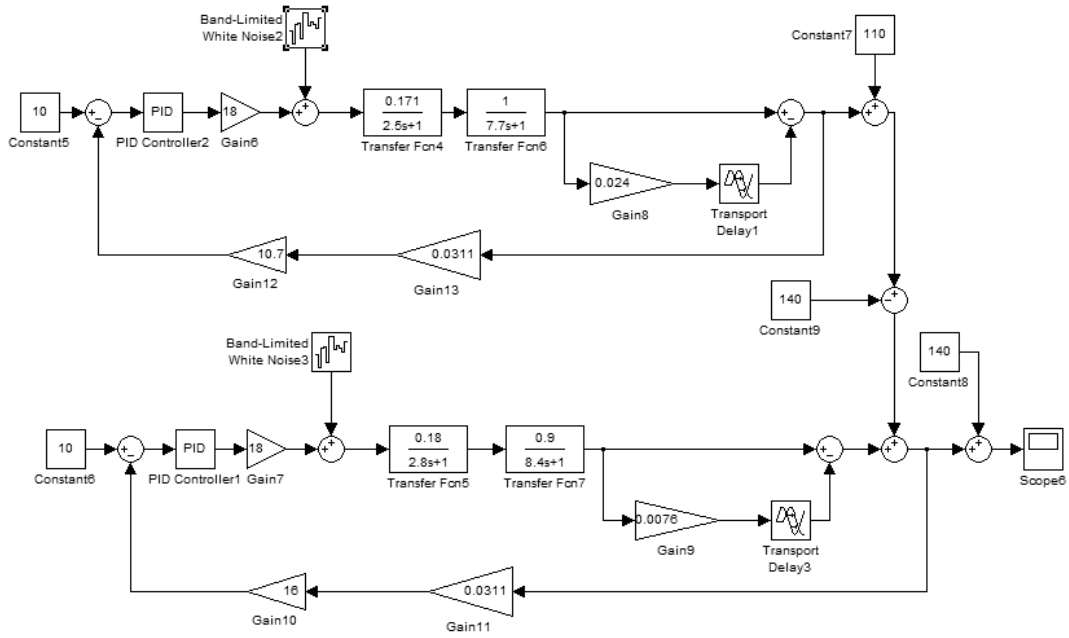


Рисунок 2 – Модель системы автоматического регулирования температуры расплава полимера с контролем двух последних зон нагрева цилиндра экструдера NOKIA-80

Численная модель объекта управления рассчитана для полиэтилена низкой плотности ввиду частого его использования в качестве изоляции высокочастотных кабелей связи. Это объясняется его хорошими механическими и электромагнитными свойствами, он также обладает невысокой температурой плавления (порядка $110°C$) относительно других используемых в кабельной промышленности полимеров, например, фторопластов (более $300°C$). При переработке полимера с добавлением вещества для химического вспенивания изоляции (порофора), коэффициенты системы, определяющие свойства объекта, преобразуются в зависимости от степени пористости, которая также зависит от температуры расплава. Также при расчете коэффициентов объекта управления ряд числовых параметров находился из критериальных

уравнений конвекции для турбулентного течения, что справедливо, ввиду особенностей течения расплава полимера в зоне дозирования.

Параметры, связанные с геометрическими размерами агрегатов экструдера, рассчитывались для одночервячного экструдера финского производства марки *NOKIA-80*.

В качестве возмущающего внешнего воздействия была задана случайная ступенчатая функция, влияющая непосредственно на мощность, подаваемую на нагреватели. Представленное возмущающее воздействие моделирует как резкие перепады напряжения питания на нагревателе, так и резкие перепады окружающей температуры. Выбор данной функции возмущения мотивирован тем, что худший вариант влияния возмущения на объект при регулировании наблюдается в том случае, когда оно наступает внезапно или за очень короткий промежуток времени. В этом случае система регулирования может не успеть отработать поступившее возмущение. Максимальное отклонение амплитуды функции возмущения от значения сигнала с усилителя составляет $\pm 10\%$. Отклонения больше заданного крайне редки и случаются при отказе в работе какого-либо операционного участка.

Для регулирования мощности, подаваемой на нагреватели, в схему были введены ПИД-регуляторы. Параметры ПИД-регуляторов находились с помощью метода CHR (Chien, Hrones и Reswick) по табличным значениям [6] для системы при наблюдении отклика на внешнее возмущение. Задача оптимального регулирования заключалась в том, чтобы настроить регулятор первой зоны нагрева на работу с быстрым выводом температуры на заданный уровень с возможностью перерегулирования не более 20%, а второй регулятор – на работу с быстрым выводом температуры на необходимый уровень без эффекта перерегулирования. Такой подход позволяет расплаву полимера быстрее достичь необходимой температуры, не вызывая эффекта спекания пластмассы вблизи стенок цилиндра экструдера, а также помогает избежать несвоевременного разложения порофора при наложении пористой изоляции.

Переходная характеристика данной системы приведена на рисунке 3.

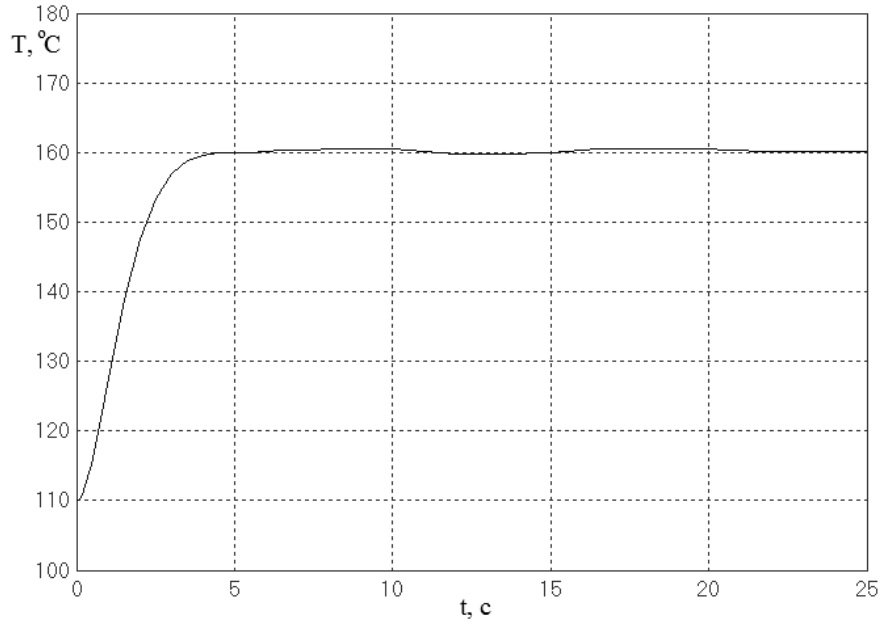


Рисунок 3 – График переходного процесса полученной системы автоматического регулирования температуры расплава полимера в зоне дозирования при управлении двумя последними зонами нагрева

В качестве сигнала обратной связи служит температура расплава полимера, снятая с помощью термопар, расположенных сразу после нагревательных элементов. Нелинейностью и инерционностью термопар в нашем случае можно пренебречь ввиду малых отклонений измеряемой температуры и допустимой точности самих датчиков.

Из рисунка 3 видно, что время переходного процесса данной системы составляет порядка 4,5 с, а также то, что регулятор справляется с поданными на объект возмущениями, не допуская изменения температуры расплава полимера на выходе зоны дозирования больше $1°C$. Начальная температура выбрана из условия того, что на входе зоны дозирования полимер находится в полностью расплавленном состоянии и температура расплава равна температуре плавления полиэтилена. Конечная температура расплава ($160°C$) взята согласно технологическим требованиям, предъявляемым к изготовлению кабелей связи путем наложения расплава полиэтилена низкой плотности на обожженную медную жилу.

Заключение

В ходе работы получена модель изменения температуры расплава полиэтилена низкой плотности в зоне дозирования одночервячного экструдера в виде передаточной функции объекта с распределенными параметрами. Данная модель получена с учетом пространственного распределения температурного поля расплава полимера, а также влияния внутренних источников тепла на формирование конечной температуры расплава. С помощью полученных данных была построена и отлажена модель системы автоматического регулирования температурой расплава полимера на выходе зоны дозирования с управлением двумя последними зонами нагрева.

Данная модель справедлива для переработки других видов полимеров на одночервячных экструдерах данного класса с числом нагревателей в зоне дозирования больше двух. Однако это, безусловно, ведет к пересчету числовых коэффициентов, отражающих реологические особенности перерабатываемого материала, геометрические параметры экструдера и уникальные начальные и граничные условия, характерные для данной технологической линии.

Список литературы

[1] Митрошин В.Н., Митрошин Ю.В. Использование системного подхода при автоматизации непрерывных технологических процессов кабельного производства // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010, №7 (28). – С. 26–31.

[2] Парфенов Ю.А. Кабели электросвязи – М.: Эко-Трендз, 2003. – С. 256.

[3] Рябинин Д.Д., Лукач Ю.Е. Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей. – М., «Машиностроение», 1972. – С. 272.

[4] Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами: Учеб. пособие / Э.Я. Рапопорт. – М.: Высш. шк., 2003. – С. 299.

[5] Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез автоматического управления с распределенными параметрами: Учеб. пособие / Э.Я. Рапопорт. – М.: Высш. шк., 2005. – С. 292.

[6] Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Современные технологии автоматизации (СТА). – 2008. – №1. – С. 86-99.

MODELLING AND CONTROL ON COMPLEX STRUCTURED SYSTEMS

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В СЛОЖНОСТРУКТУРИРУЕМЫХ СИСТЕМАХ

МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА, МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО РАНЖИРОВАНИЯ И НОРМИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБОБЩЁННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Н.В. Дилигенский[1], **М.В. Цапенко**[1], **А.Н. Давыдов**[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: nich@samgtu.ru
тел: +7 (846) 278-43-16

***Ключевые слова**: многокритериальная оценка эффективности научных исследований, классификация знаний, Data Envelopment Analysis, ранжированные и нормированные оценки эффективности*

Abstract
The paper deals with the analysis and generalized estimating the comparative efficiency of research, the impact of multi-criteria ranking of scientific papers, revealing promising areas of research in a large research institution.

Введение

В статье рассмотрены вопросы анализа и обобщенного оценивания сравнительной эффективности научных исследований, многокритериального ранжирования результативности выполняемых научных работ, системно-обоснованного выявления перспективных направлений научных исследований в рамках деятельности крупной научно-исследовательской организации.

Настоящее исследование проведено в рамках выполнения Государственного контракта Министерства образования и науки РФ № 16.740.11.0749 от 21 октября 2011 года.

1 Структура иерархической системы обобщенных характеристик эффективности научных исследований

Систему обобщенных характеристик научных исследований представим в виде четырехуровневой агрегированной иерархической структуры (рисунок 1).

Первый уровень характеризуется глобальным критерием эффективности научных исследований. На втором уровне иерархии эффективность научных исследований будем оценивать показателями, характеризующими степень соответствия наукоемкой продукции приоритетным направлениям модернизации экономики и развития науки, технологий и техники [1].

Третий уровень иерархии, более детальных оценок эффективности, будем формировать на основе локальных показателей эффективности научных исследований, выполняемых по тематике критических технологий и направлениям функционирования технологических платформ [1].

На четвертом уровне иерархии построим совокупность частных показателей, характеризующих вклад научных организаций и коллективов в разработку наукоемкой продукции, ориентированной на перспективные рынки инновационных товаров и услуг.

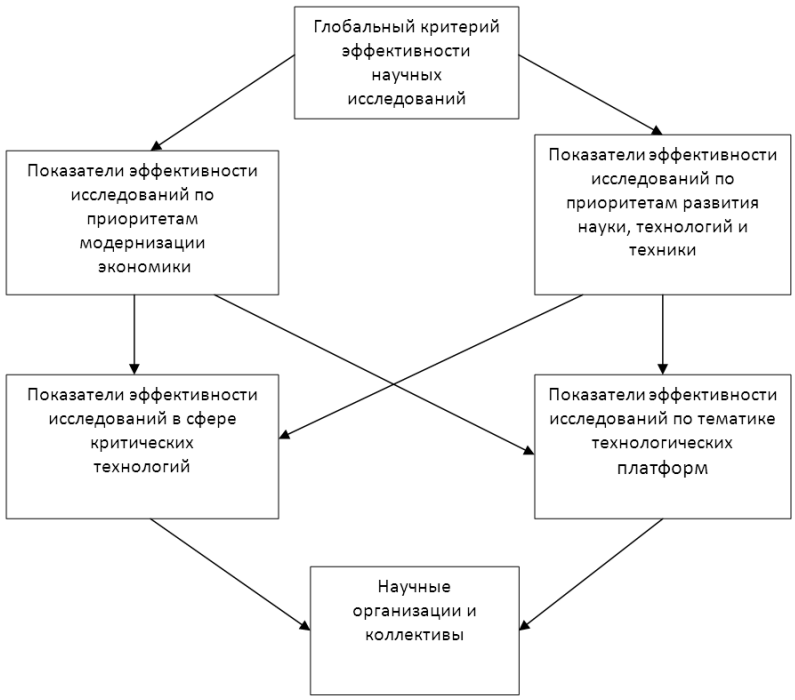


Рисунок 1 – Иерархическая система обобщенных показателей эффективности научных исследований

Детализация этой структуры для первых двух уровней иерархии приведена на рисунке 2. Базовым элементом структуры на высшем уровне иерархии является глобальный обобщенный критерий эффективности научных исследований – *ГК*.

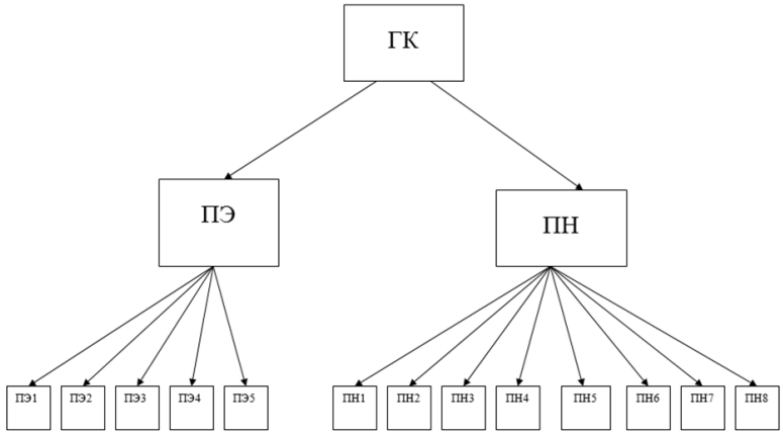


Рисунок 2 – Структуры первых уровней иерархии обобщенных показателей эффективности научных исследований

В соответствии с предлагаемой структурой глобальный критерий определяется сверткой двух специализированных критериев *ПЭ* и *ПН*, расположенных на втором уровне иерархии

(1) $ГК = ПЭ \times ПН$.

В формуле (1) и на рисунке 2 для соответствующих сокращений будем понимать: *ПЭ* – обобщенный показатель эффективности научных исследований, выполняемых по приоритетным направлениям модернизации экономики, *ПН* – обобщенный показатель эффективности исследований по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники.

Каждый из обобщенных критериев *ПЭ* и *ПН* будем характеризовать совокупностью частных показателей, а их операция свертки (х) обобщенных показателей *ПЭ* и *ПН* в (1) является многокритериальной. Её будем выполнять в соответствии с методологией, рассмотренной нами в работах [2–5] на основе *DEA*-метода [6, 7].

Для этого формулируется и решается соответствующая задача математического программирования. Её решениями являются относительные оценки обобщенной эффективности исследований по направлениям модернизации экономики – $ПЭ^0$ и развития науки, технологий и техники – $ПН^0$. Далее проводится нормирование этих оценок.

Нормирование системы многоуровневых, многокритериальных оценок эффективности научных исследований на этих ступенях иерархии проводится на основе постулирования, что глобальная оценка на высшем уровне соответствует 100% эффективности, т.е. *ГК*=1,0. Тогда нормирование на первом уровне обобщенных показателей эффективности и отыскание критериев *ПЭ* и *ПН* определяются следующими соотношениями:

$$(2)\quad ПЭ = \frac{ПЭ^0}{ПЭ^0 + ПН^0};$$

$$(3)\quad ПН = \frac{ПН^0}{ПЭ^0 + ПН^0}.$$

В соответствии со структурой иерархии показателей, приведенной на рисунке 2, обобщенный показатель *ПЭ* является многокритериальной сверткой нижерасположенных показателей:

$$(4)\quad ПЭ = ПЭ_1 \times ПЭ_2 \times ПЭ_3 \times ПЭ_4 \times ПЭ_5,$$

где $ПЭ_i$, *i=1, 2, … 5* – показатели эффективности, соответствующие приоритетным направлениям модернизации экономики, определенные Президентом России Медведевым Д.А. 18 июня 2009 года на первом заседании комиссии по модернизации российской экономики: $ПЭ_1$ – энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива; $ПЭ_2$ – медицинские технологии, прежде всего диагностическое оборудование, а также лекарственные средства; $ПЭ_3$ – стратегические информационные технологии, включая вопросы создания суперкомпьютеров и разработки программного обеспечения; $ПЭ_4$ – космические технологии, связанные с телекоммуникациями, включая и ГЛОНАСС, и программу развития наземной инфраструктуры; $ПЭ_5$ – ядерные технологии.

Свертку (4) будем выполнять также на основе *DEA*–метода и нормировать результаты решений соответствующих задач математического программирования на основе вычисленного по (2) обобщенного показателя *ПЭ*.

Аналогично, в соответствии со структурой рисунка 2, обобщенный показатель *ПН* является следующей многокритериальной сверткой:

$$(5)\quad ПН = ПН_1 \times ПН_2 \times ПН_3 \times ПН_4 \times ПН_5 \times ПН_6 \times ПН_7 \times ПН_8,$$

где $ПН_i$, *i=1, 2, … 8* – показатели эффективности, приоритетных направлений развития науки, технологий и техники, соответствующие Указу Президента РФ [1]: $ПН_1$ – безопасность и противодействие терроризму; $ПН_2$ – индустрия наносистем; $ПН_3$ – информационно-телекоммуникационные системы; $ПН_4$ – науки о жизни; $ПН_5$ – перспективные виды вооруже-

ния; $ПН_6$ – рациональное природопользование; $ПН_7$ – транспортные и космические системы; $ПН_8$ – энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика.

Свертку (5) также будем выполнять на основе *DEA*–метода и результаты решений соответствующих задач математического программирования нормировать из определенного по формуле (3) обобщенного показателя эффективности *ПН*.

Показатели относительных рангов значимости научных исследований по тематике критических технологий на третьем уровне иерархии $ПТ^0_n$, *n=1, 2, …, 19*, также как и показатели на вышерасположенных уровнях, будем получать на основе постановки и решения соответствующих *DEA*-задач математического программирования. Затем будем проводить их ранжирование на 100% и получать частные показатели эффективности $ПТ_n$, *n=1, 2, …, 19*.

Далее реализуем агрегирование показателей третьего уровня $ПТ_n$ в соответствии со структурой взаимосвязей, представленной на рисунке 3, в показатели эффективности второго уровня – $ПЭ_i$:

$$(6)\quad ПЭ_i = \bigcup_{\Gamma_i} \mu_{in} ПТ_n, i = 1,2,...,5,$$

где $\bigcup_{\Gamma_i}$ - операция композиции на графе Γ_i, формирующим структуру взаимосвязей между элементами третьего $ПТ_n$ и второго $ПЭ_i$ уровнями показателей, μ_{in} – ранги показателей $ПТ_n$, определяемые конфигурацией графа Γ_i, реализующие нормирование в соответствии со значениями показателей $ПЭ_i$, полученными на предыдущем этапе.

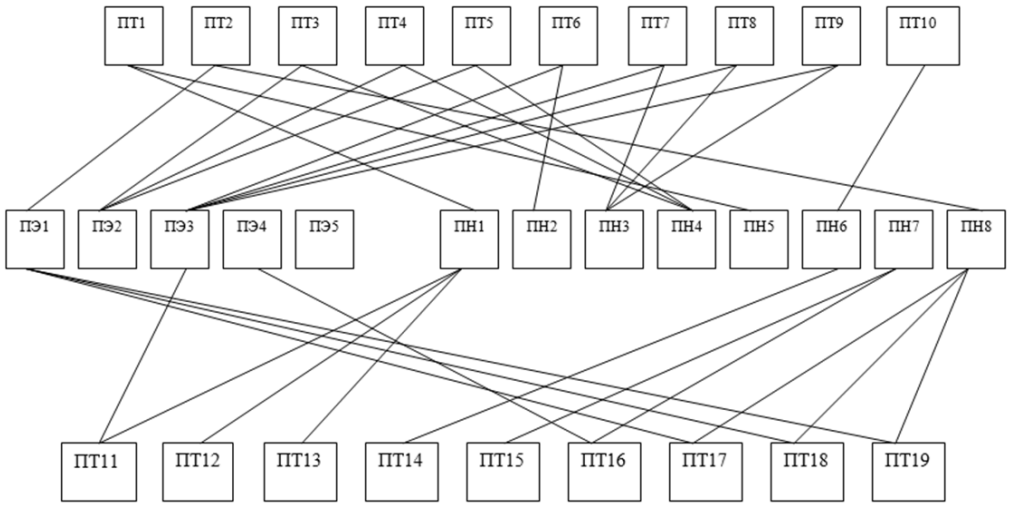


Рисунок 3 – Структура конструирования обобщенных показателей эффективности научных исследований в сфере критических технологий

Аналогично проводится агрегирование показателей $ПТ_n$ в показатели $ПН_j$:

$$(7)\quad ПН_j = \bigcup_{\Gamma_j} v_{jn} ПТ_n, j = 1,2,...,8,$$

где Γ_j и v_{jn} – граф и ранги структуры взаимосвязей элементов $ПН_j$ и $ПТ_n$ – рисунок 4.

Показатели эффективности исследований по тематике технологических платформ, утверждённых на заседания Правительственной комиссией по высоким технологиям и инновациям [8], вкладов научных организаций и коллективов определяются подобно (6), (7) аналогичными операциями композиции.

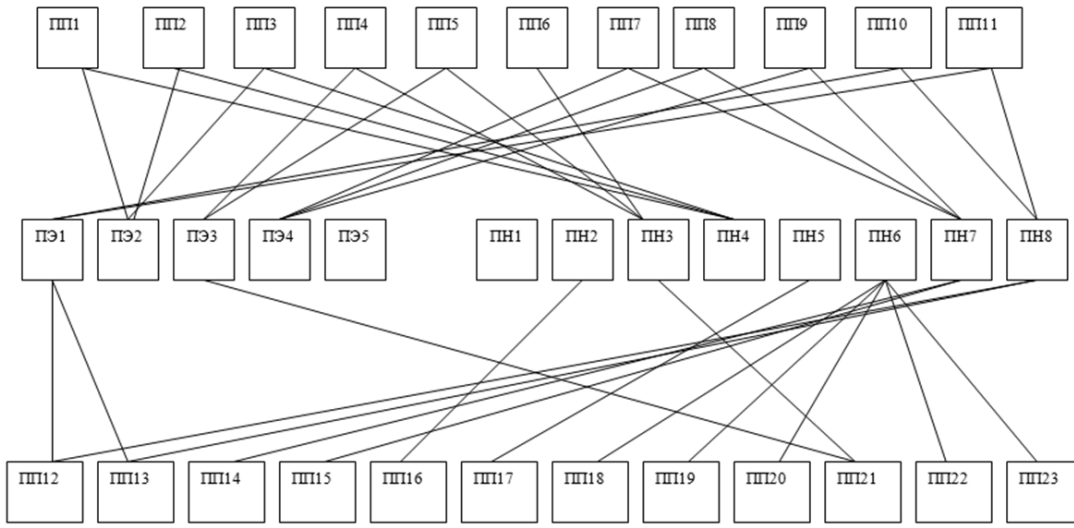


Рисунок 4 – Структура конструирования обобщенных показателей эффективности научных исследований по тематике технологических платформ

2 Ранжирование и нормирование обобщенных показателей эффективности научных исследований

Проведём комплексный анализ, ранжирование и нормирование обобщённых оценок эффективности приоритетов модернизации экономики, приоритетных направлений развития науки, технологий и техники, критических технологий и технологических платформ.

Для целей анализа обобщённой эффективности будем применять три типа показателей:

- ***DEA-оценки***, отвечающие нормированной на единицу максимальной эффективности;
- ***ранжированные оценки***, отвечающие суммарной эффективности совокупности обобщённых оценок на одном уровне иерархии, равной 100%;
- ***нормированные оценки,*** отвечающие одноуровневым относительным оценкам, согласованным с ранжированными оценками эффективности, полученными на вышерасположенном уровне иерархии.

Для иерархической структуры оценок, представленной на рисунке 2, положим, что глобальная оценка эффективности научных исследований на высшем уровне равна 100% – *ГК*=100%.

Для следующего уровня иерархии на первом этапе получим *DEA*-оценки обобщенных показателей приоритетных направлений модернизации экономики *ПЭ* и развития науки, технологий и техники *ПН*.

Эти оценки определяются на основе решения *DEA*-модели, учитывающей агрегированные характеристики приоритетов по трём параметрам: число НИР (x_1), количество участников, занятых в научных исследованиях (x_2), и объёмы финансирования НИР (x_3).

В этом случае постановка *DEA*-модели имеет следующий вид:

$$J_i = \mathbf{max}(u_{1i}x_{1i} + u_{2i}x_{2i} + u_{3i}x_{3i}), i = 1,2; \quad (8)$$

$$\begin{cases} u_1 1082 + u_2 501 + u_3 420007{,}97 \le 1; \\ u_1 1495 + u_2 894 + u_3 707324.6 \le 1; \\ u_1, u_2, u_3 \ge 0. \end{cases}$$

Решения такой модели определяют следующие коэффициенты значимости: для приоритетов модернизации экономики – 0,7238; для потенциалов научных исследований – 1,000 – рисунок 5 (левая диаграмма).

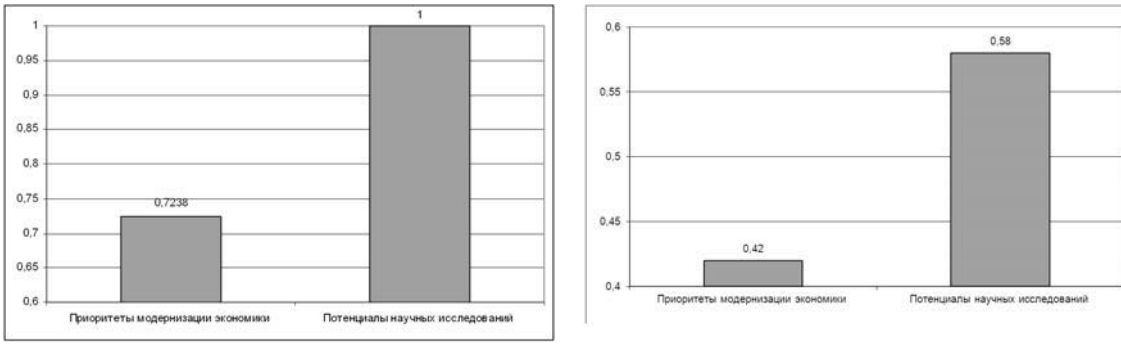


Рисунок 5 – DEA-оценки и ранжированные значения относительной эффективности приоритетов модернизации экономики и научных исследований

Также на рисунке 5 (правая диаграмма) показаны ранжированные на первом уровне иерархии на единичном интервале количественные оценки вкладов этих приоритетов – 0,4199 (41,99%) и 0,5801 (58,01%). Эти оценки являются исходными для получения нормированных оценок на втором уровне иерархии.

В таблице 1 представлены количественные значения частных показателей эффективности по приоритетам модернизации экономики.

Путем решения пяти задач линейного математического программирования, аналогичных (8) были получены обобщенные *DEA*-оценки вклада научных исследований, проведено их ранжирование и нормирование на интервале 100% значимости.

Таблица 1 – Сравнительные оценки приоритетов модернизации экономики

№ п/п	Приоритеты модернизации экономики	Число НИР	Участники НИР	Объем НИР, тыс. руб.	DEA-оценки	Ранжированные оценки, %	Нормированные оценки, %
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
1.	Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива	745	315	219255,99	1,0000	45,68%	19,18%
2.	Медицинские технологии, прежде всего диагностическое оборудование, а также лекарственные средства	154	56	163615,89	0,7462	34,09%	14,31%
3.	Стратегические информационные технологии, включая вопросы создания суперкомпьютеров и разработки программного обеспечения	63	81	17421,23	0,2571	11,74%	4,93%
4.	Космические технологии, связанные с телекоммуникациями, включая и ГЛОНАСС, и программу развития наземной инфраструктуры	103	34	12860,27	0,1383	6,32%	2,65%
5.	Ядерные технологии	17	15	6854,59	0,0476	2,17%	0,91%
Всего:		1082	501	420 007,97	2,1892	100,00%	41,99%

На рисунке 6 графически представлены ранжированные оценки приоритетов модернизации экономики на втором уровне иерархии.

Рисунок 6 – Ранжированные оценки приоритетов развития экономики

В таблице 2 приведены частные показатели и рассчитанные: *DEA*-оценки, ранжированные и нормированные оценки эффективности исследований по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники.

Таблица 2 – Оценки потенциала научных исследований по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники

№ п/п	Приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации	Число НИР	Участники НИР	Объем НИР, тыс. руб.	DEA-оценки	Ранжированные оценки, %	Нормированные оценки, %
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
1	Безопасность и противодействие терроризму	72	71	62693,82	0,2891	6,14%	3,56%
2	Индустрия наносистем	157	121	125330,01	0,7392	15,70%	9,11%
3	Информационно-телекоммуникационные системы	55	101	23479,04	0,4041	8,58%	4,98%
4	Науки о жизни	103	68	84351,29	0,4649	9,87%	5,73%
5	Перспективные виды вооружения, военной и специальной техники	78	81	55385,76	0,3957	8,40%	4,87%
6	Рациональное природопользование	361	97	216859,77	1,0000	21,24%	12,32%
7	Транспортные и космические системы	142	104	31182,67	0,4160	8,83%	5,12%
8	Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика	527	251	108042,24	1,0000	21,24%	12,32%
Всего:		1495	894	707 324,6	4,709	100,00%	58,01%

На диаграмме рисунка 7 представлены ранжированные оценки эффективности приоритетов развития науки, технологий и техники.

На рисунке 8 приведены нормированные, упорядоченные по убыванию обобщённые оценки эффективности исследований второго уровня иерархии – приоритеты развития экономики, науки, технологий и техники.

В таблице 3 приведены DEA-оценки, ранжированные и нормированные оценки эффективности исследований по проблематике критических технологий.

На диаграммах рисунков 9, 10 графически представлены ранжированные и нормированные оценки эффективности исследований по тематике критических технологий.

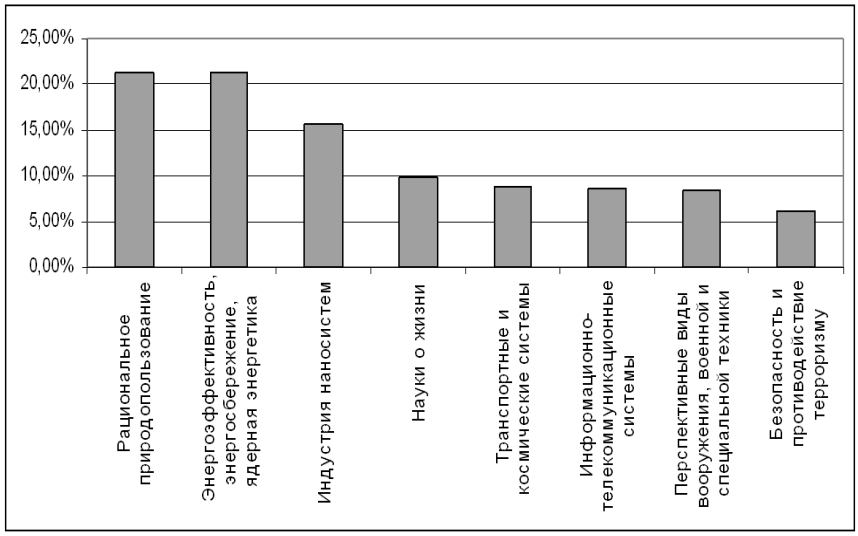


Рисунок 7 – Ранжированные оценки приоритетов развития науки

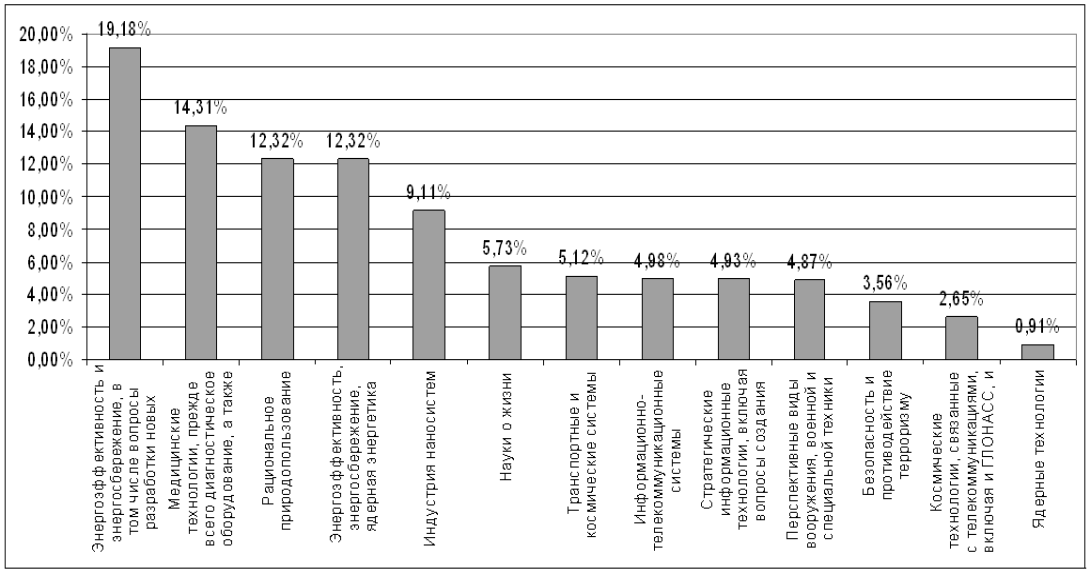


Рисунок 8 – Нормированные оценки исследований на втором уровне иерархий

Таблица 3 – Обобщённые оценки вклада научных исследований в разработку соответствующих критических технологий

№ п/п	Критическая технология	Число НИР	Участники НИР	Объем НИР, тыс. руб.	DEA-оценки	Ранжированные оценки, %	Нормированные оценки, %
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Базовые и критические военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники	3	1	552,00	0,1035	1,62%	5,1%

№ п/п	Критическая технология	Число НИР	Участники НИР	Объем НИР, тыс. руб.	DEA-оценки	Ранжированные оценки, %	Нормированные оценки, %
1	2	3	4	5	6	7	8
2.	Базовые технологии силовой электротехники	1	1	800,00	0,0347	0,54%	1,0%
3.	Биокаталитические, биосинтетические и биосенсорные технологии	1	2	124,00	0,0476	0,74%	3,6%
4.	Биомедицинские и ветеринарные технологии	2	7	455,83	0,1667	2,60%	12,7%
5.	Геномные, протеомные и постгеномные технологии	1	2	101,92	0,0476	0,74%	3,6%
6.	Нано-, био-, информационные, когнитивные технологии	1	1	1250,00	0,0390	0,61%	9,3%
7.	Технологии доступа к широкополосным мультимедийным услугам	1	4	30,00	0,0952	1,49%	0,8%
8.	Технологии и программное обеспечение распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем	5	2	1047,20	0,1724	2,69%	1,4%
9.	Технологии информационных, управляющих, навигационных систем	25	7	14508,48	0,8621	13,46%	7,1%
10.	Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения	10	21	75251,93	1,0000	15,61%	10,5%
11.	Технологии наноустройств и микросистемной техники	1	5	80,00	0,1191	1,86%	3,2%
12.	Технологии получения и обработки конструкционных наноматериалов	29	42	22662,77	1,0000	15,61%	2,3%
13.	Технологии получения и обработки функциональных наноматериалов	6	14	3455,00	0,3333	5,20%	0,8%
14.	Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера	2	7	109,13	0,1667	2,60%	1,8%
15.	Технологии создания высокоскоростных транспортных средств и интеллектуальных систем управления новыми видами транспорта	13	22	5719,76	0,5238	8,18%	2,4%
16.	Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения	17	23	15865,66	0,6113	9,54%	5,4%
17.	Технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств	1	1	65,00	0,0345	0,54%	1,0%
18.	Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии	24	36	14686,44	0,8571	13,38%	22,6%
19.	Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе	2	8	1795,00	0,1905	2,97%	5,4%
Всего:		145	206	158 560,1	6,4051	100,00%	100,00%

В таблице 4 приведены частные показатели эффективности исследований по проблематике технологических платформ, их *DEA*-оценки, ранжированные и нормированные оценки.

На рисунках 11, 12 приведены ранжированные и нормированные оценки вклада научных исследований по проблематике технологических платформ. Видно существенное различие в оценках при учёте уровней их иерархий.

Таким образом, построена иерархия обобщённых оценок эффективности научных исследований по перспективным направлениям модернизации экономики, развития науки, технологий и техники, по проблематике критических технологий и технологических платформ, найдены количественные оценки эффективности научных исследований по соответствующим направлениям исследований в разрезе трёх групп оценок.

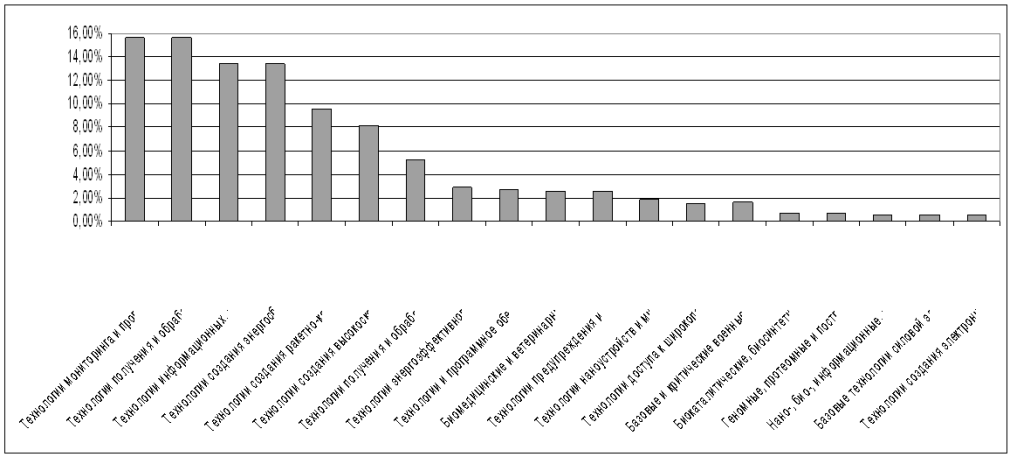


Рисунок 9 – Ранжированные оценки вклада научных исследований в разработку соответствующих критических технологий

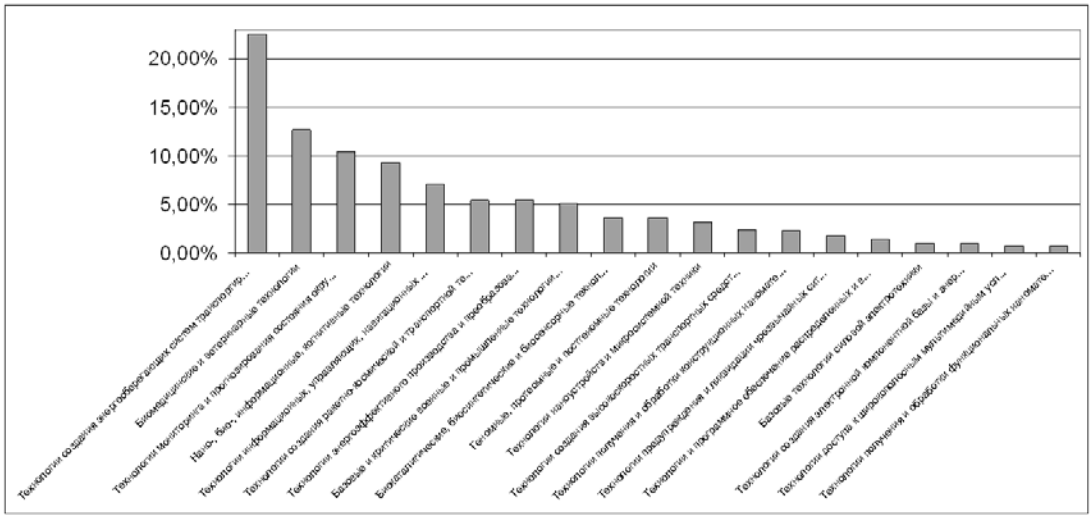


Рисунок 10 – Нормированные оценки вклада научных исследований в разработку соответствующих критических технологий

Заключение

По результатам исследования предложена методология построения четырехуровневой иерархической системы оценивания эффективности научных исследований, основанная на структурно-функциональном подходе, декомпозиции значимости характеристик и *DEA*-подходе определения рангов (весов) частных показателей эффективности.

Для научных исследований, выполняемых по приоритетным направлениям модернизации экономики, развития науки, технологий и техники, проблематике критических технологий и технологических платформ получены системы *DEA*-оценок, ранжированных и нормированных оценок эффективности, характеризующих, соответственно, относительные значимости и ранги частных показателей эффективности, взвешенные на каждом уровне и по всем уровням иерархии оценок.

Таблица 4 – Обобщенные оценки вклада НИОКР в разработку тематики технологических платформ

№ п/п	Базовые направления создания высоких инновационных технологий	Технологическая платформа	Число НИР	Участники НИР	Объем НИР, тыс. руб.	DEA-оценки	Ранжированные оценки, %	Нормированные оценки, %
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*
1.	Медицинские и биотехнологии	1. Медицина будущего	290,00	369	104100,752	0,4997	7,84%	17,11%
		2. Биоиндустрия и биоресурсы — БиоТех2030	57,00	54	4426,226	0,0829	1,30%	2,84%
2.	Информационно-коммуникационные технологии	4. Национальная программная платформа	118,00	238	28360,693	0,3119	4,89%	3,77%
		5. Национальная суперкомпьютерная технологическая платформа	8,00	24	849,250	0,0315	0,49%	0,38%
3.	Фотоника	6. Инновационные лазерные, оптические и оптоэлектронные технологии — фотоника	12,00	23	1006,663	0,0301	0,47%	0,19%
4.	Авиакосмические технологии	7. Авиационная мобильность и авиационные технологии	124,00	60	4146,189	0,1327	2,08%	1,27%
		8. Национальная космическая технологическая платформа	231,00	262	19472,478	0,3716	5,83%	3,54%
		9. Национальная информационная спутниковая система	96,00	108	10760,996	0,1537	2,41%	1,47%
5.	Энергетика	10. Интеллектуальная энергетическая система России	418,00	342	43369,188	0,5631	8,84%	18,39%
		11. Экологически чистая тепловая энергетика высокой эффективности	32,00	53	9665,721	0,0695	1,09%	2,26%
		12. Перспективные технологии возобновляемой энергетики	47,00	69	5536,418	0,0904	1,42%	2,95%
		13. Малая распределенная энергетическая	226,00	109	19514,940	0,2416	3,79%	7,88%
6.	Технологии транспорта	14. Применение инновационных технологий для повышения эффективности строительства, содержания и безопасности автомобильных и железных дорог	87,00	101	3871,132	0,1419	2,23%	0,78%
		15.Высокоскоростной интеллектуальный железнодорожный транспорт	86,00	87	10554,333	0,1296	2,03%	0,71%
7.	Технологии металлургии и новые материалы	16. Новые полимерные композиционные материалы и технологии	67,00	151	27542,979	0,1979	3,11%	9,1%
		17. Материалы и технологии метал-	243,00	341	41465,093	0,4469	7,01%	4,9%

№ п/п	Базовые направления создания высоких инновационных технологий	Технологическая платформа	Число НИР	Участники НИР	Объем НИР, тыс. руб.	DEA-оценки	Ранжированные оценки, %	Нормированные оценки, %
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*
		лургии						
8.	Добыча природных ресурсов и нефтегазопереработка	18. Технологическая платформа твердых полезных ископаемых	9,00	20	1324,130	0,0262	0,41%	0,12%
		19. Технологии добычи и использования углеводородов	550,00	763	232599,650	1,0000	15,69%	7,405%
		20. Глубокая переработка углеводородных ресурсов	185,00	294	37647,246	0,3853	6,05%	1,94%
9.	Электроника и машиностроении	21. Технологии мехатроники, встраиваемых систем управления, радиочастотной идентификации и роботостроение	244,00	350	36934,915	0,4587	7,20%	5,55%
		22. Освоение океана	4,00	6	479,999	0,0079	0,12%	0,04%
10.	Экологическое развитие	23. Технологии экологического развития	953,00	437	363762,139	1,0000	15,69%	7,405%
Всего:			4087	4261	1 007 391	6,3731	100,00%	100,00%

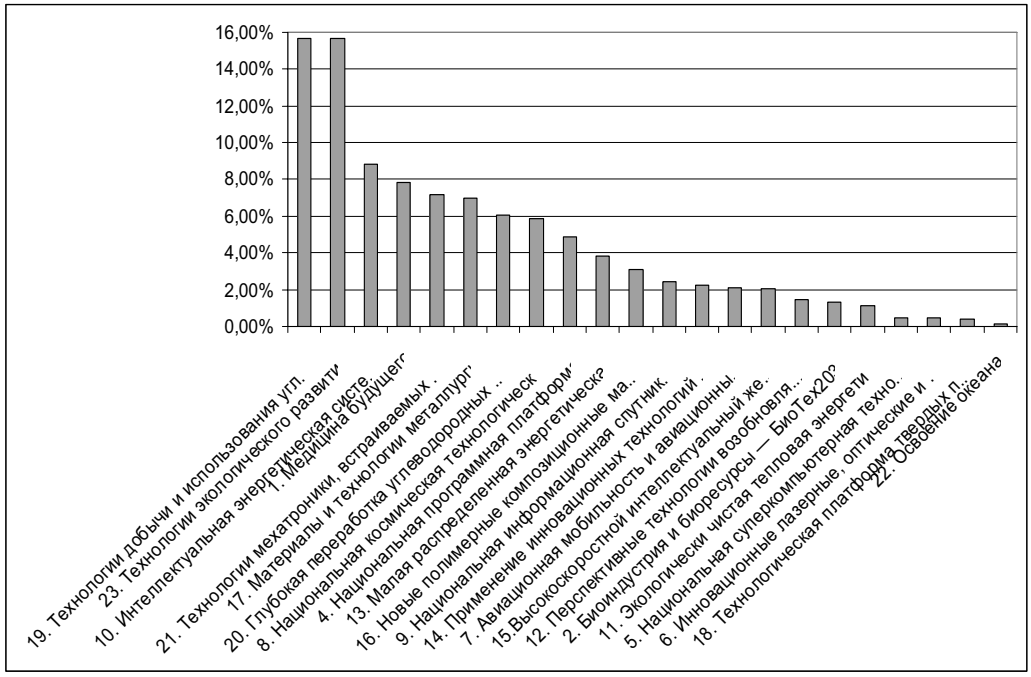


Рисунок 11 – Ранжированные оценки вклада научных исследований в разработку тематик технологических платформ

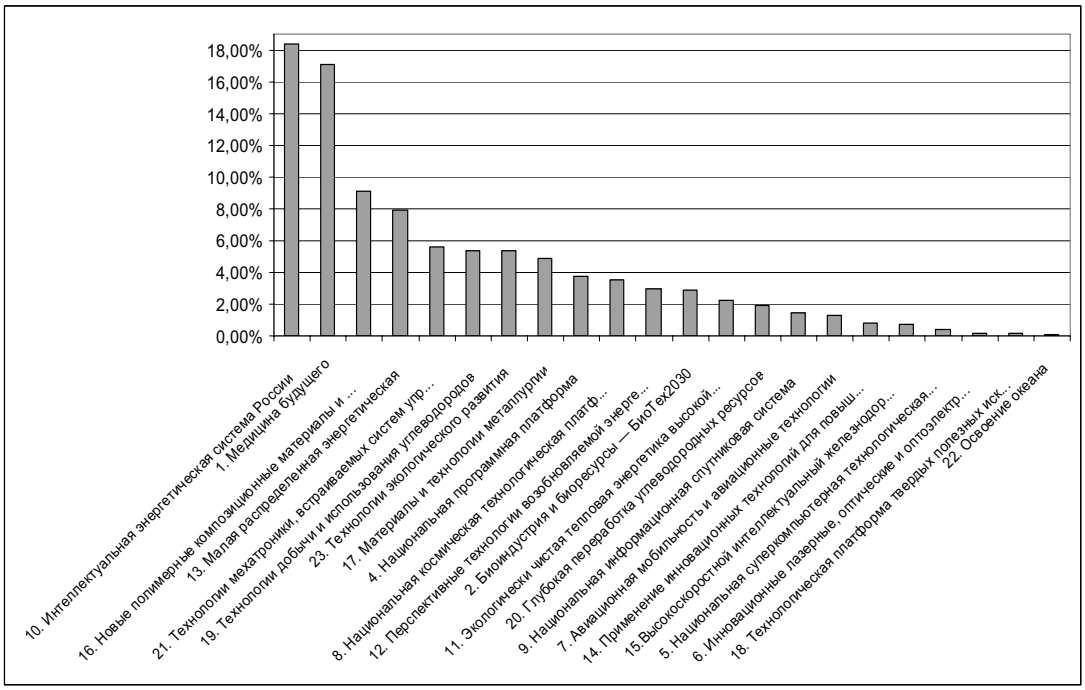


Рисунок 12 – Нормированные оценки вклада научных исследований в разработку тематик технологических платформ

Список литературы

[1] «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г N 899.

[2] Дилигенский Н.В., Цапенко М.В. Методология DEA: оценка эффективности экономических объектов, анализ метода и свойств решений // Межвузовский сборник научных трудов «Высшее образование, бизнес, предпринимательство 2001». Самара, СамГТУ, Поволжский институт бизнеса. – 2001. – с. 149–159.

[3] Дилигенский Н.В., Цапенко М.В., Давыдов А.Н. Системный анализ вклада научно-технической деятельности в развитие технологических платформ // Вестник Самарского государственного технического университета №2 (34), серия «Технические науки», Самара, 2012 год (с. 19 - 26)

[4] Дилигенский Н.В., Цапенко М.В., Давыдов А.Н., Барболин Д.А. Программно-аналитический инструментарий для многокритериального оценивания эффективности научных исследований // Вестник Самарского государственного технического университета №4 (36), серия «Технические науки», Самара, 2012 год (с. 39 – 45).

[5] Дилигенский Н.В., Цапенко М.В., Давыдов А.Н. Иерархическая система обобщённых характеристики эффективности научных исследований // Стратегическое планирование и развитие предприятий. Секция 2. / Материалы Четырнадцатого всероссийского симпозиума. Москва, 9-10 апреля 2013 г. Под ред. чл.-корр. РАН Г.Б. Клейнера. – М.: ЦЭМИ РАН, 2013 г. (с. 61 – 63).

[6] HANDBOOK ON DATA ENVELOPMENT ANALYSIS edited by: William W. Cooper, Lawrence M. Seiford, Joe Zhu // Kluwer Academic Publishers, 2004 – 593 p.

[7] Farrel M.J. The Measurement of Productive Efficiency // Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General), Vol. 120, Part III, 1957, 253 – 281 p.

[8] Протокол заседания Правительственной комиссией по высоким технологиям и инновациям №2 от 1 апреля 2011 г.

ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА *R*-ФУНКЦИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.В. Саушев

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, Россия
ep-spguvk@bk.ru
тел: +7 (812) 334-38-34, факс: +7 (812) 251-01-14

Ключевые слова: *состояние, R-функции, область работоспособности, техническая система*

Abstract
The method of an assessment of a condition of the difficult technical systems, based on information on border of area of the working capacity presented in an analytical look on the basis of use of logical *R*–functions is considered.

Введение

Одной из важнейших задач технического диагностирования сложных технических систем (ТС) является задача оценки состояния системы в рассматриваемый момент времени и прогнозирование ее состояния на предстоящий период времени. Методы управления состоянием ТС рассматриваются в работах [1, 2]. При анализе состояния большинства ТС прежде всего оценивают ее работоспособность. В задачах прогнозирования показателем состояния ТС обычно является запас работоспособности системы [3]. В докладе рассматривается метод оценки состояния ТС, основанный на использовании информации о границе области работоспособности системы. При этом область работоспособности аналитически задается в результате использования математического аппарата логических *R*-функций, что обеспечивает высокую точность идентификации состояния ТС.

1 Постановка задачи

Основу повышения эффективности процесса эксплуатации ТС составляет переход к проведению технического обслуживания и ремонтов по фактическому уровню их технического состояния. Под состоянием ТС понимается внутреннюю определенность ТС, характеризуемую в рассматриваемый момент времени признаками, установленными технической документацией на ТС, которые являются начальными условиями процессов их дальнейшего изменения [1].

Состояние ТС характеризуется некоторым набором или вектором параметров, среди которых можно выделить:

- внутренние параметры $\tilde{\mathbf{O}} = \left(X_1, X_2, \ldots, X_i, \ldots, X_n\right)$, определяющие допусковую область $\mathbf{D}_X$, которые характеризуют состояние комплектующих элементов ТС. Эти параметры называют также первичными параметрами системы;
- внутренние параметры $\mathbf{Z}^{\upsilon} = \left(Z_1^{\upsilon}, Z_2^{\upsilon}, \ldots, Z_g^{\upsilon}, \ldots, Z_c^{\upsilon}\right)$, определяющие допусковую область $\mathbf{D}_Z$, которые характеризуют фазовые переменные на выходах элементов системы, $\upsilon = \overline{1,h}$, h – число элементов;
- выходные параметры $\mathbf{Y} = \left(Y_1, Y_2, \ldots, Y_j, \ldots, Y_m\right)$, определяющие допусковую область $\mathbf{D}_Y$, которые характеризуют различные функциональные зависимости фазовых переменных $\mathbf{Z} = \left(Z_1, Z_2, \ldots, Z_g, \ldots, Z_c\right)$ на выходе объекта управления.

Область допустимых изменений параметров **X** (область работоспособности) $\mathbf{G} = \mathbf{D}_X \bigcap \mathbf{M}_Z \bigcap \mathbf{M}_Y$ определяется неравенствами:

$$
\begin{aligned}
&\mathrm{Y}_{j\min} \le Y_j = F_j(\mathbf{X}) \le Y_{j\max}, j = \overline{1,m} \to \mathbf{M}_Y \\
(1)\quad &Z^v_{j\min} \le Z^v_j = F^v_j(\mathbf{X}) \le Z^v_{j\max}, v = \overline{1,h} \to \mathbf{M}_Z, \\
&X_{i\min} \le X_i \le X_{i\max}, i = \overline{1,n} \to \mathbf{D}_X
\end{aligned}
$$

где $Y_{j\max}$ ($Z^v_{j\max}$), $\mathrm{Y}_{j\min}$ ($Z^v_{j\min}$), Y_j (Z^v_j) – соответственно максимально и минимально допустимые значения *j*–го выходного Y_j (внутреннего Z^v_j) параметра; F – оператор связи первичных параметров с внутренними Z^v и выходными **Y** параметрами; $X_{i\min}$ и $X_{i\max}$ – предельно допустимые значения первичных параметров. Области $\mathbf{M}_Z$ и $\mathbf{M}_Y$ являются соответственно отображением областей $\mathbf{D}_Z$ и $\mathbf{D}_Y$ в пространство первичных параметров ТС.

Задача контроля состояния ТС заключается в распознавании принадлежности вектора **Y**(*t*) области $\mathbf{D}_Y$ или вектора **X**(*t*), области **G**, а также в определении запаса работоспособности системы в случае, если $Y(t) \subset \mathbf{D}_Y$. При этом под запасом работоспособности λ понимается степень приближения вектора фактического состояния ТС к его предельно допустимому значению: $\lambda = l_t / l_0$. Здесь l_t – наикратчайшее расстояние в евклидовом *n*-мерном пространстве параметров **X** между текущим состоянием вектора **X**(*t*) и границей области **G**; l_0 – аналогично l_t, но для момента времени $t = t_0$, что соответствует начальному моменту эксплуатации ТС.

Трудность решения задачи контроля обусловлена необходимостью построения границы области **G**, которая может иметь весьма сложную конфигурацию, и необходимостью вычисления величин l_t и l_0. Кроме того, для определения вектора $\mathbf{X}(t) = \{X_1(t), X_2(t), \ldots, X_n(t)\}$ требуется контролировать все *n* параметров **X**, что при большой размерности пространства R^n практически неудобно и весьма проблематично. Для упрощения задачи распознавания область работоспособности обычно аппроксимируют вписанным или описанным брусом наибольшего объема. Тем самым допустимые пределы изменения на первичные параметры устанавливаются независимо друг от друга.

Анализ показал [4], что такой подход приводит к большой методической погрешности, которая нелинейно возрастает в функции числа контролируемых параметров. Кроме того, для не односвязных областей работоспособности известные методы не имеют однозначного решения. Таким образом, актуальна задача разработки метода контроля ТС, обеспечивающего его простоту и высокую достоверность.

2 Аналитическое описание области работоспособности технической системы

Для существенного повышения достоверности математического описания областей работоспособности предлагается их аппроксимировать не регулярной фигурой (брусом, эллипсоидом), а каждую гиперповерхность, составляющую эту область, аппроксимировать отдельным выражением. Учитывая, что область работоспособности представляет собой пересечение конечного числа гиперповерхностей f_g, $g = 1,2,\ldots,d$; $d = 2(m+h+n)$, описываемых уравнениями $f_g(\mathbf{X}) = 0$, а функции ограничения $f_g(\mathbf{X}) = \varphi_g$ определяются (1) и представляют собой левые части неравенств: $F_j(\mathbf{X}) - Y_{j\min} \ge 0$, $Y_{j\max} - F_j(\mathbf{X}) \ge 0$, $F^v_j(\mathbf{X}) - Z^v_{j\min} \ge 0$, $Z^v_{j\max} - F^v_j(\mathbf{X}) \ge 0$, $X_i - X_{i\min} \ge 0$, $X_{i\max} - X_i \ge 0$, можно представить функцию $G = G(\mathbf{X})$, описывающую область работоспособности в виде: $G(\mathbf{X}) = \varphi_1 \wedge \varphi_2 \wedge \ldots \wedge \varphi_g \wedge \ldots \wedge \varphi_d$.

Если функции $f_g(\mathbf{X})$ принадлежат к классу *R*–функций [5] можно воспользоваться их свойствами и перейти от логической к аналитической форме записи. Рассмотрим возможности такого перехода.

Пусть $Y = F(\mathbf{X})$ есть функция, определенная всюду в пространстве R^n. Согласно определению *R*–отображения данная функция является *R*–функцией, если в каждой из областей $H_j\left(j = 1,2,\ldots,2^n\right)$ она сохраняет постоянный знак, т.е. $Q\left[F\left(X_1, X_2, \ldots, X_n\right)\right] = \varphi = \text{const}$. При этом область H_j представляет собой совокупность всех точек пространства R^n, для которых хотя бы одна координата X_i равняется нулю [5]. Введем в рассмотрение множество χ, содержащее *k* элементов *X* и сюръекцию вида $S_k : \chi \to B_k$, $B_k = \{0,1,\ldots,k-1\}$. Задание S_k приводит к разбиению множества χ на *k* подмножеств, которые представляет собой числовую ось или ее часть.

При аналитическом описании допусковых областей, $\mathbf{M} = \mathbf{M}_Z \cap \mathbf{M}_Y$, $\mathbf{P} = \mathbf{D}_X$ и области $\mathbf{G} = \mathbf{D}_X \cap \mathbf{M}_Z \cap \mathbf{M}_Y$ будем использовать *R*–функции, соответствующие разбиению всего множества первичных параметров пространства R^n на два или три подмножества с помощью сюръекции, определяемой предикатами $S_3(t)$ и $S_2(t)$:

$$S_3(t) = \begin{cases} 2, & \forall t \in (0;+\infty) \\ 1, & t = 0 \\ 0, & \forall t \in (-\infty;0) \end{cases}; \qquad S_2(t) = \begin{cases} 1, & \forall t \in (0;+\infty) \\ 0, & \forall t \in (-\infty;0). \end{cases}.$$

Для предиката $S_3(t)$: $\chi(0) = (-\infty;0)$, $\chi(1) = 0$, $\chi(2) = (0;+\infty)$. Для предиката $S_2(t)$: $\chi(0) = (-\infty;0)$, $\chi(1) = (0;+\infty)$. Предикату $S_3(t)$ можно поставить в соответствие принадлежность точки области **G**, а также нахождение ее вне области **G** и внутри этой области. Предикату $S_2(t)$ ставится в соответствие принадлежность или не принадлежность рассматриваемой точки области работоспособности.

Рассмотрим пространство R^n первичных параметров ТС. Согласно (1) неравенству $\varphi_{j\min}(\mathbf{X}) = F_j(\mathbf{X}) - Y_{j\min} \geq 0$ или $\varphi_{j\max}(\mathbf{X}) = Y_{j\max} - F_j(\mathbf{X}) \geq 0$ можно поставить в соответствие двоичную переменную

$$Q = Q\left(f_g(\mathbf{X})\right) = \begin{cases} 1, & \text{åñëè } f_g(\mathbf{X})) \geq 0; \\ 0, & \text{åñëè } f_g(\mathbf{X}) < 0, \end{cases}$$

где $f_g(\mathbf{X}) = \varphi_g = \varphi_{j\min}$ или $f_g(\mathbf{X}) = \varphi_g = \varphi_{j\max}$, $g = j$, $j = \overline{1,m}$, $g = \overline{1,2m}$.

Функция $Q = Q\left(f_g(\mathbf{X})\right)$, определяемая таким образом, является двоичным предикатом и обозначается $S_2(t)$. Предикату $Q(Y_{j\min})$ можно поставить в соответствие геометрический объект $M_{j\min}$. Объект $M_{j\min}$ называется опорным и представляет собой совокупность всех точек пространства R^n, в которых удовлетворяется условие $Q \equiv \left(\varphi_{j\min}(\mathbf{X}) \geq 0\right) = 1$. Аналогично вводится в рассмотрение предикат $Q(Y_{j\max})$.

Допусковая область $\mathbf{M}_Y$ состоит из геометрических объектов $M_{j\min}$ и $M_{j\max}$, причем булева функция $\varphi(Y_{1\min}, Y_{1\max}, ..., Y_{j\min}, Y_{j\max}, ..., Y_{m\min}, Y_{m\max})$ определяет логику формирования области $\mathbf{M}_Y$. Так как предикаты $Q(Y_{j\min})$ и $Q(Y_{j\max})$ могут принимать значения 0 или 1, то

ими можно заменить аргументы булевой функции φ. В результате такой замены получим следующее уравнение:

$$Q(Y) = \varphi\left[Q(Y_{1\min}), Q(Y_{1\max}), ..., Q(Y_{j\min}), Q(Y_{j\max}) ..., Q(Y_{m\min}), Q(Y_{m\max}) \right] = A,$$

где A принимает значение 0 или 1.

Для того чтобы неравенство $\varphi_j(\mathbf{X}) \geq 0$ определяло ту же область, что и предикатное уравнение $Q(Y) = 1$, необходимо, чтобы булева функция φ была замыкающей. Для построения функции φ воспользуемся R–функциями, обладающими свойствами функций алгебры логики. В результате использования R–функций область $\mathbf{M}_Y$ может быть задана следующим неравенством:

$$(2) \quad (((((\varphi_{1\min} \wedge_{\alpha 1}^{k} \varphi_{1\max}) \wedge_{\alpha 2}^{k} \varphi_{2\min}) \wedge_{\alpha 3}^{k} \varphi_{2\max}) \wedge_{\alpha 4}^{k} ...) \wedge_{\alpha(2m-2)}^{k} \varphi_{m\min}) \wedge_{\alpha(2m-1)}^{k} \varphi_{m\max} \geq 0,$$

где $\wedge^k$ – R–конъюнкция R–функций $\varphi_{j\min}$ и $\varphi_{j\max}$, $j = \overline{1,m}$, обеспечивающая возможность взятия k производных; $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_{2m-1}$ – величины, принадлежащие интервалу $[-1;1]$.

В формуле (2) могут быть опущены скобки и конечный результат не будет зависеть от последовательности свертки R–функций.

Для построения R–конъюнкции удобно воспользоваться формулой [4]:

$$(3) \quad \varphi_g \wedge_{\alpha}^{k} \varphi_{g+1} = \left(\varphi_g + \varphi_{g+1} - \sqrt{\varphi_g^2 + \varphi_{g+1}^2 - 2\alpha\varphi_g\varphi_{g+1}} \right) R\left(\varphi_g, \varphi_{g+1}\right),$$

где $R\left(\varphi_g, \varphi_{g+1}\right)$ – функция, обеспечивающая наличие k производных R–конъюнкции. Для ТС можно принять $R\left(\varphi_g, \varphi_{g+1}\right) = 1/(1+\alpha)$.

Если не требуется, чтобы R–конъюнкция была дифференцируема, формула (3) может быть упрощена. Принимая $\alpha = 1$, получим

$$(4) \quad \varphi_g \wedge \varphi_{g+1} = 0{,}5\left(\varphi_g + \varphi_{g+1} - \left| \varphi_g - \varphi_{g+1} \right| \right).$$

Если неравенство (2) приравнять нулю, то полученное уравнение будет определять границу области $\mathbf{M}_Y$. Математическое описание допусковых областей **M**, **P** и области **G** осуществляется аналогичным образом. При этом следует воспользоваться сюръекцией $S_3(t)$. Поскольку область **G** определяется пересечением областей **P** и **M**, то она может быть задана неравенством $P \wedge_{\alpha}^{k} M \geq 0$, а уравнение $P \wedge_{\alpha}^{k} M = 0$ будет определять ее границу. Следуя (2), (4) и работам [4, 5] получим функцию $G = G(\mathbf{X})$ аналитически, описывающую область работоспособности в виде следующего рекуррентного соотношения:

$$(5) \quad \begin{cases} G = \varphi_{(d)} = 0{,}5\left(\varphi_{(d-1)} + \varphi_d - \left| \varphi_{(d-1)} - \varphi_d \right| \right); \\ \varphi_{(d-1)} = 0{,}5\left(\varphi_{(d-2)} + \varphi_{d-1} - \left| \varphi_{(d-2)} - \varphi_{d-1} \right| \right); \\ \ldots \\ \varphi_{(g)} = 0{,}5\left(\varphi_{(g-1)} + \varphi_g - \left| \varphi_{(g-1)} - \varphi_g \right| \right); \\ \ldots \\ \varphi_{(3)} = 0{,}5\left(\varphi_{(2)} + \varphi_3 - \left| \varphi_{(2)} - \varphi_3 \right| \right); \\ \varphi_{(2)} = 0{,}5\left(\varphi_1 + \varphi_2 - \left| \varphi_1 - \varphi_2 \right| \right). \end{cases}$$

Приравнивая функцию G нулю, получим уравнение $G = 0$, определяющее границу области работоспособности ТС.

2 Оценка состояния технических систем на основе информации о границе области работоспособности

Состояние ТС определяется запасом ее работоспособности. При этом оценка запаса работоспособности возможна как в пространстве первичных параметров системы, так и в пространстве переменных состояния $\mathbf{Z}^{\upsilon}$. Построим множество подобластей, каждая из которых располагается эквидистантно относительно исходной области работоспособности и находятся внутри нее.

В пространстве внутренних параметров R^n вводится метрика l, являющаяся функцией координат двух любых точек этого пространства, например точек A и B. При этом $l = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \mu_i \left(X_i(A) - X_i(B)\right)^2}$, где $\mathbf{X}(A)$, $\mathbf{X}(B)$ – координаты векторов точек A и B соответственно; μ_i – нормирующий множитель по i–ой координате переменных $\mathbf{X}$. Если одна из точек, например точка A, является граничной точкой области G, а точка B находится внутри этой области и ее координаты характеризуют состояние ТС в рассматриваемый момент времени, то данная метрика будет определять запас работоспособности ρ системы и служить критерием сужения исходной области $\mathbf{G}^{(0)}$ с целью определения координат оптимальной точки. Далее производится сужение области $\mathbf{G}^{(0)}$ по критерию $l = \rho$. С этой целью изменяют критерий на величину Δl, т.е. $l^{(1)} = l^{(0)} + \Delta l$, получают аналитическое описание границы области $\mathbf{G}^{(1)}$ и определяют требуемое множество ее граничных точек.

Найдем уравнение, отображающее координаты граничных точек области $\mathbf{G}^{(0)}$ в координаты граничных точек области $\mathbf{G}^{(1)}$. Предположим, что область $\mathbf{G}^{(0)}$ определена на плоскости двух параметров X_1 и X_2. Для граничной точки $A^{(0)}(X_1^{(0)}, X_2^{(0)})$ области $\mathbf{G}^{(0)}$ уравнение нормали к кривой $\Phi^{(0)} \in \mathbf{G}^{(0)}$, на которой расположена точка $A^{(0)}$, имеет вид:

$$c_2(X_1^{(1)} - X_1^{(0)}) - c_1(X_2^{(1)} - X_2^{(0)}) = 0,\ c_1 = \partial\Phi^{(0)}(X_1, X_2)/\partial X_1,\ c_2 = \partial\Phi^{(0)}(X_1, X_2)/\partial X_2.$$

Учитывая, что $(X_1^{(1)} - X_1^{(0)})^2 + (X_2^{(1)} - X_2^{(0)})^2 = \Delta l_1^{\,2}$ и решая эти уравнения, получим:

$$\left|X_1^{(1)} - X_1^{(0)}\right| = c_1 \Delta l \Big/ \sqrt{\left(c_1^{\,2} + c_1^{\,2}\right)},\quad \left|X_2^{(1)} - X_2^{(0)}\right| = c_2 \Delta l \Big/ \sqrt{\left(c_1^{\,2} + c_1^{\,2}\right)}.$$

Обобщая на произвольный случай и опуская знак модуля, можно записать:

$$X_i^{(1)} = X_i^{(0)} \pm \frac{\left(\partial\Phi^{(0)}(\mathbf{X})/\partial X_i\right)\Delta l_1}{\left|grad\,\Phi^{(0)}(\mathbf{X})\right|},\ grad\,\Phi^{(0)}(\mathbf{X}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\partial\Phi^{(0)}(\mathbf{X})/\partial X_i\right)^2}.$$

Получим уравнения, описывающие область $\mathbf{G}^{(1)}$. С этой целью для каждой гиперповерхности определим координаты N_j граничных точек, равных числу значимых коэффициентов этой гиперповерхности. Подставляя эти координаты в систему уравнений

$$\varphi_j^{(1)} = \Phi_j^{(1)}(\mathbf{X}) = b_0^1 + \sum_{i=1}^{n} b_i^1 X_{i\rho} + \sum_{i=1}^{n} b_{ii}^1 X_{i\rho}^2 + \sum_{i=2}^{n}\sum_{\nu=1}^{i-1} b_{i\nu}^1 X_{i\rho} X_{\nu\rho} = 0,\ \rho = \overline{1, N_j}$$

и решая ее относительно неизвестных коэффициентов b_0^1, b_i^1, b_{ii}^1, $b_{i\nu}^1$, получим искомые уравнения, описывающие границу области $\mathbf{G}^{(1)}$.

На основе использования логических *R*-функций и полученных уравнений $\varphi_j^{(1)}$ записывается одно уравнение, которое с заданной методической погрешностью аналитически описывает допусковую область $\mathbf{G}^{(1)}$ на первом шаге поиска:

$$\begin{cases} G^{(1)} = G_{2(m+n)}^{(1)} = 0,5\left(G_{2(m+n)-1}^{(1)} + \varphi_{2(m+n)}^{(1)} - \left| G_{2(m+n)-1}^{(1)} - \varphi_{2(m+n)}^{(1)} \right| \right); \\ \ldots \quad G_j^{(1)} = 0,5\left(G_{j-1}^{(1)} + \varphi_j^{(1)} - \left| G_{j-1}^{(1)} - \varphi_j^{(1)} \right| \right); \quad \ldots \quad G_1^{(1)} = \varphi_1^{(1)} \end{cases}.$$

Аналогичным образом, определяется допусковая область $\mathbf{G}^{(2)} \in \mathbf{G}^{(1)}$ и процесс сужения исходной области $\mathbf{G}^{(0)}$ циклически повторяется до получения оптимального решения при $N = 1$. На основании отображения $\Phi_Z : \mathbf{G} \to \mathbf{F}$ в пространстве параметров $\mathbf{Z}$ областям $\mathbf{G}_k$ будут соответствовать области $\mathbf{F}_k$. Каждой подобласти $\mathbf{G}_k(\mathbf{F}_k)$ соответствует свой запас работоспособности ТС. Таким образом, задача оценки состояния ТС сводится к распознаванию в пространстве параметров $\mathbf{Z}$ принадлежности вектора текущего состояния системы той или иной подобласти $\mathbf{F}_k$. При этом размерность пространства R^k в результате применения разработанных алгоритмов, рассмотрение которых выходит за рамки доклада, может быть существенно меньше размерности пространства первичных параметров ТС.

Если после подстановки полученных в результате контроля значений в уравнение, аналитически описывающее область $\mathbf{F}$ окажется, что $F < 0$, следовательно, ТС находится в работоспособном состоянии и далее проверяется справедливость выполнения неравенств $F_k < 0,\ k = 1,2,\ldots,(S+1)$. Если $F_k \le 0$ и $F_{k+1} > 0$, следовательно, вектор текущего состояния ТС принадлежит подобласти $\mathbf{F}_k$ и запас работоспособности ТС равен λ_k. Если $F > 0$ – система неработоспособна. В этом случае осуществляется параметрическая коррекция настраиваемых параметров и ТС восстанавливает работоспособное состояние.

Заключение

Оценка состояния сложных технических систем на основе информации о границе области работоспособности, представленной в виде аналитического выражения на основе использования логических *R*-функций, отличается от известных подходов высокой достоверностью полученных результатов. Оценка состояния возможна как в пространстве первичных параметров ТС, так и в пространстве ее переменных состояния. Для сложных многопараметрических ТС оценка состояния предпочтительна в пространстве параметров **Z**, вследствие его малой размерности. Рассмотренные в докладе методы были апробированы на примерах оценки состояния сложных электротехнических систем.

Список литературы

[1] Саушев А.В. Методы управления состоянием электротехнических систем: СПб.: СПГУВК, 2004.

[2] Саушев А.В., Шошмин В.А. Методы параметрического управления состоянием технических систем // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIV международной конференции (19-22 июня 2012 г., Самара, Россия). – Самара: Самарский НЦ РАН, 2012. - С. 649-655.

[3] Саушев А.В. Запас работоспособности как целевая функция при синтезе технических систем // Математика и ее приложения: Сб. научн. тр. – СПб, 2011. – Вып. 3. – С. 190–198.

[4] Саушев А.В. Аналитический метод назначения допусков на параметры динамических систем// Информатика и системы управления. – 2012. – № 3 (33). – С. 120–131.

[5] Рвачев В.Л. Геометрические приложения алгебры логики. – Киев.: Техника, 1967. – 212 с.

ДЕКОМПОЗИЦИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ДИСКРЕТНЫМИ РАЗНОТЕМПОВЫМИ СИСТЕМАМИ

Н.В.Воропаева

Самарский государственный университет
443011, Самара, ул.Акад. Павлова, 1, Россия
voropaevan61@mail.ru
тел: +7 (846) 334-54-38

Ключевые слова: *дискретные динамические системы, инвариантные многообразия, декомпозиция, асимптотические методы*

Abstract

The paper is devoted to reduction of nonlinear discrete time system with slow and fast variables to «block-triangular» form where the slow subsystem is isolated. The algorithm of decomposition is based on geometric approach and properties of slow and fast invariant manifolds. The separating transformation is effectively constructed as asymptotic series.

Введение

При решении задач управления объектами из различных областей науки и техники возникают сложности, обусловленные высокой размерностью моделей и наличием нескольких временных масштабов. В связи с этим актуальной является задача декомпозиции моделей.

Исследованию дискретных систем с быстрыми и медленными переменными посвящено достаточно много публикаций, важнейшие результаты которых обсуждаются в обзорах [1, 2]. Большинство работ относится к линейному случаю. Для нелинейных систем основные результаты сводятся к построению асимптотических разложений решений начальных или краевых задач по степеням малого параметра.

В работах [3, 4] предложен конструктивный метод разделения движений в нелинейных сингулярно возмущенных дифференциальных системах, базирующийся на геометрическом подходе. В работах [5, 6] идеи этого метода используются для теоретического обоснования алгоритма декомпозиции дискретных систем с быстрыми и медленными переменными, возникающих в результате частого квантования систем нелинейных сингулярно возмущенных дифференциальных уравнений. Настоящая работа посвящена обоснованию метода декомпозиции для разнотемповых дискретных систем другого вида.

Предлагаемый подход сочетает в себе приемы асимптотических и качественных методов анализа. Сущность метода состоит в выделении класса медленных движений изучаемой системы и последующем разделении быстрых и медленных движений. Расщепляющее преобразование строится с любой степенью точности в виде асимптотического разложения по степеням малого параметра.

1 Инвариантные многообразия медленных и быстрых движений

Рассматривается нелинейная дискретная система вида

(1) $x(k+1) = A\,x(k) + \varepsilon\, f(x(k), y(k), \varepsilon)$,

(2) $y(k+1) = \varepsilon\, g(x(k), y(k), \varepsilon)$,

где k=0,1 ,2,…, $x(k)$, ε – малый положительный параметр, x – вектор медленных переменных размерности m, y – вектор быстрых переменных размерности n, матрица A невырожденная. Векторные функции $f(x(k), y(k), \varepsilon)$, $g(x(k), y(k), \varepsilon)$ предполагаются достаточно гладкими.

Следуя схеме предложенной в работе [6] можно доказать, что у системы (1),(2) существует инвариантное многообразие медленных движений вида

(3) $y(k)=h(x(k), \varepsilon)$.

Это инвариантное многообразие может быть построено с любой степенью точности в виде асимптотического разложения

$h(x(k), \varepsilon)=h^{(0)}(x(k))+ \varepsilon\ h^{(1)}(x(k)+ \varepsilon^2 h^{(2)}(x(k))+\ldots$

из уравнения

$\varepsilon\, g(x(k), h(x(k), \varepsilon), \varepsilon) = h(Ax(k)+ \varepsilon f(x(k), h(x(k), \varepsilon), \varepsilon), \varepsilon)$.

При этом коэффициенты асимптотического разложения однозначно определяются из линейных алгебраических уравнений. Для доказательства асимптотического характера разложения достаточно показать, что «остаток» разложения описывает инвариантное многообразие соответствующей вспомогательной системы.

Система, описывающая движение на инвариантном многообразии медленных движений, имеет вид

$v(k+1) =A\ v(k)+ \varepsilon\ F(v(k), \varepsilon)$,

где $F(v(k), \varepsilon) = f(v(k), h(v(k), \varepsilon), \varepsilon), \varepsilon)$.

В некоторой окрестности инвариантного многообразия медленных движений введем новые переменные $w(k) = x(k) - v(k)$, $z(k) =y(k) - h(x(k), \varepsilon)$ и рассмотрим вспомогательную расширенную систему

(4) $v(k+1) = Av(k) + \varepsilon\ F(v(k), \varepsilon)$,

(5) $w(k+1) =A\ w(k) + \varepsilon\ W(v(k) ,w(k), z(k), \varepsilon)$,

(6) $z(k+1) = \varepsilon\ Z(v(k), w(k), z(k), \varepsilon)$.

Здесь:

$W(v(k) ,w(k), z(k), \varepsilon) = f(v(k). z(k) + h(v(k) + w(k), \varepsilon), \varepsilon) - f(v(k),h(v(k), \varepsilon), \varepsilon)$,

$Z(v(k),w(k),z(k), \varepsilon) = g(v(k),z(k) + h(v(k)+w(k), \varepsilon), \varepsilon) - g(v(k),h(v(k) + w(k), \varepsilon), \varepsilon) -$

$- [h(A(v(k) + w(k)) + \varepsilon\ f(v(k)\ z(k) + h(v(k) + w(k), \varepsilon), \varepsilon), \varepsilon) -$

$- h(A(v(k) + w(k)) + \varepsilon\ f(v(k)\ h(v(k) + w(k), \varepsilon), \varepsilon), \varepsilon)]$.

Получены достаточные условия существования у системы *(4)-(6)* инвариантного многообразия быстрых движений вида

(7) $w(k) = \varepsilon\, H(v(k), z(k), \varepsilon)$.

Изучены асимптотические свойства этого инвариантного многообразия. Выделены классы систем, для которых инвариантное многообразие быстрых движений (7) может быть эффективно построено с любой степенью точности виде асимптотического разложения

$H(v(k), z(k), \varepsilon) = H^{(0)}(v(k), z(k)) + \varepsilon\ H^{(1)}(v(k), z(k)) + \varepsilon^2 H^{(2)}(v(k), z(k)) +\ldots$

из уравнения

$AH(v(k), z(k), \varepsilon) + W(v(k), \varepsilon\, H(v(k), z(k), \varepsilon), \varepsilon) =$

$HA(v(k)+ \varepsilon\, F(v(k), \varepsilon), \varepsilon\, Z(v(k), \varepsilon\, H(v(k), z(k), \varepsilon), z(k), \varepsilon), \varepsilon)$.

Получены оценки остаточного члена.

Для « квазилинейных» систем, правые части которых представимы в виде:

$$f(x(k),y(k),\varepsilon) = \sum_{i=1}^{r} \varepsilon^{i-1} f_i(x(k), y(k)) + O(\varepsilon^r),$$

$$g(x(k),y(k),\varepsilon) = \sum_{i=1}^{r} \varepsilon^{i-1} g_i(x(k), y(k)) + O(\varepsilon^r),$$

где $f_i(x(k), y(k))$, $g_i(x(k), y(k))$ формы i-го порядка относительно координат вектора $y(k)$, функции $H(i)(v(k), z(k))$ могут быть построены в виде асимптотического разложения

$$H^{(i)}(v(k), z(k)) = H^{(i,1)}(v(k), z(k)) + H^{(i,2)}(v(k), z(k)) + \ldots + H^{(i,i+1)}(v(k), z(k)).$$

Здесь $H^{(i,j)}(v(k), z(k))$ − формы j-го порядка относительно координат вектора $z(k)$. Частным случаем таких систем являются системы, линейные по быстрым переменным

2 Расщепляющее преобразование

Система, описывающая движение на инвариантном многообразии быстрых движений, имеет вид

(8) $v(k+1)=Av(k)+ \varepsilon F(v(k), \varepsilon)$,

(9) $z(k+1)= \varepsilon G(v(k), z(k), \varepsilon)$, $G(v(k), 0, \varepsilon) = 0$.

Таким образом, замена переменных

(10) $x(k) = v(k) + \varepsilon H(v(k), z(k), \varepsilon)$,

(11) $y(k) = z(k) + h(x(k), \varepsilon)$

приводит нелинейную систему (1), (2) с быстрыми и медленными переменными к «блочно-треугольному» виду (8), (9) где первое уравнение является независимым.

Замена переменных (10), (11) позволяет производить расщепление не только уравнений, но и начальных, а во многих случаях и краевых условий. Так, если для системы (1), (2) заданы начальные условия x_0, y_0, то из соотношений (6) получаем $z_0 = y_0 - h(x_0; \varepsilon)$. Начальное условие v_0 может быть найдено из уравнения $x_0 = Av_0 + \varepsilon H(v_0; z_0, \varepsilon)$ в виде асимптотического разложения по степеням ε.

Используя свойства решений быстрой подсистемы (9) и представление (10), (11) можно показать, что инвариантное многообразие медленных движений (3) обладает свойством притяжения. Справедлив также дискретный аналог принципа сведения, заключающийся в том, что решение $(v(k), h(v(k), \varepsilon))$, лежащее на инвариантном многообразии медленных движений, будет устойчивым (асимптотически устойчивым, неустойчивым) тогда и только тогда, когда аналогичным свойством обладает решение $v(k)$ медленной подсистемы (8). Тем самым медленная подсистема наследует основные элементы качественного поведения исходной системы в соответствующей области и может во многих случаях использоваться в качестве упрощенной модели. Заметим, что для линейных систем расщепляющее преобразование (10), (11) будет линейным, а результирующая система - «блочно-диагональной», т. е. исходная система распадается на две независимых подсистемы, что согласуется с известными результатами [1].

3 Декомпозиция матричного дискретного уравнения Риккати

В качестве приложения рассмотрим построение матричного коэффициента усиления в задаче синтеза оптимального управления с целью минимизации функционала

(12) $J=\sum_{k=0}^{N-1} (x^T(k)Qx(k)+ u^T(k)Ru(k)$

на траекториях дискретной линейной системы с двумя масштабами времени

(13) $x_1(k+1)=A_{11}\,x_1(k)+\varepsilon A_{12}\,x_2(k)+\varepsilon B_1\,u(k)$,

(14) $x_2(k+1)=\varepsilon\,A_{21}\,x_1(k)+\varepsilon A_{22}\,x_2(k)+\varepsilon B_2\,u(k)$, $\quad x_1(0)=x_{10}$, $x_2(0)=x_{20}$,

Оптимальное управление в рассматриваемой задаче имеет вид

(15) $u(k)=-[B^TP(k+1)B+R]^{-1}B^TP(k+1)Ax(k)$,

$$A=\begin{pmatrix} A_{11} & \varepsilon A_{12} \\ \varepsilon A_{21} & \varepsilon A_{22} \end{pmatrix},\ B=\begin{pmatrix} \varepsilon B_1 \\ \varepsilon B_2 \end{pmatrix}.$$

Матрица $P(k)$ является решением матричного дискретного уравнения Риккати

(16) $P(k)=A^TP(k+1)[I+SP(k+1)]^{-1}A+Q$, $\quad P(N)=0$,

$$Q=\begin{pmatrix} \varepsilon^2Q_1 & \varepsilon Q_2 \\ \varepsilon Q_2 & Q_3 \end{pmatrix},\quad S=BR^{-1}B^T=\varepsilon^2\begin{pmatrix} E_1 & E_2 \\ E_2^T & E_3 \end{pmatrix}.$$

Если искать матрицу $P(k)$ в виде

$$P(k)=\begin{pmatrix} P_1(k) & P_2(k) \\ P_2^T(k) & P_3(k)/\varepsilon \end{pmatrix}$$

то уравнение (16) перепишется в виде системы

(17) $P_1(k)=A^T{}_{11}\,P_1(k+1)A_{11}+\varepsilon(A^T{}_{21}P^T{}_2(k+1)\,A_{11}+A^T{}_{11}P_2(k+1)\,A_{21}+A^T{}_{21}\,P_3(k+1)\,A_{21})+O(\varepsilon^2)$,

(18) $P_2(k)=\varepsilon(Q_2+A^T{}_{11}P_1(k+1)\,A_{12}+A^T{}_{11}P_2(k+1)\,A_{22}+A^T{}_{21}P_3(k+1)\,A_{22})+\varepsilon^2(A^T{}_{21}P^T{}_2(k+1)\,A_{12}-$
$-A^T{}_{11}(P_1(k+1)S_2\,P_3(k+1)+P_2(k+1)S_3P_3(k+1))A_{22}+A^T{}_{21}\,P_3(k+1)\,S_3\,P_3(k+1)\,A_{22})+O(\varepsilon^2)$,

(19) $P_3(k)=\varepsilon Q_3+\varepsilon^2\,A^T{}_{22}P_3(k+1)\,A_{22}+\varepsilon^3(A^T{}_{12}P_1(k+1)\,A_{12}+A^T{}_{22}P_2{}^T(k+1)\,A_{12}+A^T{}_{12}P_2(k+1)\,A_{22}-$
$-A^T{}_{22}P_3\,(k+1)S_3\,P_3\,(k+1)\,A_{22})+O(\varepsilon^4)$,

(20) $P_1(N)=0$, $\quad P_2(N)=0$, $\quad P_3(N)=0$.

Применим к этой системе изложенный алгоритм декомпозиции. Замена переменных вида

$P_1(k)=v(k)-\varepsilon\,(A^T{}_{11})^{-1}(A^T{}_{21}z_2{}^T(k)A_{11}+A^T{}_{11}z_2{}^T(k)A_{21}+A^T{}_{21}\,z_3\,(k)A_{21})\,(A_{11})^{-1}+O(\varepsilon^2)$,

$P_2(k)=z_2\,(k)+\varepsilon(Q_2+P_1(k)\,(A_{11})^{-1}\,A_{12})+O(\varepsilon^2)$,

$P_3(k)=z_3\,(k)+\varepsilon Q_3+O(\varepsilon^2)$

приводит систему (18)-(20) к «блочно-треугольному» виду:

$v(k)=A^T{}_{11}\,v(k+1)\,A_{11}+\varepsilon^2(Q_1+A^T{}_{21}(Q_2+v(k+1)\,(A_{11})^{-1}\,A_{12})^T\,A_{11}+$
$+A^T{}_{11}(Q_2+v(k+1)\,(A_{11})^{-1}\,A_{12})A_{21}+A^T{}_{21}\,Q_3\,A_{21}-A^T{}_{11}v(k+1)S_1\,v(k+1)\,A_{11}+$
$+A^T{}_{11}v(k+1)S_1{}^T\,v(k+1)\,A_{11})+O(\varepsilon^3)$,

$z_2\,(k)=\varepsilon(A^T{}_{11}\,z_2(k+1)A_{22}+A^T{}_{21}\,z_3(k+1)A_{22}-\varepsilon A^T{}_{11}\,z_2(k+1)A_{21}(A_{11})^{-1}A_{12}-$
$-\varepsilon A^T{}_{21}\,z_3(k+1)A_{21}(A_{11})^{-1}\,A_{12})+O(\varepsilon^3)$,

$z_2\,(k)=\varepsilon^2\,A^T{}_{22}z_3(k+1)\,A_{22}+\varepsilon^3(A^T{}_{22}\,(z_2(k+1))^T\,A_{12}+A^T{}_{12}z_2(k+1)\,A_{22}-$
$-A^T{}_{22}z_3(k+1)S_3\,z_3\,(k+1)\,A_{22})+O(\varepsilon^4)$,

с независимой медленной подсистемой.

Построенная замена переменных позволяет расщепить также и условие на правом конце для системы (18)–(20).

Заключение

Используя свойства инвариантных многообразий медленных и быстрых движений удается преобразовать нелинейную дискретную разнотемповую систему к «блочно-треугольному» виду с независимой медленной подсистемой, которая во многих случаях может играть роль упрощенной модели. Предлагаемый метод обеспечивает понижение размерности изучаемых моделей и избавляет от вычислительной жесткости. Алгоритмы построения расщепляющего преобразования реализованы в виде программ для системы MAPLE и использованы для декомпозиции задач устойчивости и оптимального управления дискретными системами с быстрыми и медленными переменными.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 13-01-97002-р_поволжье_а).

Список литературы

[1] Naidu D.S. Singular Perturbations and Time Scales in Control Theory and Applications: an Overview // Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems, Series B: Applications and Algorithms.-2002.- P. 233-278.

[2] Дмитриев М.Г., Курина Г.А. Сингулярные возмущения в задачах управления// АиТ.- 2006. -№1.- С. 3-51.

[3] Sobolev V.A. Integral manifolds and decomposition of singularly perturbed systems// Syst. & Control Lett. -1984, № 5.- P. 169-279.

[4] Воропаева Н.В, Соболев В.А Геометрическая декомпозиция сингулярно возмущенных систем.- М.:ФИЗМАТЛИТ, 2009.

[5] Воропаева Н.В., Соболев В.А. Декомпозиция линейно-квадратичной задачи оптимального управления с быстрыми и медленными переменными// АиТ. -2006.- № 8. -С. 3-11.

[6] Воропаева Н.В. Декомпозиция задач оптимального управления и оценивания для дискретных систем с быстрыми и медленными переменными// АиТ. - 2008.-№,6.- С. 15-25.

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н.В. Коплярова, Н.А. Сергеева

Сибирский Федеральный Университет
660074 Красноярск, ул. Киренского, 26б, Россия
koplyarovanv@mail.ru, тел: +7 (913) 170-56-62

Ключевые слова: *нелинейность, динамические системы, непараметрика, модели Винера и Гаммерштейна, квадратор, звено насыщения*

Abstract

The problem of nonlinear dynamical systems of Wiener-Hammerstein type identification is considered. The linear dynamical part of the system is in nonparametric uncertainty conditions. The common type of nonlinearity is assumed to be unknown or is known with set of parameters. Presented algorithm allows to create the adequate in the sense of mean-square criterion models. The proposed method of dynamic objects modeling based on the nonparametric estimation of linear and nonlinear parts of the system.

Введение

Проблема идентификации нелинейных динамических систем относится к разряду важнейших задач теории управления. В связи с большим разнообразием нелинейных динамических объектов и методов их идентификации, не существует универсальной теории идентификации. Большинство из современных методов ориентировано на создание моделей какого-то определенного класса нелинейных процессов. При этом задача идентификации рассматривается, чаще всего, «в узком смысле», что соответствует случаю, когда структура объекта известна с точностью до вектора параметров.

Настоящая работа посвящена идентификации динамических систем «в широком смысле», то есть в условиях, когда параметризация невозможна или удается частично параметризовать модель исследуемого процесса на основании имеющейся априорной информации. Рассматриваются нелинейные системы, представимые в виде последовательно соединения линейного динамического и нелинейного статического блоков (модель Винера), либо соединения указанных блоков в обратном порядке (модель Гаммерштейна). При этом структура линейного динамического блока объекта находится в условиях непараметрической неопределенности, а структура нелинейного элемента считается известной с точностью до параметров.

1 Постановка задачи идентификации

Пусть исследуемый объект может быть представлен в виде некоторой комбинации линейных динамических и безынерционных нелинейных блоков. Требуется по наблюдаемым входным – выходным переменным процесса построить математическую модель стохастического объекта, адекватно описывающую его поведение при произвольном входном воздействии и наличии аддитивной помехи на выходные данные.

Рассмотрим модели нелинейного динамического объекта, которые представляют собой последовательное соединение двух блоков (общие схемы таких систем приведены ниже на рисунок 2 и рисунок 5). Преимуществом использования таких моделей является их относительная простота притом, что в них нелинейные и динамические свойства исследуемого объекта разделены и сосредоточены во входном и выходном блоках. Линейный динамический

блок моделей в этом случае должен воспроизводить динамические свойства исследуемого объекта, нелинейный блок - имитировать его нелинейные свойства [1]. Основная сложность в построении моделей таких объектов заключается в том, что внутренние сигналы $w(t)$ являются недоступными для измерения. В общем виде задача идентификации нелинейной динамической системы поясняется на рисунке 1:

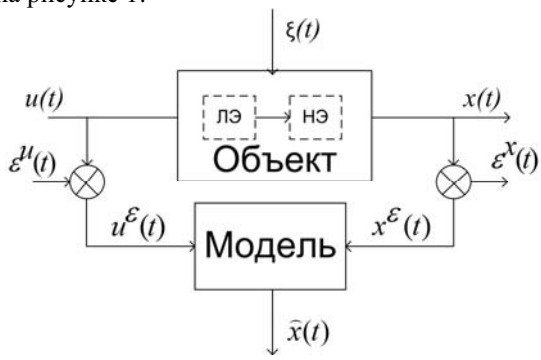


Рисунок 1 – Общая схема задачи идентификации

где $u(t)$ - входная переменная объекта, $x(t)$ - выходная переменная, u_t^{ξ}, x_t^{ξ} - соответствующие наблюдения переменных процесса, которые далее будем для простоты обозначать $\{u_i, x_i,\ t=1,s\}$, $\xi(t)$ - ненаблюдаемое случайное воздействие, $\varepsilon^u(t), \varepsilon^x(t)$ - случайные факторы, действующие в каналах измерения переменных в дискретные моменты времени t, такие что $M\{\varepsilon\}=0, \quad D\{\varepsilon\}<\infty$, $\hat{x}(t)$ - выход модели объекта. Имеется выборка измерений реакции объекта на тестовое входное воздействие $u(t)$: $\{u(t_i), x_i\}$, $i=1,s$. Структура и параметры линейной динамической части системы неизвестны. Рассмотрим некоторый вид нелинейности в объекте – известный с точностью до набора параметров. Нелинейный элемент представляет собой одно из звеньев: квадратор, звено насыщения. На основании имеющейся информации необходимо построить модель данной системы, адекватно описывающую ее поведение.

2 Непараметрическая модель линейной системы

Задача идентификации нелинейной системы может быть разделена на две части. Сначала рассмотрим задачу идентификации линейного элемента. Метод построения непараметрической модели линейной динамической системы (ЛДС) основан на том, что реакция такой системы $w(t)$ на входное воздействие $u(t)$ описывается интегралом свертки [2]:

$$(1) \quad x(t) = k(0)u(t) + \int_0^t k'(t-\tau)u(\tau)d\tau = k(0)u(t) + \int_0^t h(t-\tau)u(\tau)d\tau,$$

где $h(t)$-весовая и $k(t)$ − переходная функции исследуемой системы.

Вычисление значения выхода объекта $x(t)$ при этом возможно, если известна его весовая функция $h(t)$. На практике «снятие» весовой функции с объекта представляется невозможным. Поэтому основная идея идентификации ЛДС в условиях непараметрической неопределенности состоит в непараметрическом оценивании весовой функции.

Запишем оценку весовой функцию системы в виде стохастической аппроксимации регрессии непараметрического типа следующим образом[2]:

$$(2) \quad \hat{h}(t) = \frac{1}{sc_s} \cdot \sum_{i=1}^{s} k_i H'\left(\frac{t-t_i}{c_s}\right),$$

где k_i – значения переходной характеристики ЛДС. При этом колоколообразная функция $H(\cdot)$ и параметр размытости C_s должны удовлетворять условиям сходимости[2].

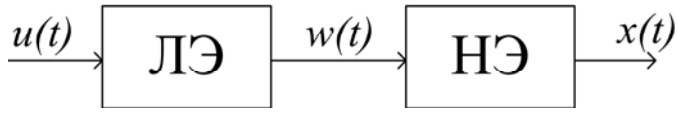
Подставив оценку переходной функции в интеграл Дюамеля и заменив интеграл его дискретным аналогом (суммой), получим непараметрическую расчетную модель линейного динамического элемента системы:

$$(3)\quad \hat{x}(t) = k(0)u(t) + \frac{1}{s \cdot c_s} \cdot \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta\tau} \hat{h}_i \cdot H\left(\frac{t - \tau_j - t_i}{c_s}\right) \cdot u(\tau_j)\Delta\tau.$$

Далее рассмотрим алгоритм идентификации нелинейной системы.

3 Непараметрическая модель Винера

Пусть исследуемая система может быть представлена в виде модели Винера, представленной ниже на рисунке[3].



ЛЭ – линейная динамическая часть системы, НЭ - нелинейный элемент системы, u(t) – входное воздействие, w(t) – выход промежуточного звена объекта (не измеряемый), x(t) – выход объекта

Рисунок 2 – Модель Винера

Предположим, что структура нелинейного элемента в модели Винера задана с точностью до набора параметров, т.е. выход исследуемого объекта вычисляется как некоторая функция от интеграла Дюамеля:

$$(4)\quad x(t) = f\{w(t), \alpha\}$$

где $x(t)$ – выходной сигнал системы; $w(t)$ – выход линейной части системы (не измеряемый); $u(t)$ – входной сигнал системы; $f\{w(t),\alpha\}$ – нелинейный оператор.

Математическая модель нелинейного объекта может быть представлена в виде системы уравнений (3), (4), в которых вместо весовой функции и параметров α используются их статистические оценки. Они могут быть получены, если путем генерации сформировать выборку $\{u_i, \hat{\omega}_i\}, i = \overline{1,s}$. В случае, когда для некоторых классов нелинейных элементов выражение (10) может быть разрешено относительно $w(t)$, имеем[3]:

$$(5)\quad w(t) = f^{-1}(x(t), \alpha),$$

В данном случае непараметрическая модель нелинейного объекта примет вид:

$$(6)\quad \hat{x}(t) = f(\hat{w}(t), \alpha) \quad \text{где } \hat{w}(t) = \int_0^t \hat{h}(t-\tau)u(\tau)d\tau,$$

Таким образом, в общем виде получен алгоритм, позволяющий строить непараметрические модели нелинейных динамических системы, представленных в виде последовательного соединения линейного и нелинейного звеньев. Данные методы не предусматривают наличия полной априорной информации о структуре объекта.

Идентификация нелинейной системы с квадратором. Пусть имеем систему, представленную в виде модели Винера (рисунок 2). Причем нелинейная часть системы представляет

собой квадратор, описываемый функцией вида: $f(p) = ap^2$ a – const. Выход объекта вычисляется следующим образом: $x(t) = f(w,a) = aw^2$. При входном воздействие $u(t) = 1$ выход нелинейной системы равен $x(t) = aw(t)^2$. То есть переходную характеристику линейного элемента $w(t) = k(t)$ можно выразить через выход исследуемого процесса следующим образом:

(7) $k(t) = \sqrt{x(t)/a}$.

При произвольном входном воздействии и нулевых начальных условиях выход линейной части системы описывается выражением (3). С учетом рассчитанного значения переходной функции (7) выход линейного элемента равен:

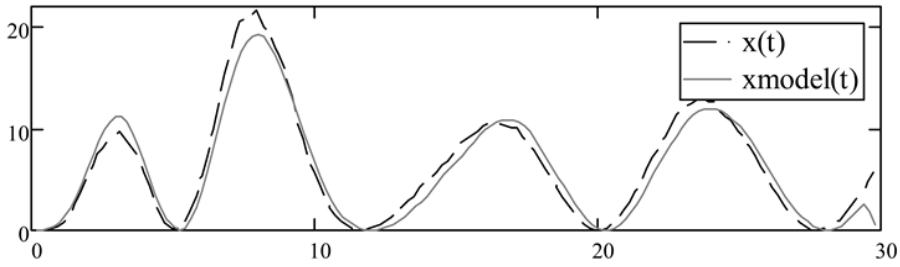
(8) $$w(t) = \frac{1}{sc_s}\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta t}\sqrt{\frac{x_i}{a}}\cdot H'\left(\frac{t-\tau_j-t_i}{c_s}\right)u(\tau_j)\Delta\tau.$$

Модель нелинейного динамического объекта, представленного в виде модели Винера, имеет вид:

(9) $$\hat{x}(t) = \left[\frac{1}{sc_s}\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta t}\sqrt{x1_i}\cdot H'\left(\frac{t-\tau_j-t_i}{c_s}\right)u(\tau_j)\Delta\tau\right]^2,$$

где $x1_i$ – реакция нелинейной системы на единичное входное воздействие

Пример. Рассмотрим нелинейную динамическую систему, состоящую из квадратора вида (параметр a=4.37) и разностного аналога дифференциального уравнения (имитирующего объект), $2\cdot y''(t) + 0{,}3\cdot y'(t) + 1.5\cdot y(t) = u(t)$ входное воздействие: $u(t)$=2**cos**(0.4t).



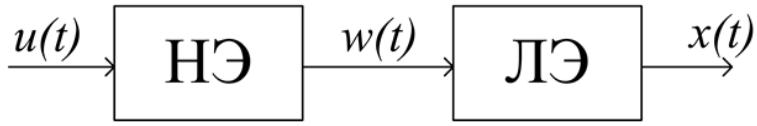
xmodel(t) - модель нелинейной системы, x - выход системы, объем выборки s=150, шаг дискретизации h=0.2, помеха 5%, относительная ошибка моделирования 2.5%

Рисунок 3 – Результаты численных экспериментов

Делая анализ работы модели нелинейного динамического объекта с видом нелинейности типа звено насыщения и квадратор, можно сделать следующие выводы: непараметрическая модель адекватно описывает систему при различных значениях параметров нелинейной части объекта, в условиях зашумленности каналов связи, при различном объеме выборки и различных входных воздействиях.

4 Непараметрическая модель Гаммерштейна

Рассмотрим систему, поведение которой может быть описано с помощью модели Гаммерштейна (рисунок 4).



ЛЭ – линейная динамическая часть, НЭ - нелинейный элемент системы, u(t) – входное воздействие, w(t) – выход промежуточного звена объекта, x(t) – выход объекта

Рисунок 4 - Модель Гаммерштейна

Выход нелинейного элемента $\omega(t)$ в данном случае измерению недоступен. Предполагается, что параметризованная структура ЛЭ не известна, а нелинейная характеристика НЭ известна с точностью до набора параметров.

Согласно рисунку 4 связь между входом $u(t)$ и выходом $x(t)$ объекта при нулевых начальных условиях может быть описана уравнениями вида[4]

(10) $\hat{x}(t) = \int_0^t \hat{h}(t-\tau)\hat{w}(\tau)d\tau,$ где $\hat{w}(t) = f(u(t),\alpha)$

Или, исключая переменную $w(t)$,

(11) $x(t) = \int_0^t h(t-\tau) f(\alpha, u(\tau))d\tau$,

где $h(t)$ – весовая функция динамического элемента; $f(\alpha,u)$ - нелинейная функция, заданная с точностью до вектора неизвестных параметров $\overline{\alpha}$.

Пусть $x1(t)$ - реакция нелинейного объекта на входной сигнал в виде функции Хевисайда $u(t)=1(t)$, $x(t)$ – реакция объекта на некоторый тестовый сигнал, форма которого отличается от ступенчатого. Измерения сигналов $x1(t)$ и $x(t)$ в дискретные моменты времени образуют выборки наблюдений $\{1, x1_i\}$ и $\{u_i, x_i\}_i, i = \overline{(1,s)}$ соответственно.

Ступенчатый сигнал *u(t)=1*, после прохождения нелинейного элемента, сохраняет ступенчатую форму, но меняет амплитуду, т.е. $\omega 1(t) = f(\alpha, 1(t)) = c1$, где c1 -некоторая константа. Выход нелинейной системы $x1(t) = \int_0^t h1(t-\tau)1(\tau)d\tau$ тогда можно рассматривать как переходную функцию некоторой линейной системы с весовой функцией $h1(t)$. Оценка весовой функции $\hat{h1}(t)$ может быть получена на основе выборки $(x1_i, t_i, i = \overline{1,s})$.

С учетом оценки $\hat{h1}(t)$, модель нелинейной системы (11) можно записать в виде

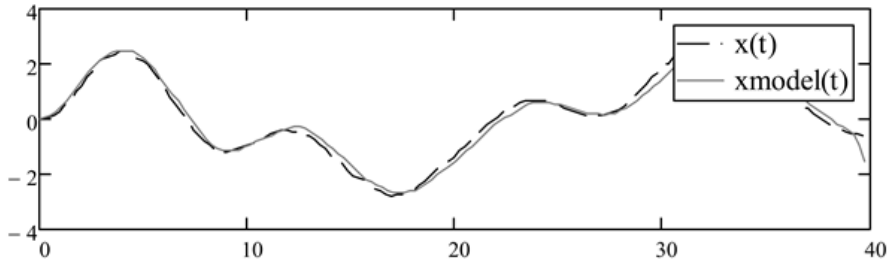
(12) $\hat{x}(t) = \int_0^t \hat{h1}(t-\tau)w(\tau)d\tau = \int_0^t \hat{h1}(t-\tau)f(u(\tau),\overline{a})d\tau,$

Оценки параметров $\overline{\alpha}$ находятся на основе выборки измерений $\{u_i, x_i\}, i = \overline{1,s}$ реакции объекта *x(t)* на входной сигнал *u(t)* произвольной формы как решения экстремальной задачи. Непараметрическая модель системы Гаммерштейна будет описываться следующим образом:

(13) $\hat{x}(t) = \frac{1}{sc_s}\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta t} k1_i \cdot H'\left(\frac{t-\tau_j-t_i}{c_s}\right)\hat{f}(u(\tau_j))\Delta\tau,$

где $k1$- оценка переходной характеристики линейного элемента, $\hat{f}(t)$ - оценка нелинейного элемента системы.

Пример. Модель Гаммерштейна. Рассмотрим нелинейную динамическую систему, состоящую из зоны нечувствительности (параметр $a1=1$) и разностного аналога дифференциального уравнения (имитирующего объект), $2 \cdot y''(t) + 0{,}3 \cdot y'(t) + 1 \cdot y(t) = u(t)$.



x2(t) - модель нелинейной системы, yy_i - выход системы, объем выборки s=150,
шаг дискретизации h=0.2, помеха 5%, ошибка моделирования 1.5% ,
входное воздействие: *u(t)=3cos(0.2t)*

Рисунок 5 – Результаты численных экспериментов

Полученная непараметрическая модель адекватно описывает исследуемую систему при различных видах нелинейной части объекта, в условиях зашумленности каналов связи, при различном объеме выборки и входных воздействиях.

Заключение

Приведены непараметрические модели и результаты вычислительных экспериментов, состоящие в построении непараметрических моделей динамических процессов типа Винера и Гаммерштейна, в случае, когда тип нелинейного элемента представлял собой квадратор и зону нечувствительности. Полученная непараметрическая модель адекватно описывает исследуемые системы при различных видах нелинейной части объектов, в условиях зашумленности каналов связи, при различном объеме выборки и входных воздействиях.

Список литературы

[1] Попков Ю.С., Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем, - М.: Энергия, 1976г., 440 с.

[2] Медведев А.В. Непараметрические системы адаптации. – Новосибирск: Наука, 1983– 173с.

[3] Медведев А.В. Непараметрические алгоритмы идентификации нелинейных динамических систем. / сб. Стохастические системы управления. Изд-во: Наука. Новосибирск, 1979. – с 15-22.

[4] Чайка С.Н. К идентификации динамических систем при частично параметризованной структуре модели / Динамика систем. Горький: Изд-во Горьковского гос. ун-та, 1989.

[5] Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. Изд. «Наука», 1968г. – 400с.

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЦЕНТРА ИНТЕГРИРОВАННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ КЛИЕНТОВ

А.Ф. Галямов , С.В. Тархов

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К.Маркса, 12, Россия
galyamov.airat@gmail.com, tarkhov@inbox.ru
тел: +7 (962) 534-42-45

Ключевые слова: *центр интегрированного обслуживания клиентов; CRM-система; контакт-центр; стратегия управления взаимоотношениями с клиентами*

Abstract
This paper describes the structure of integrated customer service centre (ICSC), its control model and formal description of the problem of structural and parametric optimization of the ICSC.

Введение

В современной мировой экономической системе повсеместно прослеживается тенденция к созданию всё более сложных высокотехнологичных продуктов. При этом во многих сегментах рынка сложилась ситуация, при которой множество производителей и поставщиков предлагают множество схожих продуктов (товаров и услуг) по приблизительно равным ценам, т.е. такие сегменты являются высококонкурентными. В процессе стабилизации и созревания рынков цены также стабилизируются и ценовая конкуренция постепенно отходит на второй план. В такой ситуации акценты в конкуренции всё больше смещаются из производственной области в клиентскую, когда ресурс снижения цен уже исчерпан, а качество продуктов невозможно повысить без их существенного удорожания. Клиент-ориентированность практически любой деятельности (не только коммерческой, но и государственной) постепенно становиться стандартом де-факто и одним из главных ориентиров, как в странах Евро-Американского конгломерата, так и в России и странах СНГ.

Реализация и воплощение в жизнь такой клиент-ориентированной стратегии ведения деятельности немыслимо без систем автоматизации и управления этой деятельностью – корпоративных информационных систем (КИС). Одним из таких инструментов является CRM (Customer Relationship Managment) – система управления взаимоотношениями с клиентами, входящая в состав комплекса ERP (Enterprise Resource Planning), системы планирования ресурсов предприятия. Целевой аудиторией для применения подобных систем являются организации, фирмы, учреждения, предприятия (далее по тексту - организации), осуществляющее продажу товаров или оказание услуг (причём, как в коммерческом, так и в государственном секторе). Автоматизированные средства CRM-системы способны помочь руководству и сотрудникам организаций выстраивать и поддерживать деловую стратегию привлечения клиентов и управления взаимоотношениями с ними, нацеленную на оптимизацию их ценности в долгосрочной перспективе.

Ядром CRM-системы является центр интегрированного обслуживания клиентов (ЦИОК), который позволяет осуществлять эффективный приём и обслуживание запросов клиентов, минимизировать долю потерянных обращений. ЦИОК включает программно-аппаратный комплекс для приёма обращений клиентов по различным каналам связи, также включает сотрудников-операторов, обслуживающих запросы. Таким образом, ЦИОК является сложной

социально-экономической системой, на эффективность работы которой оказывает влияние множество факторов.

Несмотря на многочисленные преимущества, которые приносят организациям системы ERP, CRM и ЦИОК, их внедрение и эксплуатация сопряжены с немалыми трудностями. По своей сути, ERP и CRM-системы, а также ЦИОК являются просто инструментом, которым ещё нужно овладеть, чтобы использовать правильно и эффективно. При неправильной эксплуатации затраты на эти системы превзойдут эффект от их использования, что является одним из основных рисков, останавливающих внедрение и использование ERP, CRM и других систем. Это обстоятельство породило существование компаний, занимающихся исключительно внедрением и адаптацией систем автоматизации и управления деятельностью организации (ERP, CRM и др.) под нужды конкретных заказчиков. Такие компании принято называть системными интеграторами (Value Added Resseler). При этом суммарные затраты на закупку программного и аппаратного обеспечения, на оплату работы компании-системного интегратора, на обучение пользователей и менеджеров в целом могут составлять огромные суммы, ощутимые порой даже для крупных организаций. Высокая сложность и стоимость внедрения и эксплуатации корпоративных информационных систем, таких как ERP или CRM, зачастую является непреодолимым порогом для представителей малого и даже среднего бизнеса.

В данной статье описана модель управления и подходы к структурно-параметрической оптимизации ЦИОК, проведение которой позволит существенно снизить затраты и риски в процессе внедрения и эксплуатации ЦИОК.

1 Структура и состав ЦИОК

Как было сказано во введении, ЦИОК включает в себя две взаимосвязанные подсистемы: техническую и кадровую. Техническая подсистема представляет собой программно-аппаратный комплекс для приёма и обработки обращений клиентов, поступающие по различным каналам связи (стационарная, мобильная и IP-телефония, SMS, формы на веб-сайте, веб-чат и IM-сервисы, электронная почта и т.п.). В состав этой подсистемы входят телефонные станции, линии связи, телефонные аппараты операторов, корпоративная сеть передачи данных (КСПД), сервер компьютерной телефонии, веб-сервер и другие сервера различных служб, а также клиентское и серверное программное обеспечение для работы системы. Надо сказать, что ЦИОК тесно интегрирован в ИТ-инфраструктуру организации и бывает сложно провести чёткую границу между ними.

Кадровая подсистема включает множество сотрудников различного уровня и специализации. По уровню ответственности сотрудников ЦИОК можно разделить на операторов, супервизоров и менеджеров. Основной задачей операторов является приём и обслуживание обращений клиентов. Супервизоры осуществляют мониторинг и контроль работы групп операторов, но не занимаются приёмом и увольнением сотрудников. Менеджеры являются самыми малочисленными сотрудниками ЦИОК, в их задачи входит принятие решений в процессе управления центром. В зависимости от численности операторов и размеров ЦИОК, может существовать несколько уровней иерархии супервизоров и менеджеров. Разделение между супервизорами и менеджерами часто носит условный характер. Множество операторов может быть поделено на группы на основе различных критериев, таких как специализация (проект), уровень компетентности и др.

На рисунке 1 приведена структурно-техническая схема ЦИОК, на которой показаны описанные выше компоненты системы. Программное обеспечение (ПО) ЦИОА имеет распределённую архитектуру, что делает её более гибкой и масштабируемой, но и более сложной. Распределённость системы позволяет обслуживать обращения клиентов как штатным сотрудникам, работающим непосредственно в офисе организации, так и удалённым сотрудникам, подключающимся к ЦИОК с помощью сети Интернет. Нужно отметить, что наличие удалённых

пользователей имеет свои недостатки — усложняется контроль над их работой и появляются дополнительные угрозы безопасности системы.

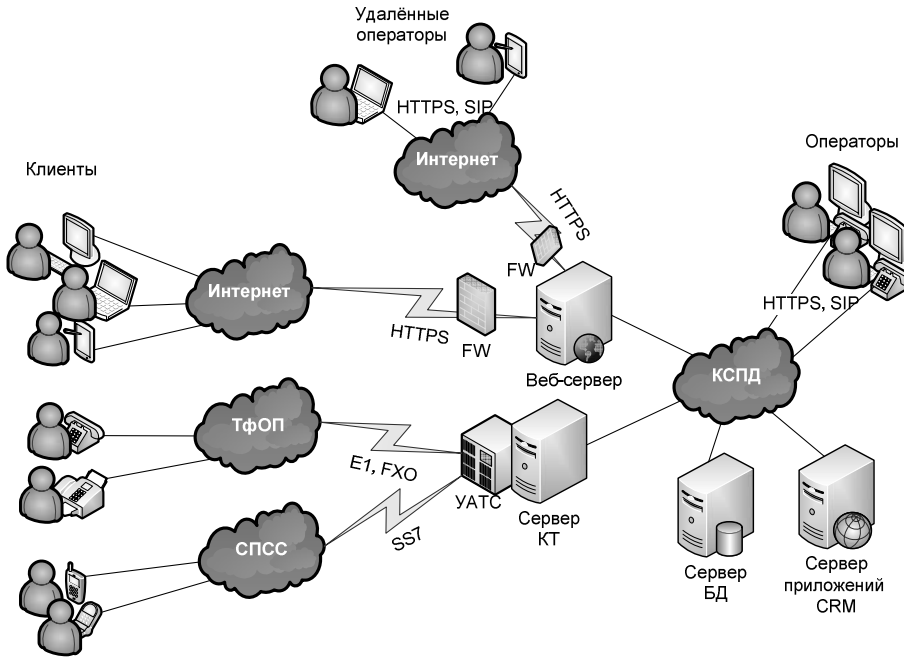


Рисунок 1 – Структурно-техническая схема ЦИОК

В последнее время наблюдается тенденция к использованию архитектуры «тонкий клиент», что предполагает использование веб-интерфейса в качестве АРМ сотрудников. Такой подход имеет ряд существенных преимуществ: отсутствие необходимости установки дополнительного ПО на компьютеры пользователей-операторов (достаточно наличие любого стандартного веб-обозревателя), более простое и прозрачное обновление ПО без замены АРМ операторов. Недостатком архитектуры «тонкий клиент» является большая сложность разработки пользовательского интерфейса. Но благодаря развитию клиентских веб-технологий, таких как jQuery, BackboneJS, Google Web Toolkit и др., веб-приложения обретают всё более развитий интерфейс, сравнимый, а иногда и превосходящий возможности традиционных настольных приложений.

2 Модель управления ЦИОК

Для решения задачи структурно-параметрической оптимизации ЦИОК требуется формализовать его описание и построить общую схему управления этой системой [1]. Один из вариантов этой схемы показан на рисунке 2. Объектом управления в данном случае является ЦИОК как центральная часть, ядро CRM-системы. Субъектом управления является руководство организации – именно оно формирует управляющее воздействие – способно менять управляемые входные условия-параметры C_j. Управление протекает в некой среде – объемлющей системе, которая также оказывает воздействие как на объект, так и на субъект управления. Внешняя среда представляет собой множество других организаций (конкурентов, партнёров и т.д.), государственные институты регулирования, описывает социально-экономическую, демографическую ситуацию и т.п. Воздействие внешней среды на объект-

ЦИОК описывается вектором неуправляемых входных параметров N_i, а её воздействие на субъект-руководство в данной работе не рассматривается и является предметом отдельного исследования.

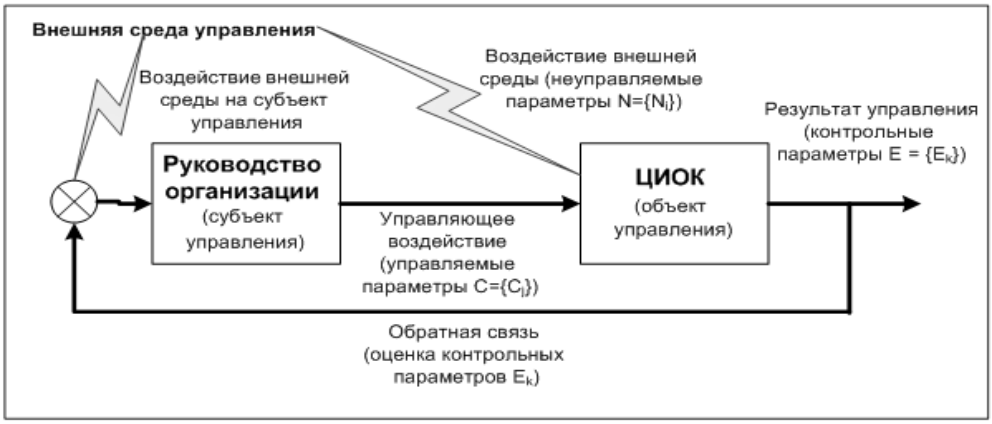


Рисунок 2 – Общая схема управления ЦИОК

Результат управления описывается вектором контрольных параметров E_k. Формальное описание этих векторов параметров приводится в следующем разделе. Для обеспечения качественного и устойчивого управления контрольные параметры E_k вместе с вместе с информацией из внешней среды оцениваются и анализируются субъектом управления – руководством организации.

4 Математическая модель задачи оптимизации ЦИОК

Процесс взаимодействия организации с клиентами подразделяется на несколько этапов:

1) отбор (сегментация) клиентов,
2) привлечение клиентов,
3) «выращивание» (осуществление первичных продаж),
4) удержание клиентов (осуществление повторных продаж),
5) прекращение сотрудничества с клиентами.

Таким образом, можно говорить о некотором жизненном цикле (ЖЦ) процесса взаимоотношения организации с клиентом. На каждом этапе следует выбрать набор показателей эффективности и отслеживать течение процесса [2]. Следует отметить, что не всегда удаётся найти количественные оценки характеристик процесса взаимодействия. Часто для подобных оценок используются нечёткие лингвистические переменные, а их значения выставляются с использованием методов экспертного анализа (например, метода парных сравнений, анализа иерархий и т.п.).

Формализация описания структуры и параметров ЦИОК была произведена с использованием математического аппарата теории множеств. Если представить процесс взаимоотношения организации с клиентами с использованием ЦИОК в виде модели типа «чёрный ящик» (как в описанной выше схеме управления), всё множество параметров модели может быть поделено на группы:

- неуправляемые входные параметры $N = \{ N_i \}$, $i=[1,n]$. Например, интенсивность потока заявок клиентов, различные характеристики этих клиентов и т.д.
- управляемые входные параметры $C = \{ C_j \}$, $j=[1,m]$. Например, кол-во операторов, их групп, «веса» операторов, число линий связи и т.д.

- контрольные параметры $E = \{ E_k \}$, $k=[1,p]$ – показатели эффективности процесса обслуживания клиентов организации. Например, доля необслуженных заявок, процент потерянных клиентов, средняя стоимость обслуживания и прибыль от клиента, среднее время ожидания обслуживания заявки и т.д.

Как было упомянуто выше, на различных этапах ЖЦ взаимоотношений с клиентом набор параметров может отличаться (причём как показателей эффективности, таки и входных параметров).

Структурно-параметрическая оптимизация заключается в изменении управляемых параметров ЦИОК, а также в изменении его структуры (состава операторских групп, схем маршрутизации и обработки заявок и т.п.).

Для постановки и формального описания задачи оптимизации процесса обслуживания клиентов типовой организации с использованием контакт-центра необходимо описать все ограничения, связанные с управляемыми и неуправляемыми входными параметрами модели, а также составить целевую функцию, включающую все выходные показатели эффективности. Математическая модель этой задачи может быть описана в виде системы уравнений и неравенств:

$$(1) \quad \begin{cases} F(C_1, C_2, ..., C_n) > 0 \\ G(N_1, N_2, ..., N_m) > 0 \\ Z(E_1, E_2, ..., E_p) \to opt \end{cases},$$

где $C_1,\ldots,C_n$ – управляемые входные параметры модели, $N_1,\ldots,N_m$ – неуправляемые входные параметры, $E_1,\ldots,E_p$ – показатели эффективности. Функция $F(C_j)$ – ограничения, связанные с управляемыми параметрами, $G(N_i)$ – ограничения, связанные с неуправляемыми параметрами, $Z(E_k)$ – целевая функция (ЦФ), связанная с показателями эффективности модели. ЦФ может быть получена, например, с помощью линейной свёртки показателей E_k с весовыми коэффициентами a_k для каждого показателя эффективности:

$$(2) \quad \begin{aligned} & Z(x) = \sum_{k=1}^{p} \alpha_k E_k(x) \to \underset{x \in D}{opt} \\ & \alpha_k > 0, \sum_{k=1}^{p} \alpha_k = 1 \end{aligned},$$

где $Z(x)$ – итоговая целевая функция, a_k – нормирующие весовые коэффициенты.

Заключение

Описанные модели управления и оптимизации ЦИОК позволят руководителям организаций и подразделений принимать более обоснованные и правильные управленческие решения для организации эффективного процесса взаимодействия с клиентами, в т.ч. с использованием таких средств, как ЦИОК и CRM-системы. Кроме того, результаты, полученные в результате расчётов и моделирования ЦИОК, позволят руководителям снизить риски при внедрении и эксплуатации ЦИОК и CRM-систем в процессе выстраивания и воплощения в жизнь клиент-ориентированной стратегии.

Список литературы

[1] Галямов А.Ф. Моделирование управления центром интегрированного обслуживания клиентов. // Восьмая Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых учёных: материалы конференции. Уфа: УГАТУ, 2013.

[2] Оптимизация процесса обслуживания клиентов с использованием контакт-центра / А.Ф.Галямов, С.В. Тархов // Компьютерные науки и информационные технологии : труды XIV международной конф. Гармиш-Партенкирхен, Бавария, Германия, 2012. С. 124–126. (Статья на англ. яз.).

КОГНИТИВНАЯ МОДЕЛЬ ТВОРЧЕСКОЙ ЛИЧНОСТИ

Б.Г. Ильясов, И.Б. Герасимова, Л.Н. Мухамедрахимова

Уфимский государственный авиационный технический университет

450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия

Ilyasov@tc.ugatu.ac.ru

тел: +7 (374) 273-78-35, +7 (347) 273-82-80

Ключевые слова: *когнитивная модель, структура творческой личности, система*

Abstract

The article considers the problem of improving personality performance and the analysis of the features and patterns of its functioning. For this purpose the cognitive linear and nonlinear models of a creative personality are built. The creative personality is regarded as a system triad the output parameter of which is its activity rate obtained in the interaction of all its concepts.

Введение

В социологии при изучении творчества человека на первый план встают понятия индивида и личности. Индивид (от лат. individuum — неделимое) — это человек как единичное природное существо, продукт филогенетического и онтогенетического развития, единства врожденного и приобретенного, носитель индивидуально своеобразных черт (способности, характер, ценности). В процессе своей жизнедеятельности индивид проходит путь социализации, т.е. усваивает накопленный поколениями людей социальный опыт, аккумулированный в традициях, нормах, знаниях, ценностях и т.п., и таким образом становится личностью [1].

Личность есть некое организованное и самоорганизующее целое (структура) множества относительно постоянных свойств (черт), динамически развивающихся из врожденных задатков индивида во взаимодействии с жизненной средой (Р. Конечный, М. Боухал, 1983). Другими словами, понятие «личность» обозначает особенные качества отдельного человека как части общества. В социологии данное понятие близко к понятию социальной роли. Только человек, ставший личностью, имеет способность к творчеству, которая в свою очередь затрагивает все системообразующие факторы структуры личности [1, 2].

Описание структуры личности в социологии происходит на дискуссионно-вербальном уровне и заканчивается предложением исследователей (А.Г. Ковалев, С.Л. Рубенштейн, А.Н. Леонтьев, А.В. Петровский) тех или иных моделей структуры личности и перечислением набора системообразующих факторов, являющихся, по их мнению, основным для определения характеристик творческой личности [3]. Однако основной недостаток в определении структуры личности этими авторами состоит в том, что, во-первых, отсутствует формальное описание моделей, и, во-вторых, все системообразующие факторы, которые касаются как самой структуры личности, так и результатов ее деятельности находятся в равновесном состоянии (состоянии покоя) и не отражают процесс получения нового результата деятельности личности как результат движения её внутренних характеристик (эмоции, физическая и интеллектуальная деятельность). В связи с этим актуальным становится определение влияния изменения внутренних факторов личности на конечный результат её творческой деятельности. Зная же это влияние, можно установить, насколько гармоничны действия человека в его творческом труде.

1 Когнитивные динамические модели структуры личности

Структура личности в когнитивной модели представляется в виде системной триады, т.е. как трехэлементное связанное множество, основными концептами которой являются интеллектуальная деятельность (ИД), организационно-трудовая деятельность (ОТД) и психологическое состояние (ПС). Системообразующей связью между элементами является обмен информацией, который достигается в результате социализации, развития и самоорганизации личности. Таким образом, творческая личность рассматривается как система, выходной координатой которой является темп деятельности, сформированный в процессе взаимодействия концептов личности. При этом природа взаимодействия такова, что один концепт (активный элемент) стимулирует или тормозит деятельность других концептов.

Изучение процессов самоорганизации личности проводится на основе синергетического подхода. При этом учитывается, что согласно этому подходу новые состояния личности в процессе самоорганизации возникают в результате когерентного (согласованного) функционирования разных по характеру элементов личности, а также в процессе образования новых структур, свойства которых прогнозируются на основе анализа прошлых поведений. С целью выявления наиболее эффективных способов самоорганизации творческой личности и исследования ее свойств строятся линейные и нелинейные когнитивные динамические модели.

В дальнейшем будем различать два состояния творческой личности: пассивное (ментальное) и активное. При ментальном состоянии личность находится в процессе размышления, планирования своих будущих форм поведения и деятельности, их согласования со своими морально-этическими нормами и духовными установками. В результате этого активного размышления, т.е. пассивной деятельности, рождаются идеи, планы, модели, образы, концепции, структуры и т.д. Это уровень концептуальной деятельности.

В состоянии активной деятельности личность реализует результаты своего ментального состояния в виде физических объектов: проектов, математических и физических моделей, программного обеспечения, методик и т.д. - это физический уровень деятельности.

В основу исследований положено представление математической модели структуры личности в ментальном состоянии в виде когнитивного орграфа, который также может быть выражен в виде системы линейных дифференциальных уравнений:

$$(1)\quad \begin{cases} \dot{X}_1 = -a_1 X_1 + k_{12} X_2 + k_{13} X_3 + u_1; \\ \dot{X}_2 = -a_2 X_2 + k_{21} X_1 + k_{23} X_3 + u_2; \\ \dot{X}_3 = -a_3 X_3 + k_{31} X_1 + k_{32} X_2 + u_3. \end{cases}$$

где X_1, X_2, X_3 – темпы интеллектуальной деятельности (ИД), организационно-трудовой деятельности (ОТД) и темп изменения психологического состояния (ПС) личности соответственно;

$\dot{X}_1, \dot{X}_2, \dot{X}_3$ - скорости изменения темпов ИД, ОТД и ПС соответственно;

a_1, a_2, a_3 – параметры, отражающие стабилизирующие факторы изменения темпа ИД, ОТД и ПС;

k_{ij} – коэффициенты взаимодействия, отражающие степень влияния концептов друг на друга;

u_1, u_2, u_3 – параметры, отражающие индивидуальный вклад каждого концепта в состояние личности.

Положительность знаков у коэффициентов между каждой парой концептов свидетельствует об их положительном влиянии друг на друга. Изменение числовых значений коэффициентов k_{ij}, a_i и параметров u_i приводит к формированию различных уровней ментального состояния личности.

Далее предлагается нелинейная когнитивная модель ментального состояния личности:

$$(2)\quad \begin{cases} \dot{X}_1 = -a_1 X_1 + b_1 X_2 X_3 + u_1; \\ \dot{X}_2 = -a_2 X_2 + b_2 X_1 X_3 + u_2; \\ \dot{X}_1 = -a_3 X_3 + b_3 X_1 X_2 + u_3. \end{cases}$$

где b_1, b_2, b_3 - коэффициенты, отражающие коллективное положительное влияние двух концептов личности на третий в мультипликативной форме.

Нелинейное влияние концептов друг на друга в модели (2) может привести личность в ментальное состояние, отличающееся от модели (1).

Теперь рассмотрим модель творческой личности в состоянии активной деятельности. Пусть целью и результатом этой деятельности будет поддержание желаемого темпа выполнения проекта (или решения научной проблемы). Все концепты личности будут направлены на достижение конечного результата. При этом состояние концептов будет влиять на темп творческой деятельности.

Для описания темпов творческой активной деятельности предлагается следующая динамическая модель:

$$(3)\quad \begin{cases} \dot{X}_1 = -a_1 X_1 + b_1 X_2 X_3 - c_1 Z + u_1; \\ \dot{X}_2 = -a_2 X_2 + b_2 X_1 X_3 - c_2 Z + u_2; \\ \dot{X}_3 = -a_3 X_3 + b_3 X_1 X_2 - c_3 Z + u_3; \\ \dot{Z} = -\alpha_0 Z + X_1 X_2 X_3. \end{cases}$$

где Z, $\dot{Z}$ – скорость темпа и темп творческой активной деятельности личности, определяемый произведением всех концептов структуры личности $X_1X_2X_3$;

c_1, c_2, c_3 – коэффициенты, отражающие восприятия элементами структуры личности динамики темпа творческой деятельности;

α_0 –коэффициент стабилизации скорости темпа творческой деятельности.

Структура нелинейной когнитивной модели творческой активной личности представлена на рисунке 1.

Особенностью данной модели структуры личности является свойство саморегулирования индивидуальных темпов работы не только по направлениям интеллектуальной, трудовой, эмоциональной деятельности за счет изменения коэффициентов a_i, но и благодаря осознанию темпов роста результатов творческой активной деятельности за счет изменения коэффициентов стабилизации c_j.

Ниже рассмотрим нелинейную когнитивную модель активной творческой деятельности личности с нелинейной формой самоорганизации всех концептов:

$$(4)\quad \begin{cases} \dot{X}_1 = a_{11} X_1 - a_{12} X_1^2 + b_1 X_2 X_3 - c_1 Z + u_1; \\ \dot{X}_2 = a_{21} X_2 - a_{22} X_2^2 + b_2 X_1 X_3 - c_2 Z + u_2; \\ \dot{X}_3 = a_{31} X_3 - a_{32} X_3^2 + b_3 X_1 X_2 - c_3 Z + u_3; \\ \dot{Z} = \alpha_{01} Z - \alpha_{02} Z^2 + X_1 X_2 X_3. \end{cases}$$

где a_{11}, a_{21}, a_{31}, α_{01} – коэффициенты положительной обратной связи, отражающие рост скорости темпов пропорционально значениям самих концептов;

a_{12}, a_{22}, a_{32}, α_{02} – коэффициенты отрицательной обратной связи, отражающие силу стабилизации (торможения) скорости темпов пропорционально значениям квадрата самих концептов.

Отличительным свойством модели (4) является самоорганизация творческой деятельности личности как за счет нелинейного воздействия концептов друг на друга, так и за счет наличия у каждого концепта сочетания линейной положительной обратной связи с нелинейной (квадратичной) отрицательной обратной связью.

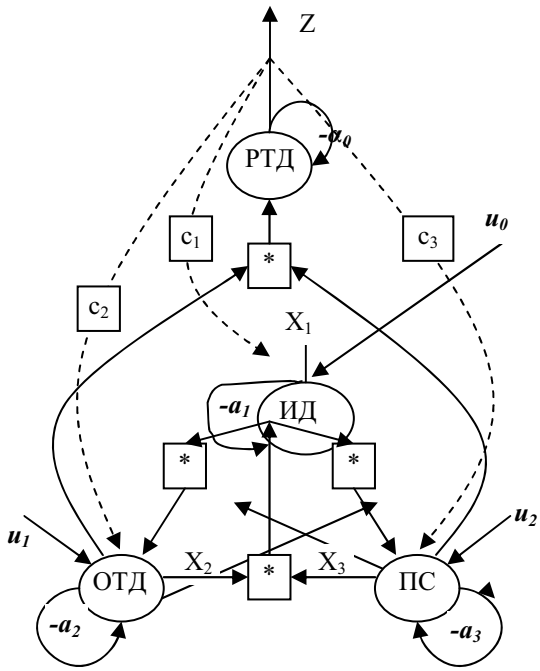


Рисунок 1 – Нелинейная когнитивная модель творческой активной личности

2 Когнитивные анализ свойств личности на основе моделирования

Свойства всех представленных моделей были проанализированы методом математического моделирования в пакете MATLAB. Время и коэффициенты взаимодействия взяты безразмерными и заданы экспертным путем. В процессе анализа производились изменения отдельных параметров модели, и оценивалось влияние этих параметров на конечный темп творческой деятельности, его устойчивость или неустойчивость. Также изучалось влияние изменения значений входных воздействий на работу системы.

Исследование *линейной* когнитивной модели (1) пассивной личности было проведено в работе [4].

Устойчивость *нелинейной* когнитивной модели (2) пассивной личности при положительности и симметричности коэффициентов a_i и b_i, сопровождающаяся плавным переходным процессом, при единичном вкладе всех концептов, достигается при условии:

(5) $b_i \le \frac{1}{4} a_i^2$, при $u_i = 1$.

Например, при значениях коэффициентов a_i=1, b_i= 0,2, u_i= 1, где i =1,2,3, темп деятельности по каждому концепту будет составлять 1,4. Если в этом случае увеличить коэффициенты взаимодействия двух концептов на третий до 0,3, т.е. нарушится условие (5), то система становится статически неустойчивой.

В случае наступления конфликтной ситуации, например, между эмоциями (X_3) и трудом (X_2), т. е. b_2 = -0,3, темпы деятельности концептов будут следующими: X_1 = 1,2, X_2 = 0,57, X_3 = 1,2, т.е коэффициент b_2 в данной ситуации становится стабилизирующим, что повышает степень устойчивости системы, и она, соответственно, становится устойчивой.

В случае уменьшения входных воздействий концептов (u_i< 1) условие (5) нарушается, и устойчивость системы достигается при более высоких значениях коэффициентов a_i и b_i. На-

пример, при значениях a_i=1, b_i= 1, а u_i= 0,25, где i =1,2,3, темп деятельности по каждому концепту будет составлять 0,5. При дальнейшем увеличении u_i система становится статически неустойчивой.

Таким образом, личность будет достигать высоких и устойчивых темпов своей деятельности, если при увеличении интенсивности деятельности каждого концепта их взаимное давление двух концептов на третий будет существенно снижено согласно условию (5). В случае, если это взаимное давление повышается, то для устойчивости деятельности личности необходимо уменьшать индивидуальный вклад каждого концепта в состояние личности.

Устойчивость нелинейной когнитивной модели (3) *активной* личности достигается при положительности и симметричности коэффициентов a_i и b_i , т.е. при полной гармонии и взаимопомощи всех концептов друг другу.

При равенстве коэффициентов обратной связи a_i и коэффициентов влияния b_i, при a_i<1, b_i<1, темп деятельности личности может достигать единицы. Например, при значениях параметров системы: a_i = 0,5, b_i = 0,5, c_i = 1, α_0=1, u_i =1, где i =1,2,3, в системе наблюдается затухающий колебательный процесс, при котором темп творческой деятельности личности стремится к единице: Z = 1. Уменьшение влияния двух концептов на третий приводит к снижению темпов творческой деятельности личности: при $a_i > b_i$, Z<1.

Снижение коэффициентов обратной связи, т.е. увеличение интенсивности деятельности концептов (a_i<b_i), приводит к росту темпов творческой деятельности: Z >1. Однако, если в этом случае не будет происходить необходимое для устойчивости системы снижение коэффициентов b_i, то система перейдет в автоколебательный режим, образуя на фазовой плоскости предельный цикл (рисунок 2).

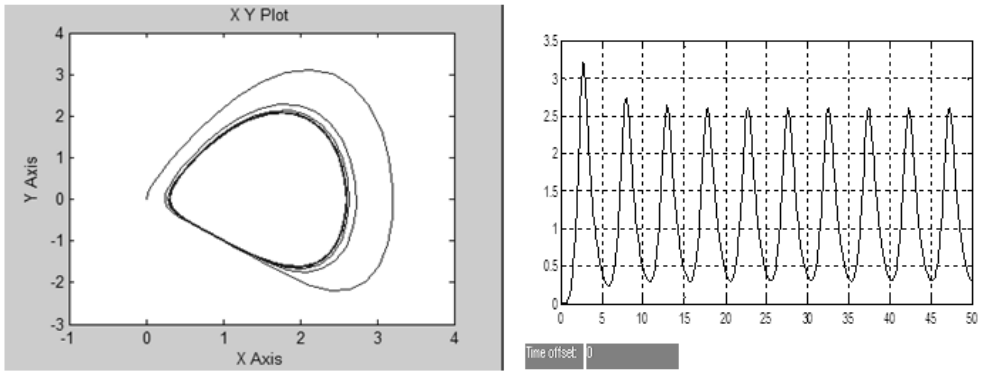


Рисунок 2 – Автоколебательный режим системы

Аналогичная ситуация наблюдается и при изменении коэффициентов c_i. Уменьшение коэффициентов восприятия элементами структуры личности динамики темпа творческой деятельности c_i повышает темп работы личности. И в тоже время темп творческой деятельности личности будет только тогда больше 1, если:

(6) $c_i < b_i + (1 - a_i)$.

Необходимо отметить, что при значениях всех коэффициентов больше 1, эти соотношения не выполняются. Более того, темп деятельности личности даже не достигает единичного значения, из чего следует вывод, что чем меньше значения коэффициентов a_i, b_i, тем выше может быть темп творческой деятельности личности.

Возникновение конфликтных ситуаций, т.е. когда знаки коэффициентов b_i различны, ведет к резкому снижению темпа выполнения проекта. Так, в случае наступления конфликтной

ситуации с одной стороны между эмоциями и трудом, а с другой между эмоциями и интеллектом: $a_i = 1$, $b_1 = b_2 = -0{,}45$, $b_3 = 0{,}45$, $c_i = 0{,}1$, $\alpha_0 = 1$, $u_i = 1$, где $i = 1,2,3$, темп творческой деятельности снизится до 0,45. Для восстановления первоначального темпа выполнения проекта необходимо увеличить усилия личности, направленные на ИД и ОТД более чем в 4 раза.

Нелинейная когнитивная модель активной творческой деятельности личности с *нелинейной формой самоорганизации* всех концептов (4) при симметричности и положительности коэффициентов характеризуется явной зависимостью темпов творческой деятельности от коэффициентов положительной обратной связи. Например, в случае значений параметров $a_{i1} = 1$, $a_{i2} = 0{,}8$, $b_i = 1$, $c_i = 1$, $\alpha_{01} = 1$, $\alpha_{02} = 1$, $u_i = 1$ и $a_{i1} = 1$, $a_{i2} = 0{,}1$, $b_i = 0{,}3$, $c_i = 1$, $\alpha_{01} = 1$, $\alpha_{02} = 1$, $u_i = 1$, где $i = 1,2,3$, темп творческой деятельности $Z = 6{,}23$.

Увеличение в данном случае взаимного нелинейного влияния двух концептов на третий, т.е. коэффициентов b_i даже на 0,1, переводит систему в статически неустойчивое состояние.

Уменьшение параметра a_{i1}, т.е. при снижении, например, мотивации личности на 0,1, приводит к значительному снижению темпа творческой деятельности $Z = 4{,}57$. Увеличению темпов творческой деятельности способствует снижение восприятия личностью динамики темпа своей творческой деятельности, т.е. коэффициентов c_i. Так в случае значений параметров $a_{i1} = 1$, $a_{i2} = 0{,}8$, $b_i = 0{,}8$, $c_i = 0{,}5$, $\alpha_{01} = 1$, $\alpha_{02} = 1$, $u_i = 1$, где $i = 1,2,3$, темп творческой деятельности достигает значения 12,44.

Изменение коэффициентов α_{01}, α_{02}, а именно их значительное уменьшение, например, до значений $\alpha_{01} = 0{,}1$, $\alpha_{02} = 0{,}3$, переводит систему в автоколебательный режим.

Заключение

В результате проведенного исследования были получены теоретические и практические результаты и сделаны следующие выводы:

1) Когнитивная модель структуры личности качественно правильно отражает поведение реальной личности в стандартных ситуациях.
2) Максимальный темп творческой деятельности личности достигается при полной гармонии и взаимопомощи всех трех концептов: интеллектуального, трудового, психоэмоционального.
3) В отличие от моделей ментального состояния личности, где все процессы протекали плавно, в моделях активной личности при определенных сочетаниях параметров появляются автоколебательные режимы работы.
4) Введение в структуру личности элементов самоорганизации позволяет выявить, что темп творческой деятельности личности преимущественно зависит от саморегулирования активности всех элементов структуры личности.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-08-01014-а и государственного контракта в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» 2009-2013г.

Список литературы

[1] Кондратьев М. Ю., Ильин В. А. Азбука социального психолога-практика. — М.: ПЕР СЭ, 2007. — 464 с.
[2] Голубинцев В.О., Данцев А.А., Любченко В.С. Философия для технических вузов. - Изд. 4-е, перераб. и доп. — Ростов н/Д: Феникс, 2008.
[3] Хьелл Л., Зиглер Д. Теория личности: Основные положения, исследование и применение. – СПб, 1999.
[4] Герасимова И. Б. Когнитивная модель общения двух личностей / СПб., 2010. С.53

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ НЕЧЕТКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ЗАЩИЩЕННОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНО-ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

А.Д. Тарасов

Оренбургский государственный аграрный университет
460795, Оренбург, ул. Челюскинцев, 18, Россия
тел./факс: +8 (3532) 77-52-30

Ключевые слова: система физической защиты, нечеткая информация, лингвистическая переменная, метод парных сравнений Саати, многокритериальный анализ вариантов, DFD-диаграммы, гиперграфы, алгоритм Дейкстры, α-уровневый принцип, дефаззификация

Abstract

It is describing method for decision making assistance in potentially-dangerous objects physical defense system automatic projecting. Method based on step by step mathematic methods using, with expert knowledges processing procedures in discrepancy and ambiguity conditions.

Введение

Потенциально-опасными являются объекты, реализация угроз на которых может привести к возникновению чрезвычайных ситуаций с социально-экономическими последствиями, и задача обеспечения безопасности таких объектов является важнейшей. Эффективность проектирования систем физической защиты (СФЗ) потенциально-опасных объектов зависит от качества экспертных знаний и методики их обработки. В задаче принятия решения о составе СФЗ самым сложным и плохо формализуемым этапом, требующим применения процедур, которые используют знания экспертов, является концептуальное проектирование, под которым понимается анализ защищенности объекта, разработка практических рекомендаций по созданию СФЗ, выбор варианта и состава инженерно – технических средств охраны (ИТСО).

Как показывает, практика оценка показателя защищенности объекта инженерно-техническими средствами охраны представляет наибольшую сложность, что подтверждается существованием нескольких подходов (моделей) к оценке данного показателя в ряде источников [1, 2]. Кроме того, при проектировании СФЗ эксперты, могут только прогнозировать или предугадывать большую часть входных данных. Подобные данные представляют собой некоторые лингвистические формы, для операций над которыми требуется, например аппарат нечетких величин.

В данной работе предлагается методика оценки защищенности объекта, позволяющая определить насколько проектируемая инженерно-техническая защита будет соответствовать требованиям защищенности для выбранного объекта. Методика основана на последовательном применении математических методов, в частности методов обработки экспертных знаний в условиях неточности и неопределенности.

1 Определение критериев защищенности

Введем определение показателя качества защищенности $P_{\text{итз}}$ – инженерно-техническая защищенность объекта. Равенство показателя $P_{\text{итз}}$ нулю означает полное отсутствие инженерно-технической защиты. Равенство единице означает, что инженерно-техническая защита полностью выполняет свои функции, т. е. противодействует нарушителям на уровне не ниже требуемого для данного объекта. Если инженерно-техническая защита оказалась выше требуемой, то значение $P_{\text{итз}}$ будет превышать 1. Таким образом, диапазон значений показателя

[0, ∞), однако варианты, при которых значение показателя становится больше числа 1, рассмотрению не подлежат т. к. превышение требуемого уровня защищенности экономически нецелесообразно и является недостатком проекта инженерно-технической защиты.

Определим критерии, от которых зависит показатель качества защищенности.

$P_{итз} = F(\alpha_{осн\,i}; p_{стр\,i})$, где $\alpha_{осн\,i}$ – степень оснащенности ИТСО наименее защищенного пути проникновения к *i*-му критическому элементу, $p_{стр\,i}$ – мера структурной защищенности наименее защищенного пути к *i*-му критическому элементу.

Критические элементы (КЭ) – уязвимые части объекта, включая элементы системы его физической защиты, в отношении которых в силу их недостаточной защищенности или устойчивости могут быть спланированы и успешно реализованы нарушителем несанкционированные действия.

$\alpha_{осн\,i} = N_i / N^T_i$, где N_i – фактическое количество установленных средств защиты на наименее защищенном пути к *i*-тому КЭ

$N_i = \sum N^k_i$, где N^k_i – фактическое количество установленных средств защиты *k*-того типа на наименее защищенном пути к *i*-тому КЭ

N^T_i – требуемое количество средств защиты на наименее защищенном пути к *i*-тому КЭ

$N^T_i = \sum N^T_{k\,i}$, где $N^T_{k\,i}$ – требуемое количество установленных средств защиты k-того типа на наименее защищенном пути к *i*-тому КЭ

Степень оснащенности всего объекта равна

$\alpha_{осн} = \min\limits_{i=1,n} \alpha_{осн\,i}$, где n – количество критических элементов

Введем определение параметра $p_{стр}$. Мерой структурной защищенности критического элемента является защищенность наиболее уязвимого пути от точки проникновения на объект до критического элемента, рассчитываемая через произведение $p_{стр} = p_{обн} \times p_{зад}$, где $p_{обн}$ – вероятность обнаружения нарушителя средствами ИТСО и $p_{зад}$ - вероятность задержки нарушителя средствами ИТСО. $p_{стр}$ покажет вероятность того, что при попытке проникнуть по самому уязвимому пути к КЭ нарушитель будет обнаружен и задержан средствами защиты. Вероятности будем представлять в виде нечетких величин.

Мера структурной защищенности всего объекта равна:

$p_{стр} = \min\limits_{i=1,n} p_{стр\,i}$, где n – количество критических элементов.

Определим вид зависимости $P_{итз}$ от $\alpha_{осн}$ и $P_{итз}$ от $p_{стр}$.

Для зависимости $P_{итз}(\alpha_{осн})$ выявим обязательные (ключевые) точки графика функции. При $\alpha_{осн}$ равной 0 показатель $P_{итз}$ равен $P_и$, где $P_и$ означает минимально возможный уровень защищенности объекта, который обеспечивается только его инженерной защищенностью (прочностью дверей, окон, стен и т. п.).

При $\alpha_{осн}$ равной 1 $P_{итз}$ равен 1. Если $\alpha_{осн} > 1$ (оснащенность выше требуемой), то $P_{итз} > 1$ (уровень инженерно-технической защиты выше требуемого для данного объекта).

Очевидно и это подтверждают результаты моделирования с помощью программных средств, что зависимость $P_{итз}(\alpha_{осн})$ монотонно возрастающая. Из простых функций такую зависимость достаточно хорошо аппроксимирует возведение в степень, например $y=x^{1/2}$. График показан на рисунке 1.

$P_{итз}(\alpha_{осн}) = w \times (\alpha_{осн} + b)^{1/2}$

Параметры b и w зависимости $P_{итз}(\alpha_{осн})$ можно определить через ключевые точки графика $\alpha_{осн} = 0$, $P_{итз} = P_и$ и $\alpha_{осн} = 1$, $P_{итз} = 1$, используя математические преобразования.

Первая точка: $P_и = w \times (0 + b)^{1/2}$; $b = P_и^2 / w^2$

Вторая точка: $1 = w \times (1 + b)^{1/2}$; $w = (1 - P_и^2)^{1/2}$; $b = P_и^2 / (1 - P_и^2)$

Таким образом параметры b и w вычисляются через значение $P_и$ – инженерную защищенность объекта, которая определяется экспертно.

Зависимость $P_{итз}(p_{стр})$ также монотонно возрастающая. Минимальное значение $p_{стр}$ равно 0 т. к. на объекте могут полностью отсутствовать средства обнаружения, тогда $p_{обн}$ равняется 0 и $p_{стр}$ как произведение $p_{обн} \times p_{зад}$ равняется 0.

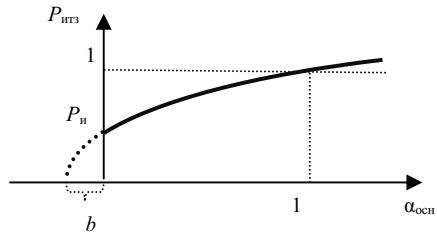


Рисунок 1 – График зависимости $P_{итз}(\alpha_{осн})$

При $p_{стр}$ равной 0 $P_{итз}$ равна 0. Если $p_{стр}$ равна требуемой – $p^m_{стр}$, то $P_{итз}$ равна 1. Значение $p^m_{стр}$ всегда меньше единицы, т. к. если требуемая вероятность обнаружения и задержки будет задана равной 1, то такое условие невыполнимо при любом уровне ИТСО и при условии $p^m_{стр} = 1$ поиск варианта ИТСО является некорректно поставленной задачей.

Если $p_{стр}$ больше $p^m_{стр}$, то $P_{итз}$ также больше 1. Так как $P_{стр} = P_{обн} \times P_{зад}$ (произведение вероятностей), то максимально возможное (недостижимое в реальности) значение $p_{стр} = 1$. При $p_{стр} = 1$ очевидно $P_{итз} = \infty$ (бесконечно защищенный, абсолютно неуязвимый для нарушителей объект). На графике прямая $p_{стр} = 1$ будет являться асимптотой функции $P_{итз}(p_{стр})$.

Функцию определяем как гиперболическую зависимость, это подтверждают результаты моделирования (рисунок 2).

$P_{итз}(p_{стр}) = -v / (p_{стр} - 1) - a$

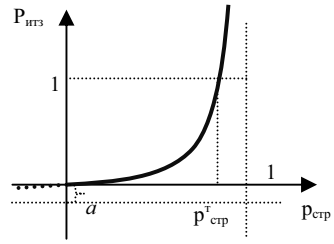


Рисунок 2 – График зависимости $P_{итз}(p_{стр})$

Вычисляем параметры зависимости через ключевые точки графика:

$p_{стр} = 0$, $P_{итз} = 0$ и $p_{стр} = p^m_{стр}$, $P_{итз} = 1$:

Первая точка: $0 = -v / (0 - 1) - a$; $v = a$

Вторая точка: $1 = -a / (p^т_{стр} - 1) - a$; $a = 1 / p^m_{стр} - 1$

Параметры a и v равны между собой и вычисляются через значение $p^m_{стр}$ – требуемую структурную защищенность, определяемую экспертно.

Таким образом для вычисления $P_{итз}$ – инженерно-технической защищенности объекта необходимо найти значения вышеописанных критериев $\alpha_{осн}$, $p_{стр}$ и определить функции зависимостей $P_{итз}(\alpha_{осн})$ и $P_{итз}(p_{стр})$.

Вычисление $P_{итз}$ проводим по формуле:

$P_{итз} = P_{итз}(\alpha_{осн}) \times P_{итз}(p_{стр})$

Далее рассмотрим методы и примеры определения $\alpha_{осн}$ и $p_{стр}$.

2 Определение степени оснащенности ИТСО

2.1 Понятие критерия значимости средств защиты

Используемые типы средств защиты опишем в виде точек контроля:

- точка обнаружения (ТО) это техническое средство, автоматически подающее сигнал тревоги при несанкционированном проникновении в зону защиты.
- точка доступа (ТД) это техническое средство позволяющее осуществлять контроль за проходом через зону защиты путем идентификации личности.
- точка видеонаблюдения (ТВ) это техническое средство дающее возможность визуально оценивать обстановку в зоне защиты, сигнал тревоги подает оператор в случае предполагаемой угрозы несанкционированного проникновения.

Каждое из установленных средств защиты вносит различный вклад в степень оснащенности. Следовательно, необходимо использовать понятие значимости для типов средств защиты. Значимость средства защиты зависит от базовой модели нарушителя. С учетом значимости для средств защиты степень оснащенности ИТСО i-ого критического элемента равняется:

$\alpha_{\text{осн i}} = \sum (N^{\text{k}}{}_i * S^{\text{k}}{}_i) / \sum (N^{\text{Tk}}{}_{\text{i}} * S^{\text{k}}{}_i)$, где $N^{\text{k}}{}_{\text{i}}$ – количество установленных средств защиты *k*-го типа для каждого КЭ объекта ; $N^{\text{Tk}}{}_i$ – требуемое количество установленных *k*-го типа средств защиты для каждого КЭ объекта ; $S^{\text{k}}{}_i$ – критерий значимости средств защиты *k*-го типа защищающих *i*-ый КЭ

Значимость средства защиты зависит от следующих критериев:

- возможности средства по обнаружению несанкционированного проникновения;
- возможности средства по затруднению перемещения нарушителей на территории объекта;
- возможности средства по ограничению доступа в охраняемые зоны объекта;
- возможности средства по распознаванию нарушителя.

Для определения значимости используем метод нечеткого многокритериального анализа вариантов [3]. В этом методе критерии рассматриваются как нечеткие множества, которые заданы на универсальном множестве альтернатив с помощью функций принадлежности. Функции принадлежности нечетких множеств определяются методом Саати по экспертным парным сравнениям альтернатив.

Представляем критерии F_{u} нечеткими множествами на универсальном множестве типов средств защиты C_i где i=1…m: $\widetilde{F}_u = \{\mu_{F_u}(C_1)/C_1, \mu_{F_u}(C_2)/C_2, \ldots, \mu_{F_u}(C_m)/C_m\}$.

Из полученных значений критериев каждого типа средств защиты определяем значимость. Опираемся на принцип Беллмана-Заде [4]. Нечеткое решение представляет собой пересечение частных критериев [3]:

$$(1)\quad \widetilde{D} = \widetilde{F}_1^{\alpha_1} \cap \widetilde{F}_2^{\alpha_2} \cap \ldots \cap \widetilde{F}_h^{\alpha_h} = \{\underset{u=1,h}{\mathbf{min}}(\mu_{F_u}^{\alpha_u}(C_1))/C_1, \underset{u=1,h}{\mathbf{min}}(\mu_{F_u}^{\alpha_u}(C_2))/C_2, \ldots, \underset{u=1,h}{\mathbf{min}}(\mu_{F_u}^{\alpha_u}(C_m))/C_m\}$$

где α_{u} – коэффициент относительной важности критерия F_{u}, $\alpha_1+\alpha_2+...+\alpha_{\text{u}}=1$. Показатель степени α_{u} концентрирует функцию принадлежности нечеткого множества в соответствии с важностью критерия F_{u}. Коэффициенты относительной важности критериев также определяются методом парных сравнений Саати и будут зависеть от базовой модели нарушителя рассматриваемого КЭ.

Приведем пример определения коэффициентов значимости для средств защиты критического элемента с моделью нарушителя – террористическая группа.

Эксперты проводят парные сравнения для средств защиты по каждому критерию. Первая матрица парных сравнений соответствует экспертным высказываниям при ответе на вопрос: «Какой тип средств защиты имеет большие возможности по обнаружению несанкционированного проникновения по сравнению с остальными?» (таблица 1).

Таблица 1 – Матрица парных сравнений для оценки возможности по обнаружению

Обнаружение	C_1	C_2	C_3
C_1 - ТО	1	9	2
C_2 - ТД	1/9	1	1/5
С3 - ТВ	1/2	5	1

Результирующий вектор матрицы парных сравнений: 0,6153; 0,0660; 0,3187 соответственно получаем F_1={0,6153/C_1, 0,0660/C_2, 0,3187/C_3}

Аналогично обрабатывается вторая матрица: «Какой тип средств защиты имеет большие возможности по затруднению перемещения нарушителей на территории объекта?»

Результат F_2={0,0909/C_1, 0,8182/C_2, 0,0909/C_3}.

Третья матрица: «Какой тип средств защиты имеет большие возможности по ограничению доступа в охраняемые зоны объекта?»

Результат F_3={0,2297/C_1, 0,6483/C_2, 0,1220/C_3}.

Четвертая матрица: «Какой тип средств защиты имеет большие возможности по распознаванию нарушителя?»

Результат F_4={0,1047/C_1, 0,2583/C_2, 0,6370/C_3}

Далее эксперты проводят парные сравнения критериев по важности, учитывая, что модель нарушителя данного КЭ - террористическая группа (таблица 2).

Таблица 2 – Матрица парных сравнений для оценки критериев по важности

Террористическая группа	F_1	F_2	F_3	F_4
F_1 - обнаружение	1	1/3	1/5	3
F_2 - затруднение перемещения	3	1	1/2	7
F_3 - ограничение доступа	5	2	1	9
F_4 - распознавание	1/3	1/7	1/9	1

Получен результирующий вектор 0,1149; 0,3094; 0,5293; 0,0464, соответственно α_1=0,1149; α_2=0,3094; α_3=0,5293; α_4=0,0464.

Далее по формуле (1) вычисляем уровень значимости. Получаем следующие нечеткие множества:

$$\widetilde{F}_1^{\alpha_1} = \{0{,}6153^{\,0{,}1149} / C_1, 0{,}0660^{\,0{,}1149} / C_2, 0{,}3187^{\,0{,}1149} / C_3\},$$

$$\widetilde{F}_2^{\alpha_2} = \{0{,}0909^{\,0{,}3094} / C_1, 0{,}8182^{\,0{,}3094} / C_2, 0{,}0909^{\,0{,}3094} / C_3\},$$

$$\widetilde{F}_3^{\alpha_3} = \{0{,}2297^{\,0{,}5293} / C_1, 0{,}6483^{\,0{,}5293} / C_2, 0{,}1220^{\,0{,}5293} / C_3\},$$

$$\widetilde{F}_4^{\alpha_4} = \{0{,}1047^{\,0{,}0464} / C_1, 0{,}2583^{\,0{,}0464} / C_2, 0{,}6370^{\,0{,}0464} / C_3\}.$$

После вычисления пересечения нечетких множеств $\widetilde{F}_1^{\alpha_1} \cap \widetilde{F}_2^{\alpha_2} \cap \ldots \cap \widetilde{F}_h^{\alpha_h}$ получаем конечный результат нечеткое множество – значения критериев значимости для каждого вида точек контроля: {0,4591/S_1, 0,7318/S_2, 0,3284/S_3}. Интерпретируем результат следующим образом: для данного КЭ (с моделью нарушителя террористическая группа) значимость точки доступа выше остальных. Следовательно, степень оснащенности КЭ будет сильнее зависеть от соответствия требуемому количества точек доступа, чем от наличия точек обнаружения и точек видеонаблюдения.

Например, для КЭ заданы следующие требуемые количества средств защиты: *ТО* - N^{T1}=2, *ТД* - N^{T2}=2, *ТВ* - N^{T3}=2. Текущее количество средств: *ТО* - N^{T1}=1, *ТД* - N^{T2}=2, *ТВ* - N^{T3}=2 (точек обнаружения на одну меньше чем требуется). Степень оснащенности ИТСО данного критического элемента равняется $\alpha_{осн}$ = (1 * 0,4591 + 2 * 0,7318 + 2 * 0,3284) / (2 * 0,4591 + + 2 * 0,7318 + 2 * 0,3284) = 0,8489

Если же текущее количество средств будет таким, что только точек доступа окажется на одну меньше чем требуется: *ТО* - N^{T1}=2, *ТД* - N^{T2}=1, *ТВ* - N^{T3}=2 то степень оснащенности будет равна 0,7592. Аналогично проверим влияние отсутствия одной точки видеонаблюдения на оснащенность: *ТО* - N^{T1}=2, *ТД* - N^{T2}=2, *ТВ* - N^{T3}=1, $\alpha_{осн}$ = 0,8919.

Таким образом, нехватка точек доступа (средств защиты с большей значимостью) показывает меньшую степень оснащенности, чем аналогичная по числу нехватка других типов средств защиты.

2.2 Процесс определения требуемого уровня защищенности

Для определения требуемого количества средств защиты необходимо выявить критические элементы объекта и для каждого КЭ оценить требуемый уровень защищенности через анализ производственно-технологического процесса.

Последовательность действий при решении данной задачи следующая:

1) Определяем критические элементы объекта. Эксперты оценивают зоны - потенциально опасные участки (ПОУ) по степени потенциальной опасности – по количеству пострадавших в результате реализации угрозы террористического акта (ТА).
2) Определяем базовую модель нарушителя для каждого КЭ. Эксперты выбирают базовую модель нарушителя из следующих вариантов: террористическая группа (ТГ) численностью 5-12 человек; малочисленная группа лиц (2-4 человека), групповой нарушитель (ГН), имеющий целью совершение ТА; одиночный нарушитель, имеющий целью совершение ТА.
3) Определяем привлекательность КЭ для совершения террористического акта. Привлекательность КЭ для ТА зависит от следующих критериев: доступность; степень уязвимости; приемлемость риска; степень последствий ТА.

Аналогично поиску уровней значимости средств защиты используем метод нечеткого многокритериального анализа вариантов.

Представляем критерии G_u нечеткими множествами на универсальном множестве критических элементов K_i где i=1…m: $\widetilde{G}_u = \{\mu_{G_u}(K_1)/K_1, \mu_{G_u}(K_2)/K_2, \ldots, \mu_{G_u}(K_m)/K_m\}$

Эксперты проводят парные сравнения для ПОУ по каждому критерию, отвечая на вопросы вида: «Какой участок более доступный по сравнению с остальными?»

Например, результирующий вектор матрицы парных сравнений ПОУ по критерию «доступность» равен: 0,3; 0,3; 0,2; 0,2 соответственно $G1=\{0,3/K_1, 0,3/K_2, 0,2/K_3, 0,2/K_4\}$

Аналогично экспертам задаются вопросы: «Какой участок более уязвимый по сравнению с остальными?»; «Какой участок менее рискованный для нарушителей по сравнению с остальными?»; «Какой участок имеет большую степень последствий по сравнению с остальными?»

Далее из полученных значений критериев каждого ПОУ определяем привлекательность для ТА. Опираемся на принцип Беллмана–Заде [4]. Нечеткое решение представляет собой пересечение частных критериев:

$$(2)\quad \widetilde{D} = \widetilde{G}_1^{\alpha_1} \cap \widetilde{G}_2^{\alpha_2} \cap \ldots \cap \widetilde{G}_h^{\alpha_h} = \{\underset{u=1,h}{\min}(\mu_{G_u}^{\alpha_u}(K_1))/K_1, \underset{u=1,h}{\min}(\mu_{G_u}^{\alpha_u}(K_2))/K_2, \ldots, \underset{u=1,h}{\min}(\mu_{G_u}^{\alpha_u}(K_m))/K_m\}$$

где α_u - коэффициент относительной важности критерия G_u, $\alpha_1+\alpha_2+\ldots+\alpha_u=1$.

Коэффициенты относительной важности критериев также определяются методом парных сравнений Саати. Например, результирующий вектор матрицы парных сравнений критериев по важности: 0,4; 0,3; 0,2; 0,1 соответственно: α_1=0,4; α_2=0,3; α_3=0,2; α_4=0,1.

По формуле (2) вычисляем уровень привлекательности. Результат, например: $\{0,785/K_1, 0,761/K_2, 0,653/K_3, 0,422/K_4\}$. По полученным коэффициентам можно определить привлекательность ПОУ в виде нечетких значений. Задаем следующее соответствие: «высокая» – 0,6 - 1; «средняя» – 0,3 - 0,6; «низкая» – 0 - 0,3 получаем в итоге {высокая/K_1, высокая/K_2, высокая/K_3, средняя/K_4}.

4) Определяем требуемый уровень защищенности для каждого КЭ.

Используем рекомендации, предназначенные для применения в организациях промышленности и энергетики, находящихся в сфере ведения Минпромэнерго России и подведомственных ему федеральных агентств, при организации работ по контролю, анализу и оценке состояния системы физической защиты объекта, а также для разработки мероприятий по совершенствованию СФЗ объекта (таблица 3).

Также необходимо учитывать влияние КЭ на соседние согласно производственно-техническому процессу объекта. При непосредственном влиянии КЭ на другой критический элемент, требуемый уровень защищенности должен устанавливается на одну ступень выше.

Таблица 3 – Рекомендации по требуемым уровням защищенности

Потенциальная опасность	Модель нарушителя	Привлекательность для совершения ТА	Требуемый уровень защищенности
высокая	ТГ	высокая	I
высокая	ТГ, ГН	средняя	I
высокая	ТГ, ГН	низкая	I
средняя	ТГ, ГН, ОН	высокая	II
средняя	ТГ, ГН, ОН	средняя	II
средняя	ТГ, ГН, ОН	низкая	III
низкая	ГН, ОН	высокая	IV
низкая	ОН	средняя	V
низкая	ОН	низкая	V

2.3 Пример определения требуемого уровня защищенности

В качестве примера рассмотрим модельный объект, на котором синтезируются химические вещества. На территории располагаются производственные корпуса цехов (ПЦ), разгрузочно-погрузочная зона, склад сырья, склад горюче-смазочных материалов (ГСМ), материальные склады, объекты жизнеобеспечения (котельная, компрессорная станция), ремонтно-механический цех (РМЦ), строительный участок, административные здания. Для транспортирования готовой продукции на территорию объекта проведена железнодорожная ветка. Три контрольно-пропускных пункта (КПП) организуют санкционированный доступ на объект персоналу и посетителям, автомобильному транспорту и железнодорожному транспорту. На объекте организована защита по периметру: запретная зона с двумя сигнально-заградительными рубежами и телевизионными средствами наблюдения. Схема объекта показана на рисунке 3.

Для оценки требуемых уровней защищенности построим две модели объекта. В моделях используем понятия зона и рубеж. Зона – часть территории объекта, представляющее собой ограниченное замкнутое пространство, имеющее физические границы. Рубеж – физический барьер (часть физической границы зоны, например: дверь, проходная) блокирующая проход из одной зоны в другую.

Первая модель структурно-логическая, где зоны объекта связываются между собой рубежами. Каждый рубеж определяет способ (или возможность) перемещения из одной зоны в другую. Таким образом, связи в структурно-логической модели показывают каким образом можно проникнуть в конкретную зону объекта (через преодоление каких рубежей).

Вторая модель функциональная требуется для анализа производственно-технологического процесса объекта. При построении функциональной модели производственно-технологического процесса используем стандарт DFD. Зоны объекта связываются между собой потоками данных производственно-технологических процессов. Связи в функциональной модели покажут наличие влияния КЭ друг на друга.

Определим необходимые характеристики зон объекта для выявления критических элементов (таблица 4). На основе характеристик зон и связей в функциональной модели делается вывод о необходимом уровне защищенности каждого критического элемента. Уровень определяется согласно таблице 1 и зависит от заданного экспертами критерия «потенциальная опасность», от модели нарушителя и от параметра «привлекательность для совершения ТА», а также от наличия влияния на другой критический элемент.

На рисунке 3 отображена структурно-логическая модель объекта с требуемыми уровнями защищенности, обозначенными римскими цифрами. Зоны без уровня защищенности не являются критическими элементами.

3 Определение требуемого и текущего количества установленных средств защиты

Текущее количество установленных средств защиты определяется через экспертный анализ объекта. Требуемое количество установленных средств защиты определим с помощью общей математической модели «угроза - объект - СФЗ» на основе нечетких гиперграфов [5].

Таблица 4 – Характеристики зон модельного объекта

№	Наименование	Потенциальная опасность	Модель нарушителя	Привлекательность для совершения ТА
1	ПЦ-1	высокая	ТГ	высокая
2	ПЦ-2	высокая	ТГ	высокая
3	Склад сырья	высокая	ТГ, ГН	высокая
4	Склад готовой продукции	высокая	ТГ, ГН	высокая
5	Склад ГСМ	средняя	ГН, ОН	средняя
6	Компрессорная станция	высокая	ГН, ОН	средняя
7	Котельная	высокая	ГН, ОН	средняя
8	Административное здание	низкая	ГН, ОН	средняя
9	Материальный склад	низкая	ОН	низкая
10	Ремонтно-механический цех	средняя	ОН	низкая
11	Железнодорожный КПП	очень низкая	ОН	низкая
12	Автомобильный КПП	очень низкая	ОН	низкая
13	КПП	очень низкая	ОН	низкая
14	Строительный участок	очень низкая	ОН	низкая
15	Гараж	очень низкая	ОН	низкая
16	Территория внутри защитного периметра	очень низкая	ОН	низкая
17	Запретная зона защитного периметра	очень низкая	ОН	низкая

Модель рассматривается как объединение трех составляющих элементов: 1) источники угроз – виды нарушителей; 2) объект – зоны являющиеся потенциальными целями нарушителей; 3) средства защиты – инженерно-технические средства охраны. Три составляющих элемента модели представлены в виде нечетких гиперграфов, и их взаимодействие рассматривается как композиция гиперграфов. Определение степеней взаимодействия элементов позволяет оценить требуемый уровень средств ИТСО следующим образом.

Для составления композиций гиперграфов используются соответствия характеристик нарушителя и критических элементов, а также характеристик нарушителя и средств защиты. Например, характеристика нарушителя «возможность пожертвовать собой» соответствует харак-

теристике КЭ – «приемлемость риска при совершении ТА из-за последствий для самих террористов». Эти соответствия позволяют построить композиции гиперграфов «Нарушители» – «Объект» и «Средства защиты» – «Нарушители». Третья композиция «Средства защиты» – «Объект» определяется автоматически по двум предыдущим. Коэффициенты матрицы инциденций гиперграфа третьей композиции покажут степень необходимости обеспечения каждого критического элемента объекта различными средствами защиты – чем выше коэффициент, тем выше должна быть эффективность средства защиты в данной зоне.

Пример результата в виде матрицы инциденций гиперграфа композиции «Средства защиты» – «Объект» объединяющей все КЭ отображен в таблице 5.

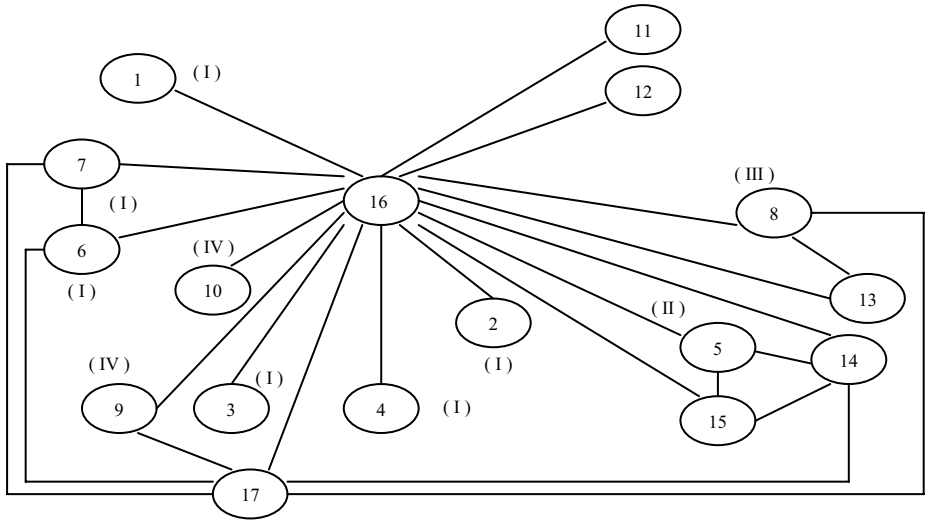


Рисунок 3 – Структурно-логическая модель объекта с требуемыми уровнями защищенности

Таблица 5 – Коэффициенты матрицы инциденций гиперграфа композиции «Средства защиты» - «Объект»

	ТО	ТД	ТВ
материальный склад	0,5	0,6	0,6
котельная	0,5	0,9	0,9
административное здание	0,5	0,5	0,5
склад готовой продукции	0,5	0,9	0,9
склад сырья	0,5	0,5	0,5

Уровень от 0 до 1 можно интерпретировать как необходимость установки единичного экземпляра средства защиты (выше 0,5 значит нужно устанавливать средство для защиты данного КЭ) или как количественный показатель (0 не нужно средство, от 0 до 0,5 один экземпляр, от 0,5 до 0,8 два экземпляра, от 0,8 до 1 три экземпляра).

4 Определение требуемой и текущей меры структурной защищенности

Требуемая мера структурной защищенности - минимальная вероятность обнаружения и задержки для каждого КЭ определяется по известным показателям потенциальной опасности, базовому типу нарушителя и привлекательности для совершения ТА аналогично требуемому уровню защищенности (таблица 6).

Таблица 6 – Требуемые минимальные вероятности обнаружения и задержки

Потенциальная опасность	Модель нарушителя	Привлекательность для совершения ТА	Требуемый уровень защищенности	Минимальная вероятность обнаружения и задержки
высокая	ТГ	высокая	I	0,95
высокая	ТГ, ГН	средняя	I	0,9
высокая	ТГ, ГН	низкая	I	0,9
средняя	ТГ, ГН, ОН	высокая	II	0,85
средняя	ТГ, ГН, ОН	средняя	II	0,8
средняя	ТГ, ГН, ОН	низкая	III	0,8
низкая	ГН, ОН	высокая	IV	0,7
низкая	ОН	средняя	V	0,6
низкая	ОН	низкая	V	0,5

Для определения текущей меры структурной защищенности необходимо определить все возможные пути и выбрать среди них наиболее уязвимый (наименее защищенный), т. е. такой что вероятность $P_{\text{стр}} = P_{\text{обн}} \times P_{\text{зад}}$ на этом пути будут минимальна. Определим, как будет рассчитываться вероятность обнаружения нарушителя $P_{\text{обн}}$ на выбранном пути. Используем величину обратную вероятности обнаружения – вероятность необнаружения $Q_{\text{обн}} = 1 - P_{\text{обн}}$. Для пути из нескольких рубежей защиты эта величина должна рассчитываться как вероятность проникновения через все рубежи одновременно. По теории вероятности для оценки одновременного выполнения двух событий их вероятности должны перемножаться. Предположим, что вероятности $P_{\text{обн i}}$ известны для каждого i-го рубежа пути из n рубежей. Вероятность обнаружения нарушителя $P_{\text{обн}}$ для всего пути равна $1 - Q_{\text{обн}}$ где $Q_{\text{обн}}$ вероятность необнаружения нарушителя на всем пути. Так как для необнаружения на всем пути нарушитель должен пройти незамеченным все рубежи, то $Q_{\text{обн}}$ равно произведению вероятностей необнаружения на каждом рубеже, соответственно:

(3) $$P_{\text{îáí}} = 1 - Q_{\text{îáí}} = 1 - \prod_{i=1}^{n} Q_{\text{îáí}\ i} = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - P_{\text{îáí}\ i})$$

Аналогично определяем вероятность Рзад для всего пути:

(4) $$P_{зад} = 1 - Q_{зад} = 1 - \prod_{i=1}^{n} Q_{зад\,i} = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - P_{зад\,i}),$$

где $Q_{\text{зад}}$ и $Q_{\text{зад}\ i}$ – вероятности того что нарушитель не будет задержан на всем пути и на i-ом рубеже соответственно.

Решение задачи определения меры структурной защищенности всех КЭ объекта потребует выявления путей проникновения на объект и оценку характеристик всех рубежей защиты. Для выявления возможных путей анализируемый объект защиты удобно описывать в виде графа. Оценка вероятностей $P_{\text{обн}}$ и $P_{\text{зад}}$ для рубежей потребует экспертной информации.

Найти наименее защищенный путь из точки проникновения в зону объекта можно путем полного перебора всех возможных путей, или через метод позволяющий упростить задачу поиска. Используем алгоритм Дейкстры для определения кратчайшего пути между вершинами графа [6]. Вместо анализа суммарной длины ребер для выбранного пути используем формулы (3) и (4). Измененный таким образом алгоритм Дейкстры позволяет найти путь с наименьшей вероятностью $P_{\text{обн}}$ и $P_{\text{зад}}$ т. е. искомый наименее защищенный.

Значения вероятностей $P_{\text{обн}}$ и $P_{\text{зад}}$ для рубежей защиты определяются экспертными методами. Информация такого рода не может быть получена с высокой точностью и достоверностью, поэтому предлагается использовать нечеткие величины для задания исходных данных в задаче определения меры структурной защищенности.

Опишем $P_{обн}$ и $P_{зад}$ в виде лингвистических переменных. Каждая лингвистическая переменная имеет свой набор термов вида «высокая», «средняя», «низкая». Набор термов и функции принадлежности могут быть любыми. Считается, что для экспертов наиболее удобным является количество от 5 до 9 термов в переменной [7]. Для каждого рубежа или зоны эксперты могут задавать вероятности в словесной форме, выбирая из используемых термов наиболее подходящий. Например, эксперт считает, что вероятность обнаружения нарушителя на контрольно-пропускном пункте «очень высокая».

Для поиска наименее защищенного пути с нечеткими исходными данными необходимо использовать арифметические операции с нечеткими числами. Существует несколько способов, такие как принцип обобщения Заде. Наиболее практичным является применение α-уровневого принципа обобщения. В этом случае нечеткие числа представляются в виде разложений по α-уровневым множествам что позволяет легко выполнять арифметические операции над нечеткими числами.

Приведем пример определения меры структурной защищенности для вышеописанного модельного объекта. Используем граф на рисунке 3. Расчеты проводились с помощью программы, созданной автором на языке Visual Basic. Рассмотрим подробно процесс определения меры структурной защищенности критического элемента ПЦ-1 – зоны №1. Точкой проникновения выберем КПП – зону №13. На рисунке 4 показано изображение графа объекта, в интерфейсе программы после проведенного анализа путей. Для каждой зоны определены пути с наименьшей вероятностью обнаружения – $P_{обн}$. Четкие значения вероятностей полученные дефаззификацией по центру максимумов подписаны над всеми зонами. Найденный путь в зону №1 проходит через следующие вершины и ребра: КПП ($P_{обн}$= «выше среднего»), вход на КПП с территории внутри периметра ($P_{обн}$=0), территория внутри защитного периметра ($P_{обн}$=0), вход в ПЦ-1 с территории ($P_{обн}$= «высокая»), помещение ПЦ-1 ($P_{обн}$= «средняя»).

В процессе поиска наименее защищенных путей используется формулы (3) и (4). Для описанного пути значение $P_{обн}$ определяется следующими вычислениями:

$P_{обн}$ = 1 – (1 – «выше среднего») × (1 – 0) × (1 – 0) × (1 – «высокая») × (1 – «средняя»)

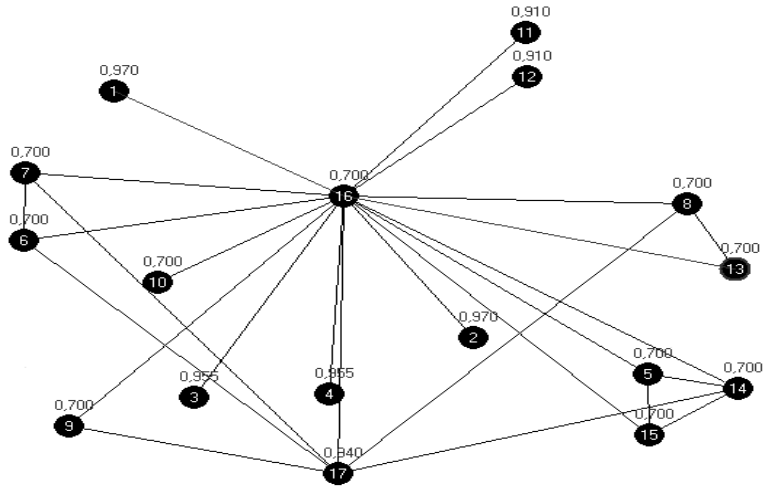


Рисунок 4 – Граф модельного объекта с указанием наименее защищенного пути из вершины №13 в вершину №1

Для расчетов используется α-уровневый принцип обобщения. Значение $P_{обн}$ получено в виде набора α-уровней, визуальное отображение которых дает возможность оценить форму функции принадлежности нечеткого числа. Большое количество α-уровней позволяет провес-

ти дефаззификацию нечеткого числа. В программе использовалось пятьдесят α-уровней. Функция принадлежности искомого нечеткого значения $P_{обн}$ в виде α-уровней и четкий аналог показаны на рисунке 5. Аналогично проводится расчет вероятности задержки – $P_{зад}$. Анализ путей до всех десяти критических элементов показал следующие четкие значения вероятностей обнаружения и задержки (таблица 7).

Определяем меру структурной защищенности критического элемента ПЦ-1 по формуле $P_{стр}=P_{обн}\times P_{зад}$. Можно перемножить полученные нечеткие числа или (если конечный результат требуется представить четким числом) их четкие аналоги: 0,970 × 0,960 = 0,9312. В итоге вероятность того, что при попытке проникнуть на ПЦ-1 нарушитель будет обнаружен и задержан, равна 0,9312.

Предположим, что критический элемент ПЦ-1 относится к категории с высокой потенциальной опасностью и средней привлекательностью для совершения террористического акта. Требуемая минимальная вероятность обнаружения и задержки для такой категории равна 0,9. Делаем вывод, что структурная защищенность критического элемента ПЦ-1 соответствует категории.

Рассмотрим элемент с такой же категорией - склад готовой продукции. Вероятность обнаружения и задержки равна 0,955 × 0,860 = 0,8213, что меньше требуемой - 0,9. Следовательно, структурная защищенность критического элемента - зоны склада готовой продукции не соответствует категории.

Рисунок 5 – Функция принадлежности нечеткого значения $P_{обн}$ зоны №1

Таблица 7 – Вероятности обнаружения и задержки наименее защищенных путей из зоны №13 до критических элементов модельного объекта

№	Критические элементы	Четкие значения вероятностей обнаружения и задержки
1	ПЦ-1	Робн= 0,970 Рзад= 0,960
2	ПЦ-2	Робн= 0,970 Рзад= 0,960
3	Склад сырья	Робн= 0,955 Рзад= 0,860
4	Склад готовой продукции	Робн= 0,955 Рзад= 0,860
5	Склад ГСМ	Робн= 0,700 Рзад= 0,900
6	Компрессорная станция	Робн= 0,700 Рзад= 0,800
7	Котельная	Робн= 0,700 Рзад= 0,800
8	Административное здание	Робн= 0,700 Рзад= 0,800
9	Материальный склад	Робн= 0,700 Рзад= 0,900
10	Ремонтно-механический цех	Робн= 0,700 Рзад= 0,800

Заключение

Представленная методика, позволяющая провести оценку уровня защищенности объекта, обладает следующими достоинствами:

1) В качестве исходных данных используется экспертная информация в нечеткой форме, что позволяет отразить нечеткость и неопределенность, присутствующую в предметной области.
2) Учитываются данные о производственно-технологическом процессе, при этом используется модифицированный стандарт DFD-диаграмм.
3) Описанный метод поиска меры структурной защищенности позволяет автоматизировать анализ путей, по составленному экспертами графу объекта.

К недостаткам методики можно отнести следующее:

Необходимо выбирать экспертов, уровень подготовки которые позволяет адекватно оценивать вероятности обнаружения и задержки, а также определять соответствующие функции принадлежности.

Таким образом, применение данной методики может повысить эффективность принятия решения при проектировании СФЗ объекта.

Список литературы

[1] Панин О.А. Как измерить эффективность? Логико-вероятностное моделирование в задачах оценки систем физической защиты / Безопасность – Достоверность – Информация. 2008. №2(77). с. 20 - 24.

[2] Радаев Н.Н. Приближенные оценки защищенности объектов от террористических действий / Безопасность – Достоверность – Информация. 2007. №3(72). с. 28 - 32.

[3] Ротштейн А. П., Штовба С. Д. Нечеткий многокритериальный анализ вариантов с применением парных сравнений // Известия РАН. Теория и системы управления. - 2001. - №3. - с. 150–154.

[4] Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях. В кн.: Вопросы анализа и процедуры принятия решений. — М.: Мир, 1976. — с. 172–215.

[5] А. С. Боровский, А. Д. Тарасов Метод обработки экспертной информации на основе нечетких гиперграфов для проектирования систем физической защиты / Информационные технологии, теоретический и прикладной научно-технический журнал, №2(186), 2012 г., с. 67-73.

[6] Томас Х. Кормен, Чарльз И. Лейзерсон, Рональд Л. Ривест, Клиффорд Штайн Алгоритмы: построение и анализ = Introduction to Algorithms. - 2-е изд. - М.: «Вильямс», 2006. – 1296 с.

[7] Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. Винница: Изд-во Винницкого гос. тех. ун-та, 2001. 198 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ С ЗАВИСИМЫМИ ВХОДНЫМИ ПЕРЕМЕННЫМИ

Н.А. Сергеева, Е.А. Чжан

Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия
ekach@list.ru
тел: +7 (965) 897-06-85

Ключевые слова: *априорная информация, моделирование, параметрическая и непараметрическая идентификация, «трубчатые» процессы, безынерционный объект*

Abstract
This clause focuses on the identification of objects with dependent stochastic inputs. This feature leads to the fact that these objects have a "tubular" structure. The results of "tubular" processes numerical simulations are presented.

Введение

При управлении сложными объектами важным этапом является задача построения моделей. Часто на практике встречаются безынерционные многомерные объекты со стохастической зависимостью между компонентами вектора входных переменных. Данная зависимость ведет к тому, что процесс протекает не во всей регламентированной области, а лишь в некоторой ее части, вследствие чего такие объекты выделены в отдельный класс – «трубчатые» [1]. Данная статья посвящена моделированию и исследования такого рода объектов.

При построении модели мы учитываем всю известную нам (априорную) информацию об объекте. В случае, когда уровень априорной информации достаточно высок (определена или хорошо угадана структура объекта, большой объем исходной выборки измерений), то используется параметрическая идентификация. Данный способ идентификации широко распространен на сегодняшний день. Однако на практике чаще всего возникает ситуация, когда структура объекта нам неизвестна, а объем выборки невелик при большом числе входных переменных. В таком случае целесообразно использовать непараметрические методы идентификации.

1 Постановка задачи

Рассмотрим стохастический многомерный объект. Общая схема такого объекта представлена на рисунке 1 [1, 2]. Приняты обозначения: A – неизвестный оператор объекта, $x(t) \in \Omega(x) \subset R^1$ – выходная переменная процесса, $u(t) = (u_1(t), u_2(t),\ldots, u_m(t)) \in \Omega(u) \subset R^m$ – векторное входное воздействие, $\xi(t)$ – векторное случайное воздействие, (t) – непрерывное время, H^u, H^x – каналы связи, соответствующие различным переменным, включающие в себя средства контроля, $h^u(t)$, $h^x(t)$ – случайные помехи измерений соответствующих переменных процесса с нулевыми математическими ожиданиями и ограниченной дисперсией. Таким образом, осуществляя контроль переменных $u(t)$, $x(t)$ через интервал времени Δt, имеем выборку «входных-выходных» переменных $\{u_i, x_i, i = 1, 2, \ldots, s\}$, где s – объем выборки.

Особенность постановки задачи идентификации в том, что между компонентами вектора входного воздействия $u(t)$ существует стохастическая зависимость, причем вид этой зависимости априорно не известен. Именно это обстоятельство делает структуру процессов, протекающих в пространстве «входных-выходных» переменных, «трубчатой».

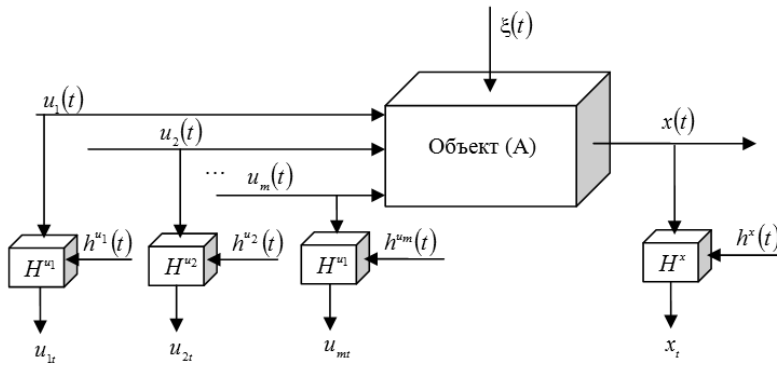


Рисунок 1 – Схема исследуемого объекта

На рисунке 1 приняты обозначения: A – неизвестный оператор объекта, $x(t) \in \Omega(x) \subset R^1$ – выходная переменная процесса, $u(t) = (u_1(t), u_2(t),\ldots, u_m(t)) \in \Omega(u) \subset R^m$ – векторное входное воздействие, $\xi(t)$ – векторное случайное воздействие, (t) – непрерывное время, H^u, H^x – каналы связи, соответствующие различным переменным, включающие в себя средства контроля, $h^u(t)$, $h^x(t)$ – случайные помехи измерений соответствующих переменных процесса с нулевыми математическими ожиданиями и ограниченной дисперсией. Таким образом, осуществляя контроль переменных $u(t)$, $x(t)$ через интервал времени Δt, имеем выборку «входных-выходных» переменных $\{u_i, x_i, i = 1, 2, \ldots, s\}$, где s – объем выборки.

Особенность постановки задачи идентификации в том, что между компонентами вектора входного воздействия $u(t)$ существует стохастическая зависимость, причем вид этой зависимости априорно не известен. Именно это обстоятельство делает структуру процессов, протекающих в пространстве «входных-выходных» переменных, «трубчатой».

2 Стохастические объекты с зависимыми входными переменными

При изучении технических и производственных систем, процессов и явлений на практике достаточно часто встречаются процессы, имеющие стохастическую зависимость компонент вектора входных переменных. Будем говорить, что объекты, обладающие подобной особенностью, имеют «трубчатую» структуру [1].

Рассмотрим в качестве примера процесса с «трубчатой» структурой объект, представленный на рисунке 2. Данный объект имеет две входные переменные u_1, u_2 и одну выходную x.

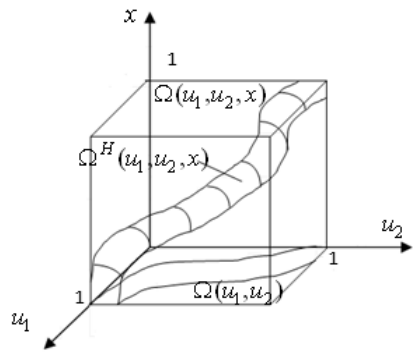


Рисунок 2 – Объект с «трубчатой структурой»

Как видно из рисунка 2, область протекания процесса $\Omega(u, x) \in R^3$ представляет собой, без нарушения общности, единичный гиперкуб, где $u \in R^2$, $x \in R^1$. Однако если исследуемый процесс имеет «трубчатую» структуру, то область его протекания ограничивается не всем объемом гиперкуба $\Omega(u, x)$, а его подобластью $\Omega^H(u, x) \in \Omega(u, x)$, которая нам никогда не известна. Поскольку подобласть $\Omega^H(u, x)$ никогда не известна, то и вид самой «трубчатой» структуры нам не известен. При этом заметим, что объем гиперкуба, как это видно из вышеприведенного рисунка, может значительно превышать объем «трубки».

Рассмотрим моделирование процессов, имеющих подобную структуру. Обычно в задаче идентификации безынерционных объектов предполагается наличие некоторой параметризованной модели, представляющей собою поверхность в пространстве «входных-выходных» переменных:

$$(1) \quad x_s(u) = \hat{f}(u, \alpha_s),$$

где α_s – вектор параметров.

В том случае, когда компоненты вектора входных переменных статистически зависимы, т.е. мы имеем дело с «трубчатой» структурой объекта, необходимо ввести индикатор $I_s(u)$. Модель типа (1) при этом должна быть скорректирована следующим образом [1]:

$$(2) \quad x_s(u) = \hat{f}(u, \alpha_s) I_s(u),$$

где в качестве оценки индикатора можно принять следующее приближение [1]:

$$(3) \quad I_s(u) = \operatorname{sgn}(sc_s)^{-1} \sum_{i=1}^{s} \prod_{j=1}^{m} \Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right),$$

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]:

$$c_s > 0; \qquad \lim_{s\to\infty} c_s = 0; \qquad \lim_{s\to\infty} s c_s^m = \infty;$$

$$\Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) \geq 0; \qquad c_s^{-1} \int_{\Omega(u)} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) du^j < \infty; \qquad \lim_{s\to\infty} c_s^{-1} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) = \delta(u^j - u_i^j).$$

Логика построения такого индикатора состоит в том, что при произвольно заданном значении текущей переменной $u = u'$ индикатор $I_s(u)$ примет значение единицы, если u' принадлежит «трубчатой» структуре, определяемой имеющейся выборкой $\{u_i, x_i, i = 1, 2, \ldots, s\}$, если же u' приняло значение за пределами «трубки», то индикатор равен нулю. Заметим, что если процесс описывается поверхностью в пространстве $\Omega(u, x)$, то модели (1) и (2) совпадают. Если же процесс имеет трубчатую структуру в этом пространстве, то необходимо использовать модель (2).

2 Идентификация в «узком» и «широком» смыслах

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 A^α:

$$(4) \quad \tilde{x}_\alpha(t) = A^\alpha(u(t), \alpha),$$

где A^α – параметрическая структура модели, а α – вектор параметров. На втором этапе осуществляется оценка параметров α на основе имеющейся выборки $\{u_i, x_i, i = 1, 2, \ldots, s\}$, 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). В настоящее время теория параметрической идентификации является наиболее развитой. [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 $\{u_i, x_i, i = 1, 2, \ldots, s\}$ в форме:

$$x_s(t) = A_s(u(t), \vec{x}_s, \vec{u}_s), \quad (5)$$

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 [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.

3 Численное моделирование объектов с зависимыми входными переменными

Рассмотрим результаты численного эксперимента. Пусть исследуемый объект описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} x = 0.7u_1 + 0.3u_2 + \xi, \\ u_2 = u_1 + \psi, \end{cases} \quad (6)$$

где ξ и ψ – случайные числа, распределенные по нормальному закону на интервале [-0.05;0.05], $u_1, u_2 \in [0;3]$. В данном случае уравнение объекта задано с целью получения выборок «входных–выходных» переменных для решения задачи идентификации. При построении модели на основе полученных выборок, структура зависимости выходной переменной x от входных переменных u принята с точностью до параметров. При оценивании параметров используется метод наименьших квадратов (МНК).

Итак, получена выборка статистически независимых наблюдений $\{u_{1i}, u_{2i}, x_i, i = 1, 2, \ldots, s\}$, где x – измеряемая выходная переменная, $u = (u_1, u_2)$ – векторное входное воздействие, s – объем выборки.

Построим параметрическую модель исследуемого объекта. Результаты моделирования показаны на рисунке 3 ($s = 100$), где красными точками обозначен исследуемый объект, цветная плоскость – полученная параметрическая модель, куб – это регламентированная область протекания процесса. Параметрическая модель (1) при этом представляет собой плоскость. Как известно, прямую, в данном случае «трубку», можно аппроксимировать бесконечным числом плоскостей. Пусть имеется шесть выборок статистически независимых измерений $\{u_{1i}, u_{2i}, x_i, i = 1, 2, \ldots, s\}$ объемом $s = 100$. Для каждого случая построим 5 моделей с помощью МНК. Результаты моделирования представлены на рисунке 4.

В результате моделирования было получено 5 моделей с различными оценками параметров, так как в каждом случае выборки были различны. Можно сделать вывод о том, что полученные модели не являются адекватными. Кроме того, для построения параметрической модели необходим большой объем выборки.

Теперь для рассматриваемого объекта (6) будем использовать модель (2), содержащую индикатор. Вид индикатора описан формулой (3). Результаты численного моделирования объекта (6) для объема выборки $s = 100$ представлены на рисунке 5.

На рисунке 5 серыми точками показана выборка, определяющая «трубчатый» процесс. Красными точками – точки выборки, случайно сгенерированные в заданной области $u_1, u_2 \in [0;3]$. Часть точек попали в истинную область протекания процесса («трубку»), значение оценки индикатора в таких точках $I_s(u) = 1$, значение модели в таких точках $x_s(u)$ восста-

навливается. В точках, которые не попали в область «трубки», значение оценки индикатора равно нулю $I_s(u) = 0$, соответственно значение выхода модели (2) в таких точках $x_s(u) = 0$.

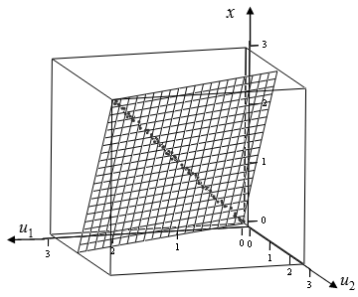


Рисунок 3 – «Трубчатый» процесса и его параметрическая модель

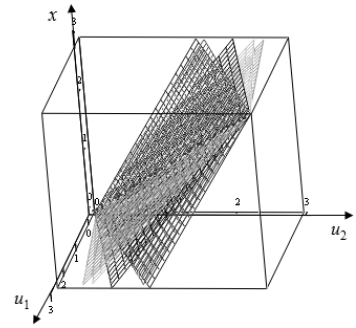


Рисунок 4 – Множество параметрических моделей «трубчатого» процесса

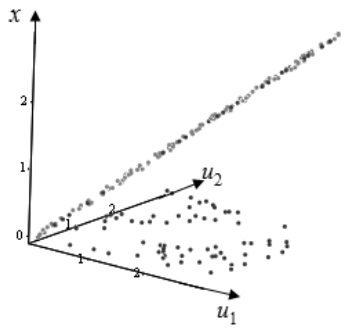


Рисунок 5 – Параметрическая модель «трубчатого» процесса с использованием индикатора

Следует отметить, что значение $x_s(u) = 0$ может принадлежать истинной области протекания процесса («трубке»), поэтому примем, что индикатор принимает булевы значения – если точка не принадлежит «трубке» $I_s(u) = 0$, то значение выхода модели в ней не восстанавливается, а если принадлежит $I_s(u) = 1$, то значение – восстанавливается.

Изменим систему уравнений, которой описывается исследуемый объект, на следующую:

$$(7) \quad \begin{cases} x = 0.4u_1^2 + 0.6u_2^2 + \xi, \\ u_2 = u_1 + \psi. \end{cases}$$

Результаты аналогичных экспериментов представлены на рисунках 6 и 7.

Параметрическая модель и модель с использованием индикатора представлены на нижеследующих рисунках, объем выборки $s = 1000$. На рис. 6 объект показан черными точками, а его параметрическая модель – поверхностью. На рисунке 7 объект показан серыми точками, а точки, в которых $I_s(u) = 1$, т.е. которые принадлежат «трубке», – красными. В данном случае в «трубку» попали 45 точек.

В данном случае при генерации входной выборки структура зависимости между входными переменными априорно не была известна, поэтому мы получили точки, которые не принадлежат истинной области протекания процесса, т.е. трубки. При моделировании с использованием общепринятой параметрической модели (1), результат получается неудовлетворительный – модель представляет собой поверхность: плоскость (рисунок 3) или параболоид (рисунок 6). Однако если модель (2) модифицировать с помощью индикатора непараметрической структуры, то в точках, в которых $I_s(u) = 0$, значение модели не восстанавливается.

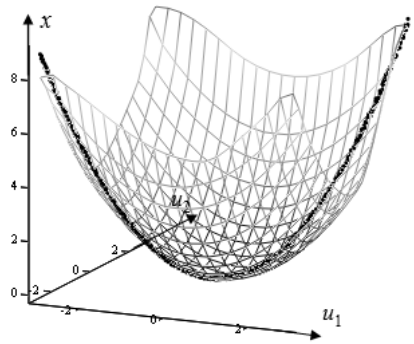


Рисунок 6 – Параметрическая модель «трубчатого» объекта

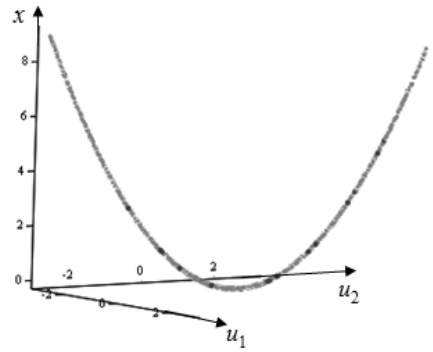
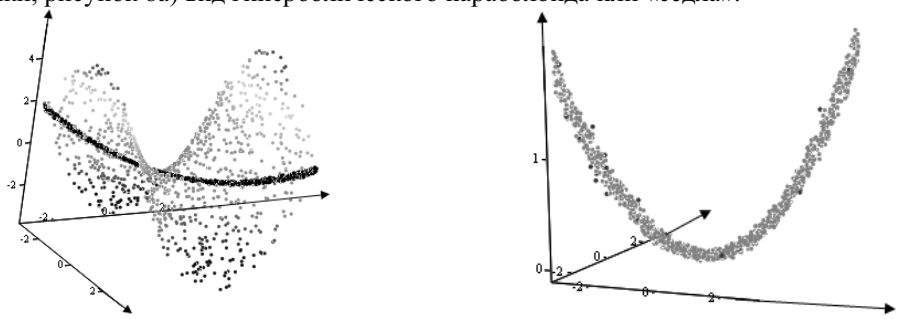


Рисунок 7 – Моделирование «трубчатого» объекта с использованием индикаторной функции

Рассмотрим следующий объект:

$$(8)\quad \begin{cases} x = -0.4u_1^2 + 0.6u_2^2 + \xi, \\ u_2 = u_1 + \psi. \end{cases}$$

Проведем аналогичные эксперименты. В данном случае объект (8) также имеет вид параболы (черные точки, рисунок 8а, серые точки, рисунок 8б), но параметрическая модель имеет (цветные точки, рисунок 8а) вид гиперболического параболоида или «седла».



а) б)

Рисунок 1 – Моделирование «трубчатого» объекта

В данном случае значении модели восстановились только в тех точках, которые попали в трубку, в остальных же точках выборки значение модели не вычислялось.

Заключение

Рассмотрен класс объектов, имеющих «трубчатую» структуру. При моделировании объектов такого рода необходимо учитывать ряд его особенностей и использовать модели, содержащие индикаторную функцию. Предложенные модели процессов, имеющих «трубчатую» структуру, относятся к категории новых по отношению к своим предшественникам, рассматриваемым в теории идентификации. Здесь важно иметь в виду, что область протекания такого процесса никогда не известна и при моделировании должна подлежать определению. Модели «трубчатых» процессов отличаются от общепринятых моделей безынерционных систем наличием индикаторной функции, которая, по существу, определяет область протекания «трубчатого» процесса.

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.

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ

О.В. Павлов

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: *управление проектами, динамическое снижение удельных затрат, динамические задачи планирования и стимулирования*

Abstract

The problem of management is considered by projects at dynamic change of organizational system characteristics. The general problem of management is divided by projects into dynamic problems of planning and stimulation. Various statements of dynamic problems of planning are formulated. The problem is considered as an optimal discreet system management problem. The numerical solution is found using the Bellman's optimality principle of dynamic programming. The influence of learning curve parameters on optimal production target volume research is executed. The problem of dynamic stimulation in projects is formulated. The algorithm of the solution of a problem of dynamic stimulation is offered.

Введение

В работе рассматривается задача управления проектами при динамическом изменении характеристик организационной системы. Под проектом понимается планируемое изменение организационной системы с целью получения требуемых результатов, ограниченное временем и ресурсами [1]. В ходе реализации проекта динамически изменяются параметры организационной системы: цена продукции, удельные затраты (трудоемкость, себестоимость, материалоемкость). Таким образом, проблема управления проектом является задачей управления динамической организационной системой.

Рассматривается динамическая детерминированная двухуровневая активная система, состоящая из центра и агента, под которым понимается коллектив исполнителей. Центр, обладающий правом первого хода, сообщает агенту плановую траекторию и функцию стимулирования. Агент, при известном управлении центра выбирает фактический объём работ в каждом временном периоде (фактическую траекторию). Цель центра заключается в том, чтобы зная реакцию агента на функцию стимулирования, выбрать такое управление, которое реализует плановую траекторию.

Общая динамическая задача управления проектами декомпозируется на динамические задачи планирования и стимулирования. Задача планирования заключается в выборе центром плановой траектории в соответствии со своей целевой функцией. Задача стимулирования состоит в выборе центром материального вознаграждения агента для каждого периода проекта, с целью реализации выбранной плановой траектории.

1 Динамические задачи планирования в проектах

Проект является динамическим процессом перевода организационной системы из существующего состояния (начального) в желаемое (конечное) [1]. Состояние организационной системы на каждом шаге t характеризуется суммарным объёмом производства x_t. Под суммар-

ным объёмом производства понимается количество продукции, изготовленной с начала осуществления проекта.

Уравнение планируемой траектории проекта имеет следующий вид:

(1) $x_t = x_{t-1} + u_t, \quad t = 1, \mathrm{n}$

где t – номер шага (временного периода) проекта, x_t –планируемый суммарный объём производства на шаге t, u_t – планируемый объём производства на шаге t, n – число шагов проекта.

Задан начальный суммарный объём производства:

(2) $x_0 = X_0$.

На последнем шаге суммарный объём произведенной продукции должен быть равен заданному:

(3) $x_n = R$.

На каждом шаге проекта может быть произведено продукции не больше, чем позволяет максимальная мощность оборудования Q^{max}:

(4) $0 \le u_t \le Q^{\mathbf{max}}, \quad t = 1, n$.

Затраты на шаге t определяются как произведение удельных затрат продукции c_t и объёма производства u_t:

(5) $C_t = c_t u_t$.

Динамика удельных затрат (трудоёмкости, материалоемкости, себестоимости) описывается степенной зависимостью от суммарного объёма произведенной продукции [2, 3]:

(6) $c_t = a x_t^{-b}$,

где a – затраты на производство первого изделия, b– коэффициент крутизны кривой освоения.

Кривая, построенная на основе степенной зависимости (6) называется кривой освоения.

Подставляя выражение (6) в формулу (5), получим затраты предприятия на шаге t:

$C_t = a x_t^{-b} u_t$.

Динамическое снижение удельных затрат вследствие увеличения суммарного объёма производства (6) приводит к постановке динамических задач планирования.

Сформулируем динамические задачи планирования в управлении проектами.

Задача о минимизации затрат проекта. В качестве критерия принятия управленческого решения центром принимается минимизация суммарных затрат:

(7) $J = \sum_{t=1}^{n} a x_t^{-b} u_t \to \mathbf{min}$.

Задача заключается в поиске оптимального управления $u_t^{opt}, t = 1, n$ удовлетворяющего ограничению (4), которое осуществляет процесс реализации проекта (1) из начального состояния (2) в конечное состояние (3) и минимизирует суммарные затраты проекта (7).

Задача о максимизации прибыли проекта. В случае если цена продукции зависит от объёма производства $p_t = f_t(x_t)$, возникает задача о максимизации суммарной прибыли проекта.

В качестве целевой функции центра принимается максимизация суммарной прибыли проекта:

(8) $J = \sum_{t=1}^{n} \left\{ p_t(x_t) x_t - a x_t^{-b} u_t \right\} \to \mathbf{max}$.

Задача заключается в поиске оптимального управления $u_t^{opt}, t = \overline{1,n}$ удовлетворяющего ограничению (4), которое осуществляет процесс реализации проекта (1) из начального состояния (2) в конечное состояние (3) и максимизирует суммарную прибыль проекта (8).

Задача о максимизации суммарного объёма производства при реализации проекта. В качестве целевой функции центра рассматривается максимизация суммарного объёма производства за время осуществления проекта:

(9) $J = x_n \to \mathbf{max}$.

Суммарные затраты организации, реализующей проект ограничены имеющимся финансовым ресурсом *C*.

(10) $\sum_{t=1}^{n} a x_t^{-b} u_t \le C$.

Задача заключается в поиске оптимального управления $u_t^{opt}, t = \overline{1,n}$ удовлетворяющего ограничению (4), которое осуществляет процесс реализации проекта (1) из начального состояния (2) с выполнением ограничения на финансовый ресурс (10) и максимизирует суммарный объём производства на конечном шаге (9).

Задача о быстродействии при реализации проекта. Критерием принятия решения центром является минимизация количества периодов реализации проекта:

(11) $J = n \to \mathbf{min}$.

Задача заключается в поиске оптимального управления $u_t^{opt}, t = \overline{1,n}$ в соответствии с ограничением (4), которое осуществляет процесс реализации проекта (1) из начального состояния (2) в конечное состояние (3) с выполнением ограничения на финансовый ресурс (10) и минимизирует количество шагов проекта (11).

Сформулированные задачи являются задачами оптимального управления. Для решения задач применяется метод динамического программирования Беллмана [4].

В качестве примера в статье приведено решение задачи о минимизации затрат проекта. По статистическим данным предприятия ОАО «Салют» построена эконометрическая модель трудоёмкости нового изделия «Корпус» $\tau_t = 16{,}08 x_t^{-0{,}13}$. С помощью динамического программирования Беллмана найдено оптимальное распределение объёмов производства изделия «Корпус» по временным периодам. С использованием данного метода поставленная задача решена для следующих данных: суммарный объём производства изделия «Корпус» за год $R = 240$ комплектов, количество временных периодов $n = 12$, $x_0 = 1$, максимальная производственная мощность $Q^{\mathbf{max}} = 40$ комплектов, объём производства в каждый период должен быть кратен 10.

Оптимальная траектория суммарного объёма производства изделия «Корпус» приведена на рисунке 1. Минимальные суммарные трудовые затраты для оптимальной траектории составили 2261,63 н/часов. Суммарные трудовые затраты при равномерном производстве равны 2305,17 н/часов.

Из анализа рисунка 1 видно, что оптимальной стратегией являются небольшие объёмы производства в начальные периоды, а затем по мере уменьшения трудоёмкости изделия увеличение объёмов производства в последних временных периодах.

На рисунке 2 приводится зависимость оптимальной траектории суммарного объёма производства от коэффициента крутизны кривой освоения, который характеризует скорость освоения производства. Из анализа рисунка 2 можно сделать следующий вывод: чем больше скорость освоения производства, тем более выпуклой является траектория суммарного объёма производства.

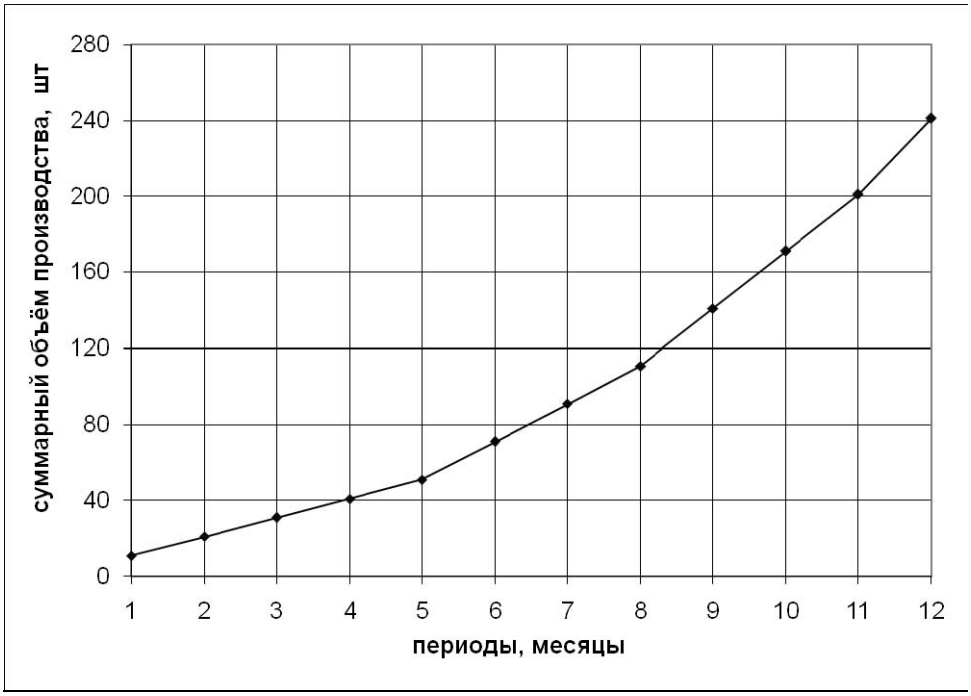


Рисунок 1 - Оптимальная траектория суммарного объёма производства изделия «Корпус»

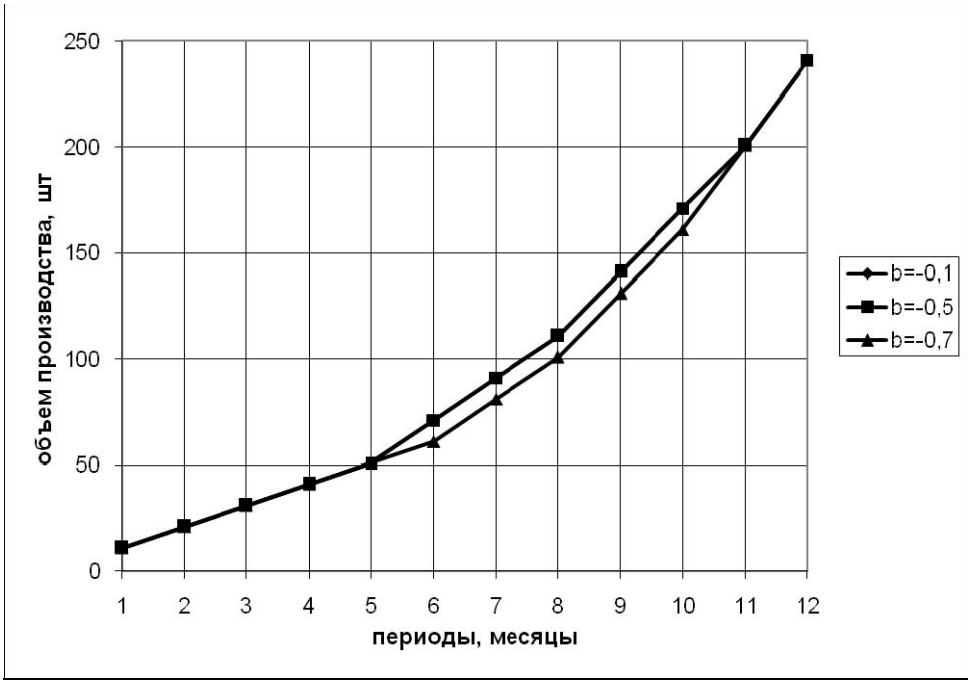


Рисунок 2 – Зависимость оптимальной траектория суммарного объёма производства от коэффициента крутизны кривой освоения

2 Динамическая задача стимулирования в проектах

Руководство проекта (центр), обладающее правом первого хода, сообщает коллективу исполнителей (агенту) плановую траекторию x_t, $t = 1,n$ и функцию стимулирования $\sigma_t(y_t)$, $t = 1,n$.

Цель центра заключается в том, чтобы выбрать такое распределение фонда заработной платы F по временным периодам, которое реализует плановую траекторию x_t, $t = 1,n$:

$$(12)\quad \sum_{t=1}^{n}\sigma_t(y_t) \le F\ .$$

В качестве целевой функции центра выбирается минимизация суммы квадратов отклонений фактической траектории y_t, $t = 1,n$ от плановой x_t, $t = 1,n$:

$$(13)\quad J_0 = \sum_{t=1}^{n}(x_t - y_t)^2 \to \mathbf{min}\ .$$

Агент, при известном управлении центра $\sigma_t(y_t)$, $t = 1,n$ выбирает фактический объём работ y_t, $t = 1,n$ (действие).

Уравнение фактической траектории проекта имеет следующий вид:

$$(14)\quad y_t = y_{t-1} + v_t,\ t = 1,n,$$

где y_t – фактический суммарный объём производства в конце шага t, v_t – фактический объём производства агента в конце шага t, Задан начальный суммарный объём производства:

$$(15)\quad y_0 = X_0\ .$$

В конце последнего шага фактический суммарный объём произведенной продукции должен быть равен заданному:

$$(16)\quad y_n = R\ .$$

На каждом шаге проекта может быть произведено продукции не больше, чем позволяет максимальная мощность оборудования $Q^{\mathbf{max}}$:

$$(17)\quad 0 \le v_t \le Q^{\mathbf{max}},\ \ t = 1,n\ .$$

В качестве целевой функции агента выбирается максимизация дохода агента:

$$(18)\quad J = \sum_{t=1}^{n}\left\{\sigma_t(y_t,\alpha_t) - a y_t^{-b} v_t\right\} \to \mathbf{max}$$

Задача для агента заключается в поиске оптимального управления v_t^{opt}, $t = 1,n$ в соответствии с ограничением (17), которое осуществляет фактический процесс реализации проекта (14) из начального состояния (15) в конечное состояние (16) и максимизирует суммарный доход агента (18).

Сформулирован алгоритм решения динамической задачи стимулирования:

1) Центр выбирает функцию стимулирования для всего горизонта планирования, с учетом ограничения (12).
2) Агент при известном материальном вознаграждении $\sigma_t(y_t)$, $t = 1,n$ решает задачу динамического планирования (14)-(18) и определяет фактическую траекторию y_t, $t = 1,n$.
3) Центр проверяет 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 уточнение функции стимулирования и переход к пункту 2.

Заключение

В работе рассматривается задача управления проектами при динамическом изменении характеристик организационной системы: цены продукции, удельных затрат. Общая динамическая задача управления проектами декомпозируется на динамические задачи планирования и стимулирования.

Сформулированы различные постановки динамических задач планирования. Представлены математические модели принятия оптимального решения для центра. Задачи планирования формализованы как задачи оптимального управления дискретной системой. Получены численные решения с помощью метода динамического программирования Беллмана. Проведено исследование влияния параметров кривой освоения на оптимальные объемы производственных заданий. Сформулирована задача динамического стимулирования в проектах. Предложен алгоритм решения задачи динамического стимулирования.

Список литературы

[1] Математические основы управления проектами / Под ред. В.Н. Буркова. - М.: Высш. шк., 2005. – 423 с.

[2] Организация производства и управление предприятием / Под ред. О.Г. Туровца. – М.: Инфра-М, 2004.

[3] ***Новицкий, Н.И.*** Организация производства на предприятиях / Н.И. Новицкий. – М.: Финансы и статистика, 2001.

[4] ***Беллман, Р.*** Динамическое программирование / Р. Беллман - М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 400 с.

СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ДОХОДОВ И РАСХОДОВ НАСЕЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ИХ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ

Б.Г. Ильясов, И.В. Дегтярева, Е.А. Макарова, Р.Р. Валитов

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия
ea-makarova@mail.ru
тел: +7 (347) 273-78-35, факс: +7 (347) 273-78-35

Ключевые слова: *макроэкономическая система, доходы и расходы домохозяйств, дифференциация доходов, социальные трансферты, динамическая модель*

Abstract

Cognitive model of macroeconomic system with population incomes and expenditures differentiation are suggested. The algorithms of social transfers and taxation at dynamic model of macroeconomic system are considered. The experimental results of described algorithms influence on the social-economic indicators of macroeconomic model are produced.

Введение

Современное состояние российской экономики характеризуется наличием существенных проблем, выраженных в нарушении воспроизводственных пропорций экономики в виде низкой доли потребления и высокой доли экспорта в структуре валового внутреннего продукта (ВВП), а также недостаточно высокой доли заработной платы при наблюдающемся росте доходов населения, низкого значения ВВП на душу населения, что обусловлено неопределенностью внешних и внутренних социально-экономических условий [1]. Одним из основных путей решения имеющихся проблем, предлагаемых правительством Российской Федерации, является обеспечение роста потребительского спроса, являющегося способом стимулирования экономики в ситуациях рецессии с учетом неопределенных условий внешнеэкономической конъюнктуры. Согласно предложенным прогнозным сценариям рост потребительского спроса необходимо обеспечить, в первую очередь, за счет достижения устойчивых темпов роста потребления домашних хозяйств – на уровне 5,7 % в год, которые, в свою очередь, планируется получить за счет ускорения роста реальных располагаемых доходов населения, поддержанного, в частности, увеличением заработной платы в бюджетном секторе. Реализация потребительски-ориентированного сценария роста экономики осложнена рядом проблем, связанных с трудностями формирования тенденций роста потребительского спроса и обусловленных существенной степенью дифференциации доходов населения, значительным уровнем бедности, низким уровнем жизни.

Перечисленные проблемы российской экономической действительности обуславливают актуальность исследования процесса формирования доходов и расходов домохозяйств с учетом их дифференциации по уровню дохода на макроэкономическом уровне в тесной взаимосвязи с воспроизводственным процессом, формирующим макроэкономический кругооборот финансовых и материальных потоков, а также в аспекте поддержания желаемых воспроизводственных пропорций экономики [2-4].

Несмотря на значительное количество работ, посвященных исследованию динамики функционирования домохозяйств во взаимосвязи с воспроизводственным процессом макроэкономической системы, следует признать, что некоторые особенности управления доходами и расходами населения не нашли достаточно полного отражения в разрабатываемых моделях и

программных комплексах в силу сложности и многогранности решаемых проблем. В частности, проблемы интеллектуального анализа и поддержки управления процессами формирования доходов и расходов населения, которые рассматриваются в единстве с воспроизводственным процессом макроэкономической системы и во взаимодействии с другими управляющими контурами макроэкономического кругооборота потоков, функционирующими с учетом влияния динамики запасов ресурсов секторов экономики, неравновесности рыночных условий и неравномерности распределения доходов населения, остаются малоизученными.

Целью исследования является разработка моделей и алгоритмов интеллектуальной системы поддержки принятия решений и имитационного моделирования, позволяющих повысить эффективность управления процессом формирования доходов и расходов сектора домохозяйств многосекторной макроэкономической системы (ММЭС) в неопределенных рыночных условиях [5-8]. В статье рассматриваются вопросы разработки когнитивной и динамических моделей процесса формирования доходов и расходов домохозяйств, протекающего в ММЭС в неравновесных рыночных условиях с учетом запасов секторов экономики и дифференциации доходов населения по децильным группам.

1 Когнитивная модель формирования доходов и расходов домохозяйств в рамках воспроизводственного процесса ММЭС

Когнитивная модель формирования доходов и расходов домохозяйств в рамках воспроизводственного процесса ММЭС представлена на рисунке 1. Множество концептов – макроэкономических агентов (МЭА) включает: реальный сектор экономики, десять децильных групп домохозяйств, различающихся по доходам и образующих в целом сектор домашних хозяйств (население); сектор финансовых учреждений (банки); сектор государственных учреждений (государство), а также три макроэкономических рынка благ, труда и денег. Взаимосвязи между МЭА представлены финансовыми потоками доходов и расходов, а также информационными связями, предназначенными для регулирования поведения агентов. Показано, что декомпозиция сектора домохозяйств на децильные группы, различающиеся по величине дохода, позволяет исследовать закономерности влияния роста доходов населения с учетом изменения уровня их дифференциации на динамику роста потребительского спроса в целом по экономике и последующего увеличения темпа выпуска ВВП.

Выделены три группы исследуемых контуров: контуры «производство–потребление» как основные контуры; контуры с регулирующими механизмами рынка труда, а также управляющие контуры «налоги–социальные трансферты», «сбережения–инвестиции» с механизмов государственного регулирования. Определена роль управляющего контура «налоги–социальные трансферты», которая состоит в предварительном создании запасов государственного сектора в периоды экономического роста и расходовании их в периоды рецессии на поддержание требуемых доходов населения, что служит целям формирования потребительски-ориентированного сценария экономического роста. Определена роль управляющего контура «сбережения-инвестиции», который служит целям последующего перехода к инвестиционно-ориентированному сценарию роста.

Выявлены два типа преобразований темпов ресурсных потоков для сектора домохозяйств как МЭА (рисунок 2). Преобразование типа «расходы–доходы» присуще потоковым связям между двумя разными агентами, корректировка которых выполняется с помощью правил и механизмов рыночного или государственного регулирования *R*. Преобразование типа «доходы–расходы» присуще информационным связям в рамках одного агента, корректировка которых выполняется на уровне отдельного агента при формировании им правил поведения *f*.

Предложена триада системных факторов, важных для исследования неравновесных процессов функционирования домохозяйств как МЭА и характеризующих динамику взаимосвязей между темпами доходов, темпами расходов и объемами запасов МЭА. Анализ триады по-

зволил расширить когнитивную модель функционирования домохозяйств, во-первых, за счет внесения специальных элементов в виде правил поведения f, корректирующих информационные связи, требуемые для принятия решений на уровне отдельной группы домохозяйств; и, во-вторых, за счет внесения специальных элементов в виде правил принятия решения R, корректирующих потоковые связи на уровне рыночных или государственных механизмов регулирования.

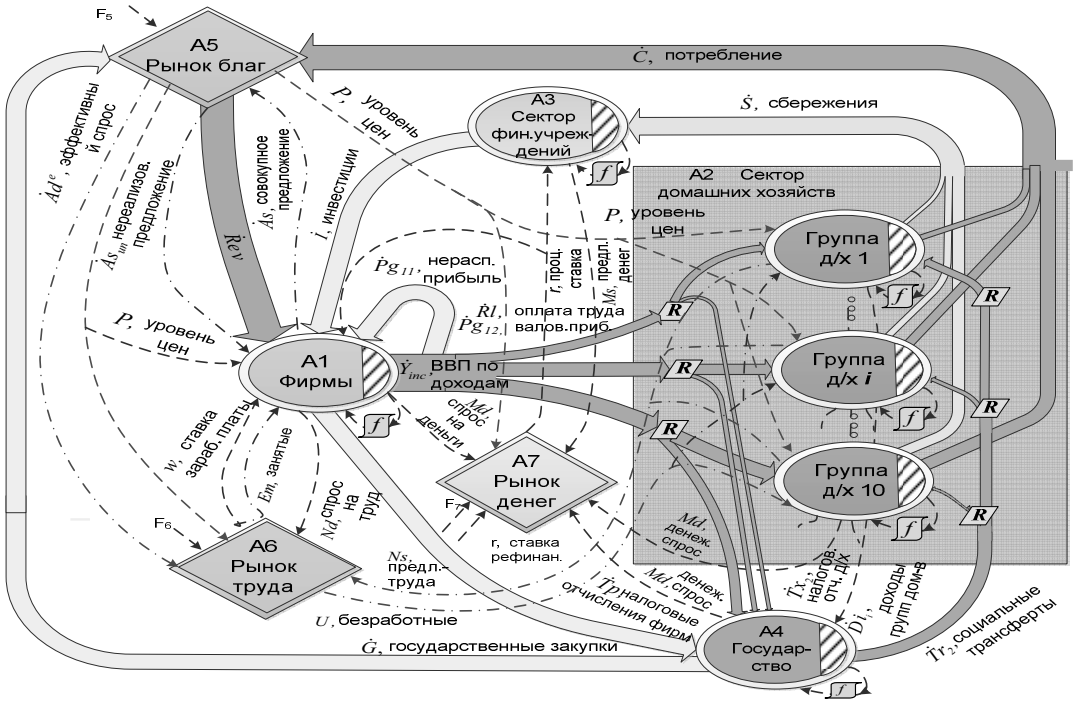
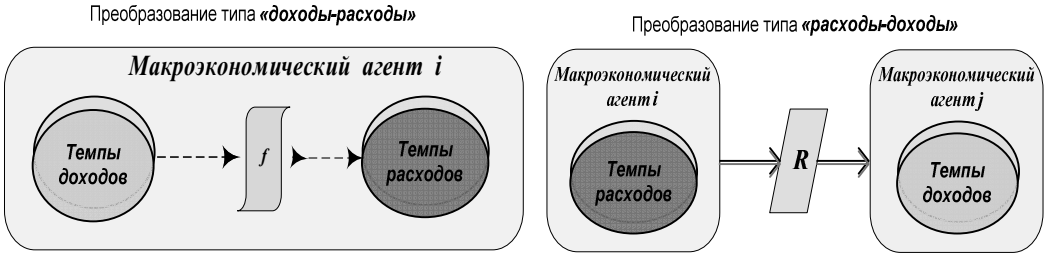


Рисунок 1 – Когнитивная модель формирования доходов и расходов домохозяйств в рамках воспроизводственного процесса ММЭС



f – правила поведения (процессов планирования и принятия решений) i-го макроэкономического агента

R – правила процесса распределения с помощью рыночных и государственных механизмов регулирования

Рисунок 2 – Преобразования темпов финансовых потоков типа «расходы–доходы» и типа «доходы–расходы» для МЭА

Определены балансовые и предельные соотношения, контроль за нарушениями которых необходим для анализа динамики ММЭС, а также для предварительной кластеризации неравновесных макроэкономических ситуаций и формирования правил принятия решений. Выявлена сложность взаимодействия перечисленных контуров, при котором рыночные механизмы

регулирования не способны противодействовать неэффективному перераспределению доходов и, следовательно, запасов между секторами экономики и децильными группами населения, что препятствует целям экономического роста, и, как следствие, будущему наращиванию запасов секторов и слоев населения, что приводит к необходимости применения механизмов государственного регулирования экономики в области политики доходов.

Особенности применения динамического подхода к исследованию процессов формирования доходов и расходов домохозяйств в ММЭС состоят: во-первых, в исследовании динамически неравновесных режимов функционирования сектора домохозяйств при условии описания динамически равновесного режима с указанием структурных пропорций расходов и дифференцированных доходов населения, соотнесенных с потребительскими бюджетами; и, во-вторых, в исследовании динамики взаимодействия темпов финансовых потоков доходов и расходов сектора домохозяйств, опосредованных влиянием объемов накопленных ими запасов с учетом механизмов рыночного и государственного регулирования доходов населения и логики макроэкономического кругооборота финансовых потоков во всей ММЭС в целом.

Разработана функциональная схема динамической модели процесса формирования доходов и расходов домохозяйств ММЭС, которая содержит четыре динамические модели секторов и три динамические модели рынков. Функциональная схема модели A2 сектора домохозяйств включает модель A21 формирования располагаемых доходов домохозяйств, десять моделей A22i ($i = \overline{1, 10}$) формирования расходов децильных групп домохозяйств и модель A23 формирования обобщенных показателей, которая осуществляет расчет суммарного потребительского спроса $\dot{C}$ и сбережения $\dot{S}$ по всем децильным группам, что необходимо для замыкания макроэкономического кругооборота.

2 Динамические модели формирования располагаемых доходов домохозяйств

Динамическая модель процесса формирования располагаемых доходов домохозяйств отражает перераспределительные процессы, характеризующие процесс формирования доходов сектора домохозяйств ММЭС.

Процесс формирования располагаемых доходов включает в себя следующие последовательные этапы: формирование совокупных доходов на основе получения оплаты труда и части валовой прибыли, выплаченной домохозяйствам; формирование налогов с заработной платы и доходов от собственности; формирование социальных трансфертов и агрегирование доходов от труда и собственности с социальными трансфертами. Перечисленные этапы сопровождаются преобразованиями типа «расходы – доходы», представляют собой только реализацию механизма влияния множества R правил принятия решений в области политики доходов.

Совокупные доходы домохозяйств формируются в результате формирования в реальном секторе темпов потоков оплаты труда $\dot{R}l_{12}$ и части валовой прибыли $\dot{P}g_{12}$, а также в результате формирования оплаты труда в секторе государственных учреждений $\dot{R}l_{42}$. Темп формирования суммарной оплаты труда от реального сектора и от государства, полученной сектором домохозяйств, определяется по формуле: $\dot{R}l_2 = \dot{R}l_{12} + \dot{R}l_{42}$. При этом суммарная часть валовой прибыли, полученная домохозяйствами, обозначается $\dot{P}g_2$: $\dot{P}g_2 = \dot{P}g_{12}$. Сформированные потоки $\dot{P}g_2$ и $\dot{R}l_2$ распределяются по децильным группам домохозяйств в соответствии с выражениями:

(1) $\dot{P}g_{2i} = k_i^{Pg} \times \dot{P}g_2, \sum_{i=1}^{10} k_i^{Pg} = 1$,

(2) $\dot{R}l_{2i} = k_i^{Rl} \times \dot{R}l_2, \sum_{i=1}^{10} k_i^{Rl} = 1$.

Следующим этапом в формировании располагаемых доходов домохозяйств является отчисление налогов с совокупных доходов. Процесс передачи налоговых отчислений осуществляется для потоков оплаты труда и доходов от собственности, декомпозированных по децильным группам, что позволяет формировать функциональную зависимость ставки налоговых отчислений от уровня дохода каждой дециальной группы (рисунок 3).

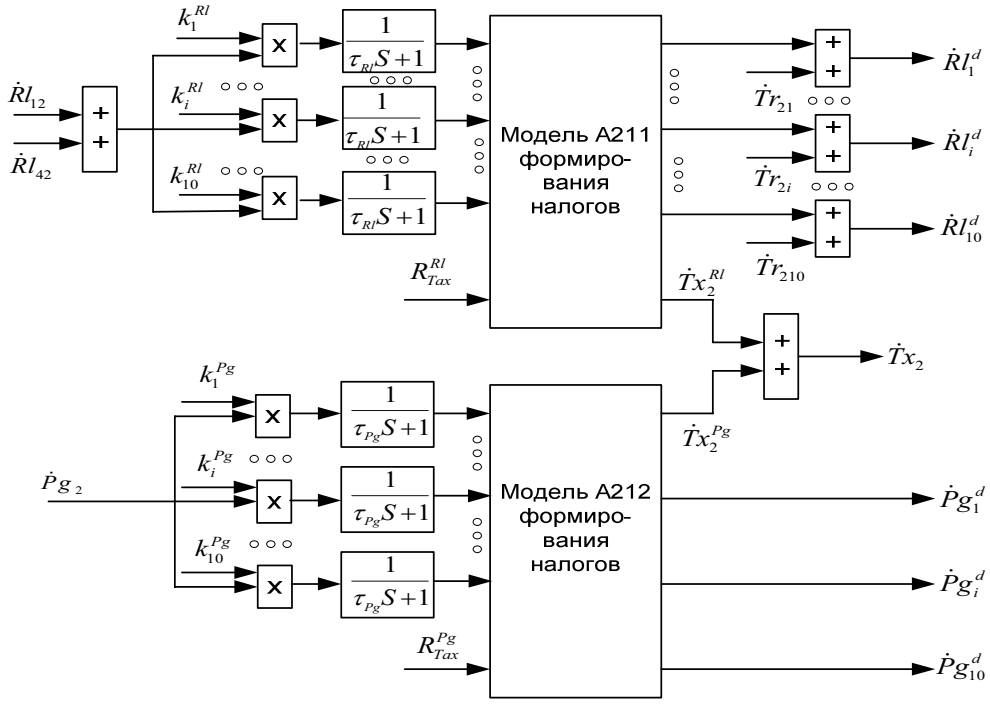


Рисунок 3 – Функциональная схема динамической модели формирования располагаемых доходов домохозяйств

Расчет налоговых отчислений по каждой группе домохозяйств осуществляется в соответствии с выражениями:

(3) $\dot{T}x_{2i}^{Pg} = f_{Tx}(\dot{P}g_{2i}, R_{Tax}^{Pg}) \times \dot{P}g_{2i}, i = \overline{1,10}$,

(4) $\dot{T}x_{2i}^{Rl} = f_{Tx}(\dot{R}l_{2i}, R_{Tax}^{Rl}) \times \dot{R}l_{2i}, i = \overline{1,10}$.

где $f_{Tx}(\dot{T}, R_{Tax})$ – предложенная функция расчета ставки налоговых отчислений для потока с некоторым темпом $\dot{T}$ на основании правил шкалы налогообложения $R_{Tax} = (l_1, l_2, k_1, k_2, k_3)$. Функция выполняет расчет согласно формуле:

$$(5) \quad f_{Tx}(\dot{T}, R_{Tax}) = \begin{cases} k_1, \dot{T} < l_1, \\ k_2, l_1 \le \dot{T} < l_2, \\ k_3, l_2 \le \dot{T}. \end{cases}$$

Такой способ формирования ставки налоговых отчислений позволяет моделировать прогрессивную или регрессивную шкалу налогообложения с тремя уровнями коэффициента налоговых отчислений. При этом для формирования плоской шкалы налогообложения предлагает-

ся использовать равное значение ставки для всех трех уровней, в таком случае вектор настроек имеет вид $R_{Tax} = (l_1, l_2, k, k, k)$, то есть ставка налоговых отчислений не зависит от темпа потока. Предложенная функция реализована с помощью структурных элементов пакета Simulink системы Matlab и допускает расширение количества уровней ставки налоговых отчислений.

Раздельное формирование налоговых отчислений с заработной платы и доходов от собственности путем задания индивидуальных векторов настроек шкалы налогообложения R_{Tax}^{Pg} и R_{Tax}^{Rl} позволяет реализовывать различные варианты процесса налогообложения с учетом диспропорций распределения дохода по его видам.

Сформированные потоки налоговых отчислений образуют суммарный темп налоговых отчислений, передаваемых домохозяйствами государству:

$$(6) \quad \dot{T}x_2 = \sum_{i=1}^{10} \dot{T}x_{2i}^{Rl} + \sum_{i=1}^{10} \dot{T}x_{2i}^{Pg} .$$

На следующем этапе формирования располагаемых доходов происходит агрегирование доходов за вычетом налоговых отчислений с социальными трансфертами, передаваемыми домохозяйствам государственным сектором.

Процесс формирования социальных трансфертов является механизмом государственного воздействия на доходы домохозяйств. Функциональная схема процесса формирования доходов и расходов домохозяйств показывает, что модель формирования социальных трансфертов является структурным элементом модели А4 функционирования государственного сектора (рисунок 4). Социальные трансферты характеризуются как общим объемом ресурсов, передаваемых государством для домохозяйств, так и адресностью, отражающей долю трансфертов, передаваемых наиболее нуждающимся слоям населения.

С целью исследования влияния объема и адресности социальных трансфертов на состояние ММЭС, а также для исследования эффективности социальных трансфертов как недискреционного механизма государственного регулирования доходов населения, учитывающего понятие прожиточного минимума, предложен следующий алгоритм формирования социальных трансфертов, включающий два этапа.

На первом этапе формирования социальных трансфертов их общая величина $\dot{T}r_2$ в структуре государственных расходов $\dot{O}ut_4$ определяется весовым коэффициентом k_{Tr}, значение которого устанавливается с учетом объемов государственных запасов и состояния ММЭС в целом посредством интеллектуальных алгоритмов поддержки принятия решений.

На втором этапе формирования трансфертов общая величина трансфертов с темпом $\dot{T}r_2$ распределяется по децильным группам населения. При распределении трансфертов по группам домохозяйств учитывается как вектор весовых коэффициентов формирования трансфертов, так и текущий уровень доходов домашних хозяйств. Такое перераспределение осуществляется посредством трех последовательных шагов.

На шаге 1 алгоритма производится оценка совокупных доходов после выплат всех обязательных трансфертов (а именно, налоговых отчислений) каждой из групп домохозяйств $\dot{Y}_i'$. При этом в оценке используется параметр $\dot{Y}d_{\min}$, отражающий минимально допустимый располагаемый доход децильной группы домохозяйств, который можно интерпретировать как прожиточный минимум или другой вид бюджета домохозяйств (минимальный, рациональный) в зависимости от желаемого уровня жизни. Осуществляется расчет величины доходов, недостающих каждой из групп домохозяйств до минимально допустимого уровня доходов:

$$(7) \quad \Delta\dot{Y}_i' = \mathbf{max}\{0; \dot{Y}d_{\min} - \dot{Y}_i'\}, i = \overline{1,10} .$$

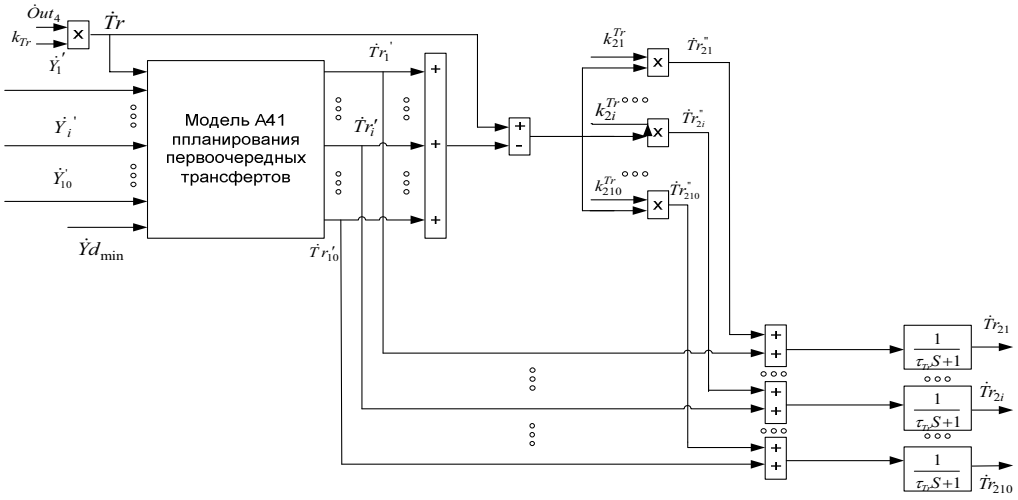


Рисунок 4 – Функциональная схема динамической модели процесса формирования социальных трансфертов

Алгоритм формирования социальных трансфертов построен таким образом, что группы домохозяйств, обладающие дефицитом дохода, имеют право на получение дополнительных социальных трансфертов, как наименее обеспеченные группы населения.

Если такие группы отсутствуют, т.е. для каждой группы домохозяйств $Yd_{\min} \le \dot{Y}_i'$, то алгоритм переходит к шагу 3 распределения трансфертов.

В противном случае, на шаге 2 алгоритма рассчитывается объем первоочередных социальных трансфертов по группам домохозяйств:

$$(8)\quad \dot{Tr}_{2i}' = \min\{\dot{Tr}_2, \Delta\dot{Y}'\} \times \Delta\dot{Y}_i' \Big/ \Delta\dot{Y}', i = \overline{1,10}.$$

Здесь $\Delta\dot{Y}' = \sum_{i=1}^{10} \Delta\dot{Y}_i'$ – величина дефицита доходов домохозяйств, показывающая, какой размер социальных трансфертов необходим для приведения доходов всех групп домохозяйств к заданному минимальному уровню доходов $\dot{Yd}_{\min}$. При этом, в зависимости от соотношения между общим темпом предоставления социальных трансфертов $\dot{Tr}_2$ и недостающими до заданного уровня доходами выражение (8) принимает следующие формы:

$$(9)\quad \dot{Tr}_{2i}' = \dot{Tr}_2 \times \Delta\dot{Y}_i' \Big/ \Delta\dot{Y}',$$

$$(10)\quad \dot{Tr}_{2i}' = \Delta\dot{Y}' \times \Delta\dot{Y}_i' \Big/ \Delta\dot{Y}' = \Delta\dot{Y}_i',$$

$$(11)\quad \dot{Tr}_{2i}' = \min\{\dot{Tr}_2, \Delta\dot{Y}'\} \times 0 \Big/ \Delta\dot{Y}' = 0.$$

В первом случае $\dot{Tr}_2 < \Delta\dot{Y}'$, то есть общего темпа запланированных социальных трансфертов недостаточно, чтобы привести доходы всех групп домохозяйств к заданному уровню $\dot{Yd}_{\min}$. Тогда, согласно выражению (9), запланированные социальные трансферты распределяется между группами домохозяйств, имеющих доход ниже заданного уровня пропорционально

величине $\Delta\dot{Y}_i'$, то есть чем больше группе домохозяйств недостает до заданного уровня, тем более высок темп ее трансфертов.

Во втором случае $\dot{T}r_2 > \Delta\dot{Y}'$, то есть общий темп социальных трансфертов превышает совокупный дефицит доходов домохозяйств. В этом случае, в соответствии с выражением (10), каждая из групп домохозяйств достигает заданного темпа формирования доходов за счет социальных трансфертов.

В третьем случае, если для группы домохозяйств $\Delta\dot{Y}_i' = 0$, т.е. она обладает доходом выше заданного уровня, и, как следствие, не получает дополнительных трансфертов (11).

В результате выполнения шага 2 алгоритма рассчитывается совокупный темп приоритетных целевых трансфертов:

(12) $\dot{T}r_2' = \sum_{i=1}^{10} \dot{T}r_{2i}'$.

Сформированные дополнительные трансферты учитываются на шаге 3 алгоритма при распределении оставшейся суммы социальных трансфертов по всем десятипроцентным группам домохозяйств с учетом вектора весовых коэффициентов $\{k_{2i}^{Tr}\}, \sum_{i=1}^{10} k_{2i}^{Tr} = 1$, задающего инвариантное фактическому распределению доходов разбиение трансфертов:

(13) $\dot{T}r_{2i}'' = (\dot{T}r_2 - \dot{T}r_{2i}') \times k_{2i}^{Tr}, i = \overline{1,10}$.

Следует отметить, что в случае если доход всех групп домохозяйств выше заданного в модели уровня $\dot{Y}d_{\min}$, то выражение (13) с учетом (12) и (8) примет вид:

(14) $\dot{T}r_{2i}'' = \dot{T}r_2 \times k_{2i}^{Tr}, i = \overline{1,10}$.

То есть в случае, если все группы домохозяйств имеют доход выше заданного уровня, распределение социальных трансфертов осуществляется исключительно на основании вектора весовых коэффициентов $\{k_{2i}^{Tr}\}$. Таким образом, в результате работы описанного алгоритма, формируется значение трансфертов, передаваемых каждой из десятипроцентных групп домохозяйств: $\dot{T}r_{2i} = \dot{T}r_{2i}' + \dot{T}r_{2i}'', i = \overline{1,10}$.

Такая организация процесса формирования социальных трансфертов позволяет учитывать бюджетные ограничения на общий объем социальных трансфертов (первый этап) и недискреционные механизмы передачи социальных трансфертов, а также влияние перераспределения социальных трансфертов на доходы и расходы домохозяйств и состояние ММЭС (второй этап).

Предложенный алгоритм формирования социальных трансфертов реализован в среде Simulink пакета Matlab с использованием библиотечных модулей. Следует отметить, что, в силу особенностей такой реализации алгоритма операция деления в выражении (8) осуществляется с помощью функции, разрешающей неопределенность, которая возникает в случае, если $\Delta\dot{Y}' = 0$, следующим образом:

(15) $f_{Tr}(a,b) = \begin{cases} a/b, b \neq 0; \\ 0, b = 0. \end{cases}$

Такой способ реализации обусловлен тем, что в случае если $\Delta\dot{Y}' = 0$, то дополнительных трансфертов не требуется, и $\dot{T}r_{2i}'' = 0, i = \overline{1,10}$.

Сформированные социальные трансферты суммируются с доходами домохозяйств от заработной платы ($\dot{R}l_{2i}^{d} = \dot{R}l_{2i} - \dot{T}x_{2i}^{Rl} + \dot{T}r_{2i}$) и совместно с доходами в виде части валовой прибыли $\dot{P}g_{2i}^{d} = \dot{P}g_{2i} - \dot{T}x_{2i}^{Pg}$ формируют располагаемые доходы (верхний индекс *d*) домашних хозяйств в виде потоков с темпами $\dot{R}l_{2i}^{d}$ и $\dot{P}g_{2i}^{d}$ соответственно.

При этом в модели формирования располагаемых доходов населения осуществляется расчет показателей дифференциации доходов – индекса Джини *Gi* и децильного коэффициента дифференциации доходов *Dec* – на различных этапах формирования доходов. Показатели дифференциации рассчитываются для совокупных потоков доходов, включающих как доходы в виде заработной платы, так и доходы в виде части валовой прибыли, по децильным группам. Значения показателей дифференциации рассчитываются по результатам первичного распределения доходов по децильным группам (*Dec, Gi*) на основании потоков первичных доходов $\dot{Y}_i = \dot{R}l_{2i} + \dot{P}g_{2i}$; после отчисления налогов на основании $\dot{Y}_i' = \dot{R}l_{2i}' + \dot{P}g_{2i}'$ (Dec', Gi'); после получения социальных трансфертов: на основании располагаемых доходов $\dot{Y}_i^{d} = \dot{\dot{R}}l_{2i}^{d} + \dot{P}g_{2i}^{d}$ (Dec^{d}, Gi^{d}). Такая система показателей дифференциации позволяет оценивать не только дифференциацию доходов, но и влияние на нее проводимой политики государственного регулирования, выраженной темпами передаваемых налоговых отчислений и социальных трансфертов.

Модель формирования располагаемых доходов домохозяйств наряду с реализацией процессов перераспределения доходов, налогообложения и получения социальных трансфертов, также рассчитывает дефицит доходов населения и уровень бедности.

Таким образом, разработана динамическая модель формирования располагаемых доходов домохозяйств, которая: отражает динамику формирования и перераспределения доходов с учетом налоговых отчислений и формирования социальных трансфертов по децильным группам населения; позволяет исследовать динамику доходов населения при использовании различных шкал налогообложения; позволяет формировать социальные трансферты с учетом их адресности и ограничений на получаемые доходы; обладает свойством адаптивности за счет возможности выбора различных ограничений на доходы населения в виде прожиточного минимума, минимального или рационального бюджетов домохозяйств.

3 Динамическая модель процесса формирования расходов домохозяйств

Динамическая модель обладает следующими особенностями.

В первую очередь, формирование расходов осуществляется в разрезе децильных групп населения, упорядоченных по уровню дохода. При этом каждая группа населения является автономным экономическим агентом и принимает решения о формировании расходов исходя из уровня доходов, объемов запасов, индивидуальных для каждой группы, а также с учетом рыночных условий и макроэкономической конъюнктуры в целом.

Во-вторых, в качестве расходов домашних хозяйств рассматриваются поток потребления, формирующий потребительский спрос $\dot{C}$ и участвующий впоследствии в формировании совокупного спроса $\dot{A}d$ на рынке благ, и поток сбережений $\dot{S}$, передаваемых домохозяйствами финансовому сектору.

В-третьих, входными потоками ресурсов каждой из групп домохозяйств являются располагаемые доходы. Процесс формирования располагаемых доходов в целом неуправляем домохозяйствами (ставка налоговых отчислений и темп и структура распределения социальных трансфертов определяются государством).

И, наконец, в-четвертых, доходы домохозяйств декомпозированы на два вида: доходы от труда в виде заработной платы и доходы от собственности в виде части валовой прибыли. Та-

кая декомпозиция доходов домохозяйств по видам и различия во влиянии видов доходов на формирование расходов актуальна в условиях диспропорций распределения этих видов доходов по децильным группам.

Процесс функционирования домохозяйств в данной модели не ограничивается формированием потребительского спроса. домохозяйства формируют сбережения, а также и управляют потоками потребления и сбережений с учетом запасов [5]. Отличительной особенностью описываемой модели является детализация процесса формирования именно потребительского спроса. Допустимость такой детализации обусловлена структурой формирования потребления и сбережений в виде автономных каналов. При этом модель функционирования группы домохозяйств в целом эквивалентна структурам моделей, описанным ранее в работах [5-8].

Формирование потребительского спроса в предлагаемой модели базируется на применении трех основных моделей потребления: кейнсианской, перманентного дохода и Энгеля-Торнквиста [9]. Особенности реализации этих концепций в рамках моделирования динамики ММЭС состоят в следующем.

Математическая модель формирования потребления согласно кейнсианской концепции потребительского спроса описывается выражением [9]:

(16) $C = C_a + mpc \times Y$.

Эта модель отражает основной психологический закон, установленный Кейнсом, и показывает, что с ростом доходов потребители увеличивают свой доход на меньшую величину, характеризуемую предельной склонностью к потреблению *mpc* [9]. При этом процесс формирования потребления также характеризуется величиной автономного потребления, не зависящего от уровня дохода. Таким образом, кейнсианская модель потребления определяет линейную зависимость расходов от доходов.

С учетом ранее представленных положений моделирования поведения домохозяйств в системе макроэкономического кругооборота, формирование потребления с учетом положений кейнсианской теории осуществляется в соответствии с выражением:

(17) $\dot{C}_i^{Ks} = \dot{C}_{ai} + mpc_i^{Rl} \times \dot{R}l_i^d + mpc_i^{Pg} \times \dot{P}g_i^d, i = \overline{1,10}$.

Выражение (17) отражает особенности применения кейнсианской модели потребления в рамках исследуемого процесса формирования располагаемых расходов. Величины потребления $\dot{C}_i^{Ks}$, заработной платы $\dot{R}l_i^d$ и доходов от собственности $\dot{P}g_i^d$ характеризуются темпами потоков и декомпозированы по децильным группам домохозяйств.

Важной особенность предлагаемой модели формирования потребления (17) является то, что она позволяет задавать различные значения предельной склонности к потреблению для различных видов дохода (mpc_i^{Rl}, mpc_i^{Pg}) по каждой децильной группе, а также индивидуальный уровень автономного потребления $\dot{C}_{ai}$. Последнее представляется особенно важным для исследования и моделирования возможностей роста потребительского спроса в условиях снижения чрезмерной дифференциации доходов и формирования интеллектуальных алгоритмов принятия решений в области политики доходов.

Модель формирования потребительского спроса согласно концепции перманентного дохода предполагает, что потребитель, формируя в каждый момент времени определенный объем потребления товаров и услуг, учитывает не только текущий уровень доходов, но и динамику доходов. При этом в данной модели все источники дохода объединяются в один; и доходы в виде заработной платы интерпретируются как доход от человеческого капитала как специфической разновидности имущества. Функция потребления описывается следующим выражением:

(18) $\dot{C}_t = mpc_{Y^P} \dot{Y}_t^P$.

Согласно выражению в каждый момент времени величина потребления обуславливается уровнем перманентного дохода $\dot{Y}_t^P$ и предельной склонностью к его потреблению $\dot{Y}_t^P$.

Перманентный доход сочетает в себе совокупность текущих доходов из всех источников и динамику доходов во времени, не является статистически наблюдаемой величиной [121]. Считая перманентный доход средневзвешенной величиной всех ранее полученных доходов, выражение (18) возможно преобразовать к виду:

(19) $C_i = (1-\lambda) \times C_{t-1} + \lambda \times mpc_{Y^p} \times Y_t$,

где $\lambda \in [0;1]$ – весовой коэффициент, отражающий степень зависимости текущего уровня доходов от потребления в предыдущем периоде C_{t-1}. Тем самым λ отражает стремление потребителя поддерживать текущий уровень расходов вне зависимости от уровня доходов за счет сокращения объема запасов.

Интеграция модели перманентного дохода в процесс формирования расходов домохозяйств динамической модели ММЭС приводит к следующей модификации выражения (19):

(20) $\dot{C}_i^{Pi} = (1-\lambda_i) \times \dot{C}kr_i^{t-1} + \lambda_i \times mpc_i^{Y^p} \times (\dot{R}l_i + \dot{P}g_i)$.

Помимо декомпозиции темпов потоков потребления и доходов по децильным группам, выражение (20) отражает функциональную зависимость потребления от фактического потребления в предыдущем периоде $\dot{C}kr_i^{t-1}$, скорректированного с учетом текущего уровня запасов по алгоритму, описанному в ранее представленных работах [5-8]. Эта особенность формирования потребления обусловлена поточно-запасной концепцией представляемой модели ММЭС и обеспечивает модель перманентного дохода косвенной информацией об имеющихся запасах децильной группы домохозяйств, выраженной в скорректированном темпе потребления $\dot{C}kr_i^{t-1}$ [5-8].

Модель формирования потребительского спроса $\dot{C}$ согласно концепции Энгеля-Торнквиста основывается на заключении немецкого статистика Э. Энгеля, обратившего внимание на изменение структуры потребительских расходов домохозяйств в зависимости от дохода [9]. Эта функциональная зависимость, получившая название закона Энгеля, описывается кривыми Энгеля, показывающими изменение потребления различных товаров и услуг в зависимости от дохода. Интерпретация кривых Энгеля шведским статистиком Л. Торнквистом для трех групп товаров отражена следующими выражениями:

(21) $C_1 = \frac{a_1 Y}{Y + c_1}, a_1 > 0, c_1 > 0;$

(22) $C_2 = \frac{a_2 (Y - b_2)}{Y + c_2}, a_2 > 0, b_2 > 0, c_2 > 0;$

(23) $C_3 = \frac{a_3 Y (Y - b_3)}{Y + c_3}, a_3 > 0, b_3 > 0, c_3 > 0.$

Данные функции (21), (22), (23) описывают зависимость спроса от уровня доходов для трех различных групп товаров: первой необходимости, второй необходимости и предметов роскоши соответственно.

Таким образом, потребление согласно модели Энгеля-Торнквиста формируется на основании трех групп товаров, причем вклад в потребление первой и второй групп товаров максимален для населения с низкими доходами, с ростом дохода их доля в структуре потребительских расходов уменьшается, а доля потребления предметов роскоши растет и не имеет предела

насыщения. Первые же две функции для товаров первой и второй необходимости предел насыщения имеют, причем уровень насыщения для второй группы выше, чем для первой.

Параметры $a_1, c_1, a_2, c_2, a_3, c_3$ регулируют интенсивность роста кривых зависимости потребления от дохода. Параметры b_2, b_3 характеризуют уровни дохода, по достижении которых свой вклад в спрос начинают вносить выражения (22) и (23) соответственно.

Иначе говоря, потребление товаров первой необходимости осуществляется всегда, быстро достигает своего уровня насыщения и при дальнейшем росте дохода не зависят от его уровня. Товары второй необходимости не потребляются, если доход потребителя ниже уровня b_2. Если доход превысил этот уровень, то у населения появляется возможность приобретать товары второй необходимости, что приводит к снижению доли товаров первой необходимости в структуре потребления.

Формирование спроса на предметы роскоши происходит только в том случае, если доход превышает уровень b_3, что, в свою очередь, также приводит к снижению долей товаров первой и второй необходимости в структуре потребительского спроса.

Вышесказанное приводит к следующей модели формирования потребительского спроса согласно концепции Энгеля-Торнквиста с учетом динамики процессов формирования доходов и расходов и методологии поточно-запасного имитационного моделирования этих процессов, реализованной в работе. Модель представлена в виде следующих зависимостей для каждой *i*-ой децильной группы домохозяйств (обозначения в формулах прежние):

(24) $\dot{C}_i^{ET} = \dot{C}_a + \dot{C}_{i1}^{Rl} + \dot{C}_{i2}^{Rl} + \dot{C}_{i3}^{Rl} + \dot{C}_{i1}^{Pg} + \dot{C}_{i2}^{Pg} + \dot{C}_{i3}^{Pg}$;

(25) $\dot{C}_{i1}^{Rl} = \dfrac{a_1^{Rl} \times \dot{R}l_i^d}{\dot{R}l_i^d + c_1^{Rl}}$;

(26) $\dot{C}_{i2}^{Rl} = f_{trs}\left(\dfrac{a_2^{Rl} \times (\dot{R}l_i^d - b_2^{Rl})}{\dot{R}l_i^d + c_2^{Rl}}\right)$;

(27) $\dot{C}_{i3}^{Rl} = f_{trs}\left(\dfrac{a_3^{Rl} \times \dot{R}l_i^d \times (\dot{R}l_i^d - b_3^{Rl})}{\dot{R}l_i^d + c_3^{Rl}}\right)$;

(28) $\dot{C}_{i1}^{Pg} = \dfrac{a_1^{Pg} \times \dot{P}g_i^d}{\dot{P}g_i^d + c_1^{Pg}}$;

(29) $\dot{C}_{i2}^{Pg} = f_{trs}\left(\dfrac{a_2^{Pg} \times (\dot{P}g_i^d - b_2^{Pg})}{\dot{P}g_i^d + c_2^{Pg}}\right)$;

(30) $\dot{C}_{i3}^{Pg} = f_{trs}\left(\dfrac{a_3^{Pg} \times \dot{P}g_i^d \times (\dot{P}g_i^d - b_3^{Pg})}{\dot{P}g_i^d + c_3^{Pg}}\right)$.

Такой способ формирования потребительского $\dot{C}$ (выражения 25-30) отражает дифференциацию домохозяйств по децильным группам и позволяет настраивать эластичность для различных источников доходов (от собственности и заработной платы), что отражено в представленных формулах.

К особенностям реализации процесса формирования потребительского спроса $\dot{C}$ в разработанной модели относится также использование пороговой функции $f_{trs}(\dot{T})$, которая при-

меняется для ограничения влияния вклада спроса на товары второй необходимости и предметы роскоши на интервалах, в которых значение этих компонент отрицательно. Пороговая функция описывается следующим образом:

$$(31)\quad f_{trs}(\dot{T}) = \begin{cases} \dot{T}, \dot{T} > 0; \\ 0, \dot{T} \le 0. \end{cases}$$

Использование автономного потребления $\dot{C}_a$ в формуле (24) отражает особенность реализации модели Энгеля-Торнквиста с учетом поточно-запасной концепции модели функционирования ММЭС. Автономное потребление $\dot{C}_a$ является ненулевым и отражает уровень потребления, осуществляемого за счет запасов, при нулевом уровне доходов.

Предложен вариант структурной корректировки динамической модели формирования потребительских расходов, согласно которому в каждый момент времени потребление формируется согласно одной из трех перечисленных концепций потребительского поведения. Структурная корректировка динамической модели формирования потребительских расходов выполняется согласно формулы:

$$(32)\quad f_{\dot{C}}(p_{Ks-Pi-ET}, \dot{C}_i^{Ks}, \dot{C}_i^{Pi}, \dot{C}_i^{ET}) = \begin{cases} \dot{C}_i^{Ks}, p_{Ks-Pi-ET} = 0; \\ \dot{C}_i^{Pi}, p_{Ks-Pi-ET} = 1; \\ \dot{C}_i^{ET}, p_{Ks-Pi-ET} = 2. \end{cases}$$

В зависимости от значения параметра $p_{Ks-Pi-ET}$, осуществляющего переключение между вариантами формирования потребительского спроса, потребление *i*-ой группы домохозяйств формируется согласно кейнсианской модели ($\dot{C}_i^{Ks}$, выражение (17)), модели перманентного дохода ($\dot{C}_i^{Pi}$, формула (20)), либо модели Энгеля-Торнквиста ($\dot{C}_i^{ET}$, формула (24)). Функции $f_1^{ET}, f_2^{ET}, f_3^{ET}$ реализуют формирование потребления в соответствии с формулами (21–23) на основании векторов коэффициентов $et_i^{Rl}, et_i^{Pg}, i = \overline{1,3}$.

Динамическая модель формирования расходов домохозяйств отражает динамику процессов потребления и сбережения с учетом текущего уровня доходов и его динамики, а также объемов накопленных запасов; формирует потребительский спрос путем агрегирования потребительских расходов всех децильных групп населения; а также учитывает особенности потребления различных видов доходов с учетом различных предельных склонностей к потреблению как по различным видам доходов, так и по различным группам потребляемых товаров, обладает свойством адаптивности к изменению потребительского поведения за счет возможности структурной корректировки модели путем выбора базовой модели потребления, что в целом позволяет исследовать и моделировать возможности роста потребительского спроса в условиях снижения чрезмерной дифференциации доходов.

Проведены имитационные эксперименты для анализа неуправляемых сценариев поведения домохозяйств, которые показали, что сокращение расходов децильных групп домохозяйств в ситуациях рецессии происходит неоднородно. Показано, что это обусловлено различиями в объемах накопленных запасов, структуре и динамике снижающихся доходов, при этом возрастающая дифференциация доходов населения усиливает протекание рецессии.

На основе ИСППР и ИМ проведены имитационные эксперименты по оценке эффективности интеллектуальных алгоритмов принятия решений при управлении процессом формирования доходов и расходов населения в неопределенных рыночных условиях с учетом дифференциации доходов населения. Результаты моделирования показали, что увеличение темпов формирования оплаты труда или социальных трансфертов в ситуациях рецессии позволяет преодолеть сокращение выпуска ВВП за счет стимулирования потребительского спроса.

Заключение

Таким образом, предложенная когнитивная модель процесса формирования доходов и расходов сектора домохозяйств ММЭС состоит в том, что в состав концептов по сравнению с существующими моделями дополнительно включены децильные группы домохозяйств, дифференцированные по доходам, а в составе связей выделены два типа потоковых связей, характеризующих преобразования финансовых потоков типа «расходы–доходы» и «доходы–расходы». Это позволяет определить множество контуров формирования и корректировки доходов и расходов домохозяйств в рамках воспроизводственного процесса ММЭС и выявить закономерности их взаимодействия на неравновесных режимах с учетом поведенческих функций населения, запасов ресурсов секторов экономики и влияния рыночных и государственных механизмов регулирования.

Предложенные динамические модели формирования доходов и расходов домохозяйств состоит в том, что они взаимосвязаны с другими макроэкономическими агентами и рынками в рамках кругооборота доходов и расходов и включают модели формирования доходов с учетом налогообложения и социальных трансфертов и модели формирования потребительских расходов. Это позволяет описать с помощью непрерывных нелинейных дифференциальных уравнений динамику процессов формирования и перераспределения доходов домохозяйств с учетом регулирующего влияния механизмов налогообложения, социальных трансфертов и прожиточного минимума, а также процессы формирования потребительских расходов с учетом динамики доходов, объемов запасов и структуры потребления, дифференцированных по всем децильным группам населения. Результаты экспериментальных исследований показали эффективность принимаемых решений при управлении процессом формирования доходов и расходов домохозяйств ММЭС, позволяющих выбирать наиболее благоприятные сценарии макроэкономического регулирования в области политики доходов.

Список литературы

[1] Доходы, расходы и потребление домашних хозяйств в I квартале 2012 года (по итогам выборочного обследования бюджетов домашних хозяйств). Статистический сборник. 2012г. [Электронный ресурс] // ФСГС –<http://www.gks.ru/free_doc/doc_2012/bul_dr/dox_rasx12/dox1.rar>

[2] Суворов А.В. Проблемы оценки дифференциации доходов населения в современной России // Проблемы прогнозирования – 2008 - №2 – С. 3-18

[3] Шевяков А.Ю. Неравенство доходов как фактор экономической и демографической динамики: монография – М.: ИСЭПН РАН, 2010 – 43 с.

[4] Шевяков А.Ю. Неравенство доходов как фактор экономической и демографической динамики: монография – М.: ИСЭПН РАН, 2010 – 43 с.

[5] Имитационная модель регулирования расходов и доходов населения в системе макроэкономического кругооборота / Б. Г. Ильясов, Е. А. Макарова, Р. Р. Валитов // Программные продукты и системы. 2011. № 1. С. 123–126.

[6] Система интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении макроэкономическим воспроизводственным процессом на основе имитационного моделирования / Б. Г. Ильясов, И. В. Дегтярева, Е. А. Макарова, Р. Р. Валитов // Вестник УГАТУ. 2012. № 3. С. 217–229.

[7] Регулирование доходов населения и анализ их влияния на динамику потребительского спроса на основе имитационного моделирования / Б. Г. Ильясов, Е. А. Макарова, Р. Р. Валитов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 5. С. 67–71.

[8] Исследование динамики макроэкономического кругооборота финансовых потоков с учетом взаимосвязанного функционирования рынков благ, труда и денег / Б. Г. Ильясов, Е. А. Макарова, А. Н. Павлова, Т. А. Карташева // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. XIII Междунар. конф. Самара : Самарск. науч. центр РАН, 2011, С. 214–224.

[9] Тарасевич Л. С., Гребенников П. И., Леусский А. И. Макроэкономика: учебник. – М.: Высшее образование, 2007. – 654 с.

ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ КАДРОВЫХ ПЕРЕСТАНОВОК НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

А.З. Асанов, И.Ю. Мышкина

Казанский (Приволжский) федеральный университет
423812, Набережные Челны, пр. Сююмбике, 10А, Россия
mirinau@mail.ru
тел: +7 (8552) 38-34-05, факс: +7 (8552) 58-88-94

Ключевые слова: *нечеткая логика, когнитивная карта, кадровая перестановка*

Abstract
This article describes models and algorithms for evaluating the feasibility of personnel changes on the basis of fuzzy logic.

Введение

Эффективность управления деятельностью любого предприятия напрямую зависит от качества организации его кадровой политики, умения руководства принимать оперативные, свободные от субъективных оценок кадровые решения. Одной из важных задач кадровой политики является задача оценки эффективности кадровых перестановок на предприятии. В условиях отсутствия точных математических методов решения данной задач и необходимости оперировать при принятии решений как количественными, так и качественными показателями в условиях неопределенности, представляется, что эффективное решение рассматриваемых задач возможно при использовании методов искусственного интеллекта, в частности нечетких вычислений.

1 Постановка задачи

Рассматривалась задача в следующей постановке:

На основе построенного графа, сведений о наличии/отсутствии (оценок) знаний специалиста, сведений о требуемых профессиональных знаниях для занятия должностей; психолого-личностных характеристик сотрудника получить оценку целесообразности возможных кадровых перестановок (перевода сотрудника на новые «преемственные» должности).

В качестве модели профессиональных знаний специалиста в данной работе выбрана когнитивная модель (когнитивная карта), в качестве концептов которой рассматривались профессиональные знания с учетом их детализации, связи между концептами интерпретированы как связи в смысле преемственности соответствующих знаний (компетенций) [1].

Пусть $Z = \{Z_i\}$, $i = \overline{1, N}$ – множество профессиональных знаний, определяющих портрет специалистов некоторых «смежных» должностей, включающее также базовые знания, являющиеся этапом освоения основных. На множестве Z построен ориентированный граф $G =< Z, E >$, где Z - множество вершин, $E = \{e_{ij}\}$, $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, N}$, – множество дуг, которые отражают взаимосвязи между вершинами Z_i и Z_j. Причем $e_{ij} = 1$, если профессиональное знание Z_i является базой (основой) для получения знания Z_j, другими словами – нали-

чие связи свидетельствует о наличии преемственности знаний; $e_{ij} = 0$, если связь между знаниями Z_i и Z_j отсутствует.

2 Оценка профессиональных знаний сотрудников

В данном разделе рассматривается модель специалиста, позволяющая представить его профессиональные знания с учетом их взаимосвязей и стадий формирования, а также алгоритм оценки соответствия специалиста должности.

Представленная модель позволяет учитывать потенциал для профессионального развития сотрудника на основе имеющихся у специалиста профессиональных знаний, что делает оценку соответствия специалиста некоторой должности более адекватной.

В нечетких продукционных когнитивных картах (Rules Based Fuzzy Cognitive Maps – нечеткие когнитивные карты, основанные на правилах) для описания влияний между концептами используются нечеткие продукционные правила [2, 3, 4, 5]. В этих картах концепты представлены в виде нечетких множеств, определяемых функциями принадлежности к базовому множеству. Причинно-следственные отношения между двумя концептами выражены в виде нечеткого продукционного правила со структурой «один вход-один выход»:

ЕСЛИ «изменение концепта X_j малое положительное», ТО «изменение концепта X_i среднее отрицательное»

Применительно к поставленной задаче причинные связи между концептами имеют некоторые особенности. Продукции, задающие связи между концептами-знаниями X_j и X_i ($i = \overline{1, N}$), означают изменение оценки потенциала (уровня подготовленности) к получению знания X_i в зависимости от значения приращения концепта X_j - базового знания.

Влияния же концептов-знаний на результирующий концепт X_{N+1} (оценка соответствия требованиям к должности) означают изменение оценки соответствия соискателя вакансии в зависимости от значения концепта-знания.

Значения концептов-знаний, известные на начальном этапе, в процессе моделирования не меняются.

Каждый концепт нечеткой продукционной когнитивной карты X_i ($i = \overline{1, N+1}$) описывается соответствующей лингвистической переменной $\left\langle \tilde{X}_i, T_i, D_i \right\rangle$, где $T_i = \left\langle T_1^i, T_2^i, ..., T_{m_i}^i \right\rangle$ - терм-множество лингвистической переменной (набор лингвистических значений концепта, характеризующих его типовые состояния); m_i - число типовых состояний данного концепта; D_i - базовое множество $\tilde{X}_i$. Значение T_z^i ($z = \overline{1, m_i}$) описывается нечетким множеством $\tilde{C}_z^i$ в базовом множестве D_i:

$$\tilde{C}_z^i = \left\{ \mu_{C_z^i}(d) / d \right\},\ d \in D_i .$$

Приращение каждого концепта нечеткой продукционной когнитивной карты X_i ($i = \overline{1, N+1}$) описывается соответствующей лингвистической переменной $\left\langle \Delta\tilde{X}_i, T_i^{\Delta}, D_i^{\Delta} \right\rangle$, где $T_i^{\Delta} = \left\langle T_1^{\Delta i}, T_2^{\Delta i}, ..., T_{k_i}^{\Delta i} \right\rangle$ - терм-множество лингвистической переменной (набор лингвистических значений приращений концепта, характеризующих его типовые состояния); k_i - число

типовых состояний приращений данного концепта; D_i^{Δ} - базовое множество $\Delta\tilde{X}_i$. Значение $T_l^{\Delta i}$ ($l=\overline{1,k_i}$) описывается нечетким множеством $\tilde{F}_l^i$ в базовом множестве D_i^{Δ}:

$$\tilde{F}_l^i = \left\{\mu_{F_l^i}(d)/d\right\},\ d \in D_i^{\Delta}.$$

Веса влияний w_{ji} ($i=\overline{1,N+1}$, $j=\overline{1,N}$) между каждой парой концептов задаются одним из значений терм-множества лингвистической переменной $\left\langle \tilde{W}, T^w, D^w \right\rangle$, где $T^w = \left\langle T_1^w, T_2^w, ..., T_k^w \right\rangle$ - терм-множество лингвистической переменной $\tilde{W}$; k - число значений T^w; D^w - базовое множество $\tilde{W}$. Таким образом, веса влияния между каждой парой концептов описываются нечеткими множествами $\tilde{H}_{st}^w$ ($s=\overline{1,N}$, $t=\overline{1,N+1}$) в базовом множестве D^w следующего вида:

$$\tilde{H}_{st}^w = \left\{\mu_{H_{st}^w}(d)/d\right\},\ d \in D^w.$$

Модель динамики нечеткой продукционной когнитивной карты (для всех концептов, кроме результирующего):

$$\begin{cases} \tilde{X}_i(t+1) = \tilde{X}_i(t) \oplus \left[\underset{j=1,2,...,N}{\oplus} \Delta\tilde{X}_{ji}(t+1) \right], \quad если \quad \tilde{X}_i(0) \equiv 0, \\ \Delta\tilde{X}_{ji}(t+1) = \tilde{f}_{ji}\left[\Delta\tilde{X}_j \right] \end{cases}, \ i=1,N$$

или

$$\tilde{X}_i(t+1) = \tilde{X}_i(t) \oplus \left\{ \underset{j=1,2,...,N}{\oplus} \tilde{f}_{ji}\left[\Delta\tilde{X}_j(t) \right] \right\},\ \tilde{X}_i(0) \equiv 0,\ i=1,N$$

где $\tilde{X}_j$, $\Delta\tilde{X}_j$ - нечеткие множества, представляющие значения уровней j-го концепта и приращения этого концепта, смежного с выходным концептом i; $\tilde{X}_i$ - нечеткое множество, представляющее значение выходного концепта; $\tilde{f}_{ji}$ - нечеткий оператор, задающий нечеткое отображение типа «один вход-один выход»; $\oplus$ - операция нечеткой аккумуляции нескольких нечетких влияния на выходной концепт.

Влияние между концептами задается значениями терм-множества лингвистической переменной $\left\langle \tilde{W}, T^w, D^w \right\rangle$, где $T^w = \left\langle T_1^w, T_2^w, ..., T_k^w \right\rangle$. Для представления нечеткого оператора $\tilde{f}_{ji}$ нечеткие правила будут иметь вид, например:

Для $w_{ji} = T_r^w$ ($r=\overline{1,k}$):

ЕСЛИ $\Delta \tilde{X}_j = T_1^{\Delta j}$ ТО $\Delta \tilde{X}_{ji} = T_1^{\Delta i}$

ЕСЛИ $\Delta \tilde{X}_j = T_2^{\Delta j}$ ТО $\Delta \tilde{X}_{ji} = T_1^{\Delta i}$

ЕСЛИ $\Delta \tilde{X}_j = T_3^{\Delta j}$ ТО $\Delta \tilde{X}_{ji} = T_2^{\Delta i}$

…

ЕСЛИ $\Delta \tilde{X}_j = T_{k_j}^{\Delta j}$ ТО $\Delta \tilde{X}_{ji} = T_{k_i-1}^{\Delta i}$

Результирующее значение приращения $\Delta \tilde{X}_{ji\,res}(t+1)$ (итоговое нечеткое множество) для *i*-го выходного концепта (от *j*-го входного концепта) формируется на основе алгоритма нечеткого вывода Мамдани путем композиции (объединения) найденных по каждому правилу «усеченных» функций принадлежности с использованием операции max.

В качестве операции $\oplus$ (операция нечеткой аккумуляции нескольких нечетких влияния на выходной концепт) могут применяться специальная операция «нечеткого аккумулирования с переносом» (Fuzzy Carry Accumulation) (как в случае «классических» нечетких продукционных карт [3]), операция нечеткого алгебраического сложения, или операция нечеткого алгебраического сложения (как в случае расширенных нечетких продукционных карт).

В случае использования для объединения отдельных влияний на выходном концепте применяется специальная операция «нечеткого аккумулирования с переносом» (Fuzzy Carry Accumulation), то должны выполняться следующие условия [3-5]:

1) Функции принадлежности, которые представляют б'ольшие изменения должны иметь б'ольшую площадь.
2) Функции принадлежности должны пересекать ближайших соседей в точке, степень принадлежности которой равна 0,5. В любой точке сумма значений соответствующих ей степеней принадлежности должна быть равна 1.
3) Функции принадлежности, описывающие положительные и отрицательные приращения не должны пересекаться.
4) Нечеткий логический вывод должен осуществлять на основе метода Max-Prod, чтобы сохранить форму функции принадлежности.
5) Каждая полученная функция принадлежности приращения в результате влияния *j*-го концепта ($w_{ji} \neq 0$, $j = \overline{1, N}$) заменяется функцией принадлежности имеющей ту же форму, что функции принадлежности концептов, с тем же центром тяжести и имеющей ту же площадь. Тем самым выполняется операция FOS (Fuzzy Output set of each input).

Эти условия необходимы для обеспечения того, чтобы операция FCA (Fuzzy Carry Accumulation) нечеткая аккумуляция с переносом, применяемая в дальнейшем для аккумуляции нескольких влияний на *i*-ый концепт обладала свойствами коммутативности и ассоциативности.

Происходит аккумуляция всех влияний на i-ый концепт на основе операции FCA:

Функция принадлежности, расположенная в области меньших значений базового множества, «перемещается» в сторону больших по модулю значений до совмещения максимального значения «большей» функции принадлежности с крайним левым значением меньшей. Далее совмещенные функции принадлежности дискретизируются по базовому множеству и полученные одноточечные значения принадлежностей, расположенные в одних точках базового множества, суммируются алгебраически, начиная с самого малого значения базового множества. Превышение над единицей добавляется к следующей точке, аналогично поразрядному сложению с переносом.

Единственным ограничением использования операции нечеткого алгебраического сложения является расширение интервала неопределенности состояний концептов. Одним из способов решения этой проблемы в расширенных нечетких продукционных картах предлагается [3] проведение идентификации типового состояния концепта после каждого шага моделирования на основе, например, определения максимальной степени нечеткого равенства с одним из типовых нечетких состояний данного концепта. Недостатком данного подхода является получение оценок соответствия соискателей из ограниченного набора типовых состояний результирующего концепта, таким образом, исключается возможность получения уникальных оценок соискателей и возможность адекватного ранжирования полученных оценок. В условиях поставленной задачи данный недостаток сглаживается на основе, во-первых, выбора соответствующего базового множества для нечетких оценок каждого концепта (по смыслу рассматриваемой задачи базовые множества приращений концептов являются частью (подмножеством) отрезка [0; 1] – базового множества нечетких состояний концептов, например, [0; 0.1] или [0; 0.3]);во-вторых, на основе применения операции FOS (Fuzzy Output set of each input) для каждой полученной функции принадлежности приращения в результате влияния причинного концепта, полученной на основе нечетких правил.

Обе представленные операции аккумуляции позволяют обрабатывать нечеткие числа по двум «координатам» (принадлежности и базовому множеству) и учитывать аддитивный характер влияний отдельных концептов.

Значение результирующего концепта (соответствие профессиональных знаний вакансии) $i = N+1$ определяется в два этапа:

1) Начальное значение результирующего концепта определяется на основе начальных значений концептов, влияющих на результирующий концепт:

$$\begin{cases} \tilde{X}^{0}_{N+1}(1) = \underset{j=1,2,...,N}{\oplus} \Delta\tilde{X}_{j,N+1}(0), \\ \Delta\tilde{X}_{j,N+1}(0) = \tilde{f}_{j,N+1}\left[\tilde{X}_{j}(0)\right] \end{cases} \text{ или } \tilde{X}^{0}_{N+1}(1) = \underset{j=1,2,...,N}{\oplus} \tilde{f}_{j,N+1}\left[\tilde{X}_{j}(0)\right].$$

Для представления нечеткого оператора $\tilde{f}_{j,N+1}$ нечеткие правила будут иметь вид, например:

Для $w_{j,N+1}$ ="высокая" :

ЕСЛИ $\tilde{X}_{j}$ ="низкая" ТО $\Delta\tilde{X}_{j,N+1}$ ="высокое отрицательное"

ЕСЛИ $\tilde{X}_{j}$ ="средняя" ТО $\Delta\tilde{X}_{j,N+1}$ ="*низкое* п*оложительное*"

ЕСЛИ $\tilde{X}_{j}$ ="высокая" ТО $\Delta\tilde{X}_{j,N+1}$ ="высокое п*оложительное*"

…

Таким образом, в данном случае учитываются не приращения, а сами значения влияющих концептов, и изменения результирующего концепта могут быть как отрицательными, так и положительными.

2) Конечное значение результирующего концепта определяется аналогично на основе конечных значений концептов ($j = \overline{1, N}$), влияющих на результирующий концепт:

$$\tilde{X}^{res}_{N+1}(2) = \tilde{X}^{0}_{N+1}(1) \oplus \left\{ \underset{j=1,2,...,N}{\oplus} \tilde{f}_{j,N+1}\left[\tilde{X}^{res}_{j}\right] \right\}.$$

Конечное значение результирующего концепта может принимать как отрицательные, так и положительные значения; отрицательные значения свидетельствуют о несоответствии соискателя вакансии и характеризуют оценку несоответствия. Введение первого этапа вычисления итогового значения результирующего концепта обусловлено тем, что если соискатель в нулевой (начальный) момент моделирования имеет положительное значение концепта, влияющего на результирующий, должен иметь большую оценку соответствия (большее значение результирующего концепта), чем соискатель, получивший аналогичную оценку влияющего концепта в конечный момент времени моделирования.

Таким образом, граф профессиональных знаний позволяет получить оценку соответствия сотрудников «преемственным» должностям. Так на рисунке 1 представлен фрагмент такого графа для трех должностей работников бухгалтерии (кассир, бухгалтер по зарплате, главный бухгалтер).

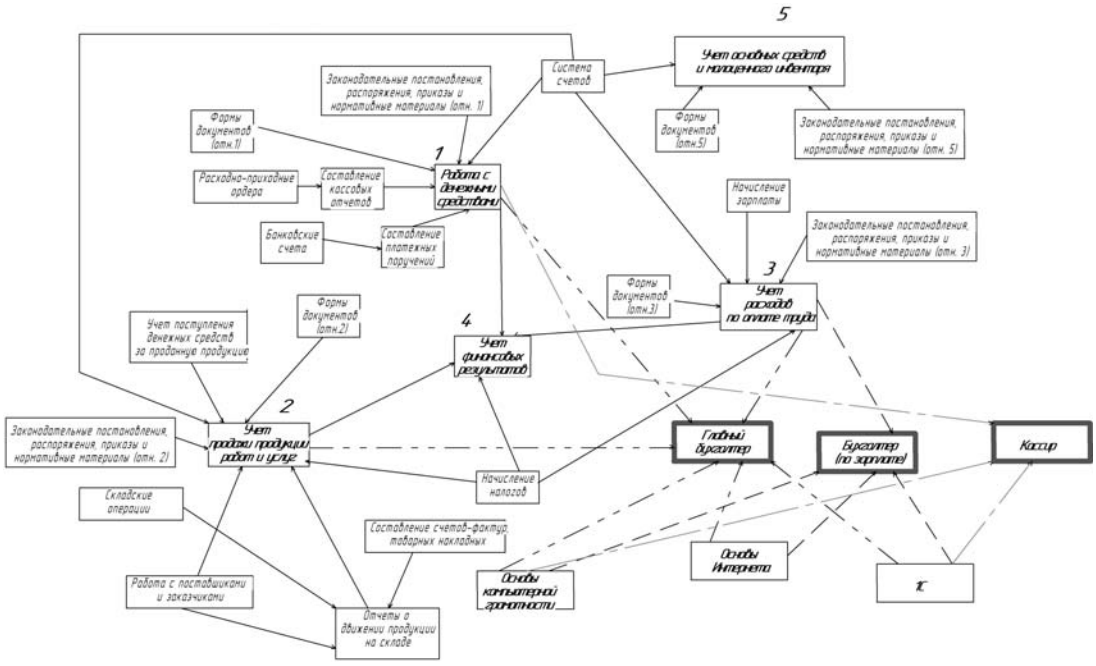


Рисунок 1 – Фрагмент орграфа профессиональных знаний сотрудников бухгалтерии

3 Оценка целесообразности кадровых перестановок

Оценка целесообразности кадровой перестановки может быть осуществлена на основе построения следующей схемы (рисунок 2), в которой, во-первых, представлены факторы, влияющие на оценку кадровой перестановки (в данном случае, это опыт работы на предыдущей должности, а также оценка соответствия сотрудника должности, на которую он претендует); во-вторых, представлена возможная «преемственность» должностей (в данном случае, на Должность 2 могут претендовать сотрудники с Должностью 1, на Должность 3 – сотрудники с Должностью1 и 2). Оценка соответствия личностных характеристик сотрудника должности может быть проведена на основе нечетких оценок, как показано в [6].

Оценку каждого влияния (связи) предлагается проводить на основе механизма, реализуемого в нечетких продукционных когнитивных картах. Таким образом, каждая связь представляется набором нечетких правил, несколько связей впоследствии аккумулируются на основе

операции FCA или нечеткого алгебраического сложения. Оценка целесообразности кадровой перестановки может принимать значения из отрезка [–1; 1].

В случае одного звена кадровой перестановки наиболее целесообразной является перестановка с максимальной оценкой. В случае нескольких звеньев кадровой перестановки с максимальной суммарной оценкой всех звеньев.

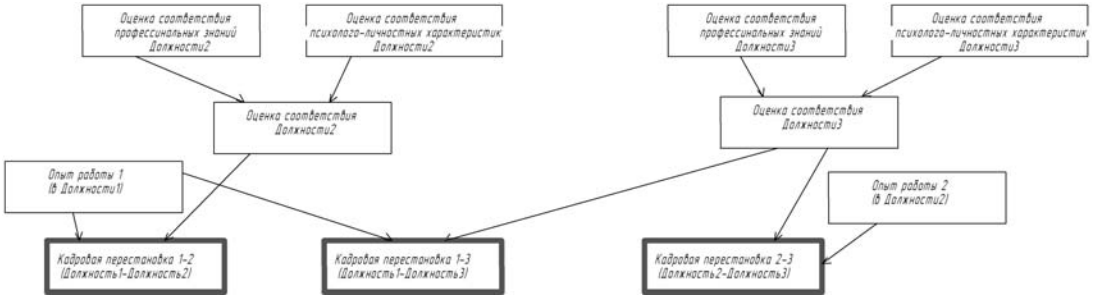


Рисунок 2 – Схема оценки кадровых перестановок

Заключение

Использование механизма нечетких продукционных карт при оценке кадровых перестановок значительно упрощает работу эксперта и позволяет избежать случайных ошибок, обеспечивает согласованность мнений эксперта.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-08-00311).

Список литературы

[1] Асанов А.З. Когнитивное моделирование в задаче оценки соответствия соискателя вакансий квалификационным требованиям / А.З. Асанов, И.Ю. Мышкина // Вестник компьютерных и информационных технологий. −М., 2012. – №12. – С. 29-34.

[2] Борисов В.В. Обобщенные нечеткие когнитивные карты / В.В. Борисов, А.С. Федулов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, № 4, 2004. – С. 3–20.

[3] Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007.

[4] Carvalho J.P., Tome J.A. Rule-based fuzzy cognitive maps and fuzzy cognitive maps – a comparative study // In Proc. of the 18th International Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society. NAFIPS'99: New York, 1999. P.115-119.

[5] Carvalho, J.P., and Jose A.B. Tomè. Fuzzy Mechanisms for Causal Relations. In Proceedings of the 8th International Fuzzy Systems Association World Congress, IFSA '99, Taiwan.

[6] Асанов А.З. Оценка соответствия специалиста требованиям работодателя на основе нечетких вычислений / А.З. Асанов, И.Ю. Мышкина // Вестник компьютерных и информационных технологий. −М., 2010. – №11. – С. 23-32.

[7] Асанов А.З. Когнитивное моделирование при оценке сотрудников предприятий / А.З. Асанов, И.Ю. Мышкина // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XIV международной конференции (2012г., Самара). – Самара : Самарский НЦ РАН, 2012. – С. 256−260.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ РЕАЛИЗАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОГРАММНОМУ ПРОДУКТУ ПО КРИТЕРИЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В.Е. Гвоздев, Н.И. Ровнейко

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. Карла Маркса, 12, Россия
office@ugatu.su
тел: +7 (347) 272-63-07, факс: +7 (347) 272-29-18

Ключевые слова: *программный продукт, требования, анализ требований, выбор альтернативы, формирование требований*

Abstract
This article describes an approach to the analysis of alternatives to the software requirements by uncertainty. The offered approach is based on processes representation of requirements formation in the form of consecutive components. Each components is associated with the own law of a continuous random variable.

Введение

В настоящее время программные компоненты являются неотъемлемой составляющей сложных организационно-технических систем. Рост сложности организационно-технических систем и обусловленное этим увеличение тяжести последствий ошибок управления; постоянный рост требований к результативности и эффективности функционирования информационной системы со стороны системы управления бизнес-процессами вынуждает выделить в качестве самостоятельной проблему повышения качества управления программными проектами.

Каждый программный проект является уникальным [1], причем, в особенности на начальной стадии проекта, когда принимаются решения относительно стратегии реализации программного продукта, имеет место большая неопределенность внешнего облика программного продукта, а также относительно внешней и внутренней сред проекта [2]. Это находит отражение в виде известной системной модели – «конус неопределенности». Одним из эффективных способов информационной поддержки принятия решений относительно альтернативных вариантов внешнего облика программного продукта и, вытекающего из этого, подхода к организации программного проекта, является привлечение экспертов [2].

При вынесении заключений каждый из экспертов опирается на свои персональные знания [3]. Их оценки относительно объемов ресурсов, необходимых для реализации проекта, обеспечивающего получение программного продукта, обладающего заданными характеристиками, являются различными.

1 Оценивание реалистичности требований к программному проекту

Реалистичность является одним из базовых признаков требований [4]. Реалистичность требований напрямую связана с их неопределенностью: чем выше неопределенность, тем больше риск проекта, тем ниже реалистичность требований. Реалистичность требований непосредственно связано с подходами к их реализации.

Выбор рациональной структуры работ из множества альтернативных вариантов является основой обеспечения высокой эффективности и продуктивности внутренних бизнес-

процессов, связанных с получением программного продукта требуемого качества. Известным приемом сравнения альтернативных вариантов структур работ является «метод критического пути» [1]. В этом случае критерием сравнения альтернативных вариантов является суммарные затраты ресурсов, необходимых для выполнения работ, расположенных на самом длинном пути графа работ (в общем случае с учетом ограничений деятельности). Отметим, что в различных литературных источниках, посвященных вопросам управления программными проектами [1, 5 и др.], обосновывается целесообразность использования времени в качестве косвенной интегральной характеристики ресурсов, необходимых для выполнения различных по сложности и объему работ.

В основе сравнения альтернативных структур работ по методу критического пути лежит предложение о независимом характере ресурсов, необходимых для реализации разных работ. При этом интегральной статистической характеристикой необходимых для выполнения отдельной работы ресурсов является значение математического ожидания ресурса. Границы диапазона, в котором может изменяться величина ресурса, при этом не принимается во внимание.

Рассмотрим пример использования сетевых графиков работ применительно к задаче оценивания реалистичности требований к программному продукту.

Постановка задачи имеет следующий вид:

Дано: Структура работ, которые необходимо выполнить для реализации требований на некоторой стадии программного проекта. Каждую из работ можно выполнить различными способами, что, соответственно, требует разных затрат ресурсов. Эксперт дает оценки ресурсов, необходимых для выполнения каждой из работ, в виде наиболее вероятного времени выполнения работ и/или временного интервала, в течение которого работа может быть выполнена.

Требуется: Вынести заключение о том, какой из предлагаемых способов выполнения работ является более реалистичным.

На рисунке1 в качестве примера представлена структурная модель процесса формирования требований к ресурсам программного проекта.

Предложенная модель служит основой построения семантической модели требований, представленной на рисунке 2. Семантическая модель, в свою очередь, служит основой построения сетевого графика работ, показанного на рисунке 3. На этом рисунке связям (дуги графа) между состояниями требований (вершины графа) ставятся в соответствие затраты ресурсов (например, время, необходимое для сбора информации об аналогичных разработках и оценки риска операции). Пунктирной линией указана ограниченная деятельность [1].

Рисунок 1 – Структура процесса формирования требований к ресурсам программного проекта

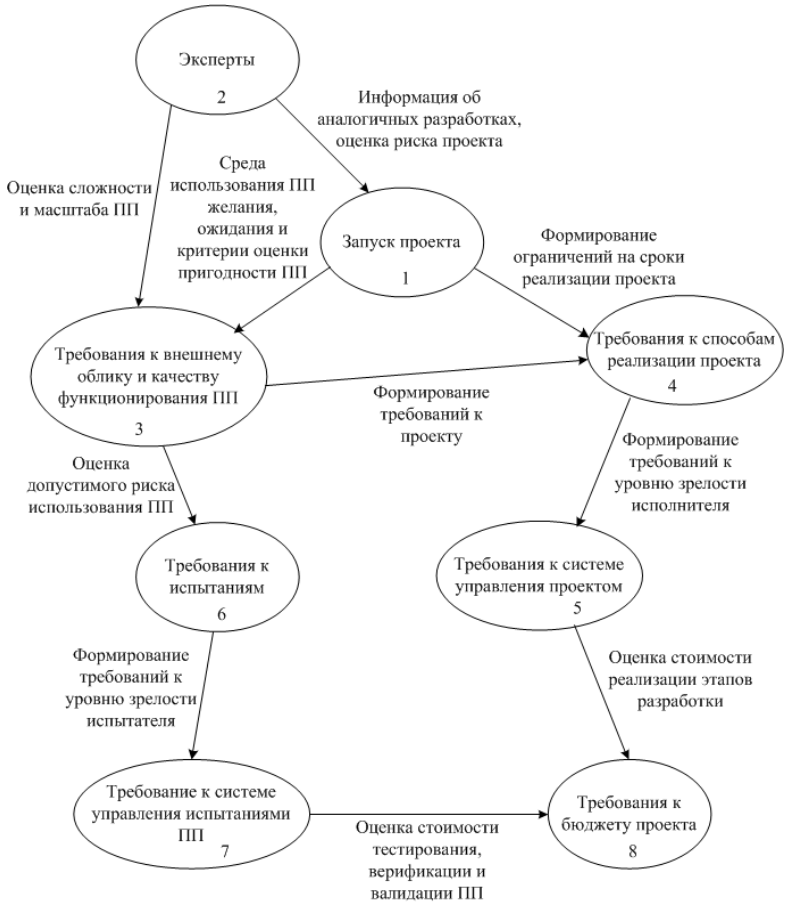


Рисунок 2 – Семантическая модель формирования требований к проекту на ранней стадии его реализации (ПП – программный продукт)

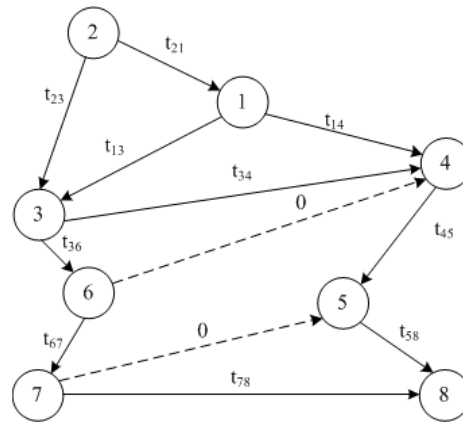


Рисунок 3 – Сетевой график процедуры формирования требований
(----- – ограничение деятельности; t_{ij} – время, необходимое для перехода из узла i в узел j)

Выше подчеркивалась связь неопределенности проекта с риском проекта. Таким образом, анализ реалистичности требований, которым поставлен в соответствие сетевой график работ, может быть сведен к сравнительному анализу неопределенностей (иными словами – рисков), соответствующих разным вариантам реализации работ. Считается, что более реалистичными являются требования, соответствующие тем способам реализации работ, которым соответствует меньшая неопределенность.

Покажем, во-первых, что сравнение структур по значению критического пути является частным случаем сравнения структур по критерию неопределенности в случае, когда в качестве меры неопределенности выступает мера Шеннона.

В [6, 7 и др.] показано, что при оценивании функции распределения непрерывной случайной величины при $X \in [0;\infty)$ по значению первого момента на основе принципа максимизации энтропии, оптимальной оценкой является показательный закон распределения. Таким образом, когда дугам сетевого графа работ ставятся в соответствие значения математического ожидания времени выполнения работ, это эквивалентно тому, что каждой дуге ставится в соответствие показательный закон распределения. Параметр λ_i этого закона связан с оценкой математического ожидания M_i известным соотношением $\lambda_i=1/M_i$. Здесь i – идентификатор дуги графа. Иными словами, каждой i-ой дуге графа ставится в соответствие оценка неопределенности вида (1).

(1) $H_i=1-\ln(\lambda_i)=\ln(e/\lambda_i)=\ln(eM_i)$.

Соотношение (1) без труда может быть получено из известного соотношения (2) для случая, когда $f_i(x)=\lambda_i e^{-\lambda_i x}$.

(2) $H_i = -\int_0^{\infty} f_i(x)\ln(f_i(x))dx$.

Предполагая независимым характер времени выполнения разных работ, k-му пути в графе соответствует неопределенность вида $H_k = \sum H_i = \sum_i \ln(eM_i)$, где суммирование введется по дугам, входящим в k-ый путь (в том числе и по дугам, лежащим на критическом пути). С другой стороны, k-му пути графа можно поставить в соответствие значение $D_k = \sum_i M_i$. Очевидно, что преобразование вида $H_i=ln(eM_i)$ сохраняет соотношение порядка между путями в графе работ, т.е. из $D_1 \geq D_2 \geq ... \geq D_r$ следует, что $H_1 \geq H_2 \geq ... \geq H_r$, и наоборот из $H_1 \geq H_2 \geq ... \geq H_r$ вытекает неравенство $D_1 \geq D_2 \geq ... \geq D_r$.

Отсюда можно заключить, что критическому пути, определяемому как $D_{кр} = \max_{1 \leq k \leq r}\{D_k\}$ соответствует $H_{кр} = \max_{1 \leq k \leq r}\{H_k\}$.

Иными словами, сравнение сетевых графиков по критическому пути дает те же результаты, что и сравнение по признаку максимальной неопределенности в случае, когда дуги графа взвешены значениями среднего времени выполнения работ.

2 Сравнительный анализ альтернативных вариантов реализации требований к программному продукту

Предположим теперь, что каждой дуге графа соответствует одна из типовых экспертных оценок, рассмотренных в [8]. Другими словами, каждой дуге графа можно поставить в соответствие закон распределения непрерывной случайной величины.

В таблице 1 в качестве примера заданы атрибуты, соответствующие разным дугам графа (рисунок 4). В качестве оценок эксперта выступают оценки математического ожидания и границы диапазона завершения действия в выбранных единицах времени.

Таблица 1 – Взаимосвязь работ и их затрат ресурсов

Действие	Оценка эксперта при первом способе выполнения работ	Оценка эксперта при втором способе выполнения работ	Может быть завершено только после действия
*d*21	*M*=6	(0;7]	-
*d*23	(0;7]	(0;5]	-
*d*13	*M*=5	*M*=5	*d*21
*d*14	(0;5]	(0;5]	*d*21
*d*34	(0;5]	*M*=6	*d*13 & *d*23
*d*36	{*M*=4, (0;5]}	(0;4]	*d*13 & *d*23
*d*45	(0;4]	(0;8]	*d*14 & *d*34 & *d*36
*d*58	(0;8]	{*M*=4, (0;5]}	*d*45 & *d*67
*d*67	{*M*=4, (0;5]}	*M*=7	*d*36
*d*78	*M*=7	{*M*=4, (0;5]}	*d*67

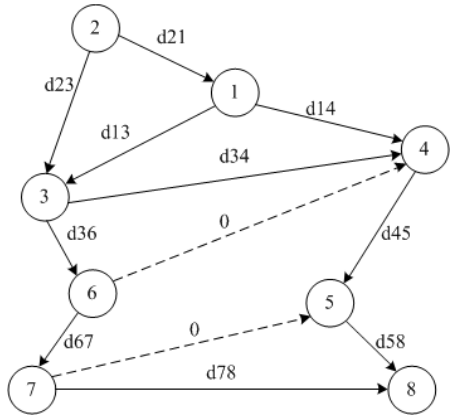


Рисунок 4 – Сетевой график процедуры формирования требований

Здесь *M* – оценка ожидаемого времени выполнения работы (оценка математического ожидания); (*a, b*] – интервальная оценка (верхние границы диапазона времени завершения работы); {*M,*(*a, b*]} – оценка, содержащая ожидаемое время завершения работы, а также предполагаемые границы интервала, в пределах которого может изменяться оценка. Подробно упоминаемые типы оценок обсуждаются в [8].

Для оценки меры неопределенности, соответствующей графу, представленному на рисунке 4, используем следующий алгоритм:

Шаг 1. Выделяются всевозможные пути графа. В рассматриваемом случае можно выделить следующие пути: а) 2 → 1 → 4 → 5 → 8; б) 2 → 1→ 3 → 4 → 5 → 8; в) 2 → 1 → 3 → 6 → 7 → 8; г) 2 → 3 → 4 → 5 → 8; д) 2 → 3 → 6 → 7 → 8.

Шаг 2. Для каждой дуги графа методом обратных функций [9] генерируется случайная величина, соответствующая одному из типовых законов распределения [8].

Шаг 3. Исходя из полученного на шаге 2 результата рассчитываются затраты ресурсов на каждом пути графа и выделяется критический.

Шаг 4. Шаги 2 и 3 повторяются многократно (например 10000 раз).

Шаг 5. Для каждого пути подсчитывается частота выделения в качестве пути, которому соответствует наибольшая неопределенность.

В таблице 2 представлен фрагмент результатов моделирования, полученных на основе оценок эксперта при первом возможном способе выполнения работ.

Таблица 2 – Фрагмент имитационного моделирования, полученных на основе оценок эксперта при первом возможном способе выполнения работ

Значения ресурса, соответствующего пути в графе				
2-1-4-5-8	**2-1-3-4-5-8**	**2-1-3-6-7-8**	**2-3-4-5-8**	**2-3-6-7-8**
55,070	**61,687**	34,411	48,992	21,716
45,135	**50,430**	27,534	41,208	18,313
28,385	29,359	2,532	**39,917**	7,811
41,405	**46,197**	24,919	38,339	17,061
25,347	28,840	9,081	**31,029**	10,176
24,643	**29,029**	11,705	28,050	11,216
81,614	**91,682**	52,355	70,467	31,139
66,832	**74,991**	42,424	58,411	25,844
26,427	28,872	6,357	**34,456**	9,149
85,738	**96,335**	55,105	73,862	32,632
26,643	28,903	5,877	**35,099**	8,974
65,767	**73,787**	41,703	57,551	25,467
77,711	**87,277**	49,744	67,264	29,732
29,192	29,659	1,213	**41,994**	7,381
46,092	**51,516**	28,202	41,950	18,637
36,617	**40,757**	21,529	34,707	15,479
84,680	**95,142**	54,400	72,990	32,249
…	…	…	…	…
21,643	24,903	15,877	**31,059**	18,924
31,417	**38,757**	20,579	31,737	12,379
64,680	**93,122**	56,420	72,980	31,229
0,00	**0,75**	0,00	**0,25**	0,00

Используя известную формулу меры неопределенности Шеннона, рассчитаем меру неопределенности, соответствующих оценкам эксперта при разных способах выполнения работ. Первому возможному способу соответствует мера неопределенности, равная S_1=0,56; второму – S_2=0,65. Таким образом, в силу того, что первому способу выполнения работ соответствует меньшая неопределенность, можно предположить, что с точки зрения конкретного эксперта он является более реалистичным, нежели второй.

Ограниченностью описанной схемы является то, что, во-первых, невозможно формально определить границы, когда виды деятельности, отнесенные к дугам графа, можно считать независимыми. В своей основе это обусловлено неопределенностью понятий «сложная программная система» и «масштаб программного продукта». Во-вторых, не определены доверительные границы, в которых расхождения в оценках неопределенности следует признавать несущественными с выбранной доверительной вероятностью. Тем не менее, даже недостаточно строгие, субъективные оценки создают предпосылки для более глубокого анализа факторов неопределенности, а также оценки затрат ресурсов для ее уменьшения.

В случае привлечения для оценивания альтернативных вариантов организации работ различных экспертов, результаты оценивания сводятся в таблицу вида 3 (r_{ij} – ранг j-ой альтернативы по оценке i-го эксперта).

Таблица 3 – Ранжирование альтернативных вариантов реализации работ по оценкам разных экспертов

		Альтернативные варианты реализации работ/сетевых графиков работ			
		A_1	A_2	…	A_M
Эксперты	$Э_1$	r_{11}	r_{12}	...	r_{1M}
	$Э_2$	r_{21}	r_{22}	...	r_{2M}
	…	...	...	...	
	$Э_N$	r_{N1}	r_{N2}	...	r_{NM}
Средние ранги		R_1	R_2	...	R_M

В последующем, по оценкам r_{ij} ($i = \overline{1;N}$, $j = \overline{1;M}$) можно рассчитать средние ранги R_j разных альтернатив, которые рассматриваются как интегральные (т.е. полученные на основе мнений разных экспертов) оценки альтернативных вариантов реализации работ.

Заключение

Необходимость обеспечения реалистичности требований к программным проектам и программным продуктам являются базовыми требованиями, создающими предпосылки успешной реализации проекта. Такой вывод обусловлен тем, что в реализацию проекта вынуждено вовлекается множество разноплановых специалистов-правообладателей, так как все особенности проекта не могут быть учтены одним человеком, что, согласно [10], является одним из характерных признаков сложной системы.

Использование критерия неопределенности делает возможным сопоставление характеристик требований, относящихся к процессам и явлениям разной природы, а также разработать формализованную процедуру анализа реалистичности требований.

Работа выполнена в рамках работ, поддержанных грантом РФФИ 13-08-00968.

Список литературы

[1] Бэгьюли Ф. Управление проектом. – Пер. с англ. В. Петрашек – М.: ФАИР ПРЕСС, 2002. – 208с.
[2] Макконнелл С. Сколько стоит программный проект. – СПб.: Питер, 2007. – 297с.
[3] Виттих В.А. Организация сложных систем //Самара: Самарский научный центр РАН, 2010. – 66с.
[4] IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications IEEE STD 830-1998, June 1998.
[5] Липаев В.В. Документирование и управление конфигурацией программных средств. – М.: СИНТЕГ, 1998. – 212 с.
[6] Трайбус М. Термостатика и термодинамика. М.: Энергия, 1970. 504с.
[7] Каган А. М., Линник Ю. В., Рао С. Р. Характеризационные задачи математической статистики. М.: Наука, 1972. 656с.
[8] Гвоздев В.Е., Мукасеева В.Н., Ровнейко Н.И. Научный журнал Уфимского авиационного технического университета «Вестник УГАТУ», 2012.
[9] Соболь И.М. Численные методы Монте-Карло. – М.: Наука, 1973. – 311с.
[10] Давыдов М.Г., Лисичкин В. А. Этюды о прогностике. – М.: Знание, 1977. – 96с.

OPTIMAL CONTROL IN AEROSPACE SYSTEMS

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

ВЕКТОРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СЛОЖНОЙ ТРЕХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ФОРМЕ РАВНОВЕСНО-АРБИТРАЖНОГО КОМПРОМИССА

Е.М. Воронов[1], В.А. Ефремов[2], С.И. Сычев[2], К. Любавский[1], М. Тихонов[1]

[1]Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана
107005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, Россия
emvoronov@mail.ru
тел: +7(903)209-05-66, 8(499)263-63-23

[2]ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»
141075, Московская область, г. Королёв, ул. Ильича, 7

Ключевые слова: *системы управления, стабилизация, летательный аппарат, векторная оптимизация, иерархия*

Abstract

In this paper the application of the theory of multi-criteria optimization in multisite systems in terms of structural inconsistency in the example of parametric synthesis of three-channel stabilization system with the cross-linking of channels statically stable aircraft normal aerodynamic scheme was considered. The object under study is a three-channel system of stabilization (stabilization of the angular velocity of pitch, yaw and roll) statically stable aircraft normal aerodynamic scheme. In this work a three-step algorithm Pao-Nash optimization was applied.

Введение

Актуальность задачи заключается в том, что с ростом информационной и структурно-целевой сложности функционирования и проектирования систем автоматического управления проявляющейся в их многообъектности (или многоканальности, многосвязности) и многокритериальности, существенным становится учёт факторов несогласованности, конфликтности и неопределённости различного характера, который может быть осуществлён с использованием комбинированных подходов теории игр и классической теории управления. Данное комбинирование составляет основу теории оптимизации управления многообъектных многокритериальных систем (ММС) [1]. Методы этой теории применяются для векторной оптимизации структурно-сложных систем, в которых, кроме получения векторно-оптимального управления, требуется обеспечить межобъектную устойчивость или балансировку подсистем в

структуре по эффективности или потерям. Методы данной теории имеют особую значимость для трёх классов задач управления структурно-сложными системами:

- задачи управления в условиях исходной структурной несогласованности;
- задачи управления в условиях конфликтной ситуации;
- задачи управления в условиях неопределённости (среды, «активного партнёра», цели).

Векторная оптимизация сложной трехканальной системы стабилизации летательного аппарата в форме равновесно-арбитражного компромисса

В данной работе рассматривается применение методов теории оптимизации в ММС в условиях структурной несогласованности на примере параметрического синтеза трёхканальной системы стабилизации (ССт) с учётом перекрёстных связей каналов статически устойчивого летательного аппарата (ЛА) нормальной аэродинамической схемы.

Рассматриваемая задача относится к первому классу задач управления – задачам в условиях исходной структурной несогласованности из-за взаимосвязи каналов ССт.

Исследуемым объектом является трёхканальная система стабилизации (стабилизация угловых скоростей тангажа, рыскания и крена) статически устойчивого летательного аппарата нормальной аэродинамической схемы.

Требуется рассчитать параметры измерителей автомата стабилизации для обеспечения основных требований к ССт. Основными требованиями к ССт в каждом канале являются: устойчивость, демпфирование колебаний, требуемая статическая точность, требуемое время переходного процесса.

Существуют хорошо отработанные методы классической теории регулирования, применяемые для синтеза систем стабилизации, например, метод стандартных коэффициентов, частотный метод. Однако, в силу сложности динамического описания системы стабилизации (как известно, уравнения движения ЛА представляют собой систему дифференциальных уравнений 14 порядка [2]) все эти методы применяют для расчёта лишь для каждого канала ССт, получаемого путём принятия целого ряда упрощений (линеаризация уравнений, разделение движения на поперечное и боковое, вращательное и поступательное). А затем с помощью имитационного моделирования осуществляют «донастройку» параметров с учётом всех отброшенных в ходе упрощения факторов, балансировки каналов и повышения эффективности по указанным требованиям.

В качестве замены «рутинных» процессов перенастройки параметров с помощью имитационного моделирования можно предложить использование методов теории оптимизации управления и регулирования ММС.

Использование методов теории ММС позволяет определить равновесное решение, которое уравновешивает (балансирует) по многокритериальной эффективности, а на основе этой равновесной точки найти самую близкую к равновесной точку области Парето (области многокритериально-оптимальных решений), и получить стабильно-эффективный (равновесно-эффективный) компромисс (СТЭК). Таким образом, методы теории оптимизации ММС реализуют своё назначение и практическую ценность в структурно-сложных системах, к которым относится трёхканальная ССт с перекрёстными связями. Поэтому трёхканальная система стабилизации ЛА представляет собой типичную многообъектную (многоканальную) многокритериальную систему в условиях исходной структурной несогласованности.

Полная математическая модель трёхканальной системы стабилизации АСП СР, представлена ниже на рисунке 1, где:

- $W_{\delta_в}^{\dot{\vartheta}}(p)$, $W_{\delta_н}^{\dot{\psi}}(p)$, $W_{\delta}^{\gamma}(p)$ - передаточные функции ЛА по скорости углов тангажа, рыскания и углу крена соответственно от углов поворота рулей по высоте, направлению и крену;

- $W_{\text{дус}}(p)$ – передаточная функция датчика угловой скорости (дифференцирующего гироскопа) в каналах тангажа, рыскания и крена соответственно;

- Бл. 1, 2, 3 – блоки для обеспечения свойств устойчивости, качества элементов адаптации во внешних контурах по перегрузкам (1, 2) и углу крена (3);

- РП – блоки соответствующих рулевых приводов, содержащих нелинейные свойства из-за люфта редуктора и сухого трения;

- a_{15}, b_{15}, c_{15}, a_{13}, b_{13}, c_{13} – некоторые аэродинамические коэффициенты ЛА;

- $M_{z\text{вз}}$, $M_{y\text{вз}}$, $M_{x\text{вз}}$, $n_{\text{зад}1}$, $n_{\text{зад}2}$ и т.д. - возмущающие моменты, управляющие перегрузки;

- $K_{\text{ЦДН}\vartheta}$, $K_{\text{ЦДН}\psi}$, $K_{\text{ЦДН}\gamma}$ – коэффициенты цифровых делителей напряжения (ЦДН) в каждом канале, оптимизируемые параметры трехканальной ССт.

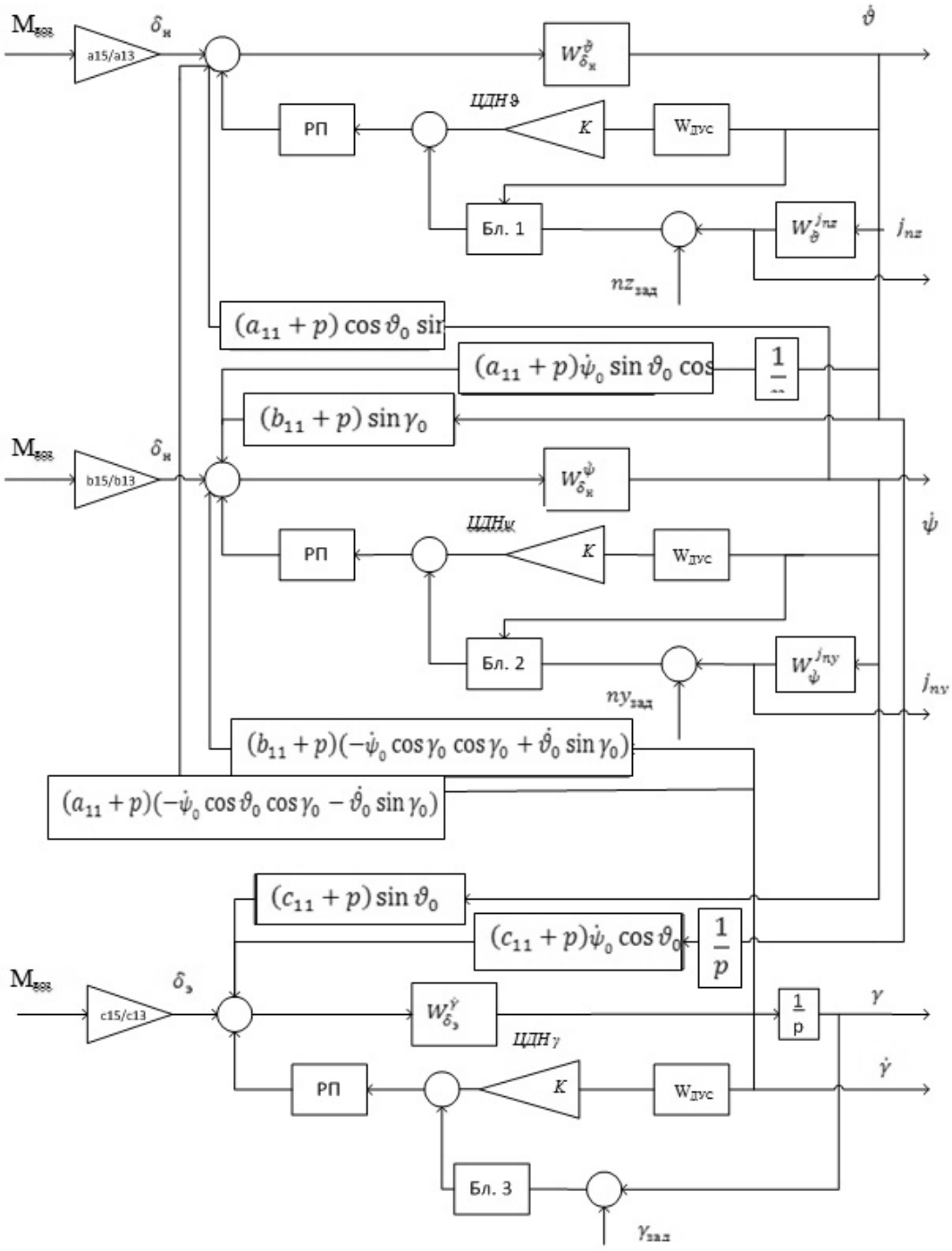


Рисунок 1 - Структурная схема трёхканальной системы стабилизации с перекрёстными связями

При анализе линеаризованной ССт по возмущающим моментам рассматривается задача многокритериальной параметрической оптимизации на пространстве состояний для обеспечения устойчивости, качества (по перерегулированию), статической ошибки и быстродействию при ступенчатом воздействии возмущающих моментов.

В каждом канале формируются показатели по статической точности, колебательности, быстродействию и устойчивости в виде квадратических «невязок». Критериями является минимизация данных «невязок».

Показатели статической точности по статической ошибке в каналах:

$$
\begin{aligned}
J_{1\vartheta} &= (\varepsilon_{ст\,\vartheta} - \varepsilon_{ст\ треб\,\vartheta})^2 \\
J_{1\psi} &= (\varepsilon_{ст\psi} - \varepsilon_{ст\ треб\psi})^2 \\
J_{1\gamma} &= (\varepsilon_{ст\gamma} - \varepsilon_{ст\ треб\,\gamma})^2
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

Показатели колебательности, с перерегулированием по нормальному ускорению в каждом канале:

$$
\begin{aligned}
J_{2\vartheta} &= (\sigma_{jн\,y} - \sigma_{треб\ jн\,y})^2 \\
J_{2\psi} &= (\sigma_{jн\,z} - \sigma_{треб\ jн\,z})^2 \\
J_{2\gamma} &= (\sigma_{jн\,x} - \sigma_{треб\ jн\,x})^2
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

Показатели быстродействия со временем переходного процесса:

$$
\begin{aligned}
J_{3\vartheta} &= \left(t_{n\vartheta} - t_{n\ треб\,\vartheta}\right)^2 \\
J_{3\psi} &= \left(t_{n\psi} - t_{n\ треб\,\psi}\right)^2 \\
J_{3\gamma} &= \left(t_{n\gamma} - t_{n\ треб\,\gamma}\right)^2
\end{aligned}
\qquad (3)
$$

Показатели устойчивости в каналах по требуемым коэффициентам усиления, с предварительным расчетом.

$$
\begin{aligned}
J_{3\vartheta} &= \left(K_{n\vartheta} - K_{n\ треб\,\vartheta}\right)^2 \\
J_{3\psi} &= \left(K_{n\psi} - K_{n\ треб\,\psi}\right)^2 \\
J_{3\gamma} &= \left(K_{n\gamma} - K_{n\ треб\,\gamma}\right)^2
\end{aligned}
\qquad (4)
$$

В дальнейшем в качестве критерия оптимизации будем использовать свёртку показателей качества для каждого канала, определяемых выражениями (1-4)

(5) $$J = \begin{bmatrix} J_\vartheta \\ J_\psi \\ J_\gamma \end{bmatrix},$$

где каждый компонент вектора определяется как сумма нормированных критериев с весовыми коэффициентами.

В рассматриваемой прикладной задаче имеют место условия исходной структурной несогласованности, когда каналы стабилизации при наличии перекрёстных связей необходимо бескоалиционно сбалансировать $J_i\,(i=1,2,3)$, где 1, 2, 3 – переобозначения из (5), а затем результат спроецировать на основе арбитражного метода в точку Парето-границы множества значений отображения $J(Q)$ (предельной эффективности ММС – трёхканальной ССт), наиболее близкую к сбалансированной точке уравновешивания $J^r = \left(J_1^r, J_2^r, J_3^r\right)$, где r – индекс равновесия.

Таким образом, предлагается взять за основу метода оптимизации метод получения обобщенного компромисса на основе последовательного применения бескоалиционного и кооперативного «взаимодействия» каналов ССт.

При бескоалиционном взаимодействии основным принципом оптимальности (стабильности) является равновесие по Нэшу [1].

Определение 1. Набор решений $\mathbf{q}^r = \left(\mathbf{q}^{r,1},...,\mathbf{q}^{r,m_k}\right)$ является равновесным по Нэшу относительно скалярного показателя $\Phi_i^c = \sum_{j\in K_i} \lambda_j^i J_j^i$, который является функцией эффективности коалиции K_i, если для любого $\mathbf{q}^i \in Q_i, i \in M_K = (1,2,...,m_k)$, $\Phi_i^c\left(\mathbf{q}^r \middle\| \mathbf{q}^i\right) \le \Phi_i^c\left(\mathbf{q}^r\right)$, где $\left(\mathbf{q}^r \parallel \mathbf{q}^i\right) = \left\{\mathbf{q}^{r,1},...,\mathbf{q}^{r,i-1},\mathbf{q}^i,\mathbf{q}^{r,i+1},...,\mathbf{q}^{r,m_k}\right\}$. Здесь M_K – множество коалиций. В прикладной задаче каждая «коалиция» состоит из одного канала ССт и $m_k = 3$.

Для трёхканальной ССт определение равновесия превращается в следующую систему неравенств при $\mathbf{q}^i = Q_i$

(6) $$\begin{cases} J^1\left(q^1, q^{r2}, q^{r3}\right) \le J^1\left(q^{r1}, q^{r2}, q^{r3}\right) \\ J^2\left(q^{r1}, q^2, q^{r3}\right) \le J^2\left(q^{r1}, q^{r2}, q^{r3}\right) \\ J^3\left(q^{r1}, q^{r2}, q^3\right) \le J^2\left(q^{r1}, q^{r2}, q^{r3}\right) \end{cases}$$

Определение 1 имеет простой практический смысл активной межканальной устойчивости по эффективности: тот канал, в котором параметры отклонились от равновесия, «теряет» в эффективности.

Простейшим необходимым условием (6) является система равенств:

$$(7) \qquad \begin{cases} \dfrac{\partial J^1\left(q^1, q^{r2}, q^{r3}\right)}{\partial q^1} = 0 \\ \dfrac{\partial J^2\left(q^{r1}, q^2, q^{r3}\right)}{\partial q^2} = 0 \\ \dfrac{\partial J^3\left(q^{r1}, q^{r2}, q^3\right)}{\partial q^3} = 0 \end{cases}$$

В данной работе применен трёхэтапный алгоритм Пао-Нэш оптимизации [1].

Определение 2. Пусть множество индексов $M_K = \{1\}$, $K = K_{\text{ММС}}$, $J^r = \left(J^1, ..., J^m\right)$ – вектор эффективности ММС, где J_i – скалярные показатели ММС. Вектор $\mathbf{q}^0 \in Q$ оптимален по Парето, если из условия $\mathbf{q} \in Q$, $J(q) \geq J(q^0)$ следует либо равенство $J(q) = J(q^0)$, либо система неравенств несовместима и хотя бы одно из неравенств – противоположного смысла.

Для трёхканальной ССт условия общего «кооперативного» анализа трёхканальной ММС формируются на основе проецирования решений на множество Парето-оптимальных решений.

Это выполняется на основе арбитражной схемы Нэша

$$(8) \qquad \Phi_A = \left[J^1(q) - J^{r1}(q^r)\right]\left[J^2(q) - J^{r2}(q^r)\right]\left[J^3(q) - J^{r3}(q^r)\right] \to \min_q$$

при условиях $J^i(q) \leq J^{ri}(q^r), i = 1,2,3$. Эта схема даёт результат в точке области Парето, наиболее близкой к точке балансировки ММС. В результате формируется следующая трехэтапная алгоритмическая структура обобщенного СТЭК в задаче оптимизации многоканальной системы ССт с перекрёстными связями с обеспечением балансировки и предельной эффективности:

- 1 этап - получение параметров системы стабилизации в каждом канале ССт (начальные приближения для равновесно-арбитражной оптимизации каналов ССт);
- 2 этап - нахождение балансировочного параметрического решения ССт на основе равновесия по Нэшу;

- 3 этап - Парето-оптимизация параметрического решения ССт на основе арбитражной схемы Нэша.

Пример

Для расчёта параметров полной трёхканальной модели с равноценным учетом качества канала крена были использованы значения параметров перекрёстных связей для опорной траектории с выраженным влиянием на работу модели: $_0 = 10°$; $\delta_0 = 10°$; $\psi_0 = _0$; $\delta\psi_0 = \delta_0$; $\gamma_0 = 15°$. На рисунке 2 изображена трёхмерная область показателей критериев оптимизации каналов крена, тангажа и рыскания.

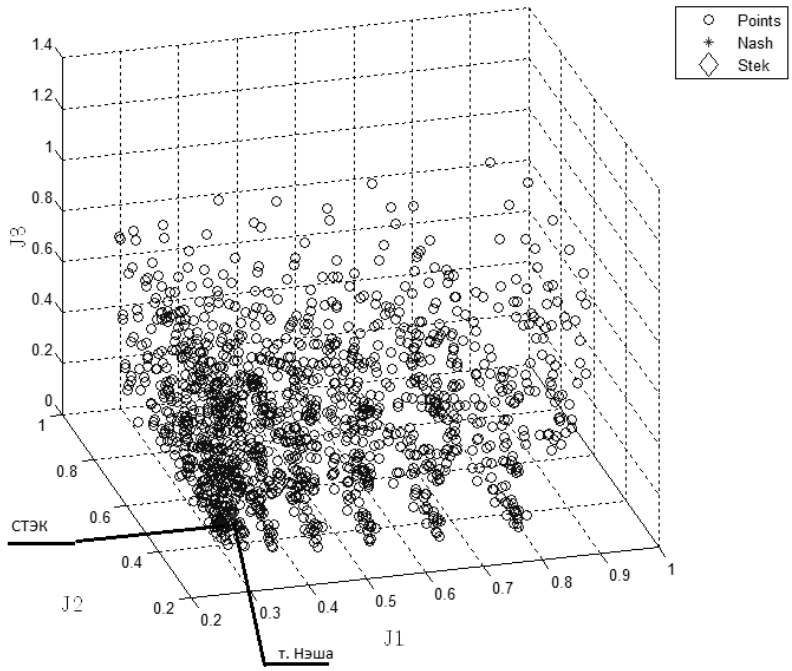


Рисунок 2 - Область значений критериев оптимизации трёхканальной ССт

Значения минимизируемых критериев:

- в точке Нэша - $J_\vartheta = 0.2663$; $J_\psi = 0.2640$; $J_\gamma = 0.2125$.
- в точке СТЭК (арбитражная схема Нэша) - $J_\vartheta = 0{,}2515$; $J_\psi = 0{,}2325$; $J_\gamma = 0{,}1984$.

При значениях оптимальных параметров имеем

$$К_{ЦДН\vartheta} = 0.5457;\ К_{ЦДН\psi} = 0.4789;\ К_{ЦДН\gamma} = 0.1786$$

Список литературы

[1] Воронов Е.М. Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных компромиссов. - М.: МВТУ, 2001. – 576 с.

[2] Кузовков Н.Т. Системы стабилизации летательных аппаратов. - М.: Высшая школа 1976. – 304 с.

[3] Воронов Е.М., Мелехина Ю.В., Веселовская О.А., Мусин Е.Р. Равновесно-арбитражная многокритериальная балансировка каналов в многосвязном регулировании и управлении // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, серия «Приборостроение». - 2007. - №4. – с. 99-119.

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ В ДВУХУРОВНЕВОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ СТАБИЛИЗАЦИИ-НАВЕДЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А.В. Ванин, Е.М. Воронов, А.А. Карпунин

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
107005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, Россия
mole@list.ru
тел: +7(926)940-16-05

Ключевые слова: *системы управления, стабилизация, наведение, летательный аппарат, оптимизация, иерархия*

Abstract

A definition of a generalized control of multilevel automated aircraft control system was given in this work. A concept of generalized control of hierarchical control system of the aircraft was formulated. Also a method of optimization based on the generalization and algorithmic hierarchical balance in multilevel system was developed in this study. An algorithm for hierarchical control optimization in two-level automation system was proposed. In this paper the application of the theory of multi-criteria optimization in multi-object systems under conditions of the structural inconsistencies on the example of parametric control optimization in a two-level two-channel system stabilization-guidance with the cross-links between channels of static stability aircraft during normal aerodynamic scheme when pointing at the target was considered.

Введение

В работе сформулирована концепция и дано определение обобщенного управления многоуровневой автоматизированной системы управления летательным аппаратом (АСУ ЛА), разработана методика его оптимизации на основе обобщения и алгоритмизации иерархического равновесия в многоуровневой системе. Предложен алгоритм иерархической оптимизации управления в двухуровневой АСУ [1].

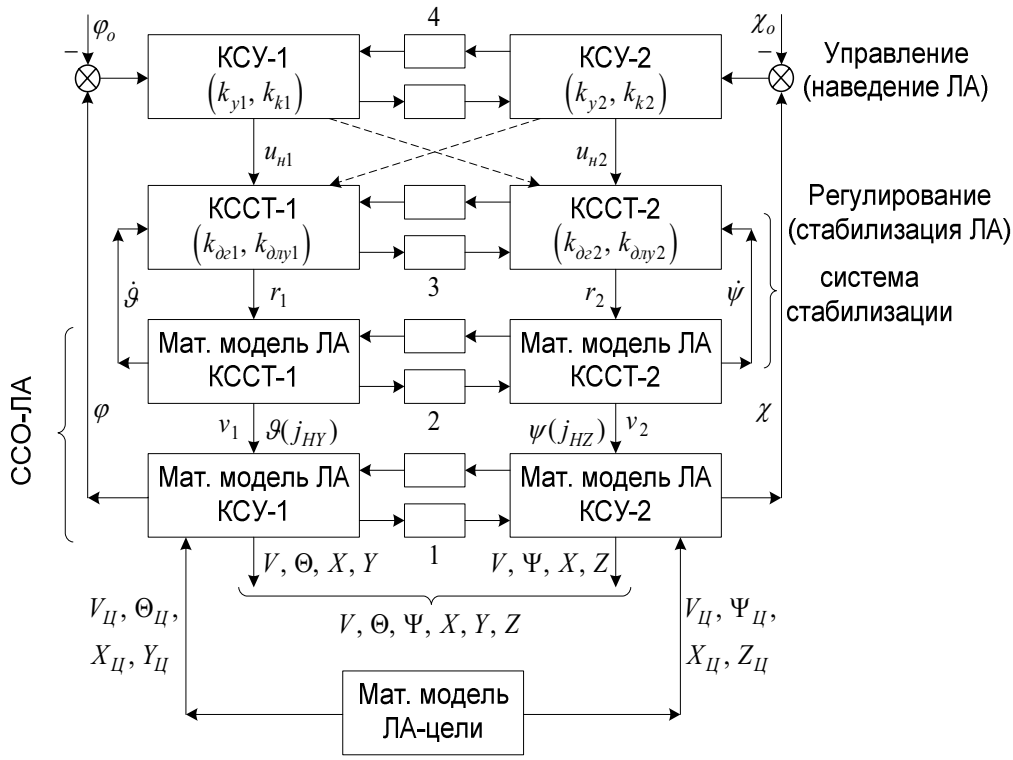
1 Структура и модель двухуровневой системы

В работе рассматривается иерархическая двухуровневая двухканальная система управления-регулирования летательного аппарата (ЛА) (рисунок 1). В системе представлены уровень управления (наведения) как многоканальной многокритериальной системы (ММС-1)[2] и уровень регулирования (стабилизации) (ММС-2), которые в свою очередь связаны между собой через структурно-сложный объект (ССО), который представлен математической моделью летательного аппарата[3]. В рамках данной работы рассматривается двухканальная система стабилизации (КССТ) с перекрестными связями летательного аппарата – по углу рыскания ψ (КССТ-1) и по углу тангажа θ (КССТ-2) и двухканальная система наведения по углу наклона траектории Θ и поворота траектории Ψ [3].

При разработке модели ЛА, взаимодействующего с целью, осуществляется переход от описания системы в абсолютных координатах к рассмотрению движения системы в отклонениях от известной выбранной траектории наведения [3]. В ходе разработки системы стабилизации траектории наведения осуществляется переход к линеаризованной системе уравнений относительно отклонений от траектории [3].

Разработанная двухуровневая линеаризованная иерархическая модель и постановка зада-

чи многоканального наведения-стабилизации беспилотного ЛА на ЛА-цель с учетом перекрестных связей каналов стабилизации углового движения вокруг центра масс ЛА [2] и кинематики пространственного поступательного движения центра масс ЛА [1] позволяет решать поставленную задачу как задачу синтеза оптимального закона обобщенного управления двухуровневой системы в линейно-квадратичной постановке. На основе данного представления описания системы и вектора функций поуровневой эффективности в квадратичном виде мы находим решение задачи в виде функций управления: на уровне наведения $u=(u_{H1},u_{H2})$, которое предопределяет нормальные ускорения (j_{HY},j_{HZ}), траектории центра масс ЛА (рисунок 1), и на уровне стабилизации $v=(v_1,v_2)$, которое предопределяет устойчивость, качество, точность и быстродействие в каналах стабилизации по тангажу θ и по рысканию ψ. В качестве параметров, изменение которых будет определять оптимальное управление на каждом из уровней, мы принимаем коэффициенты датчиков линейных ускорений ($k_{ДЛУ}$) и дифференцирующих гироскопов ($k_{ДГ}$) в каждом из каналов для выражения v на уровне стабилизации, а также параметры метода наведения (k_y) и координатора цели ($k_к$) [3] для получения u на выходе уровня управления.



[[i]], $i = 1 – 4$ – перекрестные связи,
φ, χ - углы места и азимута в сферической системе координат [3],
V, X, Y, Z – величина скорости и декартовы координаты центра масс [3].

Рисунок 1 - Двухуровневая модель управления-регулирования двухканальной системы управления летательного аппарата

Общий вид данной модели с учетом всех межканальных и межуровневых связей представлен на рисунке 1.

Следующим шагом будет подстановка найденных оптимальных функций управлений в выражения для функционалов и их последующая параметрическая коррекция на каждом уровне на основе арбитражной схемы [4] для получения предельно-эффективных по Парето.

2 Формирование и оптимизация обобщенного управления многоуровневой системой

В ходе исследований формулируется концепция и дается определение обобщенного управления многоуровневой автоматизированной системы управления (АСУ).

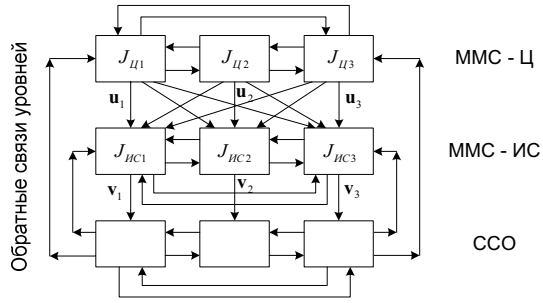
Определение 1. Обобщенное оптимальное управление многоуровневой АСУ формируется на основе комбинации процессов

1) многокритериального выбора оптимальной функциональной структуры АСУ (облика АСУ);
2) оптимизации в подсистемах ММС-уровней;
3) уравновешивания (балансировки) подсистем ММС-уровней;
4) оптимизации межуровневой координации.

В качестве комментария определения в практическом примере двухуровневой двухканальной СУ наведения-стабилизации ЛА функциональный облик уже выбран. На соответствующих уровнях выбираются параметры k_{yl}, $k_{кl}$, l =1,2, $k_{ДЛУi}$, $k_{ДГi}$, i =1,2, которые обеспечивают балансировку и Парето-оптимальность на основе равновесно-арбитражной схемы стабильно-эффективного компромисса. Сигналы $u_{нl}$, l =1,2 обеспечивают межуровневую координацию между уровнем управления и стабилизации, а r_i, i =1,2 обеспечивают исполнительное управление.

Разрабатывается методика оптимизации управления на основе обобщения и алгоритмизации иерархического равновесия по Штакельбергу [1] в многоуровневых системах.

В данной работе развиваются и применяются подходы класса иерархических дифференциальных игр (ИДИ). Без ограничения общности рассуждений рассмотрим двухуровневую ИДИ с «правом первого хода» верхнего уровня. 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 рисунке 2. На рисунке 2 также без ограничения общности рассуждений рассматриваются трехподсистемные ММС.



Верхний уровень: ММС - Центр, нижний уровень: ММС – Исполнительная Система (ММС - ИС). Структурно-сложный объект (ССО).

Рисунок 2 - Структурная схема двухуровневой трехподсистемной ИДИ

В соответствии с традиционным обозначением двухступенчатой дифференциальной игры уровень наведения называется центр (Ц), а уровень стабилизации - исполнительная система (ИС).

Структурно сложный объект (ССО) имеет математическую модель

(1) $\dot{x} = f(t, x, v, u), x(t_0) = x_0, x \in E^n,$

где v — исполнительное управление с распределенным исполнением (рисунок 2)

(2) $v = (v_1, v_2, v_3), \dim v_i = m_i, i = 1,2,3, v_i \in V_i \subset E^{m_i},$

$$\dim v = m = \sum_{i=1}^{3} m_i, v \in V = V_1 \times V_2 \times V_3 \subset E^m.$$

Управление-координация ММС-Ц

(3) $u = (u_1, u_2, u_3), \dim u_l = k_l \geq 3, u_l \in U_l \subset E^{k_l},$

$$\dim u = k = \sum_{l} k_l, u \in U = U_1 \times U_2 \times U_3 \subset E^k.$$

При распределенной координации u, связанной с одной из подсистем ММС-ИС, последнее неравенство может не выполняться.

Структурно и функционально связанные задачи ММС-Ц и ММС-ИС характеризуются соответственно функциями «выигрыша»

(4) $J_{Цl} = J_{Цl}(v, u), l = 1,2,3.$

(5) $J_{ИСi} = J_{ИСi}(v, u), i = 1,2,3.$

Общая структура показателей (4), (5) имеет вид

(6) $J_{ji} = \Phi_{ji}(x, t_k) + \int_{t_0}^{t_k} f_{ji}(t, x, u, v)dt, i = 1, 2, 3; j = (Ц, ИС)$

Определение 2 (ИРИДИШ). Структурные свойства иерархического равновесного решения двухуровневой ИДИ с обобщением стратегии Штакельберга составляют следующую трехэтапную процедуру получения обобщенного управления [3].

На первом этапе ММС-Центр на «правах первого хода» сообщает ММС-ИС свою координацию в форме закона-стратегии $u(t, x) \in U$ для каждой позиции из множества $\{t, x\}$ или программно-корректируемого закона-стратегии управления (ПКЗУ) для конечного множества $\{t_i, x(t_i), t_0 < t_1 < \ldots < t_i < \ldots < t_К = T\}$ или программного управления $u(t)$ для всех $t \in [t_0, t_К]$ или векторного параметрического множества $q \in Q$.

На втором этапе на уровне ММС-ИС формируется отображение $R: U \to V$ такое, что при каждом фиксированном $u \in U$

(7) $\max_{v \in V} \varphi_{ИС}\left(J_{ИС1}(u, v), \ldots, J_{ИС3}(u, v)\right) = \varphi_{ИС}\left(J_{ИС1}(u, Ru), \ldots, J_{ИС3}(u, Ru)\right)$

Конкретный вид функции $\varphi_{ИС}$ определяется на множестве степеней конфликтности подсистем ММС-ИС (антагонизм, бескоалиционный или коалиционный конфликт, кооперация).

На третьем этапе, который развивает стратегию Штакельберга и обобщает РИДИШ, ММС-Ц выбирает решение

(8) $\max_{u \in U} \varphi_{Ц}\left(J_{Ц1}(u, Ru), \ldots, J_{Ц3}(u, Ru)\right) = \varphi_{Ц}\left(J_{Ц1}(u^o, Ru), \ldots, J_{Ц3}(u^o, Ru)\right)$

Конкретный вид функции $\varphi_{Ц}$ определяется на множестве степеней конфликтности подсистем ММС-Ц [3].

Набор $\{u^r, Ru\}$ определяется как *иерархическое равновесие по Штакельбергу (ИРИДИШ).*

Приводится методика формирования обобщенного управления при бескоалиционном варианте балансировки ММС уровней [2].

Вводится в рассмотрение отображение

(9) $$Ru\|v_i = \begin{cases} v_1,\ R_2u,\ R_3u & при\ i=1, \\ R_1u,\ v_2,\ R_3u & при\ i=2, \\ R_1u,\ R_2u,\ v_3 & при\ i=3; \end{cases}$$

(10) $Ru = (R_1u,\ R_2u,\ R_3u),\ u = (u_1,\ u_2,\ u_3).$

В соответствии со вторым этапом получения ИРИДИШ (7) при условии, что $\varphi_{ИС}$ реализует операцию бескоалиционной конфликтной ситуации, на уровне ММС-ИС формируются три отображения R_i: $U \to v_i$, i =1,2,3, такие что

(11) $$J_{ИС\,i}(v,\ v) = \max_{v_i \in V_i} J_{ИС\,i}\left(u,\ Ru\|v_i\right),\ i = 1,2,3$$

В этом случае (4) реализует равновесное решение с индексом r при фиксированной допустимой координации u

(12) $R(u) = v^r = (v^r{}_1 = R_1u,\ v^r{}_2 = R_2u,\ v^r{}_3 = R_3u).$

Далее в соответствии с третьим этапом (8) формируется $\varphi_{Ц}$

(13) $$J_{Ц\,l}\left(u^r,\ Ru^r\right) = \max_{u_l} J\left(u\|u_l,\ R\left(u\|u_l\right)\right) = \max_{u_l} J\left(u\|u_l,\ v^r\left(u\|u_l\right)\right),\ l = \overline{1,3},$$

где

(14) $u^r = (u^r{}_1,\ u^r{}_2,\ u^r{}_3),$

(15) $$u\|u_l = \begin{cases} u_1,\ u_2^r,\ u_3^r, & при\ l=1 \\ u_1^r,\ u_2,\ u_3^r, & при\ l=2 \\ u_1^r,\ u_2^r,\ u_3, & при\ l=3. \end{cases}$$

Достаточные условия обобщенного управления при выбранной функциональной структуре системы на основе ИРИДИШ (обобщение достаточных условий Сталфорда-Вайсборда-Жуковского оптимального управления при ограничениях на управление и состояние) [3].

Функция $f(t,x,u,v)$ в (1) определена на E^n x E^m x E^k со значениями в E^n. В общем случае определено множество возможных состояний системы $X \subset E^n$, то есть задано ограничение типа $x \in X$. Допустимые стратегии $v(t,x)$ и $u(t,\ x)$ удовлетворяют следующим условиям [3]:

Для любого набора $u(t,\ x)$, $v(t,x)$ существует единственное абсолютно непрерывное решение $x(t)$ системы (1).

$v_i = v_i(t,x)$ и $u_l = u_l(t,x)$, $i,\ l$ = 1,2,3 принадлежат множеству измеримых по Борелю функций (кусочно-непрерывные функции с конечным числом точек разрыва первого рода) со значениями в E^{mi} и E^{kl} соответственно.

$v_i \in V_i$, $u_l \in U_l$ для всех $t \in [t_0\ ,t_К]$, $i,\ l$ = 1,2,3 и $V_i(t,x)$, $U_l(t,x)$ - многозначные функции, которые каждому моменту времени $t \in [t_0\ ,t_К]$ и любому $x \in X$ ставит в соответствие некоторое подмножество пространств E^{mi} и E^{kl} соответственно.

Введем функцию Гамильтона-Келли

(16) $$H_{iu}(t,\ x,\ u, v_1, v_2, v_3) = \frac{\partial W_{jiu}(t,\ x)}{\partial t} + \left(\frac{\partial W_{jiu}(t,\ x)}{\partial x}\right)^T f(t,\ x,\ u, v_1, v_2, v_3) + $$
$$+ f_{ИС\,i}(t,\ x,\ u, v_1, v_2, v_3),\ i = \overline{1,3}$$

при $x \in X_{ju}$, $j \in \Im_u$, $t \in [t_0\ ,t_К]$.

Индекс u в локально липшицевых (и дифференцируемых) функциях $W_{jiu} = V_i(t,\ x)$ на подмножестве X_{ju} разбиения

$$D = \left\{ X_j\ (j \in \Im_u),\ X_j \bigcap_{j \neq k} X_k = \varnothing,\ \bigcup X_j = X \right\}$$

при наличии ограничений $x \in X \subset E^n$ и на всем E^n при отсутствии ограничений на состояние означает фиксированную стратегию ММС верхнего уровня.

(17) $$H_{lv}(t, x, u_1, u_2, u_3, v) = \frac{\partial W_{jlv}(t, x)}{\partial t} + \left(\frac{\partial W_{jlv}(t, x)}{\partial x} \right)^T f(t, x, u_1, u_2, u_3, v) + f_{\text{Ц}l}(t, x, u_1, u_2, u_3, v), \; l = \overline{1,3}$$

при $x \in X_{jv}$, $j \in \mathfrak{I}_{\mathbf{v}}$, $t \in [t_0, t_{\text{К}}]$.

Индекс v в функциях $W_{jlv} = V_l(t, x)$ на подмножестве X_{jv} разбиения D означает фиксированную стратегию ММС нижнего уровня.

Здесь $\mathfrak{I}_u$ и $\mathfrak{I}_v$ - счетные множества индексов, соответствующих разбиениям D_u и D_v множества X.

Утверждение 1. Если существуют

1) для каждого фиксированного $u \in U$ разбиение множества X, функции $V_{iu}(t, x)$, $i = 1,2,3$ класса C^1 по D_u и однозначные функции $v_i(t, x, u)$, $i = 1,2,3$ такие, что

$$v_i(t, x, u(t, x)) = R_i(u) \in V_i,$$

$$H_{iu}(t, x, u, v(t, x, u)) = \max_{v_i \in V_i \subset E^{m_i}} H_{iu}(t, x, u, v(t, x, u) \| v_i),$$

$$H_{iu}(t, x, u(t, x), R(u)) = 0, \; i = \overline{1,3}$$

для всех $x \in X_{ju}$, $j \in \mathfrak{I}_u$, $t \in [t_0, t_{\text{К}}]$,

2) разбиение D_v множества X, функции $V_{lv}(t, x)$, $l = 1,2,3$ класса C^1 по D_v и стратегия Центра $u \in U$ такие, что

$$H_{lv}(t, x, u^r, Ru^r) = \max_{u_l \in U_l \subset E^{m_l}} H_{lv}(t, x, u^r \| u_l, R(u^r \| u_l)) = 0, \; l = \overline{1,3}$$

при $x \in X_{jv}$, $j \in \mathfrak{I}_{\mathbf{v}}$, $t \in [t_0, t_{\text{К}}]$, то набор $\{u^r, R_1u, R_2u, R_3u\} = \{u^r, Ru\}$ является иерархическим равновесным решением (ИРИДИШ) в двухуровневой системе управления, при этом

$$V_{iu}(t, x) = \Phi_{\text{ИС}i}(t_{\text{к}}, x) \text{ при каждом } u \in U, \; i = 1,2,3,$$

$$V_{lv}(t, x) = \Phi_{\text{Ц}l}(t_{\text{к}}, x) \text{ при } v = Ru, \; l = 1,2,3,$$

а выигрыши ММС верхнего и нижнего уровней соответственно равны

$$J_{\text{Ц}}(u^r, Ru^r) = V_v(t_0, x_0) = (V_{1v}(t_0, x_0), V_{2v}(t_0, x_0), V_{3v}(t_0, x_0)),$$

$$J_{\text{ИС}}(u^r, Ru^r) = V_u(t_0, x_0) = (V_{1u}(t_0, x_0), V_{2u}(t_0, x_0), V_{3u}(t_0, x_0)).$$

Получены достаточные условия оптимальности обобщенного закона управления двухуровневой АСУ [1]. Предлагаются алгоритмы иерархической оптимизации управления в двухуровневых АСУ: в форме решения задачи синтеза обобщенного управления в линейно-квадратической постановке и итерационного алгоритма получения программно-корректируемого иерархического управления в постановке общего вида [1] [5]. Разрабатывается двухуровневая математическая модель и постановка задачи двухканального наведения-стабилизации беспилотного ЛА на ЛА-цель с учетом перекрестных связей каналов стабилизации и кинематики пространственного поступательного движения ЛА, применение в которой полученных результатов имеет практическое значение.

Заключение

В работе сформирован алгоритм многокритериальной оптимизации двухканальной двухуровневой иерархической системы на основе уравновешивания (балансировки) каналов на основе ИРИДИШ с последующей Парето-оптимизацией. Данный алгоритм оптимизации системы «стабилизации-наведения» содержит три этапа:

1) Получение описания модели ССО.

На основе линеаризации дифференциальных уравнений описания движения ЛА и описания двухуровневой АСУ получено линеаризованное описание задачи (рисунок 1). В ходе преобразований осуществляется переход от описания модели в абсолютных координатах к описанию модели в отклонениях от опорной траектории [3].

2) Формирование алгоритма синтеза законов управления $u(x,t)$, $v(x,t)$ в двухуровневой системе на основе линейно-квадратичной постановки [1] [5].

Для двухуровневой двухканальной иерархической системы с перекрёстными связями разработаны алгоритмы получения поуровневых параметризованных равновесных решений – управлений на обоих уровнях иерархии, которые будут использованы для оптимизации каналов по эффективности, как этапа иерархической оптимизации управления.

Решение системы матричных дифференциальных уравнений, основанных на описании ССО и параметрах показателей эффективности на каждом из уровней и в каждом из каналов на этапе иерархической оптимизации управления [1] [5].

3) Использование полученных управлений для построения области показателей, на которой производится дальнейшая Парето-оптимизация и нахождение стабильно-эффективного компромисса (СТЭК) в форме равновесно-арбитражного решения, где свойство стабильности обеспечивается межканальной устойчивостью уравновешивания на этапе оптимизации управления иерархической системой [4].

Арбитражное решение удовлетворяет условию: $J=(J_1-J_1^{H})*(J_2-J_2^{H})->\mathbf{max}$, $J_1 \leq J_1^{H}$, $J_2 \leq J_2^{H}$, где J_1^{H}, J_2^{H} – компоненты вектора показателей в точке равновесия по Нэшу. В результате в качестве решения получаем одну из точек Парето-границы, которая является ближайшей к точке уравновешивания.

В результате удается достичь эффективности (которая обеспечивается оптимальностью решения по Парето).

Исследования показали, что значения параметров, рассчитанные с использованием элементов теории ММС обеспечивают не только оптимальное управление в системе «стабилизации-наведения» с перекрёстными связями, но и позволяют компенсировать усиление влияния перекрестных связей при больших перегрузках ЛА.

В перспективе предполагается дальнейшее решение данной задачи при условии структурных усложнений, введения третьего канала по углу крена. Так же предполагается в дальнейшем учесть факторы, которые в данной работе были не учтены или же приняты для упрощения постоянными в данной ситуации. Такими факторами, например, будут являться изменение траектории цели во время наведения, учет нелинейностей в каналах управления и стабилизации.

Список литературы

[1] Воронов Е.М., Карпунин А.А., Серов В.А. Алгоритмы иерархической оптимизации в двухуровневой многоканальной задаче «управления-регулирования» // Вестник РУДН. Инженерные исследования. —2009. — №3. — С. 1-18.

[2] Воронов Е.М. Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных компромиссов. – М.: Изд-во МГТУ, 2001. – 576 с.

[3] Лебедев А.А. Карабанов В.А. Динамика систем управления беспилотными летательными аппаратами.— М.: Машиностроение, 1965.— 528 с.

[4] Воронов Е.М., Мелехина Ю., Веселовская О.А., Мусин Е.Т. Равновесно-арбитражная многокритериальная балансировка каналов в многосвязном регулировании и управлении // ВестникМГТУ им. Н.Э. Баумана Серия «Приборостроение». — 2007.—№4.— С. 99-119.

[5] Пупков К.А., Воронов Е.М., Карпунин А.А., Пролетарский А.В., Ванин А.В. Структурный синтез и иерархическое уравновешивание в интеллектуальных системах управления //Интеллектуальные системы: Труды Девятого международного симпозиума / Под ред. КА. Пупкова. — М.: РУСАКИ, 2008. — С. 33-37.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ПЕРЕНАЦЕЛИВАНИИ АППАРАТУРЫ ЗОНДИРОВАНИЯ

М.В.Морозова

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
morozova_mv@list.ru
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, перенацеливание, оптимальное управление, проблема моментов*

Abstract

The optimal control problem of spacecraft reorientation during remote earth sensing hardware redirection is considered. The control problem is reduced to the optimal moments problem and its solution for minimum functionals of the norm type in space L_q (for $q = 2, \infty$) is found using the method of moments. The computational algorithm for the approximate solution of the problem is developed. Efficiency of this algorithm is confirmed by the results of the performed modeling.

Введение

В настоящее время широко применяются системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса и получаемая с их помощью информация находит все более эффективное применение для решения задач в интересах социально-экономического развития территорий [1, 2, 3]. Повышение производительности таких систем ДЗЗ во многом обеспечивается средствами бортового комплекса управления КА ДЗЗ, в особенности, в части решения задач формирования оптимальных программ управления угловым движением КА при реализации целевых режимов зондирования с требуемыми показателями эффективности. В настоящей статье рассматривается постановка задачи оптимального управления переориентацией КА ДЗЗ при перенацеливании его аппаратуры зондирования и приводится разработанный высокоэффективный алгоритм синтеза оптимальных программ управления угловым движением при реализации такого маневра его переориентации. Решение этой задачи тесно связано с планированием процессов дистанционного зондирования на борту КА ДЗЗ [1, 3, 4].

1 Постановка задачи

Рассматривается вращательное движение КА ДЗЗ вокруг центра масс [5, 6]:

$$(1)\quad \frac{d\boldsymbol{\sigma}}{dt} = \mathbf{N}(\boldsymbol{\sigma})\tilde{\boldsymbol{\omega}}\,;\ \ \frac{d\tilde{\boldsymbol{\omega}}}{dt} = \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{f}_{\omega}\,,$$

где $\boldsymbol{\sigma} = \mathrm{col}\,(\vartheta, \gamma, \psi)$ – вектор параметров ориентации КА в орбитальной системе координат [6], ϑ – угол тангажа, γ – угол крена и ψ – угол рысканья; $\tilde{\boldsymbol{\omega}} = \mathrm{col}\,(\tilde{\omega}_x, \tilde{\omega}_y, \tilde{\omega}_z)$ – вектор угловой скорости КА в ОСК, которая вращается с угловой скоростью $\boldsymbol{\omega}_{\text{ОСК}}(t)$ ($\boldsymbol{\omega} = \tilde{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{ОСК}}$ – вектор абсолютной угловой скорости КА); $\mathbf{u} = \mathrm{col}\,(u_x, u_y, u_z)$ – вектор управляющих параметров, $\mathbf{B} = \mathrm{diag}\,(b_x, b_y, b_z)$, $b_k = a_k / J_k$, $k = x, y, z$ (J_k, $k = x, y, z$, – главные центральные

моменты инерции КА, a_k, $k = x, y, z$, – некоторые заданные коэффициенты); $\mathbf{f}_\omega = \mathbf{f}_\omega(t, \boldsymbol{\sigma}, \tilde{\boldsymbol{\omega}})$ – вектор-функция, определяемая гироскопическим и иными возмущающими моментами. Соответственно, для выбранных параметров ориентации

$$\mathbf{N}(\boldsymbol{\sigma}) = \begin{bmatrix} -\dfrac{\sin\psi}{\cos\gamma} & 0 & \dfrac{\cos\psi}{\cos\gamma} \\ \cos\psi & 0 & \sin\psi \\ \dfrac{\sin\psi\,\sin\gamma}{\cos\gamma} & 1 & -\dfrac{\cos\psi\,\sin\gamma}{\cos\gamma} \end{bmatrix}.$$

Маневр перенацеливания аппаратуры зондирования КА на интервале управления $[t_0, t_f]$ в общем случае задается следующими граничными условиями:

(2) $\boldsymbol{\sigma}(t_0) = \boldsymbol{\sigma}_0$; $\boldsymbol{\sigma}(t_f) = \boldsymbol{\sigma}_f$; $\tilde{\boldsymbol{\omega}}(t_0) = \tilde{\boldsymbol{\omega}}_0$; $\tilde{\boldsymbol{\omega}}(t_f) = \tilde{\boldsymbol{\omega}}_f$,

где $\boldsymbol{\sigma}_0$, $\boldsymbol{\sigma}_f$, $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_0$, $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_f$ – заданные векторные константы.

По определению [6]:

(3) $\dfrac{d\boldsymbol{\pi}}{dt} = \tilde{\boldsymbol{\omega}}$,

где $\boldsymbol{\pi} = \mathrm{col}(\pi_x, \pi_y, \pi_z)$ – вектор квазикоординат, связанных с параметрами ориентации КА следующим образом: $\dfrac{d\boldsymbol{\sigma}}{dt} = \mathbf{N}(\boldsymbol{\sigma})\dfrac{d\boldsymbol{\pi}}{dt}$. Соответственно, первое уравнение в (1) можно было бы заменить кинематическим соотношением (3). Тогда уравнения углового движения КА (1) приводятся к виду

(4) $\dfrac{d\boldsymbol{\pi}}{dt} = \tilde{\boldsymbol{\omega}}$; $\dfrac{d\tilde{\boldsymbol{\omega}}}{dt} = \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{f}_\omega$

и граничные условия (2) заменяются следующими условиями:

(5) $\boldsymbol{\pi}(t_0) = 0$; $\boldsymbol{\pi}(t_f) = \boldsymbol{\pi}_f$,

где $\boldsymbol{\pi}_f$ – вектор значений квазикоординат в конечный момент времени.

Если в (4) предположить, что $\mathbf{f}_\omega$ – известная на интервале управления $[t_0, t_f]$ вектор-функция времени, то эту систему можно рассматривать как линейную управляемую систему:

(6) $\dfrac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\,\mathbf{u}(t) + \mathbf{f}(t)$,

где $\mathbf{x} = \mathrm{col}(\pi_x, \tilde{\omega}_x, \pi_y, \tilde{\omega}_y, \pi_z, \tilde{\omega}_z)$ – вектор-столбец переменных состояния; $\mathbf{f}(t) = \mathrm{col}(0, f_{\omega x}, 0, f_{\omega y}, 0, f_{\omega z})$ – вектор-функция правых частей, где $f_{\omega x}$, $f_{\omega y}$, $f_{\omega z}$ – соответствующие компоненты вектор-функции $\mathbf{f}_\omega$ в (4). Матрицы динамики и эффективности управляющих воздействий для системы (6) имеют вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ b_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_z \end{bmatrix}.$$

Для системы (6) можно сформулировать следующую двухточечную граничную задачу: найти такое допустимое управление $\mathbf{u}(\cdot) \in L_q$, что для него на решениях системы удовлетворяются граничные условия:

(7) $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$; $\mathbf{x}(t_f) = \mathbf{x}_f$,

где $\mathbf{x}_0 = \mathrm{col}\,(\pi_{x0},\ \widetilde{\omega}_{x0},\ \pi_{y0}, \widetilde{\omega}_{y0},\ \pi_{z0}, \widetilde{\omega}_{z0})$, $\mathbf{x}_f = \mathrm{col}\,(\pi_{xf},\ \widetilde{\omega}_{xf},\ \pi_{yf},\ \widetilde{\omega}_{yf},\ \pi_{zf},\ \widetilde{\omega}_{zf})$, $\pi_{k0} = \pi_k(t_0)$, $\widetilde{\omega}_{k0} = \widetilde{\omega}_k(t_0)$, $\pi_{kf} = \pi_k(t_f)$, $\widetilde{\omega}_{kf} = \widetilde{\omega}_k(t_f)$, $k = x, y, z$.

В задачах оптимального управления переориентацией КА дополнительно требуется минимизировать какой-либо показатель качества управления, который может быть представлен, например, функционалом типа нормы в $L_q[t_0, t_f]$, $1 \le q \le \infty$ [7]:

(8) $J(\mathbf{u}(\cdot)) = \|\mathbf{u}(\cdot)\|_{L_q}^{(\nu)} \to \mathbf{min}$,

где $\|\mathbf{u}(\cdot)\|_{L_q}^{(\nu)} = \left(\int_{t_0}^{t_f} \|\mathbf{u}(\tau)\|_\nu^q \, d\tau \right)^{\frac{1}{q}}$ при $1 \le q < \infty$, $\|\mathbf{u}(\tau)\|_\nu$ – векторная норма для $\mathbf{u}(\tau)$ ($\forall \tau \in [t_0, t_f]$, $1 \le \nu \le \infty$); если $q = \infty$, то в (8) $\|\mathbf{u}(\cdot)\|_{L_\infty}^{(\nu)} = \underset{\tau \in [t_0, t_f]}{\mathbf{vrai\ max}} \|\mathbf{u}(\tau)\|_\nu$. Различные сочетания q и ν в (8) приводят к разным по содержанию постановкам задач оптимального управления для (1) или (4).

2 Сведение задачи оптимального управления переориентацией КА к оптимальной проблеме моментов

Как известно [7, 8], задача оптимального управления типа (6) – (8) сводится к проблеме моментов в пространстве $L_p[t_0, t_f]$, где $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Переходное отображение для линейной системы (6) имеет вид [7]:

(9) $\mathbf{x}(t) = \mathbf{\Phi}(t, t_0)\mathbf{x}_0 + \int_{t_0}^{t} \mathbf{\Phi}(t, \tau)[\mathbf{B}\mathbf{u}(\tau) + \mathbf{f}(\tau)]d\tau$,

где матрица $\mathbf{\Phi}(t, t_0)$ является решением начальной задачи:

(10) $\frac{d\mathbf{\Phi}(t, t_0)}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{\Phi}(t, t_0)$, $\mathbf{\Phi}(t_0, t_0) = \mathbf{I}_6$,

где $\mathbf{I}_6$ – единичная матрица соответствующего порядка. Введем далее в рассмотрение

вектор-функцию:

(11) $\mathbf{g}(t) = \mathrm{Col}[\mathbf{g}_x(t), \mathbf{g}_y(t), \mathbf{g}_z(t)] = \int_{t_0}^{t} \mathbf{\Phi}(t, \tau)\mathbf{f}(\tau)d\tau$,

где $\mathbf{g}_k(t) = \begin{bmatrix} g_{k1}(t) \\ g_{k2}(t) \end{bmatrix}$, $g_{k1}(t) = \int_{t_0}^{t} (t-\tau) f_{\omega k}(\tau)d\tau$, $g_{k2}(t) = \int_{t_0}^{t} f_{\omega k}(\tau)d\tau$, $k = x, y, z$.

Очевидно, что с учетом (10) для (11) имеет место:

(12) $\dfrac{d\mathbf{g}(t)}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{g}(t) + \mathbf{f}(t)$, $\quad \mathbf{g}(t_0) = 0$.

Перепишем далее формулу Коши (9) при $t = t_f$ в следующем виде:

(13) $\int_{t_0}^{t_f} \mathbf{\Phi}(t_f, \tau)\mathbf{B}\mathbf{u}(\tau)d\tau = \mathbf{c}$,

где вектор $\mathbf{c} = \mathrm{col}(c_1, c_2, ..., c_6)$ определяется следующим образом:

(14) $\mathbf{c} = \mathbf{x}_f - \mathbf{\Phi}(t_f, t_0)\mathbf{x}_0 - \mathbf{g}(t_f)$,

и введем также в рассмотрение следующие вектор-функции:

(15) $\mathbf{h}_k(\tau)$, $\forall \tau \in [t_0, t_f]$, $\quad k = 1, 2, ..., 6$,

такие, что $\mathbf{\Phi}(t_f, \tau)\mathbf{B} = [\mathbf{h}_1(\tau) \,|\, \mathbf{h}_2(\tau) \,|\, \cdots \,|\, \mathbf{h}_6(\tau)]^{\mathrm{T}}$. Очевидно, что вектор-функции $\mathbf{h}_k(\tau)$, $k = 1, 2, ..., 6$, являются элементами $L_p[t_0, t_f]$, $1 \le p \le \infty$, сопряженного к $L_q[t_0, t_f]$.

Итак, задача оптимального управления (6) – (8) сводится к оптимальной проблеме моментов, в которой для некоторых чисел c_k, $k = 1, 2, ..., 6$ ($\sum_k c_k^2 \neq 0$) и заданных вектор-функций (15) требуется найти линейный ограниченный функционал $\varphi \in L_p^*$, который имеет вид

(16) $\varphi(\mathbf{h}(\cdot)) = \int_{t_0}^{t_f} \mathbf{h}^{\mathrm{T}}(\tau)\mathbf{u}(\tau)d\tau$,

и такой, что для него выполняется следующая система моментных равенств:

(17) $\varphi(\mathbf{h}_k(\cdot)) = c_k$, $\quad k = 1, 2, ..., 6$,

при условии

(18) $\| \varphi \|_{L_p^*} \to \min$.

Условие (18) должно быть выполнено в силу того, что $\| \mathbf{u}(\cdot) \|_{L_q} = \| \varphi \|_{L_p^*}$ [7].

Проблема моментов для (17) разрешима для любых чисел c_k (когда хотя бы одно из них отлично от нуля, что в рассматриваемой задаче означает нетривиальность маневра КА ДЗЗ), если только вектор-функции $\mathbf{h}_k(\tau) \in L_p[t_0, t_f]$ линейно независимы на интервале $[t_0, t_f]$ [8]. Справедливо следующее утверждение [7, 8]: проблема моментов (17) разрешима тогда и только тогда, когда $\rho_0 > 0$, где $\rho_0 = \| \mathbf{h}_0(\cdot) \|_{L_p}$, $\mathbf{h}_0(\cdot) \in \mathbf{P}$ – минимальный элемент, для которо-

го выполнено неравенство $\rho_0 = \| \mathbf{h}_0(\cdot) \|_{L_p} \le \| \mathbf{h}(\cdot) \|_{L_p}$, $\forall \mathbf{h}(\cdot) \in \mathbf{P}$:

$$\mathbf{P} = \left\{ \mathbf{h}(\cdot) : \mathbf{h}(\cdot) = \sum_{k=1}^{6} l_k \mathbf{h}_k(\cdot), \sum_{k=1}^{6} l_k c_k = 1 \right\}.$$

При этом для разрешающего эту проблему моментов линейного функционала (16) имеет место: $\varphi(\mathbf{h}(\cdot)) = 1$, $\forall \mathbf{h}(\cdot) \in \mathbf{P}$, и, кроме того, $\varphi(\mathbf{h}_0(\cdot)) = 1$, так как $\mathbf{h}_0(\cdot) \in \mathbf{P}$. Для нормы оптимального разрешающего функционала φ_0 справедливо равенство: $\| \varphi_0 \|_{L_p^*} = \dfrac{1}{\rho_0}$. Поскольку $\min\limits_{\mathbf{u}(\cdot)} \| \mathbf{u}(\cdot) \|_{L_q} = \min\limits_{\varphi} \| \varphi \|_{L_p^*} = \dfrac{1}{\rho_0}$ [7, 8], то для решения задачи оптимального управления (6) – (8) можно использовать принцип максимума Н.Н. Красовского, который формулируется следующим образом [8].

Пусть $\mathbf{h}_0^{\mathrm{T}}(\tau) = \mathbf{l}_0^{\mathrm{T}} \mathbf{\Phi}(t_f, \tau) \mathbf{B}$ – решение задачи:

(19) $$\min_{\mathbf{l}^{\mathrm{T}}\mathbf{c}=1} \| \mathbf{l}^{\mathrm{T}} \mathbf{\Phi}(t_f, \cdot) \mathbf{B} \|_{L_p}^{(\mu)} = \rho_0,$$

где $\mu \ge 1$ – сопряженный показатель: $\dfrac{1}{\nu} + \dfrac{1}{\mu} = 1$, где ν – показатель в (8). Тогда если задача

(20) $$\max_{\| \mathbf{u}(\cdot) \|_{L_q} = \frac{1}{\rho_0}} \int_{t_0}^{t_f} \mathbf{h}_0^{\mathrm{T}}(\tau) \mathbf{u}(\tau) d\tau$$

имеет единственное решение $\mathbf{u}^*(\cdot)$, то $\mathbf{u}^*(t)$, $\forall t \in [t_0, t_f]$ – оптимальное управление.

Итак, решение задачи оптимального управления (6) – (8) сводится к последовательному решению задач (19), (20).

Далее рассмотрим решение задачи оптимального управления (6) – (8) с функционалами типа нормы $J(\mathbf{u}(\cdot)) = \| \mathbf{u}(\cdot) \|_{L_q}$ при $q = 2, \infty$. В случае $q = 2$ задача (6) – (8) является задачей оптимального управления на минимум энергии управления, при $q = \infty$ – задачей оптимального управления на минимум максимального уровня управляющих воздействий [7 – 9].

3 Задача на минимум энергии управления

Рассмотрим задачу оптимального управления (6) – (8) при $q = 2$, $\nu = 2$. В этом случае функционал $J(\mathbf{u}(\cdot))$ в (8) имеет вид

(21) $$J(\mathbf{u}(\cdot)) = \| \mathbf{u}(\cdot) \|_{L_2}^{(2)} = \left(\int_{t_0}^{t_f} \| \mathbf{u}(\tau) \|_2^2 \, d\tau \right)^{\frac{1}{2}} \to \min,$$

где $\| \mathbf{u}(\tau) \|_2 = \sqrt{u_x^2(\tau) + u_y^2(\tau) + u_z^2(\tau)}$. Очевидно, что задача оптимального управления (6), (7), (21) сводится к проблеме моментов в $L_2[t_0, t_f]$, которую можно разрешить с помощью принципа максимума Н.Н. Красовского [8]. Вначале необходимо найти минимальный элемент $\mathbf{h}_0(\tau) \in \mathbf{P} \subset L_2[t_0, t_f]$ и его норму – ρ_0, то есть решить следующую задачу:

$$\min_{\mathbf{h}(\cdot)\in P} \| \mathbf{h}(\cdot) \|_{L_2} = \min_{\mathbf{h}(\cdot)\in P} \left(\int_{t_0}^{t_f} \mathbf{h}^{\mathrm{T}}(\tau)\mathbf{h}(\tau)d\tau \right)^{\frac{1}{2}} =$$

$$(22)\quad = \min_{\mathbf{l}^{\mathrm{T}}\mathbf{c}=1} \left(\int_{t_0}^{t_f} \mathbf{l}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Phi}(t_f, \tau)\mathbf{B}\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}(t_f, \tau)\mathbf{l}d\tau \right)^{\frac{1}{2}} = \min_{\mathbf{l}^{\mathrm{T}}\mathbf{c}=1} [\, \mathbf{l}^{\mathrm{T}}\mathbf{D}\mathbf{l} \,]^{\frac{1}{2}} = \rho_0 ,$$

где $\mathbf{D} = \mathbf{D}^{\mathrm{T}} = \int_{t_0}^{t_f} \boldsymbol{\Phi}(t_f, \tau)\mathbf{B}\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}(t_f, \tau)d\tau$. Решая эту задачу методом множителей Лагранжа [10], получим: $\rho_0 = (\mathbf{c}^{\mathrm{T}}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{c})^{-\frac{1}{2}}$; $\mathbf{h}_0(\tau) = \rho_0^2\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}(t_f, \tau)\mathbf{D}^{-1}\mathbf{c}$. Так как для оптимального разрешающего функционала φ_0 выполняется условие $\varphi_0(\mathbf{h}_0(\cdot)) = 1$, а его норма равна $\frac{1}{\rho_0}$, то программу оптимального управления можно определить из условий:

$$\max_{\mathbf{u}(\cdot)} \int_{t_0}^{t_f} \mathbf{h}_0^{\mathrm{T}}(\tau)\mathbf{u}(\tau)d\tau = 1; \qquad \left(\int_{t_0}^{t_f} \mathbf{u}^{\mathrm{T}}(\tau)\mathbf{u}(\tau)d\tau \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{\rho_0},$$

которые выполняются, если $\mathbf{u}(\tau) = \xi\,\mathbf{h}_0(\tau)$, где $\xi > 0$. Стало быть, тогда получим $\xi = \frac{1}{\rho_0^2}$ и программа искомого оптимального управления будет иметь следующий вид:

$$(23)\quad \mathbf{u}^*(\tau) = \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}(t_f, \tau)\mathbf{D}^{-1}\mathbf{c}, \ \forall\tau \in [t_0, t_f].$$

4 Задача на минимум максимального уровня управляющих воздействий

Рассмотрим задачу оптимального управления (6) – (8) в случае, когда $q = \infty$. Вначале примем $\nu = 2$, тогда функционал $J(\mathbf{u}(\cdot))$ в (8) будет иметь следующий вид:

$$(24)\quad J(\mathbf{u}(\cdot)) = \| \mathbf{u}(\cdot) \|_{L_\infty}^{(2)} = \max_{\tau\in[t_0,t_f]} \left\| \mathbf{u}(\tau) \right\|_2 \to \min,$$

где $\| \mathbf{u}(\tau) \|_2 = \sqrt{u_x^2(\tau) + u_y^2(\tau) + u_z^2(\tau)}$. В соответствии с задачей (19) вначале необходимо найти минимальный элемент $\mathbf{h}_0(\tau) \in \mathbf{P} \subset L_1[t_0, t_f]$ и его норму – ρ_0:

$$(25)\quad \min_{\mathbf{h}(\cdot)\in P} \| \mathbf{h}(\cdot) \|_{L_1}^{(2)} = \min_{\mathbf{h}(\cdot)\in P} \int_{t_0}^{t_f} \left\| \mathbf{h}(\tau) \right\|_2 d\tau = \min_{\mathbf{l}^{\mathrm{T}}\mathbf{c}=1} \int_{t_0}^{t_f} \left(\sum_{i=1}^{3} h_i^2(\tau) \right)^{\frac{1}{2}} d\tau = \rho_0 .$$

Получить решение задачи (25) в явном виде довольно затруднительно, но она эффективно решается численными методами. Предполагая, что решение задачи (25) найдено, программу оптимального управления для задачи (6), (7), (24) можно синтезировать в соответствии с принципом максимума Н.Н. Красовского [8]:

(26) $\int_{t_0}^{t_f} \mathbf{h}_0^{\mathrm{T}}(\tau)\,\mathbf{u}^*(\tau)\,d\tau = \max_{\mathbf{u}(\cdot)} \int_{t_0}^{t_f} \mathbf{h}_0^{\mathrm{T}}(\tau)\,\mathbf{u}(\tau)\,d\tau\,;\quad \max_{\tau\in[t_0,t_f]} \left\|\mathbf{u}(\tau)\right\|_2 = \frac{1}{\rho_0}\,.$

Для максимизации интеграла в (26) необходимо, чтобы подынтегральное выражение принимало максимальное значение в каждый момент времени τ. Для этого необходимо, чтобы вектор $\mathbf{u}(\tau)\ \ \forall\tau\in[t_0, t_f]$ совпадал по направлению с вектором $\mathbf{h}_0(\tau)$ и имел бы максимально допустимую норму, равную $\frac{1}{\rho_0}$. Таким образом, искомая программа оптимального управления определяется так:

(27) $\mathbf{u}^*(\tau) = \dfrac{\mathbf{h}_0(\tau)}{\rho_0 \left\|\mathbf{h}_0(\tau)\right\|_2}\,.$

В случае, когда $\nu = \infty$ функционал в (8) имеет вид:

(28) $J(\mathbf{u}(\cdot)) = \|\mathbf{u}(\cdot)\|_{L_\infty}^{(\infty)} = \max_{\tau\in[t_0,t_f]} \left\|\mathbf{u}(\tau)\right\|_\infty = \max_{\tau\in[t_0,t_f]} \max_i u_i(\tau) \to \min\,.$

Численно решая следующую задачу:

(29) $\min_{\mathbf{h}(\cdot)\in P} \|\mathbf{h}(\cdot)\|_{L_1}^{(1)} = \min_{\mathbf{h}(\cdot)\in P} \int_{t_0}^{t_f} \left\|\mathbf{h}(\tau)\right\|_1 d\tau = \min_{\mathbf{l}^{\mathrm{T}}\mathbf{c}=1} \int_{t_0}^{t_f} \sum_{i=1}^{3} \left|h_i(\tau)\right| d\tau = \rho_0\,,$

получим минимальный элемент $\mathbf{h}_0(\tau)\in\mathbf{P}\subset L_1[t_0, t_f]$ и его норму – ρ_0. Оптимальное управление для задачи (6), (7), (28) также найдем в соответствии с принципом максимума Н.Н. Красовского, а именно:

(30) $\int_{t_0}^{t_f} \mathbf{h}_0^{\mathrm{T}}(\tau)\,\mathbf{u}^*(\tau)\,d\tau = \max_{\mathbf{u}(\cdot)} \int_{t_0}^{t_f} \mathbf{h}_0^{\mathrm{T}}(\tau)\,\mathbf{u}(\tau)\,d\tau\,;\quad \max_{\tau\in[t_0,t_f]} \max_i u_i(\tau) = \frac{1}{\rho_0}\,.$

В этом случае каждая компонента вектора $\mathbf{u}(\tau)$ должна удовлетворять ограничению

$|u_k(\tau)| \le \dfrac{1}{\rho_0}\quad (k = x, y, z),\ \ \forall\tau\in[t_0, t_f]\,.$

Исходя из того, что подынтегральное выражение в (30) должно принимать максимальное значение в каждый момент времени τ, для программы оптимального управления получим следующее представление:

(31) $u_k^*(\tau) = \dfrac{1}{\rho_0}\mathbf{sgn}\,h_{0k}(\tau)\,,\ (k = x, y, z),\ \ \forall\tau\in[t_0, t_f]\,.$

5 Решение задачи оптимального управления переориентацией КА ДЗЗ при перенацеливании аппаратуры зондирования

Отметим, что полученные решения задачи управления с использованием модели (4), (5), (8) непосредственно нельзя применить для объекта управления, представленного исходной моделью (1), (2), (8). Это обусловлено тем, что замена исходной нелинейной модели на «квазилинейную» связана с заменой кинематического уравнения в (1) относительно обобщенных координат $\boldsymbol{\sigma}$ на кинематическое уравнение (3) относительно квазикоординат – $\boldsymbol{\pi}$, которые геометрически не связаны с координатами $\boldsymbol{\sigma}$. В связи с этим возникают затруднения при зада-

нии, исходя из граничных условий (2), соответствующих граничных условий (5) для квазикоординат $\boldsymbol{\pi}$. Исключением является случай малых углов переориентации КА (до нескольких градусов), когда с учетом вида матрицы $\mathbf{N}(\boldsymbol{\sigma})$ для квазикоординат имеют место следующие соотношения [6]:

$$\frac{d\pi_x}{dt} \approx \frac{d\gamma}{dt}; \quad \frac{d\pi_y}{dt} \approx \frac{d\psi}{dt}; \frac{d\pi_z}{dt} \approx \frac{d\vartheta}{dt}.$$

Тогда можно легко получить значения компонент вектора $\boldsymbol{\pi}_f$. В общем случае для нахождения соответствующего значения $\boldsymbol{\pi}_f$ и, следовательно, оптимальной программы управления для исходной задачи (1), (2), (8) предлагается использовать метод последовательных приближений, первоначальная идея и существо которого изложены в [3, 5].

Итак, принимая вначале в (1) $\widetilde{\mathbf{f}}_\omega(t) \equiv 0$, найдем такое значение $\boldsymbol{\pi}_f = \boldsymbol{\pi}_f^{(0)}$, что решение для следующей системы, получаемое с учетом (8) и соответствующих начальных условий:

$$\frac{d\boldsymbol{\pi}^{(0)}}{dt} = \widetilde{\boldsymbol{\omega}}^{(0)}; \quad \frac{d\widetilde{\boldsymbol{\omega}}^{(0)}}{dt} = \mathbf{u}^{(0)}(t) = \mathbf{u}^*(t; \mathbf{c}_\pi^{(0)}, \mathbf{c}_\omega^{(0)}, \boldsymbol{\pi}_f^{(0)}); \quad \frac{d\boldsymbol{\sigma}^{(0)}}{dt} = \mathbf{N}(\boldsymbol{\sigma}^{(0)})\widetilde{\boldsymbol{\omega}}^{(0)},$$

будет удовлетворять с требуемой точностью конечным условиям в (2), (5). Здесь $\mathbf{u}^{(0)}(t) = \mathbf{u}^*(t; \mathbf{c}_\pi^{(0)}, \mathbf{c}_\omega^{(0)}, \boldsymbol{\pi}_f^{(0)})$ – оптимальное управление для системы (4), вычисляемое при $\mathbf{c}_\pi^{(0)} = \boldsymbol{\pi}_f^{(0)} - T_\text{п}\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_0 - \mathbf{g}_{1f}^{(-1)}$ ($T_\text{п} = t_f - t_0$), $\mathbf{c}_\omega^{(0)} = \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_f - \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_0 - \mathbf{g}_{2f}^{(-1)}$, где $\mathbf{g}_{1f}^{(-1)}$, $\mathbf{g}_{2f}^{(-1)}$ – числа, получаемые при решении системы (12), если $\widetilde{\mathbf{f}}_\omega(t) \equiv 0$. Очевидно, что в этом случае $\mathbf{g}_{1f}^{(-1)} = 0$, $\mathbf{g}_{2f}^{(-1)} = 0$. Полученные таким образом вектор-функции $\boldsymbol{\pi}^{(0)}(t)$, $\widetilde{\boldsymbol{\omega}}^{(0)}(t)$, а также $\boldsymbol{\sigma}^{(0)}(t)$ вместе с вектор-функцией $\widetilde{\mathbf{f}}_\omega^{(0)}(t) = \mathbf{f}_\omega(t, \boldsymbol{\sigma}^{(0)}(t), \widetilde{\boldsymbol{\omega}}^{(0)}(t))$ можно рассматривать в качестве начального (здесь – нулевого) приближения для решения задачи (1), (2), (8). Переходя к отысканию последующих приближений для решения этой задачи, следует учитывать, что поправки $\mathbf{g}_{1f}^{(k-1)}$, $\mathbf{g}_{2f}^{(k-1)}$, $k = 1,2,3...$, получаемые при решении системы (12) с $\widetilde{\mathbf{f}}_\omega^{(k-1)}(t) = \mathbf{f}_\omega(t, \boldsymbol{\sigma}^{(k-1)}(t), \widetilde{\boldsymbol{\omega}}^{(k-1)}(t))$, вообще говоря, уже не являются нулевыми. Построение k-го приближения сводится к отысканию такого $\boldsymbol{\pi}_f = \boldsymbol{\pi}_f^{(k)}$, что решение для следующей системы, получаемое с учетом соответствующих начальных условий:

$$(32)\quad \frac{d\boldsymbol{\pi}^{(k)}}{dt} = \widetilde{\boldsymbol{\omega}}^{(k)}; \quad \frac{d\widetilde{\boldsymbol{\omega}}^{(k)}}{dt} = \mathbf{u}^{(k)}(t) + \widetilde{\mathbf{f}}_\omega^{(k-1)}(t); \quad \frac{d\boldsymbol{\sigma}^{(k)}}{dt} = \mathbf{N}(\boldsymbol{\sigma}^{(k)})\widetilde{\boldsymbol{\omega}}^{(k)},$$

будет удовлетворять с требуемой точностью конечным условиям в (2), (5). В этом случае $\mathbf{u}^{(k)}(t) = \mathbf{u}^*(t; \mathbf{c}_\pi^{(k)}, \mathbf{c}_\omega^{(k)}, \boldsymbol{\pi}_f^{(k)})$ – оптимальное управление для системы (4), вычисляемое при $\mathbf{c}_\pi^{(k)} = \boldsymbol{\pi}_f^{(k)} - T_\text{п}\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_0 - \mathbf{g}_{1f}^{(k-1)}$, $\mathbf{c}_\omega^{(k)} = \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_f - \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_0 - \mathbf{g}_{2f}^{(k-1)}$, где $\mathbf{g}_{1f}^{(k-1)} = \mathbf{g}_1^{(k-1)}(t_f)$, $\mathbf{g}_{2f}^{(k-1)} = \mathbf{g}_2^{(k-1)}(t_f)$ – поправки, получаемые при решении системы (12) с вектор-функцией $\widetilde{\mathbf{f}}_\omega^{(k-1)}(t)$.

При $k \to \infty$ для последовательных приближений (12), (32) имеет место:

$\boldsymbol{\pi}_f^{(k)} \to \boldsymbol{\pi}_f^*$; $\mathbf{g}_{1f}^{(k)} \to \mathbf{g}_{1f}^*$; $\widetilde{\mathbf{g}}_{2f}^{(k)} \to \mathbf{g}_{2f}^*$,

где $\mathbf{g}_{1f}^*$, $\mathbf{g}_{2f}^*$ такие, что $\mathbf{c}_\pi^* = \boldsymbol{\pi}_f^* - T_\text{п}\widetilde{\boldsymbol{\omega}}_0 - \mathbf{g}_{1f}^*$, $\mathbf{c}_\omega^* = \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_f - \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_0 - \mathbf{g}_{2f}^*$, а

$\mathbf{u}^*(t) = \mathbf{u}^*(t; \mathbf{c}^*_\pi, \mathbf{c}^*_\omega, \boldsymbol{\pi}^*_f)$ – оптимальная программа управления (8) для задачи (1), (2), (8).

По результатам математического моделирования маневров переориентации применительно к параметрам КА «Ресурс-ДК» для значений показателя $q = 2, \infty$ в (8) была установлена высокая скорость сходимости рассмотренного процесса синтеза оптимального управления, а именно, с точностью выполнения маневра перенацеливания, то есть переориентации КА ДЗЗ в пространстве, до десятка угловых секунд требовалось до 2…5 последовательных приближений.

Заключение

Рассмотрена задача оптимального управления переориентацией КА ДЗЗ при перенацеливании его аппаратуры зондирования, которая сводится к оптимальной проблеме моментов. С помощью принципа максимума Н.Н. Красовского получено общее решение на минимум функционалов типа нормы в пространстве L_q (для $q = 2, \infty$). Предложен вычислительный алгоритм приближенного решения исходной задачи, эффективность которого подтверждена результатами проведенного моделирования. В связи с этим он может быть рекомендован для реализации в бортовой вычислительной системе КА при формировании программ оптимального управления его ориентацией при перенацеливании аппаратуры зондирования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 13-08-97019 р_поволжье_а.

Список литературы

[1] 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 // Сб. тр. XVI С.-Петербургской междунар. конф. по интегрированным системам. СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2009. С. 232-244.

[2] Лебедев В.В., Гансвинд И.Н. Проектирование систем космического мониторинга. М.: Наука, 2010. 388 с.

[3] Горелов Ю.Н., Данилов С.Б., Курганская Л.В., Мантуров А.И., Морозова М.В. Синтез интегральных программ управления угловым движением космических аппаратов дистанционного зондирования // Сб. тр. XIV междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: СамНЦ РАН, 2012. С. 507-517.

[4] Горелов Ю.Н., Курганская Л.В., Морозова М.В., Данилов С.Б. Оптимальное планирование процессов дистанционного зондирования Земли из космоса // Сб. тр. XIX С.-Петербургской междунар. конф. по интегрированным системам. СПб, 2012. С. 252-258.

[5] Горелов Ю.Н., Данилов С.Б., Тропкина Е.А. Об одном подходе к приближенному решению задачи оптимального управления переориентацией космического аппарата // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2011, т.18, в.3. С.429-431.

[6] Маркеев А.П. Теоретическая механика. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и стохастическая динамика», 2007. 592 с.

[7] Красовский Н.Н. Теория управления движением: линейные системы. М.: Наука, 1965. 476 с.

[8] Мороз А.И. Курс теории систем. М.: Высшая школа, 1987. 304 с.

[9] Горелов Ю.Н. О сводимости оптимальной проблемы моментов к парциальным в задачах управления многомерными линейными системами // Известия СамНЦ РАН, 2012, № 6. – С.177-181.

[10] Бертсекас Д. Условная оптимизация и методы множителей Лагранжа. – М.: Радио и связь, 1987. 400 с.

ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В.А. Зеленцов[1], А.П. Ковалев[1], В.И. Салухов[1], В.И. Хименко[2]

[1]Санкт-Петербургский институт информатики и информатизации РАН
199178, Санкт-Петербург, 14 линия, 39, Россия
spiiran@iias.spb.su
тел: +7 (812) 328-01-03, факс: +7 (812) 328-44-50
[2]Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, С-Петербург, ул. Большая Морская, 67, Россия
vera@aanet.ru, тел/факс: +7 (812) 710-6510

Ключевые слова: *космическая деятельность, дистанционное зондирование Земли, мониторинг, инновационно-образовательный центр*

Abstract

The general approaches and options of introduction practical realization of innovative and space technologies in the problems of solution regions social and economic development of on the basis of creation of scientifically and educational centers are considered.

Введение

К числу наиболее приоритетных направлений развития науки, техники и новейших технологий вот уже нескольких десятилетий относятся проблемы совершенствования космических систем, внедрения результатов космической деятельности и инновационных космических технологий (ИКТ) в решение задач социально-экономического развития регионов. Уникальные возможности использования ИКТ включают в себя создание систем спутниковой навигации, систем космической связи, управления и передачи данных. Широкий спектр задач решается на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса.

Разработка, адаптация и внедрение космических технологий является сложным и наукоемким видом деятельности, требующим междисциплинарного подхода и участия специалистов и организаций различного профиля – научных, образовательных, производственных. Как показывает мировой и отечественный опыт, наиболее эффективным организационным механизмом продвижения космических технологий является создание научно-образовательных центров. Формирование таких центров представляет собой многоплановую и масштабную научно-техническую задачу, поскольку они представляют собой сложные, территориально-распределенные организационно-технические системы.

Интенсивность проведения исследований и впечатляющие результаты космической деятельности (РКД) обуславливают все более острую потребность в подготовке специалистов, пригодных к практической работе в структурах интегрированных систем мониторинга, ситуационного и кризисного управления с использованием наземно-аэрокосмических данных. Создаваемые в настоящее время глобальные системы мониторинга потенциально опасных природных процессов и явлений, сложных техногенных объектов являются следствием очевидной целесообразности организации информационного обмена и координации совместных действий всевозможных структур муниципального, регионального и федерального уровней, включая и международное сотрудничество. Именно поэтому такое сложное переплетение направлений и многоаспектность решаемых задач обуславливает особую актуальность формирования информационно-методического обеспечения функционирования центров обработки космической информации в сфере образования и подготовки специалистов.

1 Центры космических услуг – основа космической пользовательской инфраструктуры

Мощным толчком продвижения инновационных космических технологий для решения самого широкого круга социально экономических задач явилось создание и успешное функционирование научно-образовательных центров для ведения образовательной и производственной деятельности, проведения научных исследований по космической тематике.

В Санкт-Петербурге основной из созданных интегрирующих структур является Северо-западный центр аэрокосмического мониторинга (СЗЦАКМ), в состав которого также входят Инновационно-образовательный центр космических услуг и Объединенный учебный центр обработки космической информации.

В составе сформированных центров объединяются потенциальные возможности вузовского образования и науки (Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения - ГУАП), академической науки (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН – СПИИРАН), одного из ведущих предприятий космической отрасли в Северо-Западном регионе (ФГУП КБ «Арсенал»), потенциал научно-производственного предприятия, специализирующегося на разработке систем телеметрии и мониторинга (ЗАО «Специальное конструкторское бюро «Орион»), потенциал одного из ведущих российских разработчиков систем управления («Концерн «Гранит-Электрон») и потенциал основной организации по информационно-аналитическому обеспечению деятельности исполнительных органов государственной власти Санкт-Петербурга (ГУП «Информационно-аналитический центр»). Общая структура Северо-западного центра аэрокосмического мониторинга показана на рисунке 1.

Рисунок 1 – Структура Северо-западного центра космического мониторинга

Основными направлениями деятельности СЗЦАКМ являются:

1) ***образовательная деятельность:***
   - подготовка специалистов по программам высшего профессионального образования (бакалавриат и программы магистратуры):
   - подготовка кадров высшей квалификации (аспирантура и докторантура);
   - подготовка и переподготовка специалистов по программам дополнительного образования и программам повышения квалификации в области перспективных технологий аэрокосмического мониторинга и использования ИКТ;
2) ***научно-исследовательская деятельность:***
   - разработка новых технологий интегрированного использования космической информации, методов приема и обработки космической информации, а также технологий мониторинга с использованием данных дистанционного зондирования Земли из Космоса (ДЗЗ);
3) ***производственно-коммерческая:***
   - проведение мониторинга территорий и оперативное предоставление объективной информации для принятия решений по управлению хозяйствующим субъектам и органам исполнительной власти.

В настоящее время СЗЦАКМ оснащен современным технологическим оборудованием для решения задач разработки и внедрения ИКТ, включая установленную в ГУАП станцию приема и обработки данных ДЗЗ, а также распределенную технологическую платформу для разработки, испытаний и применения информационных технологий и систем наземно-космического мониторинга.

Ключевым направлением деятельности центров является интеграция последних научных достижений в области ИКТ с образовательными программами по подготовке и переподготовке специалистов в этой высокотехнологической сфере. Созданная инфраструктура включает в себя учебно-методические комплексы и учебные рабочие места Инновационно-образовательного ЦКУ и Объединенного учебного центра, а также сформированную инновационную систему доступа к пространственным данным со спутников дистанционного зондирования Земли из Космоса.

Убедительным подтверждением правильности выбранного направления развития ИКТ в регионе является то, что в ходе развития рассматриваемых центров интеграции образования, науки и промышленности Санкт-Петербурга совместно с ГУАП образованы 5 базовых кафедр СПИИРАН и ОАО «Концерн «Гранит-Электрон».

Учебно-материальная база для подготовки специалистов в области ИКТ является составным элементом общей инфраструктуры СЗЦАКМ, (рисунок 2), что позволяет проводить обучение в неразрывной связи с решением прикладных задач обработки данных ДЗЗ, мониторинга и управления природно-технологическими объектами. К настоящему времени уже существует опыт проведения обучения специалистов самого разного профиля. Учебно-методическое обеспечение занятий предполагает гибкий подход к формированию программ подготовки и, как правило, корректируется в соответствии с составом и профессиональным уровнем формируемой группы. Имеются наработки по обучению группы учителей Ленинградской области по программе «Организация проектной деятельности школьников с использованием материалов дистанционного зондирования Земли из Космоса».

Группа слушателей была сформирована из учителей школ Ленинградской области, которые преподают главным образом физику, как одну из ведущих дисциплин естественнона учного цикла с выраженной мировоззренческой направленностью. Полученные на курсах знания и навыки, несомненно, окажут позитивное влияние на качество и методический уровень проведения занятий в школах и усилят мотивацию к обучению в сфере ИКТ.

Вместе с тем, в настоящее время отсутствует в полной мере отработанная и общепринятая система подготовки специалистов, пригодных в полном объеме обеспечивать

функционирование глобальных систем мониторинга с космической информации и данных ДЗЗ.

Важно отметить, что в процессе обработки информации необходимо обеспечить глобальность, оперативность и возможность осуществления прогноза. При этом системы, формирующие информационно-телекоммуникационные ресурсы глобальных систем мониторинга, активно совершенствуются и видоизменяются, что создает дополнительные сложности в разработке структуры и содержания информационно-методического обеспечения подготовки специалистов.

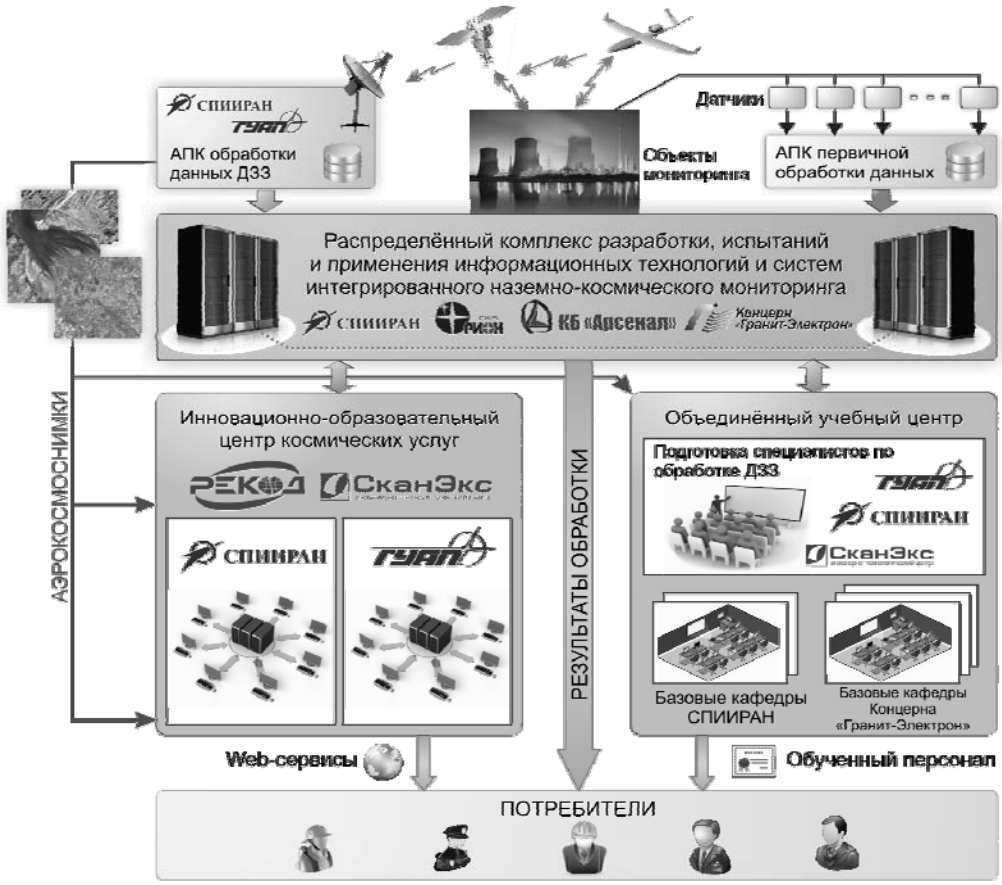


Рисунок 2 - Инфраструктура СЗЦАКМ

При формировании облика системы подготовки специалистов данного профиля необходимо учитывать следующие особенности. Результаты космической деятельности должны быть максимально интегрированы с реальными социально-экономическими процессами, протекающими в регионах. Следует сформировать качественно новую региональную навигационно-информационную инфраструктуру, обеспечивающую объективный и комплексный мониторинг основных отраслей экономики – сельское, водное, лесное хозяйства, транспорт, требований к глубине и уровню интеграции разнородных данных систем мониторинга. Учитывая сложность объектов мониторинга, принципиально важной является необходимость обработки не только массивов данных, но знаний экспертов о наблюдаемых объектах и процессах качественно нового уровня, способных использовать космическую информацию в интеграции с информацией из других источников при решении задач управления.

2 Основные пути развития Инновационно-образовательного центра космических услуг

Основными элементами инфраструктуры созданного СЗЦАКМ являются:

- Распределенный комплекс разработки, испытаний и применения информационных технологий и систем мониторинга с использованием аэрокосмических данных.
- Станция приема данных ДЗЗ Х-диапазона «Унискан-24».
- Аппаратно-программные комплексы обработки данных дистанционного зондирования Земли и предоставления геосервисов.
- Инновационно-образовательный Центр космических услуг, созданный совместно с Роскосмосом (ОАО НПК «РЕКОД») и ИТЦ «СКАНЭКС».
- Объединенный учебный центр обработки космической информации для подготовки сертифицированных специалистов в области обработки данных дистанционного зондирования Земли и их использования при управлении.

Основными задачами развития Инновационно-образовательного Центра являются:

1) Проведение фундаментальных и прикладных исследований в области аэрокосмического мониторинга, разработка технологий интегрированного наземно-космического мониторинга и широко доступных сервисов для исполнительных органов государственной власти, организаций и населения.
2) Разработка информационно-методического обеспечения, рекламно-организаторская работа с потенциальными заказчиками, обучение и подготовка квалифицированных специалистов в области обработки аэрокосмической информации и внедрения результатов космической деятельности для различных органов управления, включая ситуационные, мониторинговые, кризисные центры.
3) Обеспечение доступности объективных данных о состоянии различных отраслей городского хозяйства для органов управления, других заинтересованных организаций и населения

Разработана и адаптирована к решению задач интегрированного наземно-космического мониторинга интеллектуальная информационная технология и соответствующие системы мониторинга и поддержки принятия решений при управлении сложными объектами в различных предметных областях (космонавтика, энергетика, городское хозяйство), которые базируются на комбинированном использовании логических, лингвистических и математических моделей и методов, обеспечивающих параллельную, распределенную обработку и анализ в реальном времени сверхбольших объемов измерительной информации при наличии в них некорректных, неточных и противоречивых данных.

Созданные в СЗЦАКМ технология и системы мониторинга успешно реализованы при разработке и эксплуатации целого ряда объектов космической отрасли, атомной энергетики, химической промышленности. В настоящее время эта технология находит все более широкое применение в международных проектах, в частности, при создании Интегрированной платформы наземно-космического мониторинга в интересах России и Латвии (проект INFROM программы приграничного сотрудничества ESTLATRUS).

За последние три года с использованием инфраструктуры СЗЦАКМ выполнено более 25 проектов прикладного характера в интересах различных заказчиков. К числу наиболее важных прикладных результатов относятся разработанные модели и методики обработки аэрокосмической информации в интересах управления городским хозяйством Санкт-Петербурга.

Отличительной особенностью выполняемых СЗЦАКМ работ является инновационность используемых подходов к решению задач мониторинга. Для обеспечения достоверности результатов используются разработанные уникальные информационные технологии интегрированной обработки данных, поступающих из различных источников: наземных и аэрокосмических.

Заключение

Полученный опыт создания и функционирования Северо-Западного центра аэрокосмического мониторинга, Инновационно-образовательного ЦКУ и Объединенного учебного центра обработки космической информации показывают правомерность выбранного направления широкого внедрения инновационных космических технологий в Северо-Западном регионе РФ, позволяют на практике реализовать идею интеграции науки, образования и производства и использовать все преимущества этой интеграции во многих сферах социально-экономической деятельности региона.

Благодарности

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-08-01016, 11-08-00767, 12-07-13119-офи-м-РЖД, 12-07-00302, 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250), Программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект №2.11), проекта ESTLATRUS 2.1/ELRI –184/2011/14 «Integrated Intelligent Platform for Monitoring the Cross-Border Natural-Technological Systems», проекта ESTLATRUS/1.2./ELRI-121/2011/13 «Baltic ICT Platform».

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПИЛОТИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МАНЕВРЕННЫХ САМОЛЕТОВ НА МАЛЫХ ВЫСОТАХ

О.Н. Корсун[1], В.Н. Тихонов[2]

[1]Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем
125319, Москва, ул. Викторенко, 7, Россия
marmotto@rambler.ru
тел: +7 (495) 637-62-56, факс: +7 (499) 157-75-22

[2]Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
125993, г. Москва, Волоколамское ш., 7
fly_dabster@mail.ru
тел: +7 (499) 158-49-39, факс: +7 (499) 158-49-39

Ключевые слова: *современные маневренные самолеты, маловысотный полет, опасные факторы, комплексные системы управления, моделирование, системный подход, летные испытания*

Abstract

The aircraft with hightly automated control system when flying at low altitudes may meet such regimes of the control system functioning, which together with other factors could lead to a decrease in the level of safety. The analysis includes the planning aspects of flight tests, and evaluation of the performance of closed-loop system "pilot-aircraft -control system ". The especial attention is paid to the influence of the performance of maneuvers at low altitude, the most critical from the standpoint of safety.

Введение

При полете на малых высотах для современных маневренных самолетов, оснащенных, как правило, комплексными системами управления (КСУ), возможно возникновение таких свойств управляемости самолета, которые в совокупности с другими факторами могут приводить к снижению уровня безопасности полетов (БзП). В наибольшей степени этот эффект проявляется при малых скоростях, что связано с необходимостью реализации больших углов атаки и возможной неустойчивостью по скорости, либо при больших скоростных напорах, особенно в трансзвуковом диапазоне.

Требуют рассмотрения следующие группы явлений:

- снижение запасов устойчивости контура «КСУ-самолет»;
- снижение при больших скоростных напорах точности коррекции в звеньях КСУ, реализующих передачу управляющего сигнала летчика, обратные связи, а также автоматическое ограничение полетных параметров;
- снижение при больших скоростных напорах точности и быстродействия отработки управляющих воздействий;
- ограничение алгоритмами КСУ достигаемых параметров движения самолета менее фактически располагаемых и потребных для безопасного завершения маневра.
- выполнение полета в условиях, когда фактические располагаемые избытки тяги самолета даже на нисходящих маневрах отсутствуют или меньше нуля, а быстрая потеря скорости приводит к еще более быстрому уменьшению располагаемых аэродинамических сил, обеспечивающих траекторное управление.
- дисгармония управления угловыми и траекторными фазовыми координатами, приводящая к возможности непреднамеренного выхода за границы предельной области режимов поле-

та при пространственном движении.

- воздействие турбулентности, в том числе при наличии функций её подавления КСУ.

Анализ включает аспекты планирования летных испытаний КСУ, оценки функционирования систем «КСУ-самолет», «летчик-самолет», системный подход к оценке авиационных комплексов (систем) как обобщение полученных результатов.

1 Анализ основных факторов

При маневрировании на малых высотах кроме минимальных запасов времени для принятия правильных решений и реализации управляющих воздействий летчиком для самолетов с комплексными системами управления (КСУ) характерны следующие особенности [1, 2].

1) Возрастает влияние чистых запаздываний в тракте передачи управляющих сигналов при больших скоростных напорах в связи с «быстрой» собственной динамикой короткопериодического движения. При существенных запаздываниях это приводит к снижению запасов устойчивости по фазе контура самолет-КСУ.
2) Большие скоростные напоры на малых высотах соответствуют числам М, близким или принадлежащим трансзвуковому диапазону, характеризующемуся интенсивным изменением аэродинамических характеристик даже при небольших изменениях числа М.
3) Настройки корректоров в цепях прямых и обратных связей алгоритмов КСУ имеют особенности, обусловленные, во-первых, увеличенными относительными погрешностями аппроксимации зависимостей коэффициентов от скоростного напора при его больших значениях, во-вторых, особенностями аэродинамических характеристик, и, соответственно, потребным видом таких зависимостей в трансзвуковом диапазоне скоростей (рисунки 1, 2).
4) Настройки ограничительных режимов КСУ, реализующие функции ограничительных систем по углу атаки, перегрузкам, угловым скоростям и приборной скорости полета также имеют особенности, обусловленные прочностными характеристиками самолета и уже перечисленными факторами (рисунок 2).
5) В связи с повышенной эффективностью органов управления при больших скоростных напорах (на больших дозвуковых скоростях) потребные величины отклонений рулевых поверхностей приближаются к величинам зон нечувствительности (люфтов) в тракте передачи задающих воздействий, что может приводить к снижению запасов устойчивости контура КСУ-самолет вплоть до возникновения автоколебаний (предельных циклов).

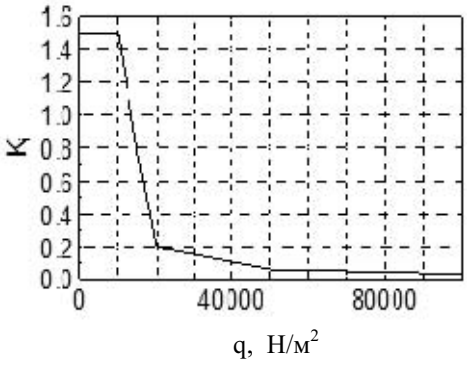


Рисунок 1 – Пример типовой зависимости $K_i=f(q)$

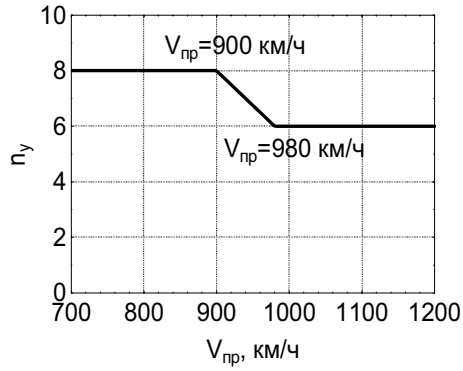


Рисунок 2 – Пример зависимости $n_{удопОПР}=f(V_{пр})$

6) КСУ обеспечивают приемлемые характеристики управляемости в расширенном диапазоне углов атаки, в том числе в областях, где фактические располагаемые избытки тяги самолета даже на нисходящих маневрах отсутствуют или меньше нуля. Это связано, во-первых, с интенсивно возрастающим на больших углах атаки сопротивлением, во-вторых, с уменьшением на больших углах атаки эффективной тяги. Быстрая потеря скорости приводит к еще более быстрой потере располагаемых аэродинамических сил, обеспечивающих траекторное управление, что при маловысотном маневрировании крайне опасно.
7) Располагаемая эффективность управления угловыми движениями самолета на больших углах атаки и малых приборных скоростях сохраняется достаточно высокой благодаря специфическим алгоритмам работы КСУ и интеграции в систему управления двигателей, что, в связи с упомянутым в пункте 6, может приводить к превышению критических скоростей вращения при пространственном движении с выходом за границы предельной области режимов полета по углам атаки и скольжения [2]. Указанная особенность при пилотаже на малых высотах даже на восходящих маневрах потенциально опасна, т.к. требует нестандартных (с изменением стереотипа) управляющих действий летчика, может приводить к развитию аварийных и даже катастрофических ситуаций.

2 Моделирование некоторых маловысотных маневров

Рассмотрим влияние некоторых факторов на характеристики нисходящих фигур пилотажа на больших приборных скоростях, а именно переворотов, наиболее критичных с точки зрения обеспечения БзП. Структурная схема модели переворота для гипотетического современного маневренного самолета, отражающая основные аэродинамические и динамические характеристики самолетов-аналогов (Як-130 и МиГ-29(КУБ) [1]) , представлена на рисунке 3.

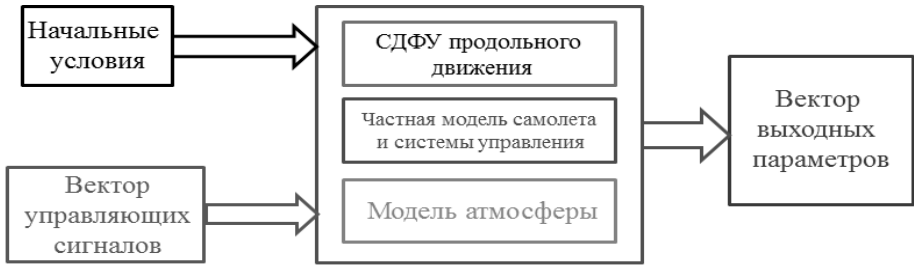


Рисунок 3 – Модель переворота для современного маневренного самолета

Модель движения после выполнения полубочки представляется системой дифференциальных уравнений (СДФУ) продольного траекторного движения с использованием базы данных аэродинамических коэффициентов самолетов-аналогов и учитывает:

динамику переходного процесса при создании перегрузки, которая описывается передаточной функцией вида

$$\frac{n_y(p)}{X_B(p)} = \frac{b_1 p + b_0}{p^2 + a_1 p + a_0} \ ;$$

работу ограничителя предельных режимов (ОПР) и особенности алгоритмов КСУ в виде зависимостей передаточных чисел в прямой и обратных цепях от скоростного напора, числа М, нормальной перегрузки; изменение тяги силовой установки в зависимости от высоты полета, числа М и положения рычагов управления двигателями (РУД).

Оценивалось влияние на потерю высоты следующих факторов: скорость ввода в переворот; выпуск тормозного щитка (ТЩ); закон управления силовой установкой;пересиливание упора ОПР с достижением перегрузки до $0.95\,n_y^p$; вертикальный порыв (восходящий) 5, 10, 15 м/с в диапазоне приращений углов тангажа $\Delta\upsilon = -60°\ldots-120°$. Вероятность попадания самолетов данного класса в вертикальный восходящий порыв $W = 5\ \ldots10$м/с лежит в пределах от $5\cdot10^{-3}$ до 10^{-2} на один час налета [3].

В качестве диапазона режимов, характеризуемого сосредоточением критических факторов выбран переворот, выполняемый при условиях: $H_{\text{ввода}}$=3000м, $V_{\text{прввода}}$=800…950 км/ч, закон управления перегрузкой: выход на максимальное значение, соответствующее полному отклонению ручки, за 2с. За опорный режим принят переворот с $V_{\text{пр}}$=900 км/ч (потеря высоты составляет ΔH=2779 м). Оценка потери высоты при варьировании указанных факторов выполнялась при сохранении равными прочих условиях. Результаты моделирования представлены на рисунках 4–6.

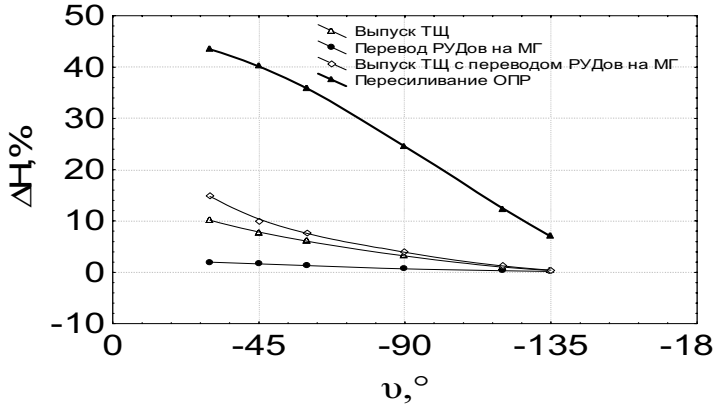


Рисунок 4 – Относительное уменьшение высоты в зависимости от момента начала действия различных средств по абсолютной величине угла приращения тангажа

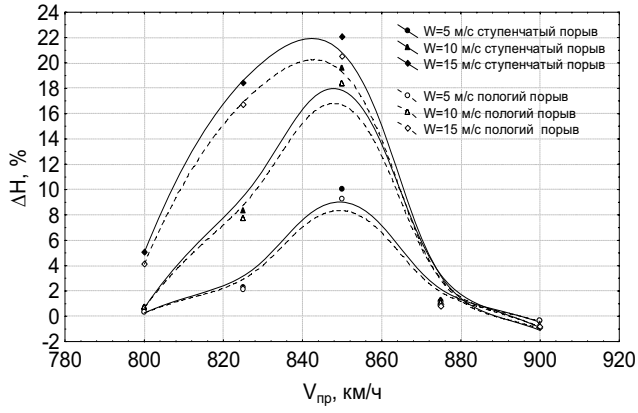


Рисунок 5 – Зависимость прироста потери высоты за вывод $\Delta H=f(V_{\text{прввода}})$ от скорости ввода при воздействии вертикального восходящего порыва

Эти результаты показывают, в частности, что при действии вертикального восходящего

порыва и соответствующего увеличения приборной скорости происходит перестройка закона ограничений нормальной перегрузки, и, как следствие, возрастает потеря высоты (рисунок 5, 6).

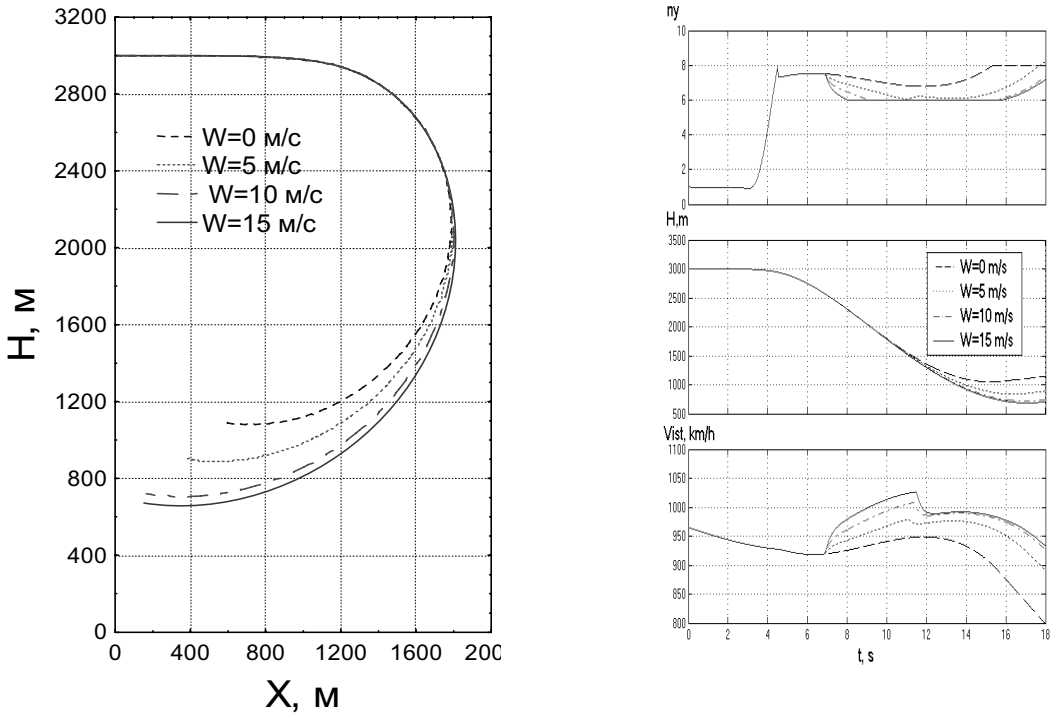


Рисунок 6 – Варианты траекторий переворота и изменение $n_y=f(t)$, $H=f(t)$, $V_{ист}=f(t)$ при разных величинах «сглаженного» восходящего вертикального порыва для прочих одинаковых условий ($H_{вв}$=3000м, $V_{првв}$=850км/ч)

3 Требования по оценке особенностей маловысотного пилотирования при испытаниях авиационных комплексов

Результаты проведенного анализа позволяют сделать некоторые обобщения в части применения моделирования как составной части испытаний авиационных систем. Авиационный комплекс (АК) – сложная техническая система (СТС). Тактико-техническое задание (ТТЗ) на АК – обобщенная вербально-логическая модель его функциональных характеристик, построенная по принципу «черного ящика», когда заданы условия функционирования СТС (вход) и показатели функционирования (выход), а оператор системы не определен. Определение оператора системы, т.е. совокупности моделей его составных частей – задача синтеза, т.е. проектирования. В этом смысле оператор системы есть интерпретация формального языка, на основании которой увязываются показатели качества функциональных характеристик и условия функционирования СТС.

Использование подхода, основанного на принципе «черного ящика» в испытаниях непродуктивно, т.к. для СТС их цель не только в определении соответствия АК ТТЗ, но и в доопределении оператора системы АК. Испытания СТС системотехнически есть процедура иденти-

фикации оператора системы и анализа: большинство показателей качества СТС формулируются в терминах более или менее формализованных моделей, являющихся компонентами оператора системы.

Научно-технический задел для разработки АК своей основой имеет различные модели составных частей АК и процессов их функционирования с различной степенью интеграции и общности. Таким образом, при условии, что проблемы измеримости и наблюдаемости СТС решены, и при синтезе оператора системы, и в испытаниях могут использоваться однотипные модели составных частей СТС и процессов их работы.

До недавнего времени такое соответствие не обеспечивалось. Именно максимальная степень неполноты модели при её адекватности исследуемым свойствам характеристик принималась как важнейшее требование к «испытательным» моделям. Для современных и перспективных АК глобальная информатизация является основой применения натурно-модельных технологий в испытаниях, что обеспечивает значительное сокращение затрат на летные испытания.

Процедура испытаний АК как СТС наиболее рационально реализуется по схеме: моделирование для выбора условий экспериментов – натурные эксперименты для идентификации частных моделей – эксперименты для их верификации – коррекция частных моделей и их связей – натурно-модельные и натурные эксперименты для идентификации обобщенных показателей АК и верификации обобщенных моделей оператора системы АК.

Речь не может идти о разделении или взаимозаменяемости процессов моделирования и натурных экспериментов: наиболее эффективно именно рациональное их сочетание в едином процессе испытаний АК как СТС.

Заключение

1) Необходимым условием разработки современных самлетов с высокоавтоматизированными системами управления является системный анализ всех факторов, потенциально снижающих уровень БзП. Целесообразно формирование гибких алгоритмов работы ограничительных режимов КСУ.
2) Методическое обеспечение летных испытаний должно формироваться на основе натурно-модельного подхода и основываться на широкомасштабном применении средств математического и полунатурного моделирования.
3) Целесообразно исследование влияние всех перечисленных в разделе 1 особенностей режимов полета и КСУ.

Список литературы

[1] Ефремов А.В., Овчаренко В.Н., Тихонов В.Н. и др. Проблемы устойчивости и управляемости современных самолетов. Статья в сборнике докладов Всероссийской конференции, посвященной 100-летию И.В. Остославского, Москва: МАИ (ГТУ), 2004г.,с. 23-33.

[2] Николаев С.В., Тихонов В.Н. Особенности пространственного движения маневренных самолетов с высокоавтоматизированными системами управления. Москва, ВИНИТИ, - Проблемы безопасности полетов, 2010, №4, с 21-26.

[3] Медников В.Н. Динамика полета и пилотирование самолетов. Монино, ВВА им. Гагарина, 1976 . 465с.

МЕТОД ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ В АНАЛИЗЕ ДВИЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

П.К. Кузнецов, Б.В. Мартемьянов

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
kurnesov@mail.ru
тел: +7 (846) 242-38-82, факс: +7 (846) 2-784-400

Ключевые слова: *изображение, вектор скорости, определение движения, оптический поток*

Abstract

The advanced method of an optical flow calculation is considered. The method, which is called as the functionalizanion method, appears as a generalization of gradient methods of optical flow calculation. It is based on the analysis of the video information containing in two successive frames of the image. The functionalizanion method is more robust and accurate in comparison with known variants of the gradient method.

Введение

Фундаментальной основой множества прикладных задач наведения и целеуказания является задача высокоточного совмещения изображений объектов, получаемых оптико-электронными системами (ОЭП) при наблюдении с борта мобильной платформ.

Так, изобразительная аппаратура КА ДЗЗ «Ресурс-ДК» имеет три спектрозональных оптико-электронных преобразователя (ОЭП), которые обеспечивают получение спектрозональных изображений, условно называемых R, G, B. Конструктивно ОЭП распложены на картинной плоскости так, что изображения проецируются на них в различном ракурсе и в различные моменты времени. Эти различия невелики: параллакс составляет 1-3 градуса, разница моментов времени появления изображения одного и того же объекта на различных ОЭП составляет от долей до 2 – 3 секунд. Поэтому изображения, преобразованные различными ОЭП, имеют не только различия «цветовые», но и морфологические, и радиометрические. Это существенно усложняет задачу совмещения изображений.

При решения задачи совмещения изображений вычисляют оптический поток (векторное поле скоростей движения изображений), по которому и производят совмещение. Основные методы, применяемые для вычисления оптического потока, являются экстремально-корреляционный (ЭК) и градиентный [1, 2]. Преимуществами градиентных методов, по сравнению с экстремально-корреляционными, являются меньшая вычислительная сложность и робастность к морфологическим изменениям изображений.

Развитием методов градиентной группы является метод функционализации параметров изображения [3], предложенный авторами данной статьи. В методе функционализации используются, также как и в градиентных методах, пространственно-временные производные, но не самого изображения, а специально задаваемого на изображении функционала. С использованием этих производных составляется система уравнений функциональной связи (ФС-уравнений) измеримых характеристик изображения с параметрами движения изображения. Метод функционализации снимает проблему вычисления частных производных от функции освещенности изображения по пространственным координатам, которая является «больным местом» градиентных методов, что делает метод робастным к действию случайных шумов.

Ниже рассматривается вариант метода функционализации, который адаптирован для решения задачи совмещения слабо «разноракурсных» изображений. Причем метод, в отличие от известных вариантов градиентного метода, не требует предварительной фильтрации изображения.

1 Постановка задачи совмещения изображений

Реальные изображения (видеосигналы) $\tilde{E}(x, t)$ представим в виде:

(1) $\tilde{E}(x,t) = E(x,t) + \eta(x)$

где $E(x,t) = (1 + \gamma(t))I(x, t)$; $I(x, t)$ – информативная часть видеосигнала, которая определяется альбедо объектов наблюдаемой сцены и их освещенностью; $\gamma(t)$ – мультипликативная помеха, вызванная изменением во времени освещенности наблюдаемой сцены,

$\gamma(t) : T \Rightarrow R_+^1, \gamma(t) > -1$; $\eta(x)$ – низкочастотная, «почти константная», помеха (геометрический шум), специфичная для конкретной ПЗС матрицы или какой-либо ее части.

Будем считать, что должны быть совмещены фрагменты двух изображений – L и R. Изображения L и R представляются в виде (1). При этом изображения и их компоненты отмечаются индексами-маркерами L и R, например: $\tilde{E}_L(x,t)$, $\tilde{E}_R(x,t)$.

На изображениях L и R зададим декартовы системы координат O_Lxy и O_Rxy, соответственно, оси O_Lx и O_Rx которых ориентированы параллельно строкам изображений.

Используем методику совмещения изображений «локальными фрагментами», по которой производится циклический перебор (последовательное сканирование) точек (пикселей) изображения L. Для каждой выбранной на L точки (обозначим ее x_L) задается некоторый фрагмент Ξ_L, накрывающий эту точку. Задача совмещения фрагментов изображений состоит в отыскании на изображении R такого фрагмента Ξ_R (сопряженного), изображение которого в некотором смысле наилучшим образом совпадет с изображением фрагмента Ξ_L На фрагменте Ξ_R назначается точка x_R, к которой «привязывается» положение фрагмента Ξ_R .Точки x_L и x_R назовем сопряженными.

Для отыскания точки x_R, сопряженной с x_L, здесь используется излагаемая ниже итерационная процедура совмещения изображений. Для каждой очередной сканируемой точки x_L задается начальное приближение x_{R0} положения искомой сопряженной точки x_R .

Примем, что сканирование изображения L начинается с точки x_L =0**.** Для нее начальное приближение x_{R0} сопряженной точки может быть определено по имеющейся априорной информации о скорости движения изображения или задано произвольно. Начальное приближение x_{R0} для последующих точек x_L , к которым обращается процедура сканирования, определяется с учетом уже найденных векторов относительного сдвига сопряженных точек. Для точки x_L необходимо вычислить вектор смещения s, уточняющий положение сопряженной точки x_R : $x_R = x_{R0}+s$; $s=[s_x\ s_y]^T$.

Вычисляемое приближение для вектора сдвига s на итерации процесса совмещения с номером k обозначим как $s(k)$, а фрагмент изображения в окрестности точки $x_R(k) = x_{R0} + s(k)$ – как $\Xi_R(k)$.

2 Методика построения основного функционала

В методе функционализации [3] вычислительные процедуры осуществляются не с изображением $E(x,t)$, как таковым, а с некоторым, определенным на изображении функционалом, называемым основным функционалом метода. Построение возможного варианта основного функционала описывается ниже.

В окрестности совмещаемой точки x_L выделим фрагмент изображения Ξ_L и покроем его системой $\left\langle D_L^i \right\rangle$ прямоугольных окон анализа D_L^i $i \in (\{1,...,N\})$ (для изображения R: $x_R(k)$, $\Xi_R(k)$, $\left\langle D_R^i(k) \right\rangle$, соответственно). Стороны окон ориентируем параллельно осям системы координат O_Lxy (O_Rxy). На каждом окне D_L^i системы $\left\langle D_L^i \right\rangle$ (соответственно, ($\left\langle D_R^i(k) \right\rangle$) определим линейный функционал вида:

(2) $F^i = \iint_{D_L^i} K^i(x)\tilde{E}(x,t)dxdy$

где $\tilde{E}(x,t)$ – видеосигнал, создаваемый изображением движущегося объекта; $K^i(x)$ – функция веса: $K(x): R^2 = R^1, \forall x \in \Gamma(D_L^i)(K(x) = 0)$, $\Gamma(D_L^i)$ – граница окна анализа.

Назовем образованное так покрытие, вместе с заданными на нем функционалами, как «штихель», обозначив его $Sh(x_L)$ ($Sh(x_R(k))$), соответственно). Будем говорить, что штихель $Sh(x_R(k))$ ($Sh(x_R(k))$) «накрывает» фрагмент изображения, покрываемый системой $\left\langle D_L^i \right\rangle$ ($\left\langle D_R^i(k) \right\rangle$) окон анализа.

Для покрытия $\left\langle D_L^i \right\rangle$ образуем множество ψ допустимых пар номеров окон:

$$\psi = \{(i,j) : (i,j \in \{1,...M\}) \wedge (i > j) \wedge (D_L^i \cap D_L^j \neq \varnothing)\}.$$

Выберем пару $(i, j) \in \psi$. Вид основного функционала определим на окнах с этими номерами следующим образом:

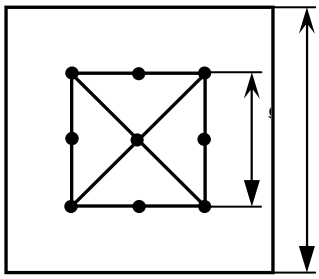
(3) $\Phi_L^{(i,j)} = (N_L^{(i,j)})(G_L)^{-0,5}$

где $N_L^{(i,j)} = F_L^i - F_L^j$, $F_L^\beta = \iint_{D_L^\beta} K^\beta(x)E_L(x)dx$, $(\beta \in \{i,j\})$;

$G_L(\tilde{E}) = \sum_{(i,j)\in\psi} (N_L^{(i,j)})^2$.

Таким образом, основной функционал (3) является нелинейным нормированным функционалом. Нормирование производится значением полной вариации изображения на фрагменте изображения Ξ_L.

На рисунке 1 приведен пример штихеля, заданного системой девяти окон $D_L^i (i \in \{1,...,9\})$ и накрывающего фрагмент изображения квадратной формы с длиной стороны квадрата, равной *d*. На рисунке 1 показано положение только одного, центрального, окна D_L^β штихеля. В примере использован функционал с пирамидальной функцией веса [3]. Диагоналями на окне показаны проекции ребер пирамидальной функции веса линейного функционала (2), определенного на этом окне. Принято, что окна имеют форму квадрата с длиной стороны d/2и размещены по штихелю равномерно. Таким образом, каждое окно имеет непустую область пересечения с соседними окнами. В качестве точки привязки x_L штихеля выберем центральную точку 5 окна D_L^β. Штихель $Sh(x_L)$ накрывает фрагмент Ξ_L изображения, привязанный к точке x_L. Аналогичным образом построим идентичный по форме штихель $Sh(x_R(k))$ на изображении *R*.



● - центры окон анализа
1÷9 – номера окон анализа в составе штихеля

Рисунок 1 – Топология штихеля

В результате перебора пар номеров $(i, j) \in \psi$ сформируем множество основных функционалов $\Phi_{L=}\left\{\Phi_L^{(i,j)}\right\}$. Аналогичным образом строится множество функционалов $\Phi_R(k) = \left\{\Phi_R^{(i,j)}(k)\right\}$.

Очевидно, функционал (3) инвариантен к помехе $\gamma_L(t)$, и, если принять, что на фрагменте изображения, накрываемого штихелем, геометрический шум $\eta_L(x) = const$, то он инвариантен и к этой помехе.

3 Итерационная процедура совмещения изображений

Для каждого функционала $\Phi_L^{(i,j)} \in \mathbf{\Phi}_L$ строится ФС уравнение, связывающее измеримые характеристики изображения с параметрами скорости его движения. ФС уравнение строится по методике из [3] вычислением полной производной по времени функционала $\Phi_L^{(i,j)}$ в силу уравнения движения изображения [3]. Принимается при этом, что на совмещаемом фрагменте скорость движения изображения постоянна.

Уравнение движения изображения имеет вид:

$$ds(x,t)/dt = v(x - s(x,t),t)\ ; \quad s(x,t_0) = 0\ .$$

С учетом этого, ФС уравнение приобретает вид:

(4) $\Phi_L^{(i,j)} = C_{Lx}^{(i,j)} v(x_L)$,

где $v(x_L)$ – вектор скорости движения изображения Lв точке x_L,

$C_{Lx}^{(i,j)} = \left[c_{Lx}^{(i,j)} \quad c_{Ly}^{(i,j)}\right]$ – вектор-строка,

$c_{L\alpha}^{(i,j)} = (N_{L\alpha}^{(i,j)}(G_L)^{-0,5} - \Phi_L^{(i,j)}(G_L)^{-1}\sum(N_L^{(i,j)} N_{L\alpha}^{(i,j)}))$,

$N_{L\alpha}^{(i,j)} = F_{L\alpha}^{i} - F_{L\alpha}^{j}$, $\alpha \in \{x, y\}$, $F_{L\alpha}^{\beta} = \iint_{D_L^{\beta}} K_{\alpha}^{\beta}(x) E(x) dxdy$, ($\beta \in \{i, j\}$).

В (4) суммирование ведется по всем парам индексов из множества $\mathbf{\Psi}$.

Переопределенная система формируется из ФС уравнений вида (4) по множеству функционалов из Φ_L. Эта система имеет вид:

(5) $\Phi_L = C_x v(x_L)$,

где $\Phi_L = \left[\Phi_L^{(i,j)}\right]$ – вектор-столбец $(M \times 1)$, $M = |\mathbf{\Psi}|$, $(i, j) \in \mathbf{\Psi}$;

$C_x = \left[C_{Lx}^{(i,j)}\right]$, матрица $(M \times 2)$.

Дискретный вариант системы ФС уравнений получается из (5) переходом к конечным разностям и усреднением данных по совмещаемым фрагментам:

(6) $\Delta \mathbf{\Phi}(j) = \overline{C}_x \hat{s}$

где $\hat{s} = v(x_L)\Delta t$, Δt – условный интервал времени; $\hat{s}$ – вектор оценки смещения s точки x_{R0} относительно точки x_R: $s = x_R - x_{R0}$;

$\Delta \mathbf{\Phi} = \mathbf{\Phi}(E_R(x - x_{R0})) - \mathbf{\Phi}(E_L(x))$;

$\overline{C}_x = \left[\overline{c}_x^{(i,j)} \quad \overline{c}_y^{(i,j)}\right]^T$, $\overline{c}_{\alpha}^{(i,j)} = 0{,}5(c_{L\alpha}^{(i,j)} + c_{R\alpha}^{(i,j)})$, $\alpha \in \{x, y\}$,

Коэффициенты $c_{R\alpha}^{(i,j)}$ вычисляется на изображении $E_R(x - x_{R0})$ аналогично $c_{L\alpha}^{(i,j)}$.

Нормальная базисная система для вычисления оценки $\hat{s}$ смещения s получается из (6) и имеет вид:

(7) $\overline{C}_x^T \Delta \mathbf{\Phi} = \overline{C}_x^T \overline{C}_x \hat{s}$.

Условием существования и единственности решения системы (7), очевидно, является выполнение $\det(\overline{C}_x^T \overline{C}_x) \neq 0$.

Итерационная процедура совмещения фрагмента изображения, накрываемого штихелями $Sh(x_L)$ и $Sh(x_R)$, строится с использованием системы (6) для вычисления на текущей итерации приращения вектора $\hat{s}(k)$. Она имеет вид:

$$\hat{s}(k) = \hat{s}(k-1) - \lambda \Delta \hat{s}(k),$$

(8) $$\Delta \hat{s}(k) = (\overline{C}_x^T \overline{C}_x)^{-1} \overline{C}_x^T (\mathbf{\Phi}(E_R(-\hat{s}(k) - x_{R0})) - \mathbf{\Phi}(E_L)),$$

где λ – коэффициент обратной связи, $\lambda > 0$.

Анализ сходимости итерационной процедуры (8), проведенный в [4] показал, что при достаточно малых относительных начальных смещениях совмещаемых изображений эта процедура сходится всегда при $\lambda \le 1$ вне зависимости от вида автокорреляционной функции анализируемых изображений. Исследование сходимости процедуры (7) «в большом» проводилось методом компьютерного моделирования.

4 Численный анализ динамики совмещения изображений

Целью проведенного моделирования являлся анализ области притяжения положения равновесия итерационной системы (8) на реальных аэрокосмических изображениях.

В экспериментах по исследованию области притяжения использовалась итерационная процедура (8) с λ=1 и размерами области анализа A (128×128) пикселей. Относительно большие размеры области были заданы с целью уменьшения влияния пространственной дискретизации изображения на качество совмещения изображений.

На рисунке 2 приведен пример изображения, в котором присутствует достаточно большой фрагмент с регулярной структурой, осложняющей процесс совмещения изображений. Рисунок 3 отображает результаты экспериментов по исследованию области притяжения положения равновесия системы (7) на примере изображения рисунке 2.

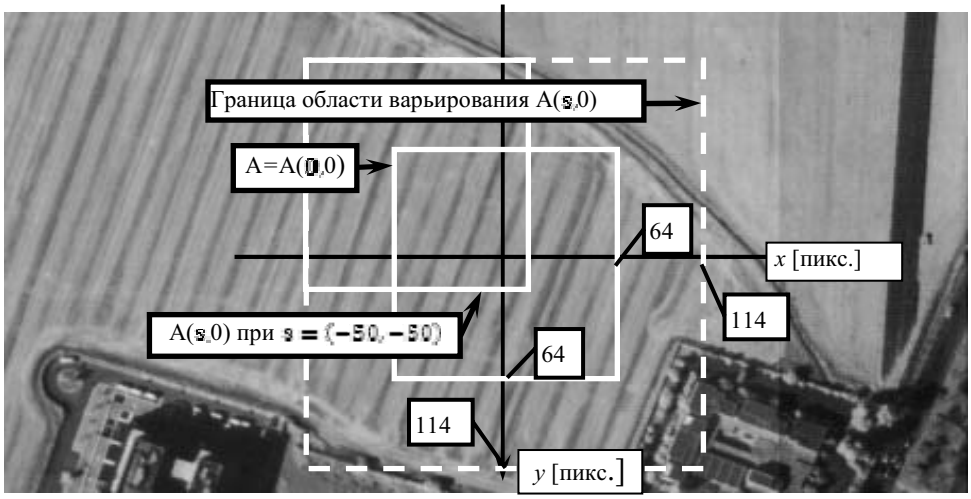


Рисунок 2 – Варьирование в экспериментах положения области анализа $A(s, 0)$ по отношению к области A на изображении «скошенное поле»

.Воронкой динамического совмещения (воронкой) здесь называется поле векторов $(-\hat{s}(1))$, построенное для всех начальных смещений s, варьируемых в некоторой окрестности точки идеального совмещения ($s = 0$):

$\hat{s}(1) = \|\hat{s}(1)\| e(\hat{s}(1))$, где $\hat{s}(1)$ – оценка вектора смещения s области $A(s, 0)$ относительно области A, полученная на первой итерации итерационной процедуры (II-7); $e(\hat{s}(1))$ – орт направления вектора $\hat{s}(1)$.

В проведенных экспериментах области A и $A(s,\ 0)$, показанные на рисунке 2, совмещались не более, чем за 3 итерации, что указывает на высокое быстродействие предложенного алгоритма совмещения

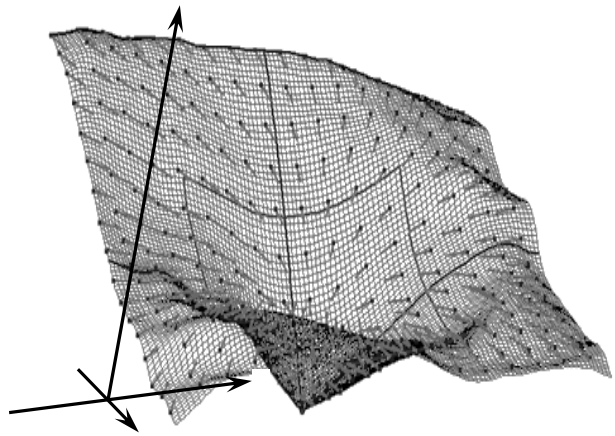


Рисунок 3 – Воронка динамического совмещения неподвижной A и подвижной $A(s,\ 0)$ областей анализа при вариации начального вектора смещения s в окрестности

$$\Omega = \{(z_1, z_2) : (\|z_1\| \le \|50\|) \wedge (\|z_2\| \le \|50\|\}$$

Из рисунка 3 видно, что область притяжения включает окрестность радиуса не менее r = 48 пикс., в то время как АФК анализируемого изображения (как следствие периодичности его структуры) в этой окрестности имеет явно выраженные локальные экстремумы. Поэтому можно сделать вывод о малой чувствительности метода функционализации к локальным экстремумам АКФ изображения.

Заключение

В статье предложена итерационная процедура совмещения изображений, отличающаяся высокой скоростью сходимости. Другим ее отличительным свойством является слабая чувствительность к локальным экстремумам автокорреляционной функции анализируемого изображения. Эти свойства позволили разработать быстрый алгоритм совмещения изображений, совмещающий «слабо разноракурсные» изображения при относительных больших начальных смещениях (до 100 пикселей и более) без привлечения процедур многократного уточнения параметров смещения.

Список литературы

[1] Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов/ Под. ред. М.Н.Красильщикова, Г.Г.Себрякова. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 556 с.

[2] Barron, J. Performance of Optical Flow Techniques. / J. L. Barron, D. J. Fleet, and S. S. Beauchemin. : IJCV 12:1 pp, 43-77, 1994.

[3] Кузнецов П.К., Мартемьянов Б.В., Семавин В.И., Чекотило Е.Ю. Метод определения вектора скорости движения подстилающей поверхности // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки». № 2 (22), Самара: СамГТУ, 2008.- С. 21-35.

[4] Кузнецов П.К., Мартемьянов Б.В., Семавин В.И, Чекотило Е.Ю. Исследование сходимости итерационной процедуры определения параметров движения изображений методом функционализации // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки». - №2 (26). Самара:

ТОЧНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ ПО ИХ ТЕЛЕВИЗИОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ МЕТОДОМ «ВСТРЕЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ»

А.В. Лопота, С.А. Половко, Д.Н. Степанов, А.А. Торубаров

Федеральное государственное автономное научное учреждение
«Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»
194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр. 21, Россия
dnstepanov@rtc.ru
тел: +7 (812) 552-4764, факс: +7 (812) 556-3692

Ключевые слова: *измерение, координаты, телевизионная камера, изображение, встречные измерения, погрешность*

Abstract

This article describes a way of reducing of measurements of coordinates error for a case when measurement is based on television frames. The method is based on so-called “counter-measurement” approach in which the passive coordinates are measured using frames received from the passive object, for which the coordinates become “active”, and can be measured with high precision.

Введение

В настоящее время востребованной технической задачей является создание измерительных комплексов, основанных на использовании телевизионных систем. Особенно актуальной является эта задача в применении к космическим аппаратам и робототехническим системам, на которых уже установлены телевизионные системы – в таком случае возникает экономия по массе, габаритам и энергопотреблению.

Основополагающий принцип использования телевизионной системы в качестве измерительной системы заключается в том, что координаты пикселя на кадре однозначно определяют угол отклонения линии визирования на объект, отображаемый этим пикселем, от оптической оси телевизионной камеры. Поэтому по результатам обработки телевизионных кадров можно измерять углы, определяющие направления на наблюдаемый объект (прямые измерения), а при известной геометрии объекта – также расстояние до объекта и его ориентацию (косвенные измерения).

Известной проблемой измерения при помощи телевизионных камер является то, что косвенные измерения производятся с точностью, которая зависит от видимых размеров объекта, при этом ориентация наблюдаемого объекта определяется с погрешностью, которая велика при малых углах ориентации – то есть при типовом расположении, например, стыкуемых космических аппаратов.

В данной статье предложено решение данной проблемы методом «встречных измерений», позволяющим вычислить углы ориентации наблюдаемого объекта посредством телевизионной камеры, установленной на самом наблюдаемом объекте и направленной на активный объект.

В статье подробно описан данный метод, типовые случаи его использования, приведен расчёт погрешностей и результаты экспериментов. Также описаны проблемы, возникающие при использовании метода «встречных измерений», и предложены способы их решения.

Постановка задачи

Назовем объект, на котором установлен телевизионный приемник, активным, а второй объект – присутствующий в телевизионном изображении – пассивным [1, 2]. Такие измерения чаще всего производятся с использованием специально разработанных маркерных систем, позволяющих однозначным образом выбрать точки на изображении, которым соответствуют хорошо известные точки в пространстве (в системе координат пассивного объекта). Также измерения могут производиться с использованием естественных особых точек. Существенным недостатком широко распространенного метода измерений по телевизионным изображениям является то, что точно могут быть измерены только 4 из 6 координат пассивного объекта, например:

- дальность до объекта;
- угол горизонтального направления на объект;
- угол вертикального направления на объект;
- угол крена.

Погрешность измерения таких координат активного объекта пропорциональна разрешающей способности телевизионного приемника и (в случае с дальностью и креном) также от видимого размера объекта. Другие 2 координаты – углы, отвечающие за ориентацию пассивного объекта – определяются с точностью, которая зависит также от величины самих углов – при малых значениях углов ориентации их изменение приводит к незначительным изменениям пиксельных координат маркеров.

1 Метод встречных измерений

Метод встречных измерений позволяет определить ориентацию систем двух координат друг относительно друга, зная координаты их центров. Пусть точка $O_1(X_{12},Y_{12},Z_{12})$ – центр первой системы координат в координатах второй системы, а точка $O_2(X_{21},Y_{21},Z_{21})$ – центр второй системы в координатах первой. Тогда пассивные углы ориентации $\psi 12$ – поворот второй системы относительно первой вокруг оси Y и $\varphi 12$ – поворот второй системы относительно первой вокруг оси X можно вычислить по следующим формулам:

$$(1)\quad \psi 12 = \mathbf{arctan}\left(X_{12}/Z_{12}\right) + \mathbf{arctan}\left(X_{21}/Z_{21}\right)$$

$$(2)\quad \varphi 12 = \mathbf{arctan}\left(Y_{12}/Z_{12}\right) + \mathbf{arctan}\left(Y_{21}/Z_{21}\right)$$

В данном случае центрами систем координат являются центры камер, которые невозможно детектировать на изображении, а следовательно, невозможно определить их координаты. Но есть возможность детектировать и вычислять координаты маркеров, расположенных на некотором расстоянии от камер, и от них осуществлять переход к системе координат камеры.

Данные системы координат показаны на рисунке 1. Пусть центр первого маркера находится в известной точке M1, а центр второго маркера находится в точке M_2, как показано на рисунке 1. Координаты этих двух точек известны в системах координат обеих камер. То есть координаты центра маркера M2 в системе координат его камеры, очевидно, равны $M_{22}(\Delta X_2,\Delta Y_2,0)$, а координаты, вычисленные с первой камеры, будут равны $M_{21}(X_{21},Y_{21},Z_{21})$ (значения X_{21},Y_{21},Z_{21} известны). То же самое справедливо для первого маркера.

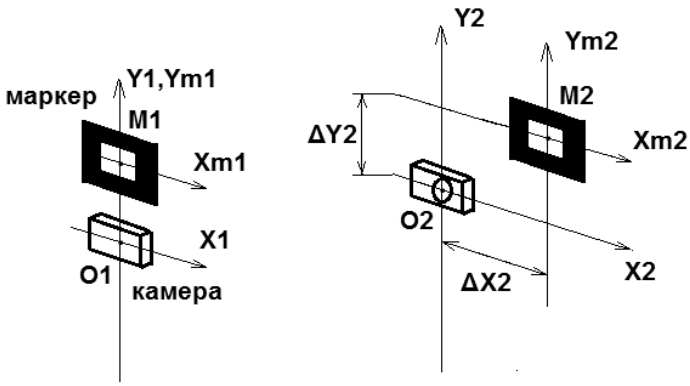


Рисунок 1 – системы координат камер и маркеров

Чтобы вычислить углы ψ12 и φ12, используя формулы (1) и (2), необходимо знать координаты точки O_2 в системе O_1. Для того нужно перейти от системы координат маркера M_2, в которой известны координаты точки $O_{22}(-\Delta X_2,-\Delta Y_2,0)$, к системе координат O_1. Такое преобразование осуществляется путем умножения на матрицу перехода $H12 = \begin{bmatrix} A_{12} & r_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, где A_{12} — матрица поворота, r_{12} — вектор, соединяющий центры систем координат. Вектор r_{12} известен $\overrightarrow{r_{12}} = \overrightarrow{O_1 M_{21}}$, а матрица A_{12} состоит из косинусов углов между осями систем координат, значения которых неизвестны. Поэтому метод встречных измерений не может быть применён математически строго в общем случае.

Далее будут рассмотрены различные частные случаи, когда возможно вычисление координат данным способом, и представлены погрешности для анализа возможности использования данного метода при решении задач различного типа.

2 Плоский случай

Рассмотрим частный случай плоского движения. При этом неизвестными являются только три координаты относительного положения. Имеется 2 камеры, над которыми жестко закреплены маркеры, как показано на рисунке 2:

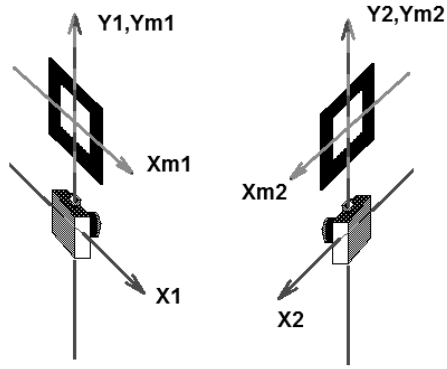


Рисунок 2 – частный случай расположения маркеров

Маркеры закреплены на одной оси и расположены в одной плоскости с камерами (оси Y1 и Ym1 совпадают, а оси X1 и Xm1 параллельны и сонаправлены). Пусть маркеры находятся в поле зрения камер, и камеры вычисляют координаты их центров с приемлемой точностью. Для вычисления ψ12 используется формула (1), как показано на рисунке 3, представляющем собой вид сверху рисунка 2.

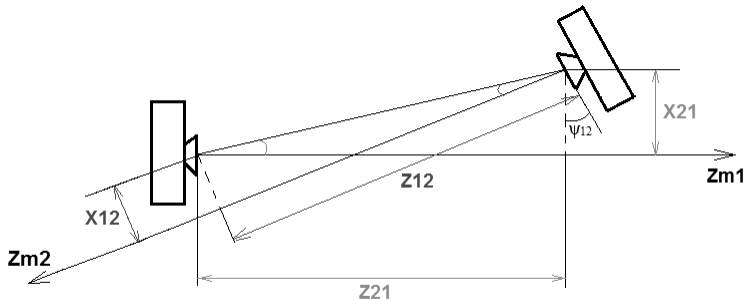


Рисунок 3 – вычисление угла ψ12

Как видно из рисунка 3, в данном конкретном случае вычисления по формуле (1) возможны, так как центр маркера всегда совпадает с центром камеры.

3 Проблема получения точных результатов

Как было сказано в разделе 1, в общем случае метод встречных измерений дает некоторую погрешность, причиной которой является невозможность осуществить точной переход к координатам камеры при повороте осей камер относительно друг друга. Для описания проблемы будут рассмотрены два случая: частный, который иллюстрирует механизм появления ошибок, и общий, который дает формулы для оценки метода.

3.1 Частный случай

Пусть на одной из камер маркер расположен со смещением вдоль осей X и Y, как показано на рисунке 4. Первый маркер расположен на одной оси с камерой, как было описано в примере плоского случая (рисунок 2).

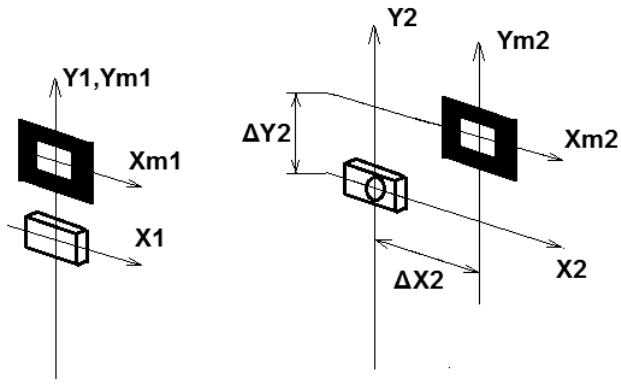


Рисунок 4 – расположение маркеров и камер для частного случая

В данном случае точно вычислять ориентацию камер по формулам (1) и (2) можно только в том случае, когда они не повернуты относительно друг друга (рисунок 5), но в этом случае

угол уже известен. Чтобы применить данные формулы, нужно перейти от системы координат маркера к системе координат камеры, отняв от координат центра маркера ΔY_2 и ΔX_2, как показано в формулах (3) и (4):

(3) $X_{21} = Xm_2 - \Delta X_2$,

(4) $Y_{21} = Ym_2 - \Delta Y_2$,

где Xm_2, Ym_2 – координаты центра маркера, а X_{12}, Y_{12} – координаты центра камеры.

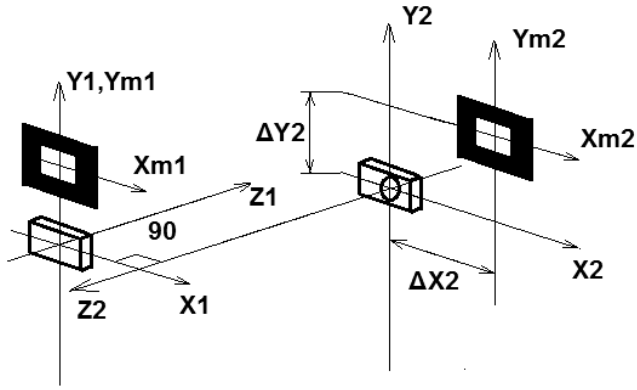


Рисунок 5 – камеры расположены перпендикулярно

Для случая, когда одна система повернута относительно другой на угол ψ12 (рисунок 6), который и необходимо вычислить по формуле (1), также необходимо осуществить переход от координат маркера к координатам камеры. Как видно из рисунка 6, при повороте камеры на угол ψ12 расстоянию ΔX_2 в формуле (3) будет соответствовать величина X_{21}', которая вычисляется по следующей формуле:

(5) $X_{21'} = \Delta X_2 \cos(\psi 12)$

То есть:

(6) $X_{21} = Xm_2 - X_{21'} = Xm_2 - \Delta X_2 \cos(\psi 12)$

Также при повороте координата маркера по оси Z_{12} не будет соответствовать координате камеры по этой оси (рисунок 6). Следовательно, чтобы использовать формулу (1), нужно осуществить переход от системы координат маркера к системе координат камеры по формуле:

(7) $Z_{21} = Zm_2 + \Delta X_2 \cdot \sin(\psi 12)$

Вычисления угла ψ12, как уже было сказано, нужно производить по формуле (1), предварительно подставив в неё формулы (6) и (7). Но это сделать невозможно, так как формулы (6) и (7) содержат искомый член ψ12.

Погрешность в случае использования формул (3) и (4) будет:

(8) $\Delta_{абс} = \arctan\left(\frac{Xm_2 - \Delta X_2 \cos(\psi 12)}{Zm_2 + \Delta X_2 \cdot \sin(\psi 12)}\right) - \arctan\left(\frac{Xm_2 - \Delta X_2}{Zm_2}\right)$

(9) $\Delta_{отн} = \frac{\Delta_{абс}}{\arctan\left(\frac{Xm_2 - \Delta X_2 \cos(\psi 12)}{Zm_2 + \Delta X_2 \cdot \sin(\psi 12)}\right) + \arctan\left(X_{12} / Z_{12}\right)} \cdot 100\%$

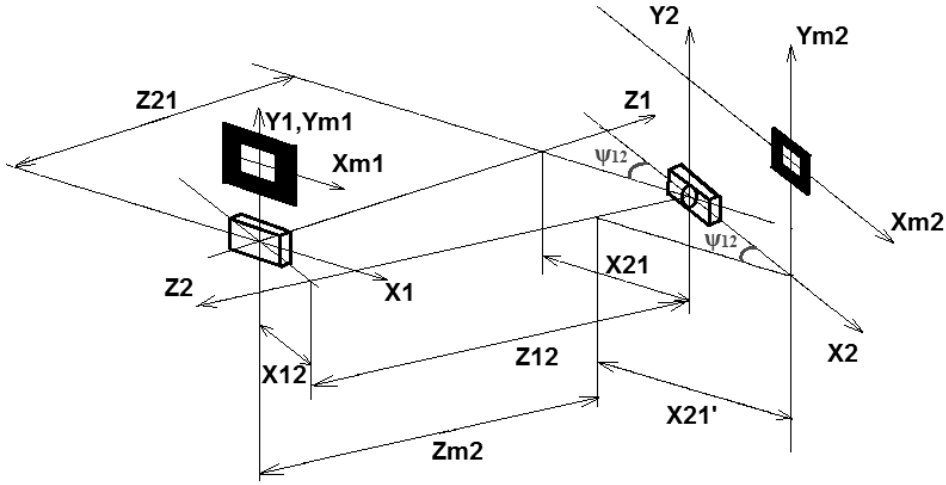


Рисунок 6 – Настройка интервалов редактора уравнений

В ходе выполнения эксперимента, воспроизводящего данный случай, были получены следующие данные при измерении угла ψ12=30°: Xm_2=380мм; Zm_2=930мм; Z_{12}=980мм; X_{12}=320мм.

В эксперименте центры маркеров находятся на 100мм ($\Delta Y_1=\Delta Y_2$=100мм) выше центров камер, центр второго маркера смещен на 100мм по оси X (ΔX_2=100мм), тогда при повороте одного из них на угол α=30°, ошибки, согласно формулам (8) и (9), будут равны:

$$\Delta_{абс} = 0.953°$$

$$\Delta_{отн} = 2.88\%$$

Величина модуля ошибки при различном угле приведена на рисунке 7. Из графика видно, что при малых значениях углов ошибка является малой и монотонно возрастающей. При расчете погрешности необходимо также учесть ошибку, вносимую дискретным характером измерения координат маркеров. Эта ошибка вычисляется исходя из цены одного пикселя на изображении в градусах. Типичным значением является величина порядка 0,02°, что существенно меньше величины погрешности при прямом измерении углов пассивного объекта. Именно эта особенность позволяет эффективно использовать принцип встречных измерений при малых углах, когда прямое измерение даёт большую ошибку.

В то же время необходимо отметить, что вместе с увеличением расстояния между центрами систем координат камеры и маркера ошибка, связанная с приближенным характером вычислений, монотонно возрастает – график на рисунке 8 приведен для угла поворота 30°.

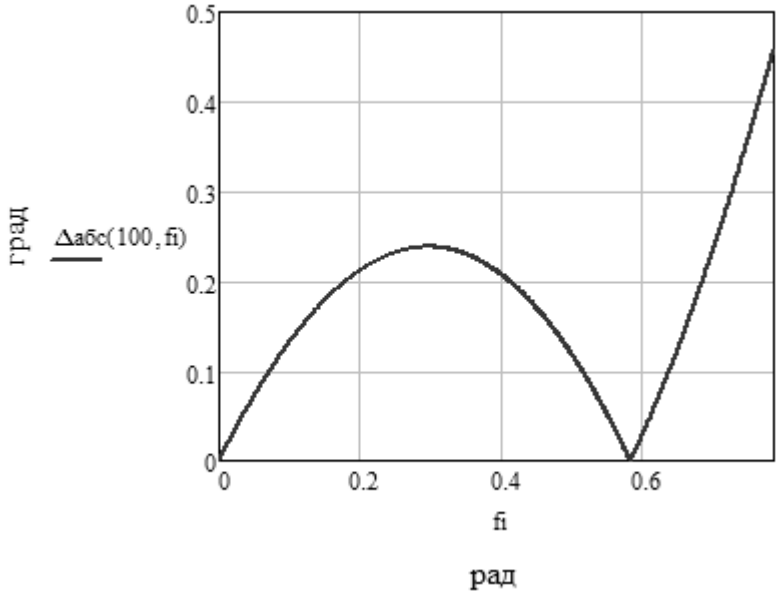


Рисунок 7 – Зависимость ошибки определения угла от величины угла

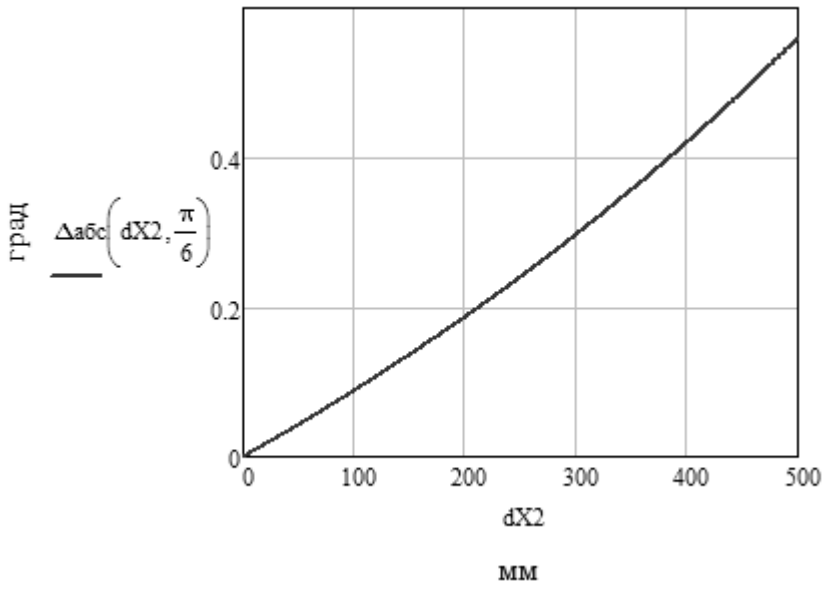


Рисунок 8 – Зависимость ошибки определения угла величины базы

3.2 Общий случай

В общем случае оба маркера расположены со смещением вдоль осей X и Y относительно камер на расстояния ΔY и ΔX. Системы повернуты друг относительно друга вокруг всех трех осей на углы α_x α_y α_z. Тогда координаты точек $O_1(X_{12},Y_{12},Z_{12})$ и $O_2(X_{21},Y_{21},Z_{21})$, необходимы для точного вычисления по формулам (1) и (2) будут равны:

(10) $$X21_{точн} = Xm_2 - \mathbf{cos}(\alpha_y)\mathbf{cos}(\alpha_z)\cdot\Delta X + \mathbf{cos}(\alpha_y)\mathbf{sin}(\alpha_z)\cdot\Delta Y$$

(11) $$Y21_{точн} = Ym_2 - \Delta X\cdot(\mathbf{cos}(\alpha_x)\mathbf{sin}(\alpha_z) + \mathbf{cos}(\alpha_z)\mathbf{sin}(\alpha_y)\mathbf{sin}(\alpha_x)) - \\ - \Delta Y\cdot(\mathbf{cos}(\alpha_x)\mathbf{cos}(\alpha_z) - \mathbf{sin}(\alpha_x)\mathbf{sin}(\alpha_y)\mathbf{sin}(\alpha_z))$$

(12) $$Z21_{точн} = Zm_2 - \Delta X\cdot(\mathbf{sin}(\alpha_x)\mathbf{sin}(\alpha_z) - \mathbf{cos}(\alpha_z)\mathbf{sin}(\alpha_y)\mathbf{cos}(\alpha_x)) - \\ - \Delta Y\cdot(\mathbf{cos}(\alpha_x)\mathbf{cos}(\alpha_z) - \mathbf{cos}(\alpha_x)\mathbf{sin}(\alpha_y)\mathbf{sin}(\alpha_z))$$

(13) $$X12_{точн} = Xm_1 - \Delta X\cdot\mathbf{cos}(\alpha_y)\mathbf{cos}(\alpha_z) + \Delta Y\cdot\mathbf{cos}(\alpha_y)\mathbf{sin}(\alpha_z)$$

(14) $$Y12_{точн} = Ym_1 - \Delta X\cdot(\mathbf{cos}(\alpha_x)\mathbf{sin}(\alpha_z) + \mathbf{cos}(\alpha_z)\mathbf{sin}(\alpha_y)\mathbf{sin}(\alpha_x)) - \\ - \Delta Y\cdot(\mathbf{cos}(\alpha_x)\mathbf{cos}(\alpha_z) - \mathbf{sin}(\alpha_x)\mathbf{sin}(\alpha_y)\mathbf{sin}(\alpha_z))$$

(15) $$Z12_{точн} = Zm_1 - \Delta X\cdot(\mathbf{sin}(\alpha_x)\mathbf{sin}(\alpha_z) - \mathbf{cos}(\alpha_z)\mathbf{sin}(\alpha_y)\mathbf{cos}(\alpha_x)) - \\ - \Delta Y\cdot(\mathbf{cos}(\alpha_x)\mathbf{cos}(\alpha_z) - \mathbf{cos}(\alpha_x)\mathbf{sin}(\alpha_y)\mathbf{sin}(\alpha_z))$$

Подставив формулы (10) – (15) в выражения (1) и (2), можно получить точные значения ψ12 и φ12. Но нужно помнить, что значения углов α_x α_y α_z неизвестны, а α_x и α_y являются искомыми углами φ12 и ψ12 соответственно. Поэтому приближенные значения координат точек $O_1(X_{12},Y_{12},Z_{12})$ и $O_2(X_{21},Y_{21},Z_{21})$ будут вычисляться по формулам (3) и (4). Тогда погрешность метода встречных измерений для общего случая можно оценить по формулам:

(16) $$\Delta абс_{\psi 12} = \mathbf{arctan}(X12_{точн} / Z12_{точн}) + \mathbf{arctan}(X21_{точн} / Z21_{точн}) - \\ - \mathbf{arctan}(Xm_1 - \Delta X / Zm_1) - \mathbf{arctan}(Xm_2 - \Delta X / Zm_2)$$

(17) $$\Delta отн_{\psi 12} = \frac{\Delta абс_{\psi 12}}{\mathbf{arctan}(X12_{точн} / Z12_{точн}) + \mathbf{arctan}(X21_{точн} / Z21_{точн})}$$

(18) $$\Delta абс_{\varphi 12} = \mathbf{arctan}(Y12_{точн} / Z12_{точн}) + \mathbf{arctan}(Y21_{точн} / Z21_{точн}) - \\ - \mathbf{arctan}(Ym_1 - \Delta Y / Zm_1) - \mathbf{arctan}(Ym_2 - \Delta Y / Zm_2)$$

(19) $$\Delta отн_{\varphi 12} = \frac{\Delta абс_{\varphi 12}}{\mathbf{arctan}(Y12_{точн} / Z12_{точн}) + \mathbf{arctan}(Y21_{точн} / Z21_{точн})}$$

Заключение

Описанный метод встречных измерений предоставляет возможность многократного увеличения точности измерения координат объектов, а именно углов тангажа и рыскания, измерение которых по телевизионным изображениям представляет большую проблему. Несмотря на то, что в общем случае метод является приближенным, так как при вычислениях неизбежно возникают неопределенные величины, для которых могут использоваться только приближенные значения, даже в этих случаях погрешность может быть существенно уменьшена при условии, что расстояние до пассивного объекта многократно превышает базу ТВ-камера – маркер, то есть как раз в том случае, когда стандартный метод масштабов обеспечивает большую погрешность измерений. Это позволяет, в частности, с высокой точностью решить задачу определения взаимного положения космических аппаратов. Также метод может использоваться в

математически строгой формулировке, например, для определения координат мобильных роботов и надводных аппаратов (судов), движение которых может рассматриваться как плоское (при движении по плоскости или при использовании гиростабилизированных платформ для компенсации крена).

Альтернативой предложенному методу является прямое измерение, при котором заведомо выбирается маркерная система, расположенная под углом не менее 30° к плоскости датчика изображения. Однако такое решение практически сложно реализовать, особенно в ситуации, когда используются естественные маркеры.

Наконец, для решения проблемы приближенного характера встречных измерений можно предложить (в случае, когда возможен выбор маркерной системы) размещать маркеры таким образом, чтобы по ним в любой момент времени можно было восстановить положение системы координат камеры. Например, для этого можно расположить маркеры по окружности с центром в начале координат системы координат камеры.

Список литературы

[1] Кравец В.Г., Любинский В.Е. Основы управления космическими полетами. – М.: Машиностроение, 1983, - 224 с.

[2] Сагдуллаева Ю.С., Абдуллаева Д.А., Смирнова А.И. Основы телевизионного контроля процесса сближения космических аппаратов. Изд-во ФАН АН РУз. Ташкент, 1997, 127 с.

INTELLECTUAL SYSTEMS OF INFORMATION CONTROL AND PROCESSING

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

THEORY OF INTERSUBJECTIVE MANAGEMENT WITH APPLICATION OF ONTOLOGICAL SITUATIONS MODELS

ТЕОРИЯ ИНТЕРСУБЪЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОНТОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИТУАЦИЙ

ПОНЯТИЕ И ПРОБЛЕМА ПОНИМАНИЯ ДЛЯ ИНЖЕНЕРОВ И СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ИСКУССТВЕННОМУ ИНТЕЛЛЕКТУ

А.Ю. Нестеров

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)
443086, Самара, Московское шоссе, 34, Россия
phil@ssau.ru
тел. +7 (846) 2674565

Ключевые слова: *понимание, герменевтика, знак, значение, смысл*

Abstract
The paper considers the notion of understanding for AI-specialists.

Проблема *понимания* в европейской философии представлена несколькими традициями, известными как техническая герменевтика, философская герменевтика, герменевтическая философия. Традиции описаны Гунтером Шольцом [1]. В рамках *технической герменевтики* понятие понимания отвечает на вопрос, что нужно сделать для того, чтобы понять, или «каков алгоритм понимания-процесса, позволяющего получать (истинный) понимание-результат?». В рамках *философской герменевтики* понятие понимания отвечает на вопрос, каковы онтологические предпосылки, при соблюдении которых возможна реализация данного алгоритма, или «в какой картине мира возможен данный алгоритм?». В рамках *герменевтической философии* понятие понимания отвечает на вопрос о бытии, т.е. «понимание» является термином, проясняющим абстракцию «всего» или «сущего».

Область исследований кибернетики, в рамках которой релевантно понятие понимания, можно задать предельно общим вопросом *«способен ли компьютер (программа) понимать?»*. В рамках данного доклада вопрос ставится более конкретно: *«каким образом и в каких терминах должно быть определено понятие понимания, чтобы можно было утверждать, что компьютер (программа) понимает?»*. Поскольку этот вопрос затрагивает сферу как технической, так и философской герменевтики, его можно разбить на два вопроса: (1) *«каковы дефиниции понимания, известные традиции технической герменевтики?»* и (2) *«какие дефиниции применимы для описания деятельности, осуществляемой компьютером (программой), как деятельности понимания и на каком основании?»*, *«что эти дефиниции могут дать исследованию искусственного интеллекта (ИИ)?»*. В случае если на второй вопрос получен ответ, то третий вопрос выглядел бы так: *«каким требованиям должна соответствовать деятельность компьютера (программы), чтобы человек мог заключать о том, что он (она) понимает?»*. Фактически в данном рассуждении предлагается учесть опыт европейской герменевтики в построении теоретических моделей ИИ, где само предложение обусловлено отсутствием внятного определения понятия понимания при использовании термина «понимание» для определения деятельности ИИ.

Проблема понимания раскрывается, как правило, через антитезы *понимание/познание*, *понимание/коммуникация*, *понимание/интерпретация*, где понятие понимания формулируется в терминах гносеологии, теории коммуникации или в терминах каких-либо интерпретационных моделей. Наиболее известные дефиниции понимания следующие: (1) понимание есть переход от знака к его значению (Бл. Августин), (2) понимание есть возникновение мысли при восприятии речи (Хладениус), (3) реконструкция реципиентом речевого сообщения

(Фр. Шляйермахер), (4) обнаружение *Я* в *Ты* или распознавание внутреннего по знакам, даваемым человеку чувствами извне (В. Дильтей), (5) применение языка как растворение горизонтов (Г.-Г. Гадамер). Подробный анализ определений понимания представлен в [2]. В утверждении, что некто или нечто «понимает», содержится, таким образом, множество отсылок, среди которых указания на способность субъекта понимания к референции, на обладание мыслью, на возможность самосознания и т.д. В терминах гносеологии понимание определяется как *косвенное познание* (рефлексия), в терминах теории коммуникации – как *исполнение семантического правила*, в терминах теории интерпретации – как *реконструкция смысла (контекстуального способа данности) истинностного значения*. Поскольку каждый из этих моментов сам по себе есть метафизическая проблема, определимая в модели герменевтического круга (т.е. рекурсивно), постольку каждое из этих определений нуждается в разъяснении. Другими словами, применимая к ИИ дефиниция понимания нуждается в терминологически определённой модели ИИ, так чтобы ответ на вопрос «что делает понимание?» или «каков алгоритм деятельности понимания?» связывал бы определённые элементы и функции системы.

В технической герменевтике последнего десятилетия XX в. развёрнутую модель понимания как расшифровки коммуникативного кода индивидуальным сознанием предлагает среди прочих В. Кюнне, выделяя *шесть ступеней понимания*: (1) перцептивное, (2) буквальное, (3) буквальное в данном контексте, (4) схватывание пропозиционального смысла выражения, (5) понимание модального смысла выражения, (6) понимание как объяснение действия говорящего субъекта (как раскрытие контекста, в котором его высказывание объяснимо) [3].

Можно было бы сказать, что эта в собственном смысле слова *аналитическая модель понимания* раскрывается как диалектический синтез антитезы познание/понимание, так что техническая герменевтика в качестве аналитической модели, обеспечивающей эксплицируемость содержания или смысла текста, имеет дело с (1) восприятием, (2) со снятием непосредственности восприятия в знаке и (2.1) с включением данного знака в систему кодов, (3) с выявлением отношения знака к денотату (отношения текста к условиям, при которых он может быть истинным), (4) с выявлением отношения субъекта знака (субъекта говорения) к знаку как к осуществляемому им действию. Обоснование данной технической модели можно увидеть в семиотическом выражении теории понимания как теории кодов, подразумевающей изоморфизм процедур познания и коммуникации, осуществляемых человеческим сознанием, где на место непрояснимного в этических терминах «целого», отвечающего за легитимность «переноса по аналогии» можно было бы подставить гипотезу о том, что коммуникативный знак (сообщение) в качестве значения может обозначать только те предметы, которые сами обладают структурой знака. В этом случае для того, чтобы ответить на вопрос о дефиниции понимания и, соответственно, о необходимых для исследований ИИ алгоритмах понимания, необходимо сформулировать соотношение семиотических процессов познания (или т.н. гносеологических знаков, т.е. знаков, кодируемых в процедурах познания) и семиотических процессов коммуникации (или т.н. коммуникативных знаков, т.е. знаков, кодируемых в процедурах коммуникации) в качестве отношения обозначения.

При таком обосновании вполне допустимым представляется отказ от определения понимания как *воссоздания значения* в пользу определения понимания как *воссоздания смыслов*. Понятие *значения* на протяжении всей истории герменевтики, как представляется, обладало тем же содержанием, что и сейчас (исключением для 20-го века является лишь структуралистское понимание значения как места в системе). Понятие же *смысла* может быть определено как минимум тремя способами (как *речевое значение*, как *способ данности значения*, как *выбор одного из наличного в словаре ряда*), из которых наше рассуждение затрагивает исключительно модель Г. Фреге [4]. Значение есть то, что делает знак или предложение истинным или ложным. Смысл есть то, посредством чего знак обозначает своё значение. Понимать можно не только истинное, но и ложное, поэтому понимание следует определить как *воссоздание (ре-*

конструкцию) способа данности значения, но никак не самого значения. Этому соответствует сформулированное Э. Бэтти [5] и позднее Акселем Бюлером [6] разграничение между истолкованием (интерпретацией) и пониманием. Интерпретация занята выявлением значений знаков, т.е. обозначаемых предметов, и способна быть истинной или ложной. Понимание есть *восстановление связи между предметом и его именем* и как таковое оно не в состоянии быть истинным или ложным.

В качестве резюме отметим: если редуцировать в семиотических терминах сложность субъекта понимания, вводимого в терминах этики, то отпадёт необходимость искать мистическое качество системы, позволяющее ей «понимать», поскольку понимание будет реализовано как *системное отношение к некоторому внешнему условию истинности данной системы*. Семиотически определённая процедура понимания подразумевает для человека *всего лишь* учёт сложности способа языковой данности полученного познанием реального объекта, т.е. фактически учёт «кода» этого объекта или знание о собственном знании об объекте: именно этот редукционистский способ введения понятия понимания может быть актуален для исследования в сфере ИИ, учитывающего опыт европейской герменевтики в построении своих моделей. В иных случаях задавая вопрос о том, каковы критерии понимания для какой-либо системы, мы фактически спрашиваем о том, что нужно для того, чтобы представить данную систему в виде человека.

Список литературы

[1] Scholtz G. Was ist und seit wann gibt es “hermeneutische Philosophie”? // Dilthey-Jahrbuch. Bd.8/1992-93 - Goettingen. - S. 93-119.

[2] Нестеров А.Ю. Семиотическая схема познания и коммуникации. – Самара: Самарская гуманитарная академия, 2008 – 193 с.

[3] Kuenne W. Verstehen und Sinn. Eine sprachanalytische Betrachtung // Bueler A. (Hrg.) Hermeneutik. - Heidelberg, 2003. - S. 61-78.

[4] Frege G. Ueber Sinn und Bedeutung // G. Frege Funktion, Begriff, Bedeutung. - Goettingen, 1980.

[5] Betti E. Zur Grundlegung einer allgemeinen Auslegungslehre. - Tuebingen, 1988, S. 12-20.

[6] Buehler A. Die Vielfalt des Interpretierens // Buehler A. (Hrg) Hermeneutik. - Heidelberg, 2003. S. 119.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ И КОММУНИКАТИВНАЯ РАЦИОНАЛЬНОСТИ АКТОРОВ

В.А. Виттих

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
vittikh@iccs.ru
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *актор, инструментальная рациональность, коммуникативная рациональность, программно–целевое планирование и управление, интерсубъективность, взаимопонимание, консенсус, постнеклассической наука*

Abstract

In the era of modernization, associated with transformation of the traditional (agrarian) society into the society of a modern type, a new man was born: the actor, who aims not only to cognize the world, but to create it. The actors' activity is characterized by rationality which distinguishes them from their predecessors of traditional society acting by the manner as their ancestors used to act. Two types of actors' rationality are examined: instrumental and communicative. Instrumental rationality, going back to the works of M. Weber and being inherent in the industrial society, assumes that the actors' actions directed to attain any fixed target may vary and must be instrumentally rational, satisfying efficiency criterion only. In contrast to instrumental rationality, the communicative rationality, being one of the key notions of J. Habermas's theory of communicative action, puts in the forefront the actors' communication, aimed to attain mutual understanding and consensus; thus, this type of rationality should be the dominant ideology of actors in the Information Society.

Введение

Трансформация традиционного (аграрного) общества в общество современного типа, называемая модернизацией [1], которая началась в России в конце XIX века, сопровождалась изменениями всех сторон жизни – социальной, экономической, политической и культурной. Изменялся и сам человек: наряду с общинным сознанием с его опорой на традиции и коллективизм, порождающими пассивность и патернализм, в эпоху модернизации у людей появлялись ростки индивидуального сознания с присущими ему верой в свои собственные силы, социальной активностью, способностью эффективно действовать в процессах достижения поставленных целей и ориентацией на личностные приоритеты при принятии решений. Такой зарождающийся тип деятельного человека стали называть актором, а в последней четверти XX века термин *актор* прочно обосновался на страницах научных публикаций. Например, М. Крозье и Э. Фрайдберг [2] считали социальных акторов начальными «точками отсчёта» социальных систем; акторы и их организационное поведение составляли основу управленческой концепции М. Крозье [3]. Т. Саати и К. Кернс [4] называли акторами людей, которые решают, какие действия предпринимать для решения сложных проблем. В теории интерсубъективного управления [5] актор рассматривается как человек, который выполняет познавательно-деятельностные функции и коммуницирует с другими акторами, достигая взаимопонимания с ними при урегулировании проблемных ситуаций.

Деятельность акторов характеризует *рациональность*, которая отличает их от предшественников из традиционного общества, действующих так, как поступали их предки. Акторы не следуют каким-то устаревшим канонам, а всякий раз стремятся найти разумное (рациональ-

ное) решение той или иной проблемы, оперируя такими понятиями как эффективность, целесообразность, согласованность, гармоничность и т.п. Поэтому *«рациональность» предстаёт в различных формах* [1]. Например, рациональным можно считать поведение акторов, стремящихся повысить собственную экономическую отдачу, но одновременно можно говорить и о рациональности действий группы акторов, если они направлены на повышение некоторого разделяемого всеми показателя эффективности сообщества в целом. С другой стороны, «исчисляемая польза» не всегда составляет основу рациональности, поскольку акторы могут согласованно и рационально действовать, опираясь на какие-то внеэкономические (чаще всего качественные) показатели.

Рациональной является и «идеальная бюрократия» М. Вебера с её жёсткой иерархией власти, регламентацией функций и игнорированием личных качеств акторов. Именно рациональность, безличность и регламентированность – идеалы бюрократии [1]. Однако М. Крозье [6] исходит их того, что рациональна не только бюрократическая организация, но и актор, действующий в ней и обладающий «ограниченной рациональностью». Дело в том, что в структуре организаций обычно имеются зоны деятельности, где из-за ограниченности возможностей «сплошного регламентирования» предписаний немного или нет вовсе, что позволяет актору по-своему интерпретировать возможности собственного поведения, исходя из определённого расчёта [7]. Он может, например, обрести власть над другими или собственную независимость, то есть заключить другого в положение детерминированного поведения, а самому остаться достаточно свободным. Если такой стратегии будут придерживаться все акторы, то они будут сталкиваться между собой в борьбе за то, чтобы сделать своё поведение для противника менее предсказуемым, чем поведение противника для себя [7].

Иными словами, *спектр представлений о рациональности акторов достаточно широк*, и когда мы сталкиваемся с проблемами управления и моделирования в сложных системах, создаваемых и функционирующих при участии людей, то всегда вынуждены принимать те или иные (соответствующие ситуации) допущения о рациональности акторов. Выбор типа рациональности определяет направление поиска решения и его адекватность реальной действительности. Ведь «рациональное – познание недоступных опыту объектов (сущностей, целостностей, общего в вещах, «вещей в себе») путём оперирования знаками, символами, моделями и иными репрезентантами сверхчувственного бытия… Критерий рациональности и мера «хитрости разума» - глубина умения решать задачи опосредованными (знаками и инструментами) способами; чем больше мастерство человека в добывании звеньев, опосредующих связи доступного с недоступным, отдельное с общим и рядовое с эталонным, тем более рациональной считается его деятельность» [8].

Рационализация, таким образом, - «способ, которым самосознание, творящее из индивида личность, преобразует его практическую деятельность. Это первое, что личность делает после того, как она отвергает традицию. Рационализация – не одномоментный акт, а очень длительный процесс» [9]. На протяжении всего прошлого века акторы, как правило, формировались и развивались в духе веберовской *целерациональности*, или *инструментальной рациональности*, ориентирующей их поведение на средства, представляющиеся адекватными для достижения цели [10], в то время как в конце XX века всё возрастающую роль начинает играть *коммуникативная рациональность* Ю. Хабермаса, нацеленная на достижение взаимопонимания и консенсуса акторов, их общего понимания какого-либо вопроса. Если инструментальная рациональность предполагает стабильность и предсказуемость окружения, то коммуникативная рациональность допускает работу акторов в условиях неопределённости. Человек, придерживающийся коммуникативной рациональности, обладает большей свободой выбора, чем человек целерациональный, скованный жёсткой программой действий. Поскольку указанными противопоставлениями не ограничивается перечень различий этих двух типов рациональностей, произведём их краткий сравнительный анализ.

1 Инструментальная рациональность

В модернизированном обществе *рациональность* прежде всего начинает проявляться *в эффективной деятельности акторов по достижению поставленных целей*. Речь идёт именно о средствах (инструментах) достижения целей, а не об оценке рациональности последних. Цель принимается и фиксируется как некая исходная данность, а вот действия акторов по направлению к цели могут варьироваться и должны быть инструментально рациональными. Поэтому инструментальная рациональность трактуется как соответствие средств цели, как подчинение деятельности акторов только критерию эффективности.

Практическим воплощением инструментальной рациональности во второй половине XX века стал *метод программно-целевого планирования и управления*, который достаточно широко используется и в настоящее время. Суть его, как известно, состоит в разработке эффективного плана достижения заданной цели, который увязан с имеющимися ресурсами, и в последующей реализации намеченной программы действий с обязательным соблюдением сроков и достижением запланированных результатов на каждом её этапе. А управление этим процессов осуществляет бюрократическая машина, в которой люди – акторы не видят ничего кроме цели и руководствуются предписанными процедурами, правилами и регламентами.

Успех применения программно-целевого метода зависит от того, насколько разработанный план соответствует реальной действительности. Если окружающие условия стабильны или их изменения предсказуемы, ресурсы поставляются в срок и в требуемом количестве, а люди действуют в чётком соответствии с установленной программой, то цель будет достигнута с заданными показателями эффективности. Однако современный мир открыт и динамичен, ситуации в нём характеризуются изменчивостью и неопределённостью, а поведение людей не всегда предсказуемо. Тогда, с какой бы тщательностью не были разработаны сетевые графики на этапе формирования целевой программы, они потребуют коррекции и привлечения дополнительных ресурсов в процессе реализации программы, что неизбежно приведёт к уменьшению её эффективности. Так, например, в работе [11] отмечается, что только 20 – 40% целевых программ в компаниях оказываются эффективными. А анкетирование топ - менеджеров 500 крупнейших американских корпораций показало, что только 45% этих компаний применяет программы управления по целям, и только менее 10% из них считают опыт применения этих программ успешным.

Более того, в организациях, построенных на бюрократических принципах, приходится сталкиваться с эффектом латентной «подмены целей», когда «всякое действие направлено не на объект, не на цель, а на следование правилам и подчинено процедурной рациональности» [12], то есть *приоритетными становятся цели канцелярские, а не государственные или корпоративные*, поскольку человек, действующий согласно инструкциям, создаёт себе хорошую основу для карьерного роста. Для достижения этой личной цели продекларированные цели программы могут быть (по возможности незаметно) отодвинуты на второй план. Но это скорее «издержки» программно-целевого метода, поскольку инструментальная рациональность исходит из предначертанности целей и не предполагает возможности их изменения или коррекции.

В самом деле, если программа действий рационализирована (оптимизирована) под заданную цель и начала выполняться, то её (цели) трансформация потребует пересмотра и модификации программы. Это допустимо только тогда, когда можно остановить и снова запустить программу, т.е. речь не идёт о работе в реальном масштабе времени. Однако в большинстве случаев на практике фактор времени играет решающую роль, что сдерживает применение инструментальной рациональности в процессах управления. Но основной проблемой этого типа рациональности является *проблема целеполагания*.

Дело в том, что в системах социальных, социотехнических, социально-экономических и в иных интерсубъективных системах цели должны формулироваться в результате взаимодействия множества акторов, каждый из которых имеет свой собственный взгляд на мир, свою систему жизненных приоритетов и ценностей [5], поскольку в противном случае могут быть до-

пущены ошибки целеполагания. Например, сотрудники органа исполнительной власти (ОИВ) для переселения населения из ветхого и аварийного жилья могут поставить цель строительства жилого микрорайона на строительной площадке, выбранной из каких-то разумных экономических и градостроительных соображений. Тем не менее, приняв и реализовав соответствующую целевую программу, представители ОИВ могут столкнуться с тем, что жители будут отказываться переезжать в этот микрорайон по причинам, которые для них являются жизненно важными, но которые не были приняты во внимание на этапе разработки программы. Иными словами, целевая программа будет осуществлена (инструмент сработал!), но цель возможно и не будет достигнута.

Резонно возникает вопрос: а почему бы на стадии формирования программы не учесть те самые жизненно важные позиции населения? Конечно же, не только можно, но и нужно. Рациональность целей и их адекватность потребностям практики должны быть не только обоснована; необходимо допускать возможность коррекции целей в связи с изменяющейся обстановкой. Однако это уже будет не инструментальная рациональность, поскольку действия акторов должны быть направлены и на оценку рациональности целей.

Зародившаяся и получившая развитие в индустриальном обществе инструментальная рациональность, несмотря на отмеченные недостатки, продолжает доминировать и в наши дни. Это обусловлено тем, что целерациональный человек верит в достижимость редуцированной цели, вырванной из совокупности взаимосвязанных целей путём реализации эффективной (в установленном смысле) последовательности процедур, сцепленных причинно-следственными связями. Такой человек согласен с тем, что цель кто-то задал, и не стремится к её обсуждению. Главное для него – сконструировать и применить рациональный инструмент для достижения цели. Подобная идеализация действительности, созвучная реалиям индустриального общества, начала диссонировать в обществе постиндустриальном, подавая сигналы о необходимости замены типа рациональности в грядущем информационном обществе.

2 Коммуникативная рациональность

Коммуникативная рациональность – одно из ключевых понятий теории коммуникативного действия Ю. Хабермаса [13], исходящей из нового понимания *коммуникации* – не как средства одностороннего распространения информации, а как способа осуществления связи и взаимодействия людей в социальной сфере через конструктивный *диалог* [14]. Основная функция коммуникации – достижение социальной общности и взаимопонимания при сохранении индивидуальности каждого её элемента [15]. Акторы, придерживающиеся коммуникативной рациональности, нацелены на установление *консенсуса* при обсуждении какого-либо спорного вопроса, в том числе при выборе целей.

Целеполагание в этом случае становится результатом коммуникативных действий *неоднородных акторов*, каждый из которых имеет свой собственный взгляд на мир, субъективную систему жизненных приоритетов и ценностей, и *цели могут корректироваться* в зависимости от складывающейся ситуации. Эта особенность коммуникативной рациональности обеспечивает большую *гибкость в процессах управления* по сравнению с инструментальной рациональностью, поскольку *интерсубъективные акторы*, имеющие структуру индивидуального сознания, отвечающую факту существования других индивидов, могут взаимодействовать и *принимать решения* в темпе развития ситуации, то есть *в реальном масштабе времени* [5].

Инструментальная рациональность опирается на методологию классической науки, «выносящей» субъектов за границы объекта и превращающей их в «унифицированного» наблюдателя, который «объективно» изучает объект со стороны. Тем самым предполагается, что процессы в объекте – социальной, социотехнической или социально-экономической системе, протекают объективно, независимо от человека; но такой «квазиприродный» объект, в котором человек отсутствует, нельзя признать адекватным действительности. Развитие подобных ис-

кусственных систем происходит под воздействием субъективных и интерсубъективных решений акторов, а не под влиянием объективных законов, подобных законам естественных наук [16, 17]. Поэтому коммуникативная рациональность предполагает *переход от классической к постнеклассической науке* [5], которая не отделяет субъекта от объекта, а учитывает соотнесённость полученных знаний об объекте с индивидуальными особенностями субъекта и средств его деятельности [18].

Одновременно трансформируются и представления об объективной истине. Если объективное знание, полученное с помощью классических научных методов, рассматривается как истинное, то в постнеклассической науке принимается во внимание *субъективное знание*, которое в лучшем случае считается *относительно истинным*. Оно может быть верным только для определённого человека, в конкретной ситуации, в фиксированные промежутки времени и т.д. Такое относительно истинное знание может выражать субъективную точку зрения автономного неоднородного актора. Однако коммуникативная рациональность постулирует взаимодействие акторов между собой, что даёт им возможность приобретать интерсубъективные знания [19].

Рациональный консенсус вырабатывается путём *дискурса* – «диалогически равноправной процедуры аргументации – и представляет собой универсальное (значимое для всех разумных субъектов коммуникации) согласие» [20]. Акторы преодолевают свои собственные субъективные взгляды в пользу рационально мотивированного консенсуса, рождаемого «силой лучшего аргумента» [14]. При этом *запрещается какое-либо принуждение к согласию.*

Таким образом, «если инструментальная рациональность состоит в способности находить, выбирать и осуществлять наиболее эффективные способы достижения осознанных и чётких целей, то коммуникативная рациональность предполагает достижение понимания и согласия относительно целей на основе диалога между субъектами социального действия, в рамках социализации. В отличие от действия на основе сотрудничества, стимулом к которому является вознаграждение или угроза, *коммуникативная рациональность зависит от степени добровольной вовлечённости в соответствующее действие заинтересованных и компетентных индивидов*. Диалог между ними способствует осознанию взаимных прав и моральных обязательств, продуцирует *солидарность*, имеющей внутреннюю связь со справедливостью [21]. С точки зрения Ю. Хабермаса инструментальная рациональность присуща прежде всего тем формам социальной жизни, где доминируют деньги и власть, т.е. капитализму и бюрократии» [22].

В контексте теории коммуникативного действия Ю. Хабермас формирует *модель делиберативной демократии*, опирающейся на идеал сообщества свободных и равных индивидов, которые в политической коммуникации определяют формы своей совместной жизни. С помощью этой модели Ю. Хабермас стремится дать ответы на вопросы о том, как формируется общая воля, как достигается политический консенсус, необходимый для самоорганизации общества, как совместить плюрализм с универсализмом и т.п. Он исходит из того, что «в современных обществах демократия как политический порядок не может опираться на субстанционально единую, как бы заранее переформированную «волю народа». Если идея коллективного самоопределения вообще ещё сохраняет свой практический смысл, то *демократическая самоорганизация должны мыслиться как процесс, как процедура формирования мнений и воли народа*» [23]. Легитимно не то решение, которое выражает якобы уже сформированную волю народа (по формуле некоторых политиков: «Я знаю, чего хочет народ»), но то, в обсуждении которого приняло участие наибольшее количество граждан [24]. «*Делиберативная демократия – это демократия рационального дискурса, обсуждения, убеждения, аргументации, компромиссов* в её беспартийном варианте. Т.е. модель основывается на убеждённости в том, что *человек* способен перейти от роли клиента к роли гражданина государства, что он склонен к беспартийности, *готов к компромиссу и даже к отказу от своих предпочтений*, если они компромиссу мешают» [25].

Таким образом, «либеральная архитектоника государства и общества дополняется у Хабермаса тем, что наряду с государственной властью и централизующим воздействием рынка он выдвигает в качестве третьего (и преимущественного) источника общественной интеграции «*солидарность, ориентирование общей воли*»» [1], опирающуюся на *убеждение, а не на принуждение.*

Заключение

Если в эпоху развития индустриального общества на рубеже 19-го и 20-го веков происходило формирование, а затем и широкое распространение, инструментальной рациональности акторов, то в период становления информационного общества в 21-м веке доминантой мировоззрения людей, склонных не только познавать мир, но и творить его, должна стать коммуникативная рациональность. Целерациональность, успешно применяемая при решении технических проблем, очень часто оказывается бессильной при решении проблем чисто человеческих. Более того, когда человека превращали в средство достижения цели, инструментальная рациональность, призывающая руководствоваться одним лишь критерием эффективности, становилась источником серьёзных гуманитарных проблем, о чём, в частности, свидетельствуют кровопролитные войны 20-го века. По сути дела, этот тип рациональности предполагает возможным совершать насилие над человеком во имя достижения цели, принуждая его делать то, что противоречит его интересам и убеждениям.

В отличие от инструментальной коммуникативная рациональность отрицает какое-либо насилие, выдвигая на передний план коммуникацию акторов, устремлённых к достижению взаимопонимания и консенсуса при урегулировании проблемной ситуации, в которой они находятся. Как считает Ю. Хабермас, выражение «взаимопонимание» обязательно требует дополнения «свободное от принуждения» и трактуется как «процесс взаимного убеждения, который координирует действия множества участников на базе мотивации через обоснование…В коммуникативном действии 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» [20].

Список литературы

[1] Новая философская энциклопедия (в четырёх томах). – Москва: «Мысль», 2010.
[2] M. Crozier, E. Friedberg. L'Acteur et le Systéme: les contraintes, de l'action collective. – Paris: Éditions du Seuil, 1977.
[3] В.Н. Бахмарова. Социальный актор в концепции управления М. Крозье. // Теория и практика общественного развития. – 2012. - №1. [Электронный ресурс]. URL: http://teoria-practica.ru/-1-2012/sociology/bahmarova.pdf.-0,5 п.л.
[4] Т. Саати, К. Кернс. Аналитическое планирование. Организация систем. – М.: «Радио и связь», 1991.
[5] В.А. Виттих. Введение в теорию интерсубъективного управления. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2013.
[6] M. Crozier. Le Phénomene bureacratique. – Paris, Éditions du Seuil, 1963.
[7] В.И. Спиридонова. Современный анализ бюрократического феномена. – 19.04.2010. http://www.politvektor.ru/glavnaya-tema/4598/-0,5 п.л.
[8] Современный философский словарь. – Лондон, Франкфурт-на-Майне, Париж, Люксембург, Москва, Минск/ «ПАНПРИНТ», 1998.
[9] В. Пастухов. Три времени России. Общество и государство в прошлом – настоящем – будущем. – Москва: ПОЛИС-РОССПЭН, 1994.
[10] М. Вебер. О некоторых категориях понимающей социологии. – Избранные произведения. М., 1990, с. 495-499.
[11] Г. Кунц, С. Одоннел. Управление. Системный и ситуационный анализ управленческих функций (том 1). – М., 1981, с.221.
[12] Z. Bauman. Life in Fragments: Essey on Postmodern Morality. – London: Blackwell, 1995.

[13] J. Habermas. Theorie des kommunicativen Handelns. Bde 1-2. – F.a.M., 1981.
[14] Энциклопедия эпистемологии и философии науки. – М.: «Канон+» РООН «Реабилитация», И.Т. Касавин, 2009.
[15] Всемирная энциклопедия. Философия. – М.: АСТ; Мн.: Харвест, Современный литератор, 2001.
[16] Г.Саймон. Науки об искусственном. – М., Мир, 1972.
[17] В.А. Виттих. Управление ситуациями в сложных развивающихся системах с применением интерсубъективных теорий. – Мехатроника, автоматизация, управление, №12, 2011, с. 2-6.
[18] В.С.Стёпин, В.Г. Горохов, М.А. Розов. Философия науки и техники. – М.: Гардарики, 1996.
[19] В.А. Виттих. Когнитология развивающихся систем. – Мехатроника, автоматизация, управление, №10, 2011, с. 45-49.
[20] Новейший социологический словарь. – Мн.: Книжный Дом, 2010.
[21] Ю. Хабермас. Моральное сознание и коммуникативное действие. – СПб, 2000, с. 90-92.
[22] Д.В. Ефременко. Концепция общества знания как теория социальных трансформаций: достижения и проблемы. – Вопросы философии, №1, 2010, с. 49-61.
[23] В.В. Посконин, О.В. Посконина. Делиберативная модель демократии как один из путей её совершенствования (концепция Ю. Хабермаса). – Правовестник, 22.01.2013. http://pravovestnik.ru/?p=15.
[24] Ю. Хабермас. Демократия, разум, нравственность. – М.: Наука, 1992, с. 194-195.
[25] Н.А. Баранов. Трансформации современной демократии: Учебное пособие. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2006.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ ИНТЕРСУБЪЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АСУП ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

М. М. Матюшин

ОАО «РКК «Энергия»
Московская обл., г. Королев, ул. Ленина, д.4А, Россия
matushin@scsc.ru
тел:+7 4955137497

Ключевые слова: *космический аппарат, теория интерсубъективного управления, оперативное управление полетом, группы управления полетом, взаимодействие, онтологический базис управления полетом*

Abstract

The paper attempts to change the methodological paradigm of classical rationality postnonclassical science the paradigm of rationality in the description of some elements of process control of spacecraft. Discusses the types of intersubjectivity in relation to the description of the problems of space mission operational control. Considered actors of participating in the regulation of the problem situation in the operational control the spacecraft. Provides practical examples of the description of operational flight control of the International Space Station.

Введение

Большинство современных научных работ, описывающих автоматизированные системы управления полетом (АСУП) пилотируемых объектов космической техники (ОКТ), используют методологическую базу классической рациональности. В парадигме классической рациональности объективно-истинное знание может быть получено только в том случае, когда субъект отделён от объекта (изучаемой системы), а из описания и объяснения исключается всё, что относится к самому субъекту и средствам (процедурам) его познавательной деятельности. В результате разрабатываются модели, в которых либо специалисты управления отсутствуют полностью и АСУП будто бы функционируют сами, без участия человека, либо человек-оператор заменяется абстрактным блоком, для которого можно построить, например, вероятностные характеристики надежности.

При анализе подобных моделей с практической точки зрения сразу встает целый комплекс факторов, связанных именно с объективными и субъективными качествами специалиста- оператора. Полностью исключить из поля зрения данный комплекс не возможно – он существует на практике и достаточно сильно влияет на результаты деятельности АСУП, учесть его в рамках классической рациональности очень сложно – поскольку созданные модели претендуют на абсолютную объективность и независимость от субъективных факторов использования. Поэтому этот комплекс скрывается за абстрактным термином «человеческий фактор». В результате получатся, что АСУП работает по разработанным логически правильным моделям плюс «человеческий фактор», о котором сложно сказать что-то, кроме того, что он есть. А ведь именно пресловутый «человеческий фактор» выступает и в роли мощного внутреннего источника энергии и в роли основной угрозы для работы АСУП.

Альтернативой является использование методологической парадигмы постнеклассический рациональности, онтологичесткой основой которой являются труды М. Хайдеггера, Э. Гуссерля, Ю. Хабермаса. Постнеклассическая рациональность исходит из того, что знания об объекте соотносятся не только с особенностями его взаимодействия со средствами наблюде-

ния, но и с ценностно-целевыми структурами деятельности субъекта. Иными словами, оппозиция субъекта и объекта заменяется в постнеклассической науке их суперпозицией, а место всеобщего «унифицированного» субъекта, каковым является субъект классической рациональности, занимает индивид, личность

Для сложных организационных систем на основе этой парадигмы в трудах В.А. Виттиха разработана теория интерсубъективного управления. Важнейшим результатом этой теории является то, что сложной системе люди, с их персональными знаниями и навыками, перестают быть слабо учитываемым «человеческим фактором» и становятся в центр предметного онтологического миров системы. Таким образом, на передний план выходят проблемы субъективности, интерсубъективности и коммуникативного действия, а основой принимаемого решения выступает достижение взаимопонимания между людьми, участвующими в разработке этого решения.

В результате использование элементов теория интерсубъективного управления открывает возможности для построения широкого класса моделей, методов и технологических средств для обработки информации в процессе выработки решения в ходе оперативного управления полетом ОКТ и объединение их на качественно новых принципах, существенно повышающих безошибочность процесса оперативного управления полетом ОКТ.

1 Классическая и постнеклассическая парадигмы рациональности как методологические основы описания сложных организационно-технических систем

В [1] справедливо указывается, что моделирование работы АСУП, возможно лишь при теоретико-множественном их описании. Это обосновывается высоким уровнем сложности и неопределенности процессов функционирования АСУП ОКТ. Действительно АСУП ОКТ представляет собой сложные структуры, направленные на достижения вектора целей. Однако, кроме этого, на функционирование АСУП ключевое влияние оказывает непосредственное вовлечение практически во все аспекты деятельности человека-оператора. Имеемо присутствие оператора, и не абстрактного «человека», а конкретного специалиста, имеющего определенный опыт и знания, порождает, например, в ситуации принятия оперативных решений тот высокий уровень неопределенности и трудности прогнозирования, который проглядывается за достаточно абстрактным термином «человеческий фактор».

Сложность моделирования как описания процессов, происходящих в АСУП, помимо множества частных факторов, таких как, например, отсутствие полностью удовлетворяющего всем требованиям математического аппарата, обуславливается важной методологической проблемой – использование практически во всех попытках моделирования подходов, в основе которых лежит классическая рациональность.

В парадигме классической рациональности объективно-истинное знание может быть получено только в том случае, когда субъект (исследователь) отделён от объекта (изучаемой системы), а из описания и объяснения исключается всё, что относится к самому субъекту и средствам (процедурам) его познавательной деятельности [2].

Осознанно или не осознанно используя методологическую базу классической рациональности, исследователь сложных организационно-технических систем (ОТС) вынужден некоторым образом абстрагировать конкретных специалистов-операторов в процессе работы ОТС. В результате получаются модели, в которых либо специалисты управления отсутствуют полностью и ОТС будто бы работают сами, без участия человека, как некая техническая система, либо оператор заменяется абстрактным блоком, для которого можно построить, например, вероятностные характеристики надежности, что и вызывает в дальней бурные дискуссии.

При анализе подобных моделей с практической точки зрения сразу встает целый комплекс факторов, связанных именно с объективными и субъективными качествами специали-

ста- оператора. Полностью исключить из поля зрения данный комплекс не возможно – он есть и достаточно сильно влияет на результаты деятельности ОТС, учесть его в рамках классической рациональности практически невозможно – поскольку модели претендуют на абсолютную объективность и независимость от субъективных факторов использования, поэтому этот комплекс скрывается за абстрактным термином «человеческий фактор», как за некой ширмой. В результате получатся, что ОТС работает строго по разработанным логически правильным моделям плюс «человеческий фактор», о котором сложно сказать что-то, кроме того, что он есть. А ведь именно пресловутый «человеческий фактор» выступает в роли мощного внутреннего источника энергии для работы ОТС, способного в разы увеличивать или уменьшать КПД системы.

Еще одной важной проблемой, появляющейся при замене конкретных операторов абстрактными блоками, становиться проблемы взаимодействия и взаимопонимания разных операторов управления. При вводе в модель одинаковых абстрактных блоков вместо операторов проблемы взаимодействия и взаимопонимания просто исчезают. Ю. Лотман указывает [3], что при полном подобии говорящего и случающего исчезает потребность в коммуникации вообще. Для коммуникации изначально требуется неэквивалентность говорящего и слушающего. Т.е. модель ОТС логически красиво и правильно начинает описывать обмен командами между элементами, но к практике управления это начинает иметь отдаленное отношение, а разница списывается на «человеческий фактор».

Одним из возможных выходов из данной, достаточно не простой ситуации видится смена методологической парадигмы классической рациональности на парадигму постнеклассический рациональности [4]. Постнеклассическая рациональность исходит из того, что знания об объекте соотносятся не только с особенностями его взаимодействия со средствами наблюдения, но и с ценностно-целевыми структурами деятельности субъекта. Иными словами, оппозиция субъекта и объекта заменяется в постнеклассической науке их суперпозицией, а место всеобщего «унифицированного» субъекта, каковым является субъект классической рациональности, занимает индивид, личность [4].

Для сложных организационных систем эта парадигма разрабатывается в трудах В.А. Виттиха [4,5,6]. В.А. Виттих указывает, что переход к постнеклассической рациональности приводит к необходимости отказа от декартовских онтологических построений, постулирующих единую картину объективного мира «твёрдой» материи, в которой нет места человеку и сознанию, и использования фундаментальной онтологии М. Хайдеггера, рассматривающего бытие как бытие человека, сознание которого конструирует (конституирует) его собственный предметный мир. Тогда учение о бытии предстаёт как онтология субъективности: человек располагается в центре своего предметного мира. Таким образом, происходит переход от мира объективного к миру субъективному.

В основание постнеклассической рациональности ставятся понятия субъективности, интерсубъективности и коммуникативного действия. Понятие интерсубъективности, предложенное Э. Гуссерлем, указывающет на внутреннюю социальность индивидуального сознания [4]. С помощью данных понятий определяется класс интерсубъективных систем.

Атомарным элементом интерсубъективных систем, способным к саморазвитию и самоорганизации, является человек с его субъективными чувствами, желаниями, знаниями, опытом и т.п. Определим человека как актора если он может осознать сложившуюся проблемную ситуацию и осуществлять познавательно-деятельностную функцию для её регулирования. Акторы являются неоднородными, поскольку каждый из них, в общем случае, имеет свой субъективный взгляд на мир [6].

В своём стремлении понять смысл проблемной ситуации и урегулировать её путём снижения неопределённости ситуации до некоторого приемлемого уровня, автономные акторы организуются в интерсубъективную систему [7]. Каждый актор вместе с имеющимися в его распоряжении интеллектуальными, материальными и трудовыми ресурсами образует базовый

элемент интерсубъективной системы - холон (от греческого «holos» - весь, целый с суффиксом «on», обозначающим часть, частицу) [4]. Понятие «холон» обозначает целое, являющееся частью другого целого, включающее в себя управляемые актором компоненты для обработки, транспортировки и хранения физических объектов (вещества, энергии) и информации. Являясь независимым и автономным, холон, располагающий развитыми средствами коммуникации, способен взаимодействовать с другими холонами, образуя новые (составные) холоны.

Холоны могут не только объединяться (интегрироваться) в составные холоны, но и, наоборот, распадаться (дезинтегрироваться). Процессы интеграции и дезинтеграции холонов определяют эволюцию интерсубъективной системы, которая должна рассматриваться как система развивающаяся, остающаяся всегда открытой и незавершённой. Дело в том, что в процессах осознания и регулирования проблемной ситуации может изменяться не только состав участников (холонов), но и корректироваться их договорённости, связанные с ценностными приоритетами, целевыми ориентирами и задачами, требующими решения.

Таким образом, в сознании акторов, направляющих своими решениями и действиями на развитие интерсубъективной системы, фактически доминирует коммуникативная рациональность, а не целерациональность, предполагающая жёсткую ориентацию на определенную цель. Это обуславливается тем, что в процессе коммуникации акторов в рамках многоцелевой системы именно процесс коммуникации во многом определяет выбор той или иной цели.

2 Акторы участвующие в ходе регулирования проблемной ситуации в процессе оперативного управления полетом ОКТ

В первую очередь необходимо отметить, что процесс принятия решений при оперативном управлении полетом ОКТ инициируется и является ответом на сложившуюся к некоторому моменту времени проблемную ситуацию. Ситуация как «совокупность обстоятельств» [8] присутствует при оперативном управлении полетом всегда. Однако, если неопределенность ситуация превышает определенный порог и ее последствия могут иметь негативные для процесса управления полетом последствия нужно говорить о проблемной ситуации.

АСУП представляет собой сложную организационно-техническую систему, в которой работает достаточно большое количество операторов. Каждый из операторов имеет заранее строго определенную область ответственности за один аспектов подготовки и реализации процесса оперативного управления полетом ОКТ. Данная ответственность определяет круг должностных обязанностей каждого оператора. Предполагается изначально, что АСУП имеет такую структура, которая гарантирует при появлении проблемной ситуации, что решение этой ситуации будет вменена в обязанность как минимум одному из операторов АСУП. Однако, на практике, проблемной ситуация как правило предполагает решение именно комплекса задач, т.е. в решение проблемной ситуации будет вовлечено некоторое множество специалистов (даже если окончательное решение принимается одним лицом – это подробно рассмотрено в главе 1). Специалистов, имеющих активную позицию в условиях конкретной проблемной ситуации и направленную на разрешения этой проблемной ситуации, будем называть акторами.

В модели интерсубъективного управления актор вместе с имеющимися в его распоряжении интеллектуальными, материальными и трудовыми ресурсами образует базовый холон, для управления которым актор располагает властными полномочиями и несёт ответственность за принимаемые решения [4]. Т.е. в рамках своих заранее определенных прав и обязанностей специалист может и должен использовать наделенные ему ресурсы для разрешения проблемной ситуации.

Вполне естественно, что каждый из акторов может по-разному оценивать складывающуюся проблемную ситуацию управления полетом. У каждого из акторов есть свои интересы, планы, требования и ограничения. Однако необходимость принятия совместного решения обуславливается тем, что при выполнении ответственной полетной операции, как правило, ни

один из элементов АСУП не в состоянии выполнить ее самостоятельно, используя только «свои» средства. Поэтому управление полетом ведется в рамках сложившейся полетной ситуации на основе согласованных решений, разрабатываемых и принимаемых в процессе информационного взаимодействия акторов. Подобные решения являются одним из важных факторов обеспечения самоорганизации в постоянно протекающих процессах оперативного управления полетом КА.

Т.е. разрешение проблемной ситуации требует деятельности коллектива специалистов, в этом случае в терминологии интерсубъективного управления образуется составной холон, который в некоторых случаях сам может проявлять признаки актора. Составные холоны, в свою очередь, могут «интегрироваться» в более крупные холоны или, наоборот, «дезинтегрироваться».

Необходимо отметить следующий момент. В общем виде могут быть различия между формальной структурой группы управления АСУП и холоном, образующимся в процессе разрешения проблемной ситуации. Формальная структура группы управления определяется заранее иногда на весь, иногда на достаточно длительный период функционирования АСУП. Она отражается, как правило, в штатном расписании группы управления и имеет четко выраженный иерархический принцип подчиненности специалистов. Место конкретного специалиста в формальной структуре определяет его права и обязанности в рамках реализации процесса оперативного управления полетом.

Составной холон возникает при решении определенной проблемной ситуации и после ее решения исчезает. Основой для формирования холона является именно разрешение этой ситуации, поэтому в зависимости от характеристик развития ситуации в нем могут быть установлены как иерархические (т.е. объединение идет «сверху-вниз»), так и лоурархические (объединение идет «снизу-вверх») отношения. Кроме того иерархические и лоурархические отношения могут комбинироваться в разных сочетаниях. Так в процессе анализа комплексной проблемы, затрагивающей работу нескольких бортовых систем, специалистами группы анализа в процессе разрешения данной ситуации путем обсуждения вполне может быть выделена «ключевая» в данном случае бортовая система и, соответственно, выбран один специалист, являющийся в данной проблеме «головным» по данной проблеме, т.е. реализуется принцип лоурархии.

В качестве примера рассмотрим распределенное управления полетом ОКТ, т.е. разными сегментами ОКТ управление ведется разными Центрами управления полетом (ЦУП). В соответствии с этим принципом ведется управление полетом Международной космической станцией (МКС).

Решение проблемной ситуации, затрагивающей МКС в целом и требующей согласованных решений и взаимных действий групп управления в ЦУПах международных партнеров (МП), будет проходить в следующих условиях.

В качестве акторов могут выступать как отдельные специалисты групп управления, например Сменный руководитель полета в ЦУП-М или Flight Director в ЦУП-Х (базовые холоны), либо оперативные группы управления в ЦУПах МП в целом (составные холоны).

Практически каждый из международных партнеров, участвующих в управлении полетом МКС, к моменту начала эксплуатации МКС имел опыт управления полетами сложными объектами космической техники. Так, собственные пилотируемые программы были до МКС и у США и в России (СССР), Европа и Япония достаточно разрабатывали программы беспилотных космических аппаратов и т.д.

Это явилось причиной значительных различий в инженерных нормах, культуры и философии управления полетом, которым придерживаются каждый из международных партнеров в программе МКС. Средства, которыми пользуются группы управления полетом в различных ЦУПах – различны. В целом, достаточно сложно сравнивать, например, ЦУП-М и ЦУП-Х ЦУП-ATV, поскольку они представляют собой различные организационно-технические сис-

темы. Поэтому со всей ответственностью можно констатировать, что группы управления ЦУПов МП преставляют собой с точки зрения данной ситуации неоднородных акторов. Таким образом, каждый из акторов может по-разному оценивать складывающуюся ситуацию управления полетом МКС. У каждого из акторов есть свои интересы, планы, требования и ограничения.

Однако проблемная ситуация, затрагивающая МКС в целом, как правило, диктует необходимость принятия совместного решения. Эта необходимость может обуславливаться несколькими факторами.

Бортовые системы МКС как сложного технического объекта настолько тесно связаны, что, как правило, при выполнении ответственной полетной операции ни один из ЦУПов не в состоянии выполнить ее самостоятельно, используя только «свои» наземные и бортовые средства.

Экипаж работает как единое целое, чтобы обеспечить максимальный уровень безопасности управления полетом МКС. ЦУПы проявляют достаточно много усилий, чтобы не разделить экипаж, противопоставляя друг другу его членов разной национальной принадлежности.

Определенные действия на МКС должны быть выполнены за определенный ограниченный интервал времени, т.е. уйти от точки принятия решений или постоянно сдвигать ее вдоль временной оси невозможно из-за объективных требований функционирования МКС.

Относительно организации составных холонов при решении проблемной ситуации на МКС, можно заметить следующее. Отдельные группы управления ЦУПов МП будут в данной ситуации выглядеть как составные холоны, организованные по иерархическому принципы. Эти холоны будут состоять из специалистов оперативной смены и с позиции одного ЦУПа в другом ЦУПе можно четко выделить руководителя оперативной смены, подчиненных ему специалистов. Взаимодействие ЦУПов будет строится с учетом этой подчиненности.

Однако сами ЦУПы в своем функционировании достаточно автономны, и ярко выраженная подчиненность отсутствует. Т.е. составной холон, образующийся из самих групп управления ЦУПов МП для решения проблемной ситуации, будет иметь ярко выраженные черты лоурархии. Для решения совместных проблем определяется так называемый «ведущий» ЦУП или ЦУП – интегратор, чаще всего в этой роли выступает ЦУП-Х. В данном случае термин «интеграция» используется строго по прямому назначению и отражает идею «сплочения, объединения (от лат. integrum — целое; лат. integratio — восстановление, восполнение)», а не навязывание своей воли остальным партнерам.

3 Персональные и интерсубъективные знания, использующихся в ходе регулирования проблемной ситуации в процессе оперативного управления полетом ОКТ

Разрешение или парирование проблемной ситуации в ходе оперативного управления полетом ОКТ предполагает прежде всего понимания акторами этой ситуации. Собственно это общее понимание, вырабатывается ими при разрешении проблемной ситуации, и служит залогом успешности процесса принятия решения. Поэтому можно говорить, что акторы, вырабатывая общее понимание ситуации, компонуют некоторую область интерсубъективного знания, которая и является онтологической основой разрешения проблемной ситуации.

Однако, перед началом процесса взаимодействия, акторы представляют собой далеко не «чистый лист». Все специалисты группы управления полетом имеют профильное высшее инженерное образование. Не один из специалистов не будет допущен к работе, если он не пройдет соответствующую сертификацию, подтверждающую наличие у него необходимого для выполнения своих обязанностей в ходе оперативного управления полетом уровня знаний. Ответственным операциям предшествует комплекс тренировок, дающий необходимые навыки специалисту и т.д. Т.е. со всей ответственностью можно сказать, что каждый из акторов обладает неким предпониманием ситуации [9].

Предпонимание, выражающее предметный мир человека, находящийся в его «поле зрения», по сути дела, представляет собой совокупность априорных персональных знаний актора [10], на основе которых он постигает смысл сложившейся ситуации. Эту совокупность априорных персональных знаний актора можно на верифицируемые и аксиологические [11]. При этом, под верифицируемыми знаниями понимаются знания, истинность которых не просто утверждается, а доказывается, объясняется; при этом содержание знаний не зависит от исследователей, что позволяет относить их к разряду объективных. Под аксиологическими понимаются знания, которые применимы только в конкретных жизненных ситуациях и носят субъективный характер, хотя имеют большую практическую ценность. Таким образом, в верифицируемых знаниях делается акцент на их истинности, а в аксиологических – на ценности в текущих ситуациях.

Для подготовки и реализации процессов оперативного управления полетом ОКТ изначально было характерно и характерно в настоящий момент целенаправленное формирование как верифицированных так и аксиологических знаний. Так знания, содержащиеся в эксплуатационно-технической документации, описывающей подготовку реализацию и реализацию оперативного управления, именно в рамках оперативного управления считаются верифицированными и специалисты обязаны следовать им неукоснительно. Необходимо отметить, что вне рамок оперативного управления полетом ОКТ те же самые знания вполне могут подвергаться критике, уточняться, модифицироваться и т.д.

Для гарантии правильного понимания специалистом знаний, содержащихся в эксплуатационно-технической документации, предусмотрен и реализуется целый комплекс мер, называющийся как правило, подготовкой специалиста. Декларацией того, что специалист обладает необходимым для выполнения своих должностных обязанностей объемом верифицированных знаний является сертификация специалиста. Такая сертификация может, например, проходить в виде экзамена, на котором членных экзаменационной комиссии коллегиально на основе ответов специалиста на вопросы принимают решение достаточности объема знаний, который есть у специалиста, и правильности трактовки специалистом этих знаний.

Аксиологические знания накапливаются специалистом только в ходе выполнения им практической работы. Однако сама практика оперативного управления полетом не всегда в требуемый интервал времени способна дать возможность специалисту выработать необходимый объем знаний. Поэтому для специалистов оперативного управления широко используется такой вид деятельности как тренировка. Тренировка в данном случае представляет собой максимально приближенную к реальности, имитацию процесса оперативного управления полетом, в ходе которой используется комбинация как моделирующих средств, так и штатных средств управления полетом ОКТ. Отличие от реальной практике управления состоит в том, что при тренировке составляется специальный сценарий хода процесса оперативного управления полета, направленный на выработку опыта специалиста, т.е. формирование максимально возможного максимального объема аксиологических знаний.

Таким образом, попадая в проблемную ситуацию в ходе оперативного управления полетом, каждый из специалистов формирует предпонимание ситуации на основе имеющего в его распоряжении предварительно накопленного им объема знаний. Но, как уже отмечалось, для успешного разрешения проблемной ситуации акторам необходимо выработать некоторое общее понимание ситуации, некоторую область интерсубъективного знания, которая будет являться онтологической основой разрешения этой ситуации.

Интерсубъективные знания будут являться в конкретной проблемной ситуации той, основанной на рациональной аргументации, на единой для всех акторов «платформой знаний», которая определяет: на основе каких принципов, правил и норм будут приниматься решения об управлении ситуацией (т.е. это достигнутые договорённости о «правилах игры» в процессах принятия решений).

Рациональные основания, составляющие платформу для достижения взаимопонимания, обеспечиваются интерсубъективностью [4]. Таким образом, логично было бы предположить, что в онтологии интерсубъективного знания можно будет выделить части соответствующие типам интерсубъективности [4].

Нормативная онтология, построенная в соответствии с нормативной интерсубъективность, предполагает взаимное принятие согласие использования акторов некоторого объема норм и правил поведения или оценки ткущей ситуации. Нормативная онтология опирается с одной стороны на разработанное заранее множество знаний, содержащих взаимосвязанную совокупность законов, правил, стандартов и иных официально оформленных соглашений, которое обеспечивает регулирование отношений акторов на некотором уровне неопределённости ситуации. В качестве примера можно привести Правила полета ("Flight rules") представляющие собой нормы выполнения тех или иных полетных операций (действий на борту ОКТ). В этих правилах содержатся ограничения и возможные действия каждого из участников управления полетом, влияющие на реализацию операций. При необходимости приводится обоснование того или иного действия или ограничения, а также последствия их невыполнения. Благодаря согласованию правил все стороны могут быть уверены, что их ограничения известны и правильно понимаются всеми участниками.

С другой стороны, нормативная онтология опирается на согласованную трактовку этих заранее разработанных знаний, что обеспечивается путем коммуникации акторов в процессе разрешения проблемной ситуации. Если степень неопределенности ситуации превышает некий порог и знаний выработанных заранее уже не достаточно для успешного разрешения ситуации, то акторы могут новые нормы и правила, трансформируя нормативную онтологию. Это в свою очередь создает предпосылки для модификации совокупности законов, правил, стандартов и иных официально оформленных соглашений в будущем.

Онтология принятия решений, построенная в соответствии с логической интерсубъективностью, предполагает достижение согласия акторов между собой в логике принятия решений. Ожеговым логика определяется как «ход рассуждений, умозаключений» [8]. Для задач оперативного управления полетом согласованная онтология принятия решений предполагает договоренность акторов о таком направлении развития процесса принятия решений, которое обуславливает производство схожих выводов из схожих предпосылок или предположений. В основе принятия решений могут лежать разные логические системы, при принятии тех или иных решений могут быть использованы разные логики, однако для конкретной проблемной ситуации акторами должна быть достигнута договоренность об использовании той или иной логической основы для разрешения того или иного аспекта ситуации.

Онтология деятельности, построенная в соответствии с операциональной интерсубъективностью, предполагает, что определенные последовательности действий (технологии, операции, массивы управляющих воздействий для бортового контура управления и т.д.), выполняющиеся при управлении полетом, обладают свойством воспроизводимости. Таким образом, сами элементы действий и их последовательность понимаются всеми акторами однозначно, с оговоренным уровнем глубины, и могут быть воспроизведены в том же виде. Кроме того, вырабатываются договоренности о «допустимых технологиях» деятельности, которые могут быть использованы на основе консенсуса всех участников процесса оперативного управления. Онтология деятельности будет, таким образом, включать в себя регламентацию деятельности акторов как описание технологий управления с указанием ответственности за их реализацию.

Онтология фактов, построенная в соответствии с эмпирической интерсубъективностью, предполагает, что факты, которыми акторы обосновывают суждения признаются всеми сторонами. Онтология фактов конкретной проблемной ситуации может основываться на некотором множестве заранее выявленном множестве фактов составляющих процесс оперативного управления полетом, которые были верифицированы всеми акторами. В качестве основы верификации могут выступать, например, средства моделирования. Средства моделирования

могут включать в себя как физические модели агрегатов, приборов, оборудования, бортовых систем и даже целых модулей, так и математические модели процессов функционирования ОКТ и полетной обстановки. Большая часть этих моделей формально или неформально предварительно согласуется акторами процесса оперативно управления полетом. Поэтому результаты моделирования, как эмпирическое подтверждение выводов о возможной полетной ситуации, вполне принимаются всеми акторами. При этом всегда подразумевается, что подобные результаты актор всегда имеет возможность проверить на «своих» средствах моделирования. В процессе разрешения проблемной ситуации акторы, используя предварительно верифицированное множество фактов, договариваются о соответствующей данной ситуации трактовке фактов, т.е. окончательно формируют онтологию фактов. Кроме того, иногда возможна ситуация, при которой некоторые факты не могли быть заранее верифицированы одним, несколькими или даже всеми акторами, в этом случае акторы договариваются лишь о некоторой общей интерпретации этих факторов, осознавая что эта интерпретация не подтверждена верифицирующими средствами и процедурами.

Онтология единого культурного поля, построенная в соответствии с семантической интерсубъективностью, предполагает возможность акторов вести коммуникацию «на одном языке», имея возможность понимать друг друга, т.е. предполагает ясность и общее согласие относительно понятий и построенных из них суждений. В оперативных группах управления полетом одной национальной программы онтология единого культурного поля формируемся, как правило, без особенных затруднений, поскольку все специалисты работают, как правило, в одной корпоративной среде, даже если формально относятся к разным предприятиям.

Это обуславливается тем, что, являясь частью корпоративной культуры, специалисты имею схожий «угол зрения» на корпоративные цели и задачи, ценности, правила корпоративного поведения и т.д. даже независимо от того, согласны они с ними или нет. Гораздо больше проблем встает, когда в разрешении проблемной ситуации участвуют акторы, представляющие оперативные группы управления разных национальных программ. В этом случае вполне естественно, что акторы используют и разные языки и различный культурный код, поэтому требуются специальные меры для обеспечения понимания акторов.

Так, например, проблема одинакового понимания терминологии всеми участниками процесса управления полетом МКС с самого начала программы МКС усугублялась использованием разных языков ЦУП-М и ЦУП-Х – соответственно русского и английского. Для того, что бы избежать непонимания был сформирован специализированный словарь – «МКС Russian-English/English-Russian technical Lexicon», в котором согласовывалась русская и английская терминологии. Общение между специалистами ЦУП-М и ЦУП-Х в голосовых каналах связи было организовано с помощью специально подготовленных и сертифицированных переводчиков.

Хотелось бы обратить внимание, что использование разных языков, составляет только часть проблемы и иногда не основную ее часть. Так именное некоторые различия культурного кода способствовали, в том числе сохранению переводчиков голосовых каналов в программе МКС, хотя изначально предполагалось при управлении полетом МКС перейти полностью на английский язык в голосовых каналах в 2003 году. Одними из определяющих факторов для такого состояния дел являются с одной стороны предпочтительность использования специалистами управления полетом «своего» языка в сложных полетных ситуациях, с другой необходимость наличия сертифицированных переводчиков для обеспечения единообразия используемой терминологии. Кроме того, поскольку различия культурного кода легче преодолеваются при личном общении специалистов, в ЦУПах международных партнеров существуют и полноценно функционируют консультативные группы как представительство других МП. Основной задачей специалистов этих групп является именно личное общение со специалистами оперативных групп управления в процессе разрешения проблемных ситуаций.

4 Интресубъективная модель выработки и принятия решений при оперативном управлении полетом ОКТ

Средства теории интерсубъективного управления предназначены для достижения взаимопонимания неоднородных акторов в процессе принятия решения о том, каким образом будет урегулирована проблемная ситуация [4]. Интресубъективная модель процессов выработки и принятия решений при оперативном управлении полетом ОКТ, использующая эти средства будет выглядеть следующим образом.

После появления проблемной ситуации в процессе управления полетом ОКТ начинается временной интервал, характеризующий способность акторов, вовлекаемых в эту ситуацию, ее обнаружить. Способность акторов обнаружить проблемную ситуацию, т.е. длительность этапа обнаружения зависит с одной стороны от сложившихся обстоятельств и ограничений, накладываемых на процесс оперативного управления полетом, например, факт наличия или отсутствия ОКТ в зоне видимости станций слежения; работа тех или иных бортовых алгоритмов; доступность экипажа и т.д. С другой стороны, длительность этапа обнаружения зависит от подготовленности и готовности сами акторов к обнаружению проблемной ситуации.

После обнаружения проблемной ситуации акторы, являющиеся в общем случае неоднородными, начинают взаимодействовать друг с другом используя подготовленные заранее средства и процедуры взаимодействия. Именно этот процесс взаимодействия и формирует интерсубъективную систему, в рамках которой акторы будут вырабатывать согласованное решение по выходу из проблемной ситуации.

Взаимодействие может быть выстроено как по принципу двухсторонней связи, когда интерсубъетивная система образуется множеством акторов, связанных «каждый с каждым», так и по принципу «круглого стола», когда множество акторов взаимодействует в рамках некоторого единого информационного поля. Второй принцип позволяет оптимизировать циркулирующие потоки информации, убрав дублирующие сообщения, однако, первый может позволить более эффективно достичь взаимопонимание между акторами и сохранить конфиденциальность. В общем случае могут быть использованы сразу оба метода, в зависимости от складывающейся ситуации и организации оперативного управления полетом ОКТ.

Создающаяся интерсубъективная система будет представлять собой открытую холоническую структуру. Т.е. по мере продвижения к разрешению проблемной ситуации, в эту структуру могут входить или выходить из нее новые акторы. Появление этих новых акторов может происходить как по инициативе самих новых акторов, осознавших, что проблемная ситуация начинает касаться сферы их ответственности, так и новые акторы могут вовлекаться специалистами, уже участвующими в разрешении проблемной ситуации. Например, если основой проблемной ситуации послужили проблемы с системой ориентации космического аппарата, но ситуация начинает влиять на выработку электроэнергии солнечными батареями, то к участию в разрешении этой ситуации должен подключиться специалист по анализу системы электропитания, заметив снижение характеристик свой системы. В качестве другого пример можно привести вовлечение в разрешение проблемной ситуации специалиста-разработчика бортовой системы, если специалисты оперативной смены не могут разрешить проблемную ситуацию, не имея требуемой глубины знаний.

Также по мере развития ситуации акторы могут объединяться в составные холоны и в этом случае, с одной стороны сами составные холоны могут выступать в роли акторов. С другой стороны акторы, формирующие составной холон, должны прийти к взаимопониманию на основе соглашения относительно общих интересов составного холона и собственных интересов акторов. В качестве примера можно привести уже упоминавшееся распределенное управление полетом, при котором у всех участников в той или иной ситуации складывается путем переговоров взаимное понимание как интересов каждого из участников, так и понимание задач, которые требуется решить для оперативного управления объектом в целом.

Необходимо отметить, что вполне возможна ситуация при которой актор будет участвовать в разрешении сразу нескольких проблемных ситуаций, т.е. он будет частью сразу нескольких интерсубъективных систем, может входить в состав нескольких составных холоном и будет вынужден делить свои ресурсы между этими интерсубъективными системами. Так специалист группы детального планирования, занимаясь перепланированием в рамках суточного плана полета, может, и в соответствии со своими должностными обязанностями должен, быть одновременно участником перепланирования работ экипажа, планирования дополнительных наземных средств управления и пересмотром порядка операций с некоторой бортовой системой. В этом случае, естественно, необходимо учитывать при разрешении проблемной ситуации не только ресурсы, теоретически имеющиеся у каждого из акторов, но и тот уровень ресурсов, который он способен для разрешения конкретной ситуации выделить.

В рамках созданной для разрешения проблемной ситуации интерсубъективной системы акторами строится онтологическая модель ситуации. Эта оно онтологическая модель ситуации представляет собой структурированный объем знаний, определяющий общее понимание акторов данной конкретной ситуации. Этот объем знаний формируется на основе предпонимания ситуации каждым из акторов путем синтеза единой согласованной всеми акторами платформы интерсубъективных знаний, которая будет являться онтологической основой разрешения этой ситуации.

Формируя онтологическую модель ситуации, акторы одновременно, в процессе коммуникации, еще и постигают смысл сложившейся проблемной ситуации, поэтому онтологическую модель ситуации не является некоторой выборкой из знаний, образованных суммой предпониманий акторов, но является динамической системой знаний отражающих определенное понимание конкретных акторов конкретной ситуации в конкретный момент времени.

Синтезировав на некотором этапе онтологическую модель ситуации, согласованную всеми участниками, акторы уже в рамках этой модели знаний, учитывая имеющиеся в их распоряжении ресурсы и ограничения, стараются выработать взаимопонимание относительно пути разрешения проблемной ситуации. Т.е. взаимно согласованное понимание акторами сложившейся ситуации вовсе не гарантирует автоматически определение способа урегулирования проблемной ситуации, который бы устраивал всех акторов.

Для поиска этого пути акторы продолжают процесс взаимодействия, трансформируя при этом онтологическую модель ситуации. В процессе этого взаимодействия и именно путем взаимодействия каждый из акторов стремится разрешить конфликт между своими целями и интересами других акторов, а также групповыми ценностными ориентирами. Важно иметь в виду, что предпочтения акторов зависят от контекста и характера взаимодействий между ними, а шкалы предпочтений строятся в процессе самих переговоров, не являясь жёстко заданными априори.

Результатом взаимодействия акторов является достижения взаимопонимания и общего согласия относительно решений, которые могут разрешить данную проблемную ситуацию. Такое общее согласие подразумевает достижение акторами консенсуса, полученного путём переговоров, благодаря сближению позиций акторов. В данном случае консенсус вовсе не означает единогласие, т.е. он не устанавливает, что «все – за», он означает лишь, что «никто не против» [4].

Здесь необходимо отметить, что при достижении консенсуса в рамках оперативного управления полетом предполагается согласие именно всех акторов, участвующих в разрешении данной проблемной ситуации, т.е. мажоритарный принцип принятия решения большинством голосов в данном контексте не подходит. Это обуславливается неоднородностью акторов, участвующих в процессе оперативного управления полетом ОКТ, и соответственно, различием задач и ответственности, лежащих на каждом из акторов. Так, например, в ситуации, при которой необходимо решить комплекс проблем в разных бортовых системах ОКТ, принятие решения оставляющие проблемы в одной из бортовых систем, устраняя их в других, пред-

ставляется абсурдным, поскольку все бортовые системы связаны и оставшиеся проблемы не только будут влиять на другие системы, но и могут привести к катастрофическим последствиям для всего ОКТ в целом.

Основным стимулом для достижения акторами консенсуса является ограниченный резерв времени, характерный для оперативного управления полетом ОКТ. Каждая проблемная ситуация в процессе оперативного управления полетом ОКТ имеет строго ограниченный резерв времени. Всеми акторами осознается, что в этот резерв времени должно входить не только время, выделенное на приятие решения, но и время на реализацию этого решения и, крайне желательно, интервал времени на корректировку решения, если оно не полностью достигло своей цели. Этим обуславливается понимание акторами необходимости поиска компромисса, путем взаимных уступок и варьированием шкал предпочтений, поскольку резерв времени постоянно уменьшается.

После принятия согласованного всеми актора решения, это решение переводится в управляющие воздействия, которые изменяют состояние ОКТ в требуемом направлении. Контроль и оперативный анализ состояния ОКТ позволяет сделать выводы о том, достигнуты ли цели определенные выработанным решением, или нет. И если цели не достигнуты, каковы размеры изменения проблемной ситуации на борту ОКТ. Вполне возможно, что если поставленные цели не достигнуты, а ситуация коренным образом изменилась, то может потребоваться для разрешения новой ситуации формирование новой интерсубъективной системы.

Необходимо отметить, что представленная интерсубъеативная модель полностью соответствует обобщенной технологии ликвидации нештатных ситуаций при оперативном управлении полетом ОКТ, разработанной в трудах В.А. Соловьева и В.Е. Любинского [1].

Заключение

Человек, специалист оперативного управления полетом ОКТ, является основным объектом, от которого зависит качество решений. Выработка и принятие решения является сложным творческим процессом, использующим цепи логических рассуждений, обращение к аналогиям и ассоциациям. Процесс выработки и принятие решения немыслим без построения прогноза, анализа и учета опыта управления полетом. В процессе выработки и принятие решения специалистам приходится прибегать к анализу и синтезу, выполнять и использовать различного рода расчеты.

Принятие решений при управлении полетом современными и перспективными ОКТ все более характеризуется ограниченным лимитом времени, высоким динамизмом процессов управления полетом, повышенным уровнем неопределенности ситуации управления, большим объемом данных, которые необходимо переработать. Все объективно усложняет процесс принятия решений.

Однако одним из наиболее важных аспектов, влияющих на выработку и принятия решений, является его интерсубъективность. Решение, вырабатываемое в ходе оперативного управления полетом ОКТ, даже если принимается единолично ответственным и уполномоченным на это лицом, все равно является продуктом совместной работы некоторого коллектива специалистов.

Список литературы

[1] [1] Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полётами. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009.

[2] [2] Философский словарь/под ред. Фролова И.Т. - М.: Республика, 2001.

[3] [3] Лотман Ю.М. Семиосфера. – СпБ.: Искусство, 2010.

[4] [4] Виттих В.А. Введение в теорию интерсубъективного управления.- Самара: Самарский научный центр РАН, 2013.

[5] [5] Виттих В.А. Управление ситуациями в сложных развивающихся системах с применением интерсубъективных теорий. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. №12.
[6] [6] Виттих В.А. Организация сложных систем. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2010.
[7] [7] Виттих В.А. Интерсубъективные системы как объекты постнеклассической науки // Мехатроника, автоматизация, управление. - № 1,2012.
[8] [8] Ожегов С.И. Словарь русского языка. – М.: Мир, 2008.
[9] [9] Виттих В.А. Процессы управления в социотехнических системах. - Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды VII международной конференции. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2005.
[10] [10] Виттих В.А. Персонализация знаний. - Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды IX международной конференции. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2007.
[11] [11] Виттих В.А. Аксиологические и верифицируемые научные знания. - Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XI международной конференции. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2009.

УПРАВЛЕНИЕ РАЗРАБОТКОЙ ПОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРСУБЪЕКТИВНОЙ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

М.В. Игнатьев

Национальный исследовательский университет Высшая Школа Экономики в Нижнем Новгороде
603155, г. Нижний Новгород, ул. Б.Печерская, 25/12
mikhail.ignatyev@gmail.com

Ключевые слова: *управление разработкой программного обеспечения, онтологический подход, поддержка коммуникативных действий, интерсубъективная теория*

Abstract

This paper describes analysis the process of software development in intersubjective theory terms. Made a conceptual adaptation intersubjective theory terms to the process, which has shown that the using of theory and CASS does not conflict with the existing flexible methodologies of software engineering. It also can bring management in software development to the next level, thus raising the quality of the software and customer satisfaction.

Введение

Разработка программного обеспечения (ПО) - это род деятельности, направленный на создание сложного продукта с использованием различных методологий, связанных с представлением знаний об определенных областях деятельности человека. Устоявшееся определение процесса создания программного продукта сформировалось достаточно давно, когда разработка ПО считалась дополнительной прикладной задачей в рамках достижения некоторой основной производственной цели предприятия или научного учреждения. Процесс разработки ПО в современной литературе по инженерии программного обеспечения описывается как совокупность четырех фундаментальных процессов: спецификации требований, собственно создания программного продукта, его аттестации и совершенствования [1]. Развитие вычислительной техники стало причиной расширения класса задач, решаемых программным обеспечением. В настоящее время разработка ПО – уже не только род деятельности обособленных энтузиастов, объединений, коллективов, но и сфера бизнеса крупных корпораций (Microsoft, Oracle, SAP, 1С и другие). Показатели деятельности таких корпораций становятся определяющими не только для национальной, но и для международной экономики.

В ходе разработки ПО возникает множество проблем: увеличение стоимости продукта, рост реализационной сложности, возникновение непредвиденных ситуаций, которые вызваны трансформацией требований заказчика, недостаточная прозрачность процесса разработки, неконтролируемые изменения продукта и др. «Человеческий фактор», его учет играет здесь важнейшую роль. Например, согласно стратегическим установкам популярного семейства методологий разработки программного обеспечения Agile [2] минимизировать или вовсе исключить появление перечисленных проблем позволит реализация четырех основных идей:

- личности и их взаимодействия важнее, чем процессы и инструменты;
- работающее программное обеспечение важнее, чем полная документация;
- сотрудничество с заказчиком важнее, чем контрактные обязательства;
- реакция на изменения важнее, чем следование плану.

В предлагаемой статье разработка ПО будет рассматриваться как производственная задача, решение которой описывается с использованием базовых понятий и принципов интерсубъективной теории управления [3].

1 Онтологии и разработка программного обеспечения

Будем рассматривать такие процессы разработки ПО, в которые вовлекаются несколько групп людей. Процесс разработки ПО имеет инициализатора, т.е. лицо, которому необходимо то или иное ПО. Те случаи, в которых инициализатор процесса и лицо, выполняющее разработку, есть один и тот же человек не исключают возникновения разнообразных проблем, но они имеют скорее техническую природу: их преодоление не связано с необходимостью коллективной или коллегиальной выработкой стратегии решения, - и поэтому здесь они не будут рассматриваться.

Инициализатором процесса разработки ПО выступает заказчик. Ему необходимо ПО, отвечающее возникшим у него потребностям, которые идентифицируются как новые функциональные возможности, определенный уровень отказоустойчивости, ограничение стоимости ПО и др. Необходимость разработки ПО, таким образом, является определенной *проблемной ситуацией*. Требования заказчика могут быть выражены в некоторой *онтологической модели ситуации*, отражающей представление о свойствах, сущностях (понятиях) и отношениях в проектируемом продукте [4].

Для создания ПО необходим трудовой коллектив, который, как правило, включает в себя *аналитика*, *архитектора*, *разработчика* и *тестировщика* или групп людей, решающих такие ролевые задачи.

Роль аналитика заключается в трансформации требований заказчика в техническое задание на разработку ПО. Процесс трансформации требований включает в себя достаточно много коммуникативных актов, направленных на достижение понимания аспектов рассматриваемой проблемной ситуации и надлежащей трансформации онтологической модели заказчика.

Таким образом, понимание проблемной ситуации, выраженной в первоначальной онтологии, описывается понятийным аппаратом иной онтологии, сформированной уже двумя участниками процесса разработки. Эта онтология содержит информацию о проблемной ситуации с точки зрения не только заказчика ПО, но и аналитика, что позволяет передавать эту онтологию архитектору. Роль архитектора, обладающего персональной онтологией о методах и средствах разработки ПО, заключается в адаптации и трансформации полученной онтологии для дальнейшего использования разработчиком и тестировщиком, которые также располагают персональными онтологиями.

Такой обмен онтологиями между участниками процесса приводит к объединению персональных онтологических моделей в *групповую онтологическую модель*, которая:

- отражает всю необходимую информацию о проблемной ситуации;
- служит фундаментом для создания ПО, в частности, фиксирует требования к нему;
- является адекватным аргументом для урегулирования спорных вопросов.

Для создания и редактирования онтологических моделей, лица занятые в процессе разработки ПО, могут использовать различные программные продукты. Наиболее популярным редактором онтологий принято считать Protégé [5]. Вместе с тем, количество удачных разработок в это области стремительно увеличивается.

В настоящее время компания Cognitum [6], разрабатывает семантический фреймворк Ontorion. Важнейшей частью этого фреймворка является редактор онтологий Fluent Editor. Главное достоинство этого редактора состоит в том, что он позволяет создавать OWL-онтологии людям, не имеющим представления о синтаксисе этого языка. Онтологии создаются на естественном языке - Controlled English, - фактически на обычном английском языке, к которому применены определенные правила и ограничения. Таким образом, Fluent Editor представляет собой общедоступный инструмент создания онтологий, намного более подходящий для людей, не являющихся профессионалами в онтологическом анализе. На практике сведениями, которые должны быть отражены в онтологии, обладают именно профессионалы в области управления и производства в прикладной предметной области.

2 Процесс разработки программного обеспечения в терминах интерсубъективной теории

Очертим ключевые понятия интерсубъективной теории в приложении к управлению процессом разработки ПО.

2.1 Актор

Методы управления разработкой программного обеспечения более развиты, чем традиционные методы и приемы менеджмента. Передовые компании осознают роль человека, который выполняет ту или иную функцию в процессе разработки. И дело тут даже не в профессиональной квалификации сотрудника, а в том, что его личностные качества позволяют не только осознать проблемную ситуацию, но и оперативно предложить способ её урегулирования.

Заказчик, как лицо, инициировавшее проблемную ситуацию, и сотрудник, вовлеченный в процесс разработки ПО рассматриваются как *акторы.* Такие акторы неоднородны, имеют свои взгляды на ситуацию, по-разному воспринимает её. Вместе с тем, каждый актор осознает необходимость урегулирования ситуации, путем достижения взаимопонимания. Взаимопонимание же достигается путем переговоров, аргументированных диалогов.

2.2 Ситуация

На первый взгляд проблемная ситуация, отражающая потребность в создания ПО, не зависит от персональных особенностей акторов. Однако такое предположение опровергается неоднородностью акторов. Каждый актор, понимает ситуацию по-своему, с использованием своей персональной онтологии. Вместе с тем ситуация может осознаваться акторами как предмет их общей заботы, связанной с необходимостью совместного принятия решения по её урегулированию. Тогда необходима разработка онтологической модели ситуации, представляющей собой согласованное описание ситуации в форме понятий и отношений.

Ситуация (необходимость создания ПО), обычно описывается регламентированным пакетом документов, в который включаются описание требований, техническое задание, планы сертификации ПО и др. При использовании интерсубъективной теории управления предлагается дополнять этот набор документов согласованной онтологической моделью. Использование такой модели позволит оперативно реагировать на возникающие проблемы при трансформации ситуации, разрешать спорные моменты, поддерживать вовлечение в процесс разработки других акторов, позволяя им быстрее осознать уже достигнутые договоренности и соглашения относительно методов и средств урегулирования ситуации.

2.3 Коммуникация

Как только неоднородные акторы (поначалу индивидуально) начинают осознавать проблемную ситуацию, они коммуницируют для согласования понимания ситуации, достижения взаимопонимания, а затем и в совместном поиске устраивающего всех решения по урегулированию ситуации. Коммуникация здесь, таким образом, не отождествляется с более узкими понятиями связи и передачи сообщений, а является, прежде всего, средством обеспечения *взаимопонимания акторов.*

Заметим, что в классическом менеджменте, построенном на принципах бюрократии, такой задачи обычно не ставится. Менеджер коммуницирует со своими подчинёнными в основном с целью получения от них информации, требуемой ему для принятия решения, но у него нет необходимости достигать с ними взаимопонимания. Аналогичную картину можно наблюдать и при коллегиальном управлении, когда каждый из членов коллегии, несущий ответственность за определённую, «свою» сферу деятельности, обычно не стремится глубоко вникать в существо проблем, волнующих его коллег. Если кто-то из них подготовил проект решения, то согласуется он чаще всего формально – лишь при условии отсутствия противоречий с интересами других коллег.

3 Поддержка коммуникативных действий

Фундаментальным понятием интерсубъективной теории является важнейшее свойство интерсубъективных систем – самоорганизация, осуществляемая на основе коммуникации и взаимном информационном обмене между акторами. Именно содержательность информации, её интенциональность, или направленность, составляют важнейшие предпосылки взаимного обмена мыслями, благодаря которому достигается взаимопонимание и взаимодействие между акторами в процессе коммуникации.

Процессы формирования, согласования онтологической модели ситуации сопряжены с большим количеством коммуникативных действий. Акторы должны иметь возможность сообща формировать онтологическую модель ситуации, а, значит, возникает необходимость создания адекватных инструментов поддержки коммуникативных действий. Такие инструменты можно объединить в *систему поддержки коммуникативных действий* (СПКД) [7]. Развитие ad hoc-интерсубъективных теорий связано с созданием таких систем.

Среди инструментальных составляющих СПКД следует выделить следующие основные:

- *портал акторов* – интранет-сайт, на котором актор может просматривать профили других акторов, персональные онтологии и онтологии интерсубъективной системы;
- *инструмент создания и редактирования онтологий* – возможно использование различных языков и систем, например, Fluent Editor, Protégé. Определяющим критерием для выбора здесь является квалификация акторов;
- *инструмент визуализации онтологий* – также большой диапазон существующих решений. Значительными достоинствами обладает, например, WiGis - веб-ориентированный фреймворк для визуализации больших RDF-графов.

СПКД, содержащая перечисленные компоненты, будет служить не только адекватным инструментом информационного обеспечения акторов уже вовлеченных в процесс, способствовать урегулированию проблемной ситуации по разработке ПО, но и являться своеобразной корпоративной базой знаний, которая будет служить дополнительным источником информации для работы других акторов.

Заключение

В работе рассмотрен процесс разработки ПО с точки зрения интерсубъективной теории управления. Произведена понятийная адаптация терминов интерсубъективной теории к процессу создания программного продукта, которая показала, что использование интерсубъективной теории и СПКД не только не конфликтует со сложившимися методологическими основами гибкой разработки ПО, но и способно вывести управление разработкой ПО на другой уровень, тем самым подняв качество ПО и уровень удовлетворенности заказчиков разработок.

Список литературы

[1] *Sommerville, I.* Software Engineering / I. Sommerville // 9th Edition. - Addison-Wesley, 2010.

[2] http://www.agilemanifesto.org

[3] *Виттих, В.А.* Введение в теорию интерсубъективного управления / В.А. Виттих // Самара: СамНЦ РАН, 2013. – 64 с.

[4] *Смирнов, С.В.* Онтологическое моделирование в ситуационном управлении / С.В. Смирнов // Онтология проектирования. - 2012. - №2(4). - С.16-24.

[5] http://protege.stanford.edu/

[6] http://www.cognitum.eu

[7] *Виттих, В.А.* Разработка систем поддержки коммуникативных действий / В.А. Виттих, М.В. Игнатьев, С.В. Смирнов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIV международной конф. (19-22 июня 2012 г., Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН, 2012. - С. 125-130.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ V^{TF}-ЛОГИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМАЛЬНЫХ КОНТЕКСТОВ И ПОСТРОЕНИЯ ОНТОЛОГИЙ ПРЕДМЕТНЫХ ОБЛАСТЕЙ

В.П. Офицеров[1], С.В. Смирнов[2,3]

[1]Московский городской педагогический университет
115191, Москва, 2-й Тульский переулок, 4, Россия
kafpin@mail.ru
тел: +7 (495) 633-99-81

[2]Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Самара, ул. Л. Толстого, 23, Россия
info@psati.ru
тел: +7 (846) 333-58-56

[3]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: *онтология, анализ формальных понятий, формальный контекст, многозначная логика, нестрогие множества, α-сечение*

Abstract

The paper investigates the problem of the automatic creation of ontological specifications for conceptually structuring domains of interest on the basis of ontological data analysis. In particular, sources, description and processing of nonstrict formal contexts in the construction of ontologies by the Formal Concept Analysis are being analyzed. It is shown that some reasons of this uncertainty are immanent to the technology of formal context generation from experimental data. For work with the uncertain and inconsistent data multiple-valued logic V^{TF} is used.

Введение

Формальные онтологии сегодня являются подлинным аттрактором интересов специалистов по прикладной информатике и интеллектуальным информационным технологиям. Проектирование онтологии некоторой предметной области (ПрО) – сложная когнитивная задача, которая, как правило, осуществляется «вручную» высококвалифицированными аналитиками, опирающимися на доступное им «поле знаний» в виде разнообразных «протоколов извлечения знаний», документации, текстов, связанных с ПрО [1]. Существенную поддержку аналитику способны оказать *средства онтологического инжиниринга* – языки и системы онтологического моделирования [1-3]. Вместе с тем построение онтологий может быть автоматизировано в гораздо большей степени при применении относительно новой ветви теории решеток – *анализа формальных понятий* (АФП) [4].

Построение онтологии с помощью АФП имеет характер *автоматического вывода* понятийной структуры ПрО из частично структурированного в семантическом смысле источника, именуемого в АФП *формальным контекстом* (ФК) [4]. Основу ФК ПрО составляет матрица инцидентности, которая описывает *соответствие «объекты-свойства»* и может быть получена в результате обработки общепризнанного протокола для представления эмпирических данных о ПрО - *таблицы «объекты-свойства»* (ТОС) [5, 6].

Изначально АФП признавался пригодным лишь для формирования «скелета» формальной онтологии – *решетки формальных понятий* (т.е. множества понятий ПрО с выявленным

на этом множестве отношением *обобщения*, или таксономии) - см., например, [7, 8]. Позднее были найдены эффективные способы использования АФП и для построения полноценных онтологических моделей – понятийных структур, включающих описания *произвольных отношений* между объектами ПрО – см., например, [6, 9]. Однако в последнем случае при формировании первичного ФК из ТОС не исключается возникновение своеобразной «методически обусловленной» *нехватки информации* о ПрО, что выдвинуло проблему построения *более адекватной* основы ФК, чем обычная матрица инцидентности «объекты-свойства» [10].

В [11] проведен морфологический анализ составляющих ТОС, позволивший установить различные потенциальные источники подобной неполноты данных о ПрО, и предложен метод построения онтологий исходя из *нечеткого* ФК.

Задача данной статьи – указать генезис и использование еще *более «тонкой» модели* ФК, когда истинность *базового семантического суждения* (БСС) онтологического анализа ПрО - b_{ij} = «объекту g_i присуще свойство m_j» - оценивается *вектором* ⟨*Истина, Ложь*⟩ (многозначная логика класса V^{TF} [12]):

(1) $\bar{b}_{ij} = \langle b^+_{ij}, b^-_{ij} \rangle$; $b^+_{ij}, b^-_{ij} \in [0, 1]$.

Здесь компонент (аспект истинности) b^+_{ij} *Истина* формируется свидетельствами, подтверждающими БСС, а компонент (аспект) b^-_{ij} *Ложь* - отрицающими БСС.

Соответствие «объекты-свойства», описываемое матрицей с элементами-векторами $\bar{b}_{ij}$, следуя риторике Л.В. Аршинского [12] будем называть *нестрогим*. Бóльшая адекватность *нестрого соответствия* как основы ФК объясняется тем, что **Истина** и **Ложь** БСС b_{ij} на практике зачастую определяется *независимым комплексом свидетельств* так, что **Ложь** не выводима из отсутствия (дефицита) **Истины**, а **Истина** – из отсутствия (недостачи) **Лжи**.

1 Обобщенная таблица «объекты-свойства» как первичный источник данных о предметной области

В *стандартной* ТОС строки соответствуют *объектам*, которые составляют *эмпирическую выборку объектов* G^* исследуемой ПрО: $G^* \subseteq G$, $|G^*| = r > 0$, G – множество всех объектов ПрО. А состав столбцов ТОС отражает априорную оснащенность аналитика *измерительными процедурами*:

(2) $\{mp_j: G \to Sst_j\}_{j = 1,\ldots, s}$,

где Sst_j - априори известные непустые множества *«стандартных»* символов, составляющее *диапазон измерений* свойства $m_j \subseteq M$, $|M| = s > 0$.

В результате морфологического анализа этой модели в [11] при формировании ФК было предложено рассматривать более сложную структуру первичных данных - *обобщенную* ТОС, которая глубже отвечает реалиям накопления эмпирической информации о ПрО и учитывает:

- информацию о многократных измерениях[1] одного и того же свойства объекта ПрО, попавшего в поле зрения аналитика (т.е. сведения о *многократной проверке* БСС);
- дифференциацию доверия аналитика к различным измерительным процедурам (*разницу в доверии* к различным источникам сведений об истинности БСС);
- использование нескольких различных процедур измерения одного и того же свойства (*содержательную эквивалентность* части источников сведений об истинности БСС).

Согласно этим положениям обобщенная ТОС представляет собой *гиперматрицу «объекты-свойства»* $A = (\bar{a}_{ij})_{i=1,\ldots,r;\, j=1,\ldots,s}$, где $\bar{a}_{ij} = (a_{ij_k})_{k=1,\ldots,k_{ij}}$ - *вектор значений*, протоколирующий k_{ij} повторных измерений j-го свойства у i-го объекта. Дополнительно столбцы гиперматрицы, во-первых, помечены некоторой *оценкой доверия* к соответствующей измерительной

[1] Здесь и далее считаем отдельные измерения *независимыми*.

процедуре, а, во-вторых, разделены на *подмножества*, каждое из которых представляет собой группу измерительных процедур, направленных на *измерение одного и того же свойства* у объектов ПрО.

Опишем методику обработки обобщенной ТОС в рамках парадигмы V^{TF}-логики.

2 Построение нестрого формального контекста на основе обобщенной таблицы «объекты-свойства»

Для начала отметим, что измерительные процедуры определяются формулой (2) лишь частично.

Во-первых, любая такая процедура может дать специальный результат **None**, который может свидетельствовать, например, о том, что анализируемый объект и измерительная процедура семантически не сочетаются, либо о том, что измеряемая величина лежит за порогами чувствительности, вне динамического диапазона измерительного прибора [6].

Во-вторых, на практике приходится сталкиваться еще с одной разновидностью неопределенности результата работы измерительных процедур - **Failure**, свидетельствующего о фактическом *невыполнении* задачи измерений (отказе, сбое средства измерений, воздержании при голосовании и т.п.).

Таким образом, реалистичным является следующее определение арсенала измерительных процедур:

(3) $\{mp_j: G \to Sst_j \cup \mathbf{None} \cup \mathbf{Failure}\}_{j = 1,\dots, s}$,

причем **None**, **Failure** $\notin \cup_{j = 1,\dots, s} Sst_j$.

Задачей первичной обработки ТОС в онтологическом анализе ПрО является истолкование результатов выполнения процедур (3) для объектов из множества G^* применительно к проблеме оценки истинности всех эмпирически индуцируемых БСС, т.е. формирование матрицы $B = (\|b_{ij}\|)_{i=1,\dots,r;\, j=1,\dots,s}$, где $\|b_{ij}\|$ оценка истинности БСС b_{ij}. В исследуемом нами случае $\|b_{ij}\|$ есть вектор (1).

2.1 Интерпретация сведений об одно- и многократных измерениях свойства объекта

Согласно ранее проведенным исследованиям [6, 10, 11] признается, что результат **None** выполнения процедуры mp_j для $g_i \in G^*$ сопоставляется для БСС b_{ij} = «объекту g_i присуще свойство m_j» с истинностным значением **Ложь**, а результат из множества Sst_j – со значением **Истина**. В V^{TF}-логике этому отвечают вектора *«ложь»* **Л** = ⟨0, 1⟩ и *«истина»* **И** = ⟨1, 0⟩ соответственно.

Сложнее обстоит дело с интерпретацией результата **Failure**.

Если исходные данные свидетельствуют о том, что для объекта g_i измерение свойства m_j выполнено всего один раз (*однократно*), и его результатом было значение **Failure**, то разумно оценить такую ситуацию *крайней неопределенностью* истинности соответствующего БСС. В V^{TF}-логике для описания подобных предельных значений истинности суждений используется вектор *«неопределенность»* **Н** = ⟨0, 0⟩.

По смыслу ничего не меняется и при наличии сведений о *многократных* измерениях свойства m_j у объекта g_i, если *все* они дали результат **Failure**, т.е. и в этом случае в качестве оценки истинности БСС b_{ij} резонно использовать вектор **Н**.

Семантически ситуация кардинально меняется, если результат хотя бы одного из многократных измерений свойства m_j у объекта g_i отличен от **Failure**. Такой результат свидетельствует, что «успешное», определяющее строгое значение истинности БСС измерение *возможно*, БСС *в действительности истинно* или *ложно* (и здесь неважно какой силой обладают имеющиеся свидетельства в пользу того или другого), и лишь *внутренние причины* в работе проверочной процедуры не позволили получить соответствующую информацию в актах измерений, завершившихся результатом **Failure**. Поэтому об истинности БСС в случае такого отдельно

взятого **Failure**-результата можно сказать, что она *«равноудалена»* от *«истины»* **И** = ⟨1, 0⟩ и *«лжи»* **Л** = ⟨0, 1⟩. С другой стороны, она в нашем понимании отличается и от *«неопределенности»* **Н** = ⟨0, 0⟩, но одновременно *нет оснований* считать ее ближе к *«противоречию»* **П** = ⟨1, 1⟩, чем к *«неопределенности»*. В итоге в проанализированной ситуации результату **Failure** правомерно сопоставить векторное значение истинности БСС равное ⟨0.5, 0.5⟩[2].

Итак, при однократном измерении свойства m_j у объекта g_i, когда элемент гиперматрицы A суть скаляр $\bar{a}_{ij} = (a_{ij_k})_{k=1} = (a_{ij})$, имеем

$$(4)\quad \bar{b}_{ij} = \begin{Bmatrix} \langle 1, 0\rangle, & \text{если } a_{ij} \in Sst_j; \\ \langle 0, 1\rangle, & \text{если } a_{ij} = \textbf{None}; \\ \langle 0, 0\rangle, & \text{если } a_{ij} = \textbf{Failure}. \end{Bmatrix}$$

Случай многократных измерений требует *совмещения* (объединения, накопления) $k_{ij} > 1$ свидетельств для БСС b_{ij} с разными значениями истинности $\bar{b}_{ij_k} = \left\langle b^+_{ij_k}, b^-_{ij_k} \right\rangle$: ⟨0, 1⟩, ⟨0.5, 0.5⟩, ⟨1, 0⟩, - для $a_{ij_k}, k = 1,...,k_{ij}$, равных соответственно **None**, **Failure** и любому значению из множества Sst_j.

Различные варианты *правила совмещения свидетельств* для векторных логик предложены в [12]. Для правдоподобной оценки истинности БСС b_{ij} среди известных вариантов этого правила естественно принять *схему усиления свидетельств* при их совмещении и конкретно их *усреднение* (это частный случай так называемого «11-композиционного совмещения» на основе композиционного сложения согласно триангулированной s-нормы $x \oplus y = \textbf{min}(1, x + y)$ [12]). Тогда истинность БСС b_{ij} при обработке многократных измерений свойства m_j у объекта g_i определит вектор

$$(5)\quad \bar{b}_{ij} = \left\langle \frac{1}{k_{ij}} \sum_{k=1}^{k_{ij}} b^+_{ij_k}, \quad \frac{1}{k_{ij}} \sum_{k=1}^{k_{ij}} b^-_{ij_k} \right\rangle.$$

2.2 Простейшая модель учета меры доверия к источнику информации

Рассматривая приложение V^{TF}-логики, естественно в качестве модели *меры доверия* к измерительной процедуре – отдельно взятому независимому источнику информации о ПрО - использовать вектор истинности $\bar{t}_j = \langle t^+_j, t^-_j \rangle$ суждения t_j = «j-я измерительная процедура принадлежит множеству достоверных источников». Тогда в качестве итоговой оценки истинности БСС b_{ij} *разумно* признать вектор, получаемый как результат моделирования в V^{TF}-логике *естественно-языковой связки* «И» векторов $\bar{t}_j$ и $\bar{b}_{ij}$.

Однако формализация в векторной логике типичных в логических приложениях естественно-языковых конструкций со связками «И», «ИЛИ», «НЕ» требует довольно скрупулезного сопоставления информационной подкрепленности связываемых суждений [12]. Оставляя заинтересованному читателю возможность самостоятельно освоить эту методику, рассмотрим более простую модель доверия к источнику информации.

Свяжем с каждой измерительной процедурой скалярную меру доверия к ее работе $T_j \in [0, 1]$ и воспользуемся простейшей гипотезой о линейном изменении аспектов истинности

[2] Заметна известная корреляция наших рассуждений о двух вариантах интерпретации результата измерения **Failure** с трактовкой смысла дополнительных значений истинности (кроме **Истины** и **Лжи**) в работах Г.Н. Зверева, посвященным многозначным логикам в теории управления. Так значение **Квин** – «квадратный информационный ноль», свидетельство «внешней неопределенности» переменной - отражает «фатальные ошибки информационно-логического процесса»; значение **Крин** – «круглый информационный ноль», свидетельство «внутренней неопределенности» - обозначает ситуацию, когда априори известно, что суждение либо истинно, либо ложно, но выбор неоднозначен [13].

БСС в зависимости от меры доверия к измерительной процедуре. Тогда получаем элементарную формулу для пересчета вектора истинности БСС b_{ij}:

(6) $\quad \bar{b}_{ij} = T_j \cdot \bar{b}_{ij}.$

2.3 Обработка информации из содержательно эквивалентных источников

На практике весьма распространен прием использования одновременно *нескольких* источников информации для оценки *одного и того же фактора*. Применительно к обобщенной ТОС можно предложить следующую модель этой ситуации[3].

Пусть $J_1,\ldots,J_l$ – множества индексов *конгруэнтных* столбцов ТОС, $J_n \cap J_m = \varnothing$ при $m \neq n$, $m, n = 1,\ldots, l$; $|J_m| \geq 2$. Каждое множество J_m указывает группу *независимых* друг от друга измерительных процедур, которые направлены на измерение одного и того же (J_m)-го свойства у объектов ПрО.

Если при обработке ТОС вычислены вектора истинности $\bar{b}_{ij}$, $i = 1,\ldots, r$, $j \in J_m$, то следует произвести *«свертку»* информации из конгруэнтных столбцов ТОС по уже упоминавшемуся правилу совмещения свидетельств – *схеме усиления-усреднения* – см. подраздел 2.1. Имеем

$$(7) \quad \bar{b}_{i(J_m)} = \left\langle \frac{1}{|J_m|}\sum\nolimits_{j\in J_m} b_{ij}^{+}, \quad \frac{1}{|J_m|}\sum\nolimits_{j\in J_m} b_{ij}^{-} \right\rangle.$$

2.4 Определение нестрого формального контекста

В результате последовательного разворачивания вычислений с помощью формул (4)-(7) формируется матрица B *векторных* оценок истинности всех эмпирически индуцируемых БСС, размерность которой в общем случае составит $r \times s_0$, где $s_0 = |M_0| = \left(s + l - \sum_{m=1}^{l}|J_m|\right)$ - число *различных* измеряемых свойств объектов ПрО (см. предыдущий подраздел). Матрица B устанавливает *нестрогое соответствие* между эмпирической выборкой объектов ПрО G^* и множеством M_0: $B \subseteq G^* \times M_0$.

Кортеж

(8) $\quad (G^*, M_0, B)$

определяет нестрогий ФК исследуемой ПрО.

3 Построение онтологии предметной области по её нестрогому формальному контексту

Нетрудно видеть, что вектор истинности $\bar{b}_{ij}$ БСС «объекту g_i присуще свойство m_j» можно рассматривать как векторный показатель *принадлежности* свойства m_j априори неизвестному множеству M_i свойств объекта g_i. Это означает, что M_i – *нестрогое подмножество* [12] универсального множества U, корректным определением которого в нашем случае будет

$$U = M_0 \cup \{m_U\},$$

где m_U – искусственно вводимое в онтологическом анализе свойство *«объект неопознан имеющимися измерительными процедурами»*, $M_0 \cap \{m_U\} = \varnothing$ [6].

В узком смысле целью обработки ФК ПрО методом АФП является построение *множества формальных понятий* и идентификация на этом множестве *отношения порядка*. Эта задача в настоящее время содержательно интерпретирована и решена как для *полностью определенных* так и *нечетких* соответствий «объекты-свойства» (см., например, [4, 6-8] и [15, 16] соответственно). Однако, повторяя высказанную в [10] точку зрения, считаем, что лишь в первом

[3] В этом случае множество M измеряемых свойств объектов ПрО суть *мультимножество* (комплект, обобщенное множество) [14], а его основа M_0 – множество *различных* измеряемых свойств объектов ПрО.

случае возможно получение конструктивной онтологической спецификации ПрО с богатыми прикладными возможностями. Поэтому в [10, 11] исследовались условия α-аппроксимации (α-*сечения*) нечеткого соответствия «объекты-свойства» и возникающие при этом эффекты при построении онтологий.

Для нестрогих множеств также развита теория разложений на обычные *множества уровня*, только в несколько усложненном виде [12].

Так в случае использования V^{TF}-логик для нестрого множества A множеством уровня α (или α-сечением, обозначаемого как $A^{(\alpha)}$) является множество в обычном смысле такое, что

$$\forall\, u \in A^{(\alpha)} \to u^{+} \geq \alpha^{+},\, u^{-} \leq \alpha^{-},$$

где $(u^{+},\, u^{-}) = \|u\|$ - вектор истинности суждения о принадлежности элемента u универсума множеству A, а $\alpha = (\alpha^{+},\, \alpha^{-})$ - векторный *порог доверия к свидетельствам:* α^{+} - о принадлежности элемента u множеству A; α^{-} - о противоположном суждении. Разумеется, u^{+}, u^{-}, α^{+}, $\alpha^{-} \in [0, 1]$.

Таким образом, устанавливая порог $\alpha = (\alpha^{+},\, \alpha^{-})$, из нестрого ФК (8) путем замены матрицы векторов B матрицей инцидентности $B^{(\alpha)}$:

$$B^{(\alpha)} = (b^{(\alpha)}{}_{ij})_{i=1,\ldots,r;\, j=1,\ldots,s_0}, \quad b^{(\alpha)}{}_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } b_{ij}^{+} \geq \alpha^{+}, b_{ij}^{-} \leq \alpha^{-}; \\ 0 & \text{в противоположном случае,} \end{cases}$$

получаем обычный ФК, который может быть обработан стандартными алгоритмами онтологического анализа с применением АФП [6].

Следуя методике, изложенной в [11], можно показать, что из данного нестрого ФК при варьировании вектором порога α может быть получено *конечное* число различных онтологических спецификаций ПрО. Наблюдается при этом (в более сглаженной форме) и обнаруженный в [10, 11] эффект *обеднения* этих спецификаций как с ужесточением требований к истинности БСС ПрО, так и их значительном смягчении (разумеется, при более сложной трактовке такого «ужесточения» и «смягчения» в духе V^{TF}-логик).

Заключение

В статье предложена *методика работы с неопределенными и противоречивыми данными*, характерными для эмпирического исследования предметной области с задачей построения онтологической спецификации. Для моделирования истинности базовых семантических суждений, т.е. суждений о наличии у объектов тех или иных априори зафиксированных свойств, использована *векторная логика с двумя аспектами: Истина* и *Ложь*.

При обработке исходных данных о предметной области, представляемых обобщенной таблицей «объекты-свойства», предложена интерпретация *реально наблюдаемого поведения измерительных процедур* (независимость друг от друга актов измерения, ограниченность динамических диапазонов, возможность отказа от измерения), использована теория объединения свидетельств и другие *формализмы* V^{TF}*-логик*.

Получение промежуточного результата онтологического анализа предметной области в форме *нестрого* формального контекста *не влечет* пересмотр собственно метода построения онтологических спецификаций, опирающегося на принципы анализа формальных понятий, но дополнительно *требует* принятия решения о величине порога доверия к исходным данным, задаваемого в рамках парадигмы многозначных векторных логик.

Список литературы

[1] *Гаврилова, Т.А.* Интеллектуальные технологии в менеджменте: инструменты и системы / Т.А. Гаврилова, Д.И. Муромцев. – СПб.: Изд-во «Высшая школа менеджмента»; Изд. дом СПбГУ, 2008. – 488 с.

[2] *Смирнов, С.В.* Среда моделирования для построения инженерных теорий / С.В. Смирнов // Известия Самарского научного центра РАН. - 1999. - Т. 1. № 2. - С. 277-285.
[3] *Скобелев, П.О.* Онтологии деятельности для ситуационного управления предприятиями в реальном времени / П.О. Скобелев // Онтология проектирования. – 2012. - №1(3). - С. 6-38.
[4] *Ganter, B.* Formal Concept Analysis. Mathematical foundations / B. Ganter, R. Wille. - Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1999.- 290 p.
[5] *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.
[6] *Смирнов, С.В.* Онтологический анализ: определения и алгоритмы / С.В. Смирнов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды III международной конф. (4-9 сентября 2001 г., Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН, 2001. - С. 137-146.
[7] *Godin, R.* Ontology Design with Formal Concept Analysis / R. Godin, H. Mili, G.W. Mineau, R. Missaoui, A. Arfi, T.-T. Chau // Theory and Application of Object Systems (TAPOS). 1998. Vol. 4. N. 2, 117-134.
[8] *Obitko, M.* Ontology Design with Formal Concept Analysis / M. Obitko, V. Snasel, J. Smid // Proc. of the CLA 2004 International Workshop on Concept Lattices and their Applications (Ostrava, Czech Republic, September 23-24, 2004). V. Snasel, R. Belohlavek (Eds.), 111-119.
[9] *Ferre, S.* Arbitrary Relations in Formal Concept Analysis and Logical Information Systems / S. Ferre , O. Ridoux, B. Sigonneau // Conceptual Structures: Common Semantics for Sharing Knowledge. Proc.13th Int. Conf. on Conceptual Structures ICCS-2005 (Kassel, Germany, July 17-22, 2005). Eds.: F. Dau, M.-L. Mugnier, G. Stumme). – Springer, LNCS-3596, 2005, 166-180.
[10] *Смирнов, С.В.* Генезис и отражение нечеткости объектно-признаковых моделей в онтологическом анализе данных / С.В. Смирнов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды IX международной конф. (22-28 июня 2007 г., Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН, 2007. - С. 174-179.
[11] *Смирнов, С.В.* Нечеткие формальные контексты при построении онтологий на основе анализа формальных понятий: происхождение и использование / С.В. Смирнов // Знания – Онтологии – Теории: Труды Всероссийской конф. с международным участием (14-16 сентября 2007 г., Новосибирск, Россия). Т. 2. – Новосибирск: Институт математики СО РАН, 2007. - С. 17-25.
[12] *Аршинский, Л.В.* Векторные логики: основания, концепции, модели / Л.В. Аршинский. - Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2007. – 228 с.
[13] *Зверев, Г.Н.* Неклассические логики в задачах идентификации / Г.Н. Зверев // Идентификация систем и задачи управления: Труды международной конф. SICHRO'2000 (26-28 сентября 2000 г., Москва, Россия). – М.: ИПУ РАН, 2000. – С. 1607-1616.
[14] *Петровский, А.Б.* Основные понятия теории мультимножеств / А.Б. Петровский. - М.: Едиториал УРСС, 2002. - 80 с.
[15] *Pollandt, S.* Fuzzy-Begriffe: Formale Begriffsanalyse unscharfer Daten / S. Pollandt. - Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1997. – 146 S.
[16] *Yang, K. M.* Fuzzy Concept Mining based on Formal Concept Analysis / K.M. Yang, E.H. Kim, S.H. Hwang, S.H. Choi // Int. J. of Computers. – 2008. - Issue 3., V.2. – P. 279-290.

«СЛОЖНЫЕ СИСТЕМЫ» КАК ОБЪЕКТ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

С.И. Кретов

АНО ВПО «Российская академия предпринимательства», Научно-исследовательский центр
105005, Москва, ул. Радио, 14, Россия
e-mail: kretsi1955@gmail.com; kretsi@yandex.ru
тел: +7-903-122-31-19

Ключевые слова: *классификация сложных систем, неопределенность, необратимость, хроно, «наблюдатель-явление»*

Abstract

Complexity is studying systems. But so far there is no consensus among scholars on the definition of complex systems and their differentiation from simple systems. At the functioning level researchers and ordinary people starting the scientific research or practical analysis of any objects in each case referred them to the complex, or simple system according their personal ideas and desires. However, this distinction is always based on a subjective assessment of pattern of organization of complex systems. United scientific paradigm of complex systems should be created in the nearest future. This paper presents one more interpretation of the problem.

Введение

Объектом исследования теории сложности являются системы. Однако до сих пор среди ученых нет консенсуса по вопросу определения сложных систем и их разграничения с простыми системами. На уровне процессов функционирования исследователи и практики, приступая к научным разработкам или анализу, в каждом конкретном случае относят изучаемый объект либо к сложным, либо к простым системам. Однако это разграничение всегда базируется на субъективной оценке компонентов паттерна организации сложных систем. Единую научную парадигму сложных систем еще предстоит создать. В настоящей статье представлена еще одна интерпретация данной проблемы.

1 Отличие методологии теории сложности от инструментария классических наук

Прежде, чем попытаться осуществить теоретическую классификацию систем, следует отметить, что по мере развития представлений об окружающем мире у исследователей расширяется не только знания о предмете, но и изменяется сам инструментарий изучения явлений окружающей Природы. Сейчас доминируют классические представления о природе вещей и методах ее познания. Однако, начиная с середины прошлого века классические подходы к процессам познания все больше и больше подвергаются сомнениям, так как они не дают исчерпывающих и непротиворечивых ответов на накопившиеся вопросы теории и практики. Современная классическая научная парадигма в целом оказалась в точке бифуркации [1].

Для целей настоящего анализа возьмем лишь три фактора, которые развивают классические представления о методологии научных исследований.

Во-первых, одним из своих достижений наука считала способность предсказывать будущее состояние исследуемого явления на основе накопления сведений о траектории его предыдущего развития. Действительно во многих случаях такое предсказание осуществлялось с высокой надежностью довольно часто. Однако накопились факты движения сложных систем по непредсказуемым траекториям. Точки, после которых траектория движения сложной системы отклоняется от прогнозной на произвольную величину и не может быть предвосхищена на

основе классического статистического наблюдения, стали называться точками бифуркации. Фактор неопределенности был многократно отмечен при изучении неживой природы. Это и форма трещин на стекле, и структура снежинок и т.д. Практически все явления, в которых присутствуют живые существа, подпадают под известное изречение древнего философа: «Нельзя дважды войти в одну и ту же реку». Исследуя параметры неопределенности в «жизни» сложных систем, можно в схематичной форме записать ее следующим образом:

$y = f(x) + КСИ_1 + КСИ_2$,

где:

y – это будущий, прогнозируемый результат взаимодействия параметров системы, познанных и непознанных наукой;

$f(x)$ – это формализованная система взаимодействия изученных и учитываемых параметров системы, которые получили научное объяснение, и ученые познали зависимость будущего состояния системы от значения данных параметров в момент их измерения;

$КСИ_1$ – это некие неизвестные в данный момент параметры системы, которые влияют на ее будущее состояние, но в настоящий момент нет никаких свидетельств, что эти неизвестные факторы не могут быть познаны по мере развития научного инструментария,

$КСИ_2$ – это параметры системы, которые в рамках современной научной парадигмы признаются принципиально не познаваемыми человеком. Это в первую очередь связано с тем фактом, что человек является лишь малой частью Природы, а часть не может иметь большие знания, чем целое. Иными словами, человечество всегда будет находиться внутри замкнутого, непрозрачного шара Природы, в силу чего знания, находящиеся на поверхности данного шара будут для человечества принципиально недостижимыми. Новые научные познания могут бесконечно расширять радиус этого шара, но его поверхность всегда будет оставаться «непрозрачной».

Лучшей иллюстрацией данной формулы являются сведения о расчетной и фактической скорости трех американских исследовательских спутников, направляющихся за пределы Солнечной системы. Реальная скорость каждого из них отличается от расчетной на некоторую константу. Причем эта константа у каждого спутника собственная. Астрономы, основываясь на существующей научной парадигме, делают вывод, что при расчете скорости объектов не было учтено гравитационное воздействие на спутники не менее чем двух небесных тел. Осталось лишь определить, что это за тела, которые столь ощутимо влияют на объекты в Солнечной системе и где они находятся? Можно предположить, что одно тело находится на орбите Земли прямо за Солнцем и нам когда-либо удастся туда заглянуть и обнаружить нашего двойника. Этот факт может рассматриваться как $КСИ_1$. Местоположение и способ воздействия на спутники второго тела предположить значительно труднее и в настоящее время это скорее фактор $КСИ_2$.

Во-вторых, точность инструментария ученых выросла настолько, что при исследованиях значимые значения принял фактор необратимости. Сейчас этот фактор является определяющим в исследовании социально-экономических и биологических явлений. Классические науки об искусственном продолжают рассматривать повторяемость, как доказательство некоторых закономерностей. В науках о живом и исследованиях социальных процессов уступкой этому принципу доказательства стал тезис о движении исторического процесса по спирали, то есть не через точки, повторяющие пройденное, а некоторые точки проекций. Это связано с тем, что принцип необратимости является всеобщим и очевидным в этой сфере научных изысканий. При этом гуманитарии в своих исследованиях применяют еще и формулу: «Социально-экономические законы осуществляются через свое неосуществление». Или законы рассматриваются лишь как законы-тенденции, а не функциональная зависимость будущих параметров системы от нынешних. Этот факт следует рассматривать, как подтверждение наличия и существенного влияния на систему знаний факторов $КСИ_1$ и $КСИ_2$. То, что науки об искусственном долгое время выводили эти факторы за пределы своих «рафинированных» расчетов, вводя

ограничительные и прочие условия в эксперименты, было оправдано ранее. Сейчас уже ясно, что расположение элементарных частиц в структуре катящегося шара и желоба при каждом эксперименте существенно отличается. Просто задачи экспериментатора и его инструментарий не позволяли учитывать этот фактор. А влияние сил межмолекулярного притяжения на скорость качения шара по желобу, то есть факторы $КСИ_1$ и $КСИ_2$, игнорировались.

Сейчас ясно, что для познанной части Природы, важным фактором является «стрела времени», введение которой в качестве научного инструментария делает фактор необратимости значимым для явлений макро и микро мира, живой и неживой Природы.

В качестве научной гипотезы можно сделать еще одно замечание. Приближающийся шестой технологический уклад характеризуется расхожей формулой Нано-, Био-, Инфо-, Когно- (NBIC) конвергенцией технологий. Компонента «нано» характеризует будущее углубление представлений человечества о молекулярной и возможно волновой природе вещества. Компонента «био» предполагает открытия в исследовании феномена жизни, как целостной сложной системы. Компонента «когно» должна ответить за познание природы разума, принципов формирования новых знаний. Компонента «инфо» характеризует переход от передачи сигналов в двоичном коде к принципиально новым способам информационного взаимодействия, которые трудно представить даже в футурологических прогнозах на современном этапе развития производительных сил.

В свете рассмотрения фактора необратимости данная характеристика компонент паттерна организации шестого технологического уклада, по нашему мнению является неполной. Наиболее значительные изменения человеческого бытия и знаний о Природе будут обеспечены благодаря познанию новых свойств времени. Компонента «Хроно» является наиболее влиятельной и определяющей для шестого технологического уклада. По этому поводу необходимо привести некоторую аргументацию.

Сейчас категория «время» рассматривается в лучшем случае, как стрела времени, имеющая некий субъективно определенный ноль и одно направление. Если же исходить из самых общих научных представлений о росте энтропии, как всеобщем и универсальном свойстве, и направлении изменения Природы, то такое направление развития можно условно признать «стрелой времени» с положительным значением времени. Однако, в клетке, как неотъемлемой компоненте паттерна организации части Природы, биологической жизни, растет упорядоченность, то есть уменьшается энтропия. Поэтому внутриклеточное время можно рассматривать, как время с отрицательным знаком. Пока это лишь гипотеза, требующая серьезного научного исследования. Это с одной стороны.

С другой стороны, учитывая появления в ноосфере Земли человеческого сознания, способного инновационно преобразовывать Природу наряду с естественной эволюцией, следует сказать и о другом свойстве времени. Для искусственных систем и биологических существ, не наделенных человеческим сознанием и способностью к самосознанию, время представляется как циклический феномен. Растения и животные подчиняются циклам смены дня и ночи, времен года. Их ощущения времени не распространяются на периоды до их появления и после их смерти. Сознание человека позволило «замкнутые циклы времени» представить в виде разомкнутой циклической функции. Дальнейшее развитие науки и сознания должны привести к новому пониманию времени, которое окажет наиболее значимое влияние на технологии шестого технологического уклада.

В-третьих, одной из задач любого исследователя может считаться учет фактора взаимодействия наблюдателя-ученого и наблюдаемой сложной системы. В случае, когда наблюдаемая система представляет собой техническое устройство, отсутствует субъективная реакция системы на факт ее исследования. Конечно, нельзя не учитывать отдельные факты телекинеза, остановки и запуска часов по воле наблюдателя и т.п. Однако пока это чаще воспринимается современной наукой как фокусы, а не реальное взаимодействие механических, материальных

объектов и человека посредством некоторого «биополя», аналогичное гравитационному взаимодействию.

В социально-экономических системах один индивидуум наблюдает за другими живыми существами и, поэтому возможны различные формы реакций, «спровоцированных» самим фактом наблюдения, сбора первичной информации и т.п. Это существенно различает фактор вовлеченности наблюдателя в исследование даже самых совершенных технических и примитивных живых систем.

Другой аспект состоит в том, что сам способ мышления наблюдателя весьма существенно влияет на полученные выводы. Наиболее общее и целостное представление по этому вопросу было сформулировано Борисом Раушенбахом в книге «Пристрастие». Он и многие его коллеги выделяют два способа мышления: «естественнонаучный» и «гуманитарный». Многократно подтверждено и очевидно, что из одного биологического вида Homo Sapience образовательная система создает индивидуумов, мыслящих принципиально по-разному и это чрезвычайно важно для развития науки.

Первые не мыслят себе ничего, не связанного в строгие логические, причинно-следственные цепочки, описанные математическими зависимостями и бесчисленное количество раз проверенные в лабораторных опытах. Паттерн организации любой исследуемой системы «ректифицируется» естествоиспытателями до уровня формализации компонент ее паттерна организации в форматах математических формул.

Вторые мыслят размытыми множествами, образами, их нечеткими взаимными связями, перетеканием одного множества в другое, для описания которых причинно-следственная логика не только излишня, но и вредна, так как не дает никакого строгого ответа в условиях непрерывно меняющейся, текучей социально-экономической действительности, неопределенности и необратимости исследуемых процессов. Такой подход к методологии исследования позволяет абсолютному большинству гуманитариев производить качественные рассуждения о предмете на уровне процессов функционирования или даже теоретическом уровне, без кристаллизации паттерна организации системы на сущностном уровне. Сами рассуждения часто выглядят эффектно, но реальных научных выводов сделать не позволяют.

Лучшей иллюстрацией этого концептуального противоречия является «Капитал» К. Маркса и другие его труды, где изучаемые явления: товар, капитал, деньги, рента и т.п. на сущностном уровне представлены через четкие и однозначные компоненты паттерна организации каждой из категорий. Так как каждому паттерну организации системы может соответствовать множество допустимых материализаций в виде структур или теоретических моделей, то и понимание существа исследуемых явлений на этих уровнях может быть различное. Иными словами компоненты паттерна организации системы являются той азбукой или таблицей умножения, из которых вырастают допустимые лингвистические или математические теоретические модели, которые описывают различные стороны реальных процессов функционирования. Иными словами строится функция $y = f(x)$. Серьезные ученые добавляют к этому черный ящик, под которым скрываются все те же $КСИ_1$ и $КСИ_2$. В гуманитарных исследованиях после К. Маркса и Ф. Энгельса, раскрывших сущность биологической жизни в целом и рыночной экономики в частности, аксиоматический и функциональный подход применяется в основном на эмпирическом уровне процессов функционирования. Фундаментальные экономические исследования захлестнула волна качественного анализа размытых множеств без какого-либо определения начальных точек отсчета, масштабирования наблюдаемых явлений, формулирования хотя бы в самых общих чертах метрических и топологических параметров изучаемых явлений, компонент паттерна организации, которые проводят «водораздел» между близкими, но различными категориями.

Именно поэтому так различаются наблюдатели-ученые, образованные в гуманитарных и остальных ВУЗах. Отличны их методы познания, способы обработки получаемых знаний и т.п. Сейчас между ученым гуманитарием и естествоиспытателем больше различий, чем общих

черт. Теория сложности представляет им шанс сблизиться и (в дальнейшем) найти общие точки соприкосновения в методологии исследования Природы, как целостной и неделимой на физику, биологию, обществоведение и другие науки сложной целостной системы. Но, придется повториться, это общее может родиться лишь на сущностном уровне исследования компонент паттерна организации сложных систем. У физиков, биологов и экономистов сейчас рассматриваются собственные теоретические модели, например, человеческого социума. Между ними очень мало точек соприкосновения, хотя объект исследования – социум людей, один и тот же. Только на уровне компонент: а) материи и энергии; б) клетки; в) эволюции; г) бумажных законов социоразвития, - возможна кооперация всех наук для нового понимания этого природного феномена. Именно это является главным отличием теории сложности от классических представлений о научном познании окружающей действительности.

2 Относительность знаний и ее учет в познаниях Природы

Следующий важный вопрос состоит в относительности знаний. Сейчас трудно оспаривать, что существует комната фактов и комната их интерпретаций. Каждый ученый во все времена имел и имеет субъективную интерпретацию наблюдаемых фактов, от античных до современных. При этом надо отдавать себе отчет, что будущие научные интерпретации фактов нашей жизни будут отличаться от наших современных представлений еще больше, чем, например, суждения алхимиков отличаются от достижений лауреатов Нобелевской премии. Единичные интерпретации отдельных ученых агрегируются в историческую или региональную интерпретацию факта. Научная парадигма, как еще более общая форма интерпретации фактов, как правило, формируется академиями наук и существует достаточно долго. Она является прогрессивной в момент ее формирования, а дальше чаще всего происходит, условно говоря, обсуждения новых идей Коперника на академической комиссии Птоломея. С какого-то этапа развития классическая парадигма начинает тормозить развитие науки. Это было, есть и будет всегда. Например, представление о плоской Земле постепенно, но не без проблем, трансформировалось в современное знание, которое не является окончательным. Открытие Ньютоном силы взаимного притяжения вызвало бурю критики со стороны адептов бытующей парадигмы, что тела могут взаимодействовать лишь при соприкосновении друг с другом. Даже теория относительности Эйнштейна за исключением Макса Планка была встречена в штыки классическими профессорами физики того времени. Сейчас появилось значительное количество фактов, которые невозможно объяснить в рамках доминирующей классической научной парадигмы. И такое происходит в рамках всех наук, даже не смотря на то, что новые субъективные интерпретации, рушащие сложившуюся парадигму можно перепроверить экспериментальными опытами, создавая адекватный научный инструментарий.

В социально-экономических науках апологетика каждой очередной научной парадигмы исходит из ее естественности, объективности и вечности. Так было, например, со знаниями о рабовладении. Античные философы, которые предвосхитили многие современные представления о мироустройстве, ни на секунду не сомневались в естественности, вечности и объективности разделения общества на рабов и свободных граждан. Можно сказать, что до 19 века социально-экономические и политические проекты великих мыслителей представлялись лишь как утопии и фантастика. Сейчас мы наблюдает такое же смехотворное цепляние ученых прошлого за либеральные и рыночные интерпретации. Простое заявление о естественном и неизбежном умирании рыночных механизмов и условий влечет за собой обвинения в коммунистическом мракобесии и антинаучности такой новой исторической интерпретации. К сожалению, опыт исторического развития научных парадигм мало чему учит современных ученых. Вопреки страстному противодействию классической науки, придется согласиться, что любая теоретическая модель сложной системы, включая и рыночный хозяйственный механизм, имеет дату рождения, продолжительность жизни и дату естественной смерти «по старости».

3 Научный инструментарий

Опыт исследования человеком сложных систем иллюстрируют историческое развитие процессов познания. Изучением процессов познания, мышления и принятия сложных решений отдельными индивидуумами или их структурированной совокупностью для достижения поставленных целей занимается наука эпистемология [2]. Эта классическая наука выступает в роли методологической основы любого научного исследования и является важнейшим инструментом при изучении сложных систем, когда сам наблюдатель является активным участником той или иной научной исторической интерпретации.

Набирающий значение термин «онтология» был введен в науку немецким философом Р. Гоклениусом еще в начале 17 века для выделения раздела философии, исследующего всеобщие основы, принципы бытия, его структуру и закономерности. Его исходное значение сейчас претерпело значительное изменение, но сущность категории, как характеристики первокирпичиков сложной системы, осталось. Через совершенствование научного инструментария, интеграции разнородных знаний на уровне паттерна организации системы в настоящее время вырабатываются объективные условия методологического объединения естественнонаучных и гуманитарных исследований. Главным «клеем» который производит «скрепление научных тектонических плит» является введение в процессы познания классическими науками факторов времени, неопределенности, необратимости и самого наблюдателя, влияющего на получаемые результаты самим фактом своего присутствия в сложной системе. Особенно глубокой реорганизации должны быть подвергнуты именно гуманитарные науки, которые будут вынуждены взять на вооружение инструментарий теории сложности. Точным наукам, со своей стороны, придется признать «бога» неопределенности, необратимости и субъективности, который умеет каждый раз неповторимо проводить трещины на стекле, или вылепливать мириады форм снежинок, находящиеся за пределами знаний точных наук.

Фактически паттерн организации - это междисциплинарная категория, которая через минимальный набор компонент должна охарактеризовать сущность сложной системы, развивающейся в условиях неопределенности и необратимости, и изучаемой учеными посредством сбора визуальной, звуковой и другой научной информации через органы чувств.

Ученым пока не удалось в форматах формул и уравнений понять, как исследуемая система, например стул, преобразуется их факта «стул» в образ «стул». Можно лишь в форматах размытых множеств и качественного описания процессов в черных ящиках, представить себе следующую последовательность. Для простоты понимания данного тезиса все существующие и подлежащие научному исследованию сложные системы, объединим под единым термином – «стул».

Человек слышит звуковые колебания от произношения слова «стул» или «chair» или воспринимает световые волны, наблюдая за стулом. В ушах или глазах они преобразуются в электрохимические сигналы, поступающие в мозг. Мозг на основе этих сигналов достает из своей библиотеки компоненты паттерна организации системы «стул», а это «сиденье» и «опора», и сообщает человеку, что означали те звуковые колебания, которые поступили в ухо. Реальный стул при этом может и отсутствовать. Паттерн организации и его компоненты - это категория специфического языка мозга, который сообщает исследователю значения воспринимаемых органами чувств косвенных раздражителей звуков, света и т.п. Так, через органы чувств, осуществляется восприятие всеми ученым любой информации об изучаемом явлении. В основе передачи данной информации лежит не двоичный код передачи сигналов, а нечто более совершенное и возможно, даже не совместимое с процессами, протекающими в современных вычислительных и аналитических устройствах.

Если же в «библиотеке мозга» двух ученых лежат два различных набора компонент одного и того же явления, например «рыночной экономики», то они не только не смогут о чем-то договориться, но даже понять друг друга. Они будут видеть перед собой одну и ту же картину глобального кризиса рыночной экономики, но их интерпретации будут весьма различны. Пе-

ретасовывая факты, статистически собранные на уровне процессов функционирования и даже агрегированные на теоретическом уровне, выпячивая некоторые из них и игнорируя другие, каждый «научно» докажет правоту своей интерпретации. Но он ее докажет лишь для себя лично. Далее он может ее навязать в качестве официальной через принятие соответствующих бумажных законов, но он ни на йоту не приблизится к комнате фактов. В этом квинтэссенция бесконечных и бесплодных дискуссий о причинах и перспективах современного глобального кризиса.

Экономика – это характерная сложная диссипативная структура. Она находится в точке бифуркации. Прогнозирование дальнейшего ее развития на основе классических методов статистического анализа, с точки зрения теории сложности, является деструктивным и антинаучным. Сейчас невозможно достоверно предсказать, каковы будут параметры ВВП и курсы валют, как трещины на стекле. Возможно лишь констатировать, что трещины будут, то есть цивилизация выйдет из современного кризиса в принципиально и качественно новое состояние, которое в самом общем виде можно назвать, как гуманистическая общественно-экономическая формация (ГОФЭ). На базе этой новой парадигмы будут формироваться политические, экономические, социальные и прочие механизмы государств (или государства) принципиально нового типа. Этот вывод органически вытекает из применения методологии теории сложности к исследованию сложной системы, именуемой глобальная экономика.

4 Классификация сложных систем

После этих более общих тезисов и научных гипотез можно перейти к классификации сложных систем. Любая классификация является продуктом человеческого сознания и базируется на тех компонентах паттерна организации, которые сформированы в головах самих классификаторов на основе предыдущего опыта и Менделеевских прозрений. Для классификации объектов исследования важно выявление сущностных черт сложных систем. К сложным системам принято относить искусственные системы, авторегулируемые с помощью обратных связей, и аутопоэтические системы.

К первым можно отнести:

А) детерминированные системы с механической или аналогичной обратной связью;

Б) системы, которые на основе сигналов обратной связи выбирают нужные управленческие процедуры из конечного заранее известного набора алгоритмов реагирования;

В) системы, которые в рамках заданных условий, ограничений, процедур и т.п., сами генерируют тип реакции на сигналы обратной связи, на базе выработанных онтологий;

Г) системы, которые могут принимать решения не только в ответ на сигналы обратных связей, но и самостоятельно корректировать исходные условия, ограничения и процедуры.

Все перечисленные системы в своей основе используют сигналы, а их алгоритмы формируются в «двоичном коде» современной информационной парадигмы. Однако системы группы Г) являются последним шагом на пути к технологической сингулярности, когда, по предположению футурологов, машины станут разумными. Из самого общего понимания этого процесса, однако, можно сделать вывод, что любая, самая разумная система, опирающаяся на двоичный код, никогда не сможет стать разумней созданной Природой информационной системы сознания.

Ко вторым можно отнести:

Д) аутопоэтические системы неживой Природы;

Е) живые аутопоэтические системы.

Данную гипотезу классификации можно сейчас рассматривать лишь как рабочую гипотезу, но уже на ее основе можно сделать несколько выводов.

Классификация сложных систем невозможна ни на уровне процессов их функционирования, ни на уровне теоретической модели. Только вычленив компоненты паттерна организации

сложной и простой системы можно провести научную классификацию. Примером является классификация К. Марксом всех предметов на Земле на «товары» и «не товары». «Не товары» имеют лишь одну компоненту – способность удовлетворять потребности биологических организмов. «Товар», наряду с этим свойством приобретает «человеческую» компоненту – способность обмениваться на другие товары.

Все системы состоят из подсистем и это универсальная компонента, также как и способность удовлетворять потребности живых существ. То есть первой компонентой системы является ее представление во взаимодействии надсистемы с самой системой и подсистемами через некие физические или теоретические мембраны. Второй компонентой, которая отличает простые системы от сложных, представляется аутопоэтичность. Как товар может в одночасье может с помощью человека превратиться в другой товар, так и сложная система способна к самосозиданию и имманентному развитию. Иными словами активное присутствие в системе человеческого сознания делает данную систему аутопоэтической и классификационно отделяет ее от простых систем.

Может показаться, что такой жесткий подход к классификации исключает из кластера сложных систем все современные технические и технологические системы. Рассматривая большинство искусственно созданных сложных технических систем, как изолированные технические или технологические комплексы, представляется, что нет существенной разницы между ними и, например, камнем или скалой. Однако искусственная сложная система есть в первую очередь продукт сознания человека и ее нельзя рассматривать изолировано от лиц проектирующих, создающих, эксплуатирующих данную систему. Иными словами, любая искусственная система является совокупностью преобразованных веществ Природы в некую упорядоченную структуру и процессы. Разрабатывая принципы, алгоритмы и технологии саморегулирования искусственных систем, люди не усложняют саму систему, а лишь переносят часть функций, выполняемых в таких системах сознанием, на алгоритмический язык технических устройств. Уровень их сложности в целом остается неизменным. Перераспределяется лишь ответственность за создание самой системы и поддержание ее в функционирующем состоянии.

Неустранимое присутствие в сложной технической и технологической системе людей: изобретателей, проектировщиков, обслуживающего персонала, - и рассмотрение их как неотъемлемой части самой системы, позволяет провести аутопоэтические параллели, например, между ножом и современными режущими средствами. Использование только что изобретенного ножа всеми другими соплеменниками перевели сложную систему «изобретатель-нож» в разряд простых систем, так как нож после его изобретения может сделать каждый. За этим последовали следующие инновации. То же самое наблюдается в Природе. Одноклеточные организмы – «цари Природы» многие миллиарды лет - превратились в простейшие после появления многоклеточных существ. Надо отдавать себе отчет, что это превращение произошло лишь на уровне теоретической модели современной ноосферы.

Сложные системы функционируют и осуществляют взаимодействие на основе качественно иных принципов. В их основе, как и в основе сознания, лежат свойства, соответствующие больше волновой (голографической) нежели корпускулярной природе и резонансному взаимодействию как внутри себя, так и с внешней средой.

Что такое технические средства изобретаемые человеком благодаря своему сознанию? Сам процесс освоения новых знаний себе на пользу можно в расширительном плане назвать инновационным самосозиданием, то есть аутопоэзом сознания. Результатом инновационного развития являются предметы, которые быстро усиливают естественные способности человека. Сколько миллионов лет ушло у Природы, чтобы одеть животных на Земле в шкуры, которые защищают их и от холода, и от жары, китов в подкожный жир, каланов в непромокаемый мех, птиц в ненамокаемые перья. Сознание человека протаранило инновационный путь от звериных шкур до современной одежды за несколько тысячелетий. Правда, неспешная эволюция

Природы не загрязняет окружающий мир неразлагающимися отходами от недолговечной искусственной одежды, а человеческие поспешные инновации засорили все вокруг и уже реально представляют угрозу для жизни миллионов «прекрасно» одетых людей и всей ноосферы в целом. Все инновации, по большому счету, это некие мультипликаторы свойств человека, как биологического вида, скорость осуществления которых существенно опережает скорость природных эволюционных процессов.

Биологическая жизнь на Земле, по утверждению современной науки, существует уже более 2 млрд. лет. Если этот необозримый временной период силой научной мысли сжать в шесть дней «божественного творения» всего сущего, то человеческая история существует всего лишь около одной секунды. Наша цивилизация занимает ничтожно малый период в истории биологического развития Природы, но создала бесчисленное количество сложных технических и технологических систем и уже оказала катастрофическое воздействие на Природу, через инновации ускорив естественный процесс эволюции, превратив его в противоположность. Причем, по большому счету, еще в 19 веке инновационное разрушение природной среды обитания всего живого не было столь глобальным и катастрофически необратимым. Да, Лондон утопал в конском навозе, но его дальнейшая естественная переработка пошла лишь на пользу Природе. С переработкой отходов всеобщей автомобилизации и т.п. пока возникает больше проблем, чем пользы для Природы. Рассматривая генезиз аутопоэтической инновационной системы, включающей человека с его сознанием и создаваемые им технические и технологические системы, нельзя не учитывать первую системную компоненту, что это лишь подсистема более крупной и могущественной системы, именуемой Природа.

Простейшие организмы: бактерии, вирусы и т.п., - которые господствовали на Планете все эти два миллиарда лет, и масса которых в несколько тысяч раз больше массы всей прочей органики на Земле, вместе с человеком и его инновациями входят более устойчивую аутопоэтическую систему. Микроорганизмы в ситуации изменения параметров окружающей среды за пределы некого сложившегося устойчивого положения в неравновесном состоянии, будут стремиться выправить ситуацию, получая по цепочкам обратных связей сигналы об угрозе их существованию от человеческих инноваций. Примером такого «царствования» на планете может быть эволюционное «изобретение» микроорганизмами фотосинтеза, которое позволило компенсировать увеличение интенсивности солнечной радиации примерно на четверть и утилизировать эту громадную энергию с пользой для Земли. Тогда ведь не было человеческих лабораторий по генной модификации, а столь грозная проблема была решена во благо Природе, а не во вред ей! Как только техногенное воздействие на ноосферу окажется ощутимым для сообщества микроорганизмов, они начнут выправлять параметры окружающей среды. Кто является действительным властелином на нашей Планете, покажет время. Но главным для данного исследования является возврат к первой компоненте паттерна организации сложных систем: «Любая сложная система является подсистемой более общей системы». Не учет этой компоненты при нарастающей, разрушительной инновационной деятельности человека, может в одночасье превратить все существующие технические и технологические сложные системы в подобие простых камней. Если бактерии «осознают» угрозу своему существованию, то они быстрее всего ликвидируют один из элементов сложных технических систем – человека. Такое «уничтожение» может протекать в форме физического уничтожения или в форме воздействия на самосознание для изменения социально-экономической парадигмы. Однофакторная модель социального бытия современной цивилизации в форме абсолютной и относительной максимизации прибыли, именуемая рыночная экономика, должна быть преобразована в форматы гуманистического сосуществования человечества и всей остальной Природы иначе микроорганизмы могут «вспомнить» свою аутопоэтическую функцию.

Невозможно и непродуктивно делать предположения о структуре и теоретической модели будущего мироустройства. Однако надо иметь ввиду, что витальные, жизненные потребности человека в исторической перспективе сотен тысяч лет изменились весьма незначительно.

«Витальные нужды не имеют тенденцию к неограниченному росту, поэтому и производство предметов их удовлетворяющих не может привести к экологическому кризису. Основная же часть роста затрат вещества и энергии в индустриально развитых обществах приходится на потребление ритуально-престижного характера. Здесь продукты чаще всего изнашиваются не материально, а морально, а рост потребления теоретически неограничен. Этот рост и есть один из двигателей современного экологического кризиса» [3]. Для характеристики снобистского потребления[1] еще в прошлом веке был введен термин «вейстинг» - накопление ненужных вещей, перевод зерна в алкоголь с последующим ритуальным пропиванием, помпезно-монументальное строительство, гонка вооружений, война и т.д. Удовлетворение базовых потребностей людей более эффективным способом является целью инновационной деятельности. Снобистское потребление современного общества и связанная с ним индустрия избыточного производства «товаров для престижа» априори не может относиться к сфере инноваций. Это сфера воспроизводства разрушительного для Природы вейстинга, который необходимо немедленно остановить для выживания человека, как биологического вида. Эту угрозу выживания человечества создала система бумажных законов, обожествляющая рыночные отношения и создание все более разрушительных технических и технологических систем.

Если пристально взглянуть на современные технические и технологические системы, которые в совокупности с окружающими их людьми представляют собой сложные системы, то с точки зрения теории сложности, их вряд ли можно и целесообразно относить к ***сложным системам созидания***. Быстрее они представляют собой ***сложные системы разрушения*** экосистемы и ноосферы. Иными словами сама разработка и создание технических и технологических систем и рассмотрение их как сложных биотехнологических систем, должна увязываться с целевой функцией. Нацеленность системы на повышение эффективности удовлетворения витальных потребностей человека без ущерба для Природы в настоящем и будущем, безусловно, характеризует такую сложную систему, как систему развития. В противном случае – это система уничтожения.

Эволюция человека, как биологического вида протекала тысячелетия. Инновации, создание сложных технических и технологических систем, как форма эволюции сознания в виде генерации новых способов взаимодействия человека и Природы, ускорились лишь в последнее столетие [5]. Технические и технологические инновации, закрепляемые искусственными бумажными законами, явились тем решающим звеном, которое создало у человечества иллюзию возможности покорения Природы. Учитывая современное состояние взаимодействия человеческой цивилизации и Природы – это главный критерий классификации сложных и простых систем, инноваций и деградации. Однако этот вопрос пока не является актуальной научной проблемой. Он представляет собой частную научную интерпретацию, не имеющую признаков научной парадигмы.

Заключение

1) Сложные системы всегда существовали в Природе. Сама Природа является сложной аутопоэтической системой.
2) Разрабатываемый в рамках различных научных дисциплин инструментарий исследования окружающей действительности создает объективные предпосылки для интеграции достижений ученых для целостного понимания Природы и ее подсистем, как сложной системы.
3) Эволюционизирующее сознание человека порождает все новые и новые технические и технологические системы, создаваемые в рамках современной парадигмы максимизации прибыли и покорения Природы.

[1] Это потребление, побуждаемое стремлением возвыситься над другими людьми. См., например [4].

4) Концепция глубокой экологии, как важнейшая часть теории сложности, нацелена на изменение сложившегося положения в науке и практике для спасения нашей цивилизации от самоуничтожения через совершенствование «сложных систем разрушения».
5) Определение и классификация сложных систем с учетом целей и расходуемых ресурсов является отправной точкой в формировании будущей гуманистической общественно-экономической формации, производительные силы, производственные отношения и надстройка которой будут ориентированы на союз с Природой, а не на ее покорение.
6) Все усилия гуманитариев и естествоиспытателей, развивающих различные аспекты теории сложности, должны в конечном этапе вылиться в единую концепцию развития цивилизации, учитывающую достаточный уровень сложных технических и технологических систем развития, а также задачу сохранения и развития ноосферы в целом.

Список литературы

[1] *Kretov, S.* Complex System Analysis of the Russian Innovation Mechanism // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIV Международной конф. (19-22 июня 2012 г., Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН. - С. 52-59.
[2] Большой энциклопедический словарь, Москва, «Советская энциклопедия», 1991, т.2, стр.351, 461.
[3] *Арутюнов, С.* От мотовства к бережливости // Знание-сила. – 1983. - №2.
[4] *Райзберг, Б.А.* Современный экономический словарь. 2 е изд., испр. / Б.А. Райзберг, Л.Ш. Лозовский, Е.Б. Стародубцева. - М.: ИНФРА-М., 1999. - 479 с.
[5] *Кретов, С.И.* Инновации как форма эволюции сознания. В свете теории сложности. - LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. - 316 с.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ НАУКА В КОНТЕКСТЕ КЛАССИЧЕСКОЙ, НЕКЛАССИЧЕСКОЙ И ПОСТНЕКЛАССИЧЕСКОЙ НАУКИ

О.В. Карамова

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации
25993, Москва, Ленинградский проспект, 49
Lelia_apa@ mail.ru
тел: +7(499) 943-98-55

Ключевые слова: *классический этап, неклассический этап, постнеклассический этап, метод социально-философского универсализма, социально-гуманитарное познание, принцип универсализма*

Abstract

This paper analyzes the development of Russian economic science at three levels: classical, non-classical, and post non-classical. The proposed periodization of Russian science is based on general scientific and philosophical approaches.

Периодизация российской экономической науки является нерешенной проблемой. Наиболее распространенным подходом остается хронологическое выстраивание научных школ, течений и направлений.

В соответствии с трехэтапным методом периодизации науки возможно предложить аналогичную модель для отечественной экономической науки.

Первый классический этап развития российской экономической науки (XVII–XIX вв.) основан на объективистском стиле мышления. Для него характерно линейно-кумулятивное развитие науки. «Субъект-объектные» отношения в научном исследовании характеризуются нивелированием влияния субъекта, исключением методов, приемов и средств познания из объекта. В XVII–XIX вв. экономическая наука прошла путь от первой школы русского меркантилизма, или «русской школы», до научной школы русского либерализма, славянофильства и исследовательской научной программы русского утопического социализма. Если «русская школа» меркантилизма опиралась на эмпиризм, то в XIX в. в рамках русского либерализма, славянофильства, западничества и утопического социализма был уже разработан ***метод социально-философского универсализма***. Культурный контекст российской цивилизации в XVIII в. ознаменовался процессом секуляризации. Петровские преобразования послужили толчком к созданию светской культуры. Религиозное мировоззрение стремительно сменялось верой в разум, рационализм. Начала формироваться новая атеистическая идеология, основанная на вере в преобразующую силу человека. Олицетворением всемогущества человечества становится наука.

Российская экономическая наука в XVIII в. находилась под воздействием научного мировосприятия, а также испытывала усиление западного влияния. В этих условиях сформировалась первая научная экономическая школа, русский меркантилизм, или «русская школа». Ее основными представителями были А.Л. Ордин-Нащекин, И.Т. Посошков, М.В. Ломоносов, В.Н. Татищев. Экономические взгляды этих мыслителей носили ярко выраженный характер российской самобытности.

Особенно в этом ряду выделяется Иван Тихонович Посошков, который жил и работал в эпоху петровских преобразований на рубеже XVII-XVIII вв. «Книга о скудости и богатстве, сие есть изъявление от чего приключается скудость, и от чего гобзовитое богатство умножается» (1726) – это главный экономический труд И.Т. Посошкова.

Экономические взгляды Василия Никитича Татищева (1686-1750) совершенствовали сложившуюся в XVIII в. экономическую науку, которая называлась «экономия учена». В разработке проблем государственной экономики В.Н. Татищев был предшественником М.В. Ломоносова, ему принадлежит заслуга создания основ «русской школы» в российской экономической науке.

«Русская экономическая школа» была пронизана традициями российской культуры, отличалась национальной самобытностью и глубокой научностью. Основной чертой российской экономической науки была широта подхода, которая не ограничивалась только односторонней материальностью. Российские экономисты-мыслители, в отличие от западных ученых, обладали всеобъемлющей многосторонностью духа. Это позволило им раздвинуть предмет экономического познания, сделать научный методологический инструментарий более разнообразным, приблизить экономическое знание к социально-гуманитарному.

В первой четверти XIX в. социально-экономическая мысль России находилась под влиянием рационалистической философии французских просветителей XVIII в. Они поставили в центр общественной жизни разум, возложив на человека и его интеллект задачу восстановления гармонии мира и человека. Содержание культурно-исторического процесса заключалось в развитии и совершенствовании всего человеческого рода и каждого индивида в отдельности при помощи просвещения и разума. Тюрго, Вольтер, Дидро уделяли первостепенное внимание политическому развитию общества, государственному управлению, развитию науки, морали, искусства. Желание идти по пути прогресса и движения гуманности, приводило к признанию всех средств, включая насильственные меры. Практические выводы, сделанные из теоретической мысли, привели к Великой французской революции, которая ужаснула человечество своими кровавыми методами и жестокими расправами над несогласными врагами, и самими революционерами.

В экономической науке доминировала классическая политическая экономия, которая приняла специфические черты российской мысли. Можно согласиться с точкой зрения М.Г. Покидченко, в соответствии с которой существовало два основных направления – теоретическая и практическая экономическая мысль. Теоретическая, университетская наука следовала за образцами западно-европейской политической экономии. Наиболее яркими представителями были Н. Тургенев, А.Г. Шторх. Другое направление, представленное практическими проектами социально-экономических реформ, использовало либеральный дух классической политической экономии. Самобытный, национальный характер носили идеи реформаторов М.М. Сперанского и Н.С. Мордвинова.

Экономическая и общественная мысль времён царствования Николая I (1825-1855) отражала специфику этого периода, связанную с политической реакцией, жесткой цензурой, гонениями на свободомыслие, ограничениями выезда за границу. Сложность обсуждения общественно-политических вопросов обусловила интерес к теоретическим и философским проблемам. На смену рационализму просветителей пришли идеи немецкого идеализма и романтизма. В российской общественной науке начался процесс национального самоопределения и поиска собственного пути развития. Теория славянофилов стала одной из первых моделей самобытного развития России. Течение славянофилов, сложившееся в русской общественной мысли 40-50-х гг. XIX в. обосновывало особый, отличный от западноевропейского, путь исторического развития России.

К славянофилам относились такие мыслители как И.С. и К.С. Аксаковы, И.В. и П.В. Киреевские, А.И. Кошелев, Ю.Ф. Самарин, А.С. Хомяков, В.А. Черкасский и др. Близки к славянофилам были В.И. Даль, А.Н. Островский, А.А. Григорьев, Ф.И. Тютчев. Однако крайность их позиций заключалась в неприемлемости общих закономерностей, в поиске самобытности России в отсутствии борьбы социальных групп, в крестьянской общине, православии как единственно истинном христианстве. Идеи славянофилов получили дальнейшее развитие в идеологии почвенничества в трудах Н.Н. Страхова, в цивилизационной теории Н.Я. Данилевского.

Западничество, как оппонент славянофильства, выступало за преодоление социальной и экономической отсталости России не на базе развития самобытных элементов культуры, а за счет освоения опыта Европы. Основными представителями западничества были П.В. Анненков, В.П. Боткин, Т.Н. Грановский, К.Д. Кавелин, М.Н. Катков, И.С. Тургенев, П.Я. Чаадаев, Б.Н. Чичерин. Они акцентировали внимание не на различиях России и Запада, а на их общности в исторической и культурной судьбе. Рекомендации западников в гносеологическом плане строились в основном на заимствовании позитивистской философии, и поэтому противоречили мировоззренческим национальным традициям. Но даже западники отмечали специфику российской истории и мысли, предлагали экономические преобразования с учетом сложившихся условий.

Другим самобытным направлением русской экономической науки середины XIX в. было народничество, создавшее экономическую и этическую теорию. Лидерами этого течения была разночинная интеллигенция, защищающая интересы крестьянства. К основным чертам теории народников следует отнести их стремление ликвидировать все остатки старого строя, и, прежде всего феодальную монархию, уничтожить крепостничество в стране, спасти русский народ от жестокости и безнравственности капиталистической эксплуатации и наметить пути перехода к новому обществу.

Народники дали теоретическое обоснование крестьянского социализма. Исторические корни народничества уходят в 40-е годы XIX в., когда выразителями чаяний крестьянства выступали А.И. Герцен и Н.П. Огарев. В конце 60-х — начале 70-х годов в пореформенной России изменилась экономическая и политическая обстановка. Экономические идеи народников-семидесятников или революционных народников не были однородными. Три разных течения революционного народничества представляли П.Л. Лавров, П.Н. Ткачев и М.А. Бакунин. Таким образом, народничество создало теорию крестьянской демократии, которая отражала самобытность российских традиций и образа хозяйствования.

Второй неклассический этап экономико-теоретической российской науки (начало XX в. – 80-е гг. XX в.) связан с распространением идей эволюционизма и социальной динамики. Русская марксистская школа формировалась под воздействием западного марксизма и метода исторического материализма и материалистической диалектики. Российские экономисты внесли свой вклад в развитие методологии и онтологии марксизма.

Отечественная экономическая наука бурно развивалась в начале XX вв. в рамках школы русского циклизма, экономико-математической школы, этико-социального направления, школы русского институционализма и русского космизма. В этот период российские экономисты создали теории, получившие мировое признание. К ним относится теория промышленного цикла М.И. Туган-Барановского, теория потребительского поведения Е.Е. Слуцкого, теория больших волн Н.Д. Кондратьева, теория ноосферы В.И. Вернадского, теория крестьянского хозяйства А.В. Чаянова и др. Российские экономисты разработали свой метод исследования, который продолжал традиции старой и новой исторической школы в нормативном подходе и историко-дедуктивном методе.

В социалистический период отечественная экономическая наука развивалась в направлении онтологии и широты предмета исследования, а в методологическом плане ограничивалась марксистской школой.

Третий постнеклассический этап экономико-теоретической российской науки (90-е гг. XX в. – начало XXI в.) связан со становлением институционализма и эволюционного институционализма, формированием парадигмы самоорганизации и «синергетическим движением», нелинейностью мышления. В отечественной экономической науке на этом этапе произошли качественные изменения, связанные, помимо кризиса марксистской теории, со становлением разных экономических научных школ. Оформилось несколько научных направлений со своими специфическими методологическими основаниями – неоклассическое, неоинституциональное, эволюционное, неомарксистское. Методологический плюрализм в экономической науке создал проблему размывания общих стандартов, обособленности понятийных систем,

обнажил конфликт инструментального, эпистемологического и онтологического характера. С другой стороны, открылись огромные возможности творческого, эвристического плана в научном познании экономических процессов.

Российская экономическая наука представлена многими направлениями, течениями и исследовательскими программами. Предметом исследования философии национальной российской науки выступают родовые, сущностные особенности сознания и поведения человека как социального познающего существа. Несмотря на разные объекты исследования в экономических течениях и школах, можно говорить о некоторых общих чертах российской экономической науки с точки зрения методологических, аксиологических и этических подходов.

Общей чертой является то, что отечественные ученые не замыкаются на анализе чисто экономических факторов и создании абстрактных теоретических моделей. Включение в анализ широкого спектра проблем, касающихся правовых, политических, морально-этических сторон общества, позволило отечественным экономистам выйти на другой уровень научного исследования, во многом отличный от неоклассической научной школы. Методологический прием, синтезирующий в единую систему тесно взаимосвязанные стороны организации общества, позволяет назвать представителей российской экономической мысли создателями самостоятельного научного метода.

В мировом социально-гуманитарном знании совершенно неоценен подход, развитый русской религиозной метафизической философией начала XX в., представленный Вл. Соловьевым, С.Н. Булгаковым, Н.А. Бердяевым, С.Л. Франком и др. Основная идея русской философии заключается в единстве человека с миром, «космическое» значение личности, причастность человека к абсолюту, и все это фокусируется в принципе всеединства. Общей особенностью российской социально-философской мысли является универсальность подхода. Суть его заключается в неприятии ограниченного видения западной науки – технократизма, механицизма, рационализма и индивидуализма. Российские мыслители рассматривают человека в единстве с миром не столько материальным, сколько духовным. Человек находится в единстве с миром, с основаниями бытия, в целостности и всеединстве.

Российская общественная наука создала основополагающие принципы методологии социально-гуманитарного познания, которые воспринимаются не только российской, но и западной современной наукой. К этим принципам относится идея универсализма, аксиологический и ценностно-этический подходы.

Список литературы

[1] Покидченко М.Г. Социально-экономическая мысль России середины XVIII – начала XX в. // Пути развития экономики России: теория и практика. – М.: ИНФРА-М, 2005. - С. 35.

[2] Железнов В.Я. Россия /Die Wirtschaftstheorie der Gegenwart/ Wien: Verlag von Julius Springer. 1927/ Bd.1. // Историки экономической мысли России – М.: Наука, 2003.

[3] История русской экономической мысли / Под. ред. А.И.Пашкова. - М.,1955 -1966. В 3-х томах.

[4] Истоки: социокультурная среда экономической деятельности и экономического познания. (Текст) / Редкол.: Я.И. Кузьминов, В.С. Автономов, О.И. Ананьин и др.; Нац. Исслед. Ун-т «Высшая школа экономики». – М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2011.

[5] История экономической мысли России в лицах. Словарь-справочник. / Под ред. Н.Н. Думной, О.В. Карамовой – М.: КНОРУС, 2007.

[6] История экономических учений: (современный этап): Учебник / Под общ. ред. А.Г. Худокормова. – М.: ИНФРА-М, 2009.

[7] Алпатов А.А. О законе стоимости. Концепция двух экономических равновесий // «Вопросы экономики и права» , 2010, № 2.

[8] Саменкова С.Е. К вопросу о цели социального и правового государства // «Вопросы экономики и права» , 2012, № 2.

[9] Нусратуллин И.В. Теоретические аспекты нарушения устойчивого развития рыночной экономики в свете неоклассической теории // «Вопросы экономики и права» , 2011, № 10.

КРОСС-ТЕХНОЛОГИИ СИТУАЦИОННОГО ЦЕНТРА КАК ИНФРАСТРУКТУРА КОЛЛЕКТИВНОЙ МНОГОДИСЦИПЛИНАРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В.А. Филимонов

Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Омский филиал
644099, Омск, ул. Певцова, 13, Россия
filimono@ofim.oscsbras.ru
тел: +7 (3812) 23-65-67, факс: +7 (3812) 23-45-84

Ключевые слова: *системный анализ, рефлексивный анализ, эвристика, рефлексивный театр, быстрое прототипирование*

Abstract

An approach to the organization and management of collective multidisciplinary activity is offered. The approach is based on system of "rigid" and "soft" methods. The instrument of realization of the approach is the service team of the situational center. The reflexive analysis is one of important components of the approach.

Введение

Основная задача состоит в организации коммуникации многодисциплинарного коллектива (проектной группы) в процессах проектирования и управления сложными развивающимися системами [1]. Предполагается, что эта задача является актуальной.

Целью является создание инфраструктуры, с использованием ресурсов которой проектной группой ставится и решается указанная выше основная задача.

Предлагаемый подход является детализацией системного анализа [2, 3].Технические компоненты инфраструктуры формируются на основе ресурсов ситуационного центра. Информационные компоненты формируют кросс-технологии [4, 5]. Используются «жёсткие» и «мягкие» методы формализации и интерпретации. Организационные компоненты формируются специализированной сервисной командой ситуационного центра (методолог, игротехник, планшетист) [6].

1 Концепция подхода

Сложность постановки и решения многодисциплинарных задач даёт основание применить для этих целей подход на основе кросс-технологий ситуационного центра [7]. Особенности подхода следующие:

- Понятия всегда рассматриваются как части «клеточек» [8]. Соответственно, построение «клеточек» требует чёткого понимания специфики исследователя (субъекта), логики и онтологии.
- Исследовательский коллектив формирует виртуальную систему (универсум в трактовке П.С. Порецкого) определений, понятий, «клеточек» и т.п. Подчеркнём, что универсум актуален только для конкретного коллектива и проекта.
- Формирование универсума и прочих систем начинается с формирования «Экран»-прототипов. Характеристика такого прототипа: это наиболее простой вариант системы, содержащий наиболее сложный компонент.
- Инфраструктурой исследования являются кросс-технологии ситуационного центра.

Термин «кросс-технологии» отражает перекрёстное взаимодействие различных систем и процессов. Примерами являются термины «кросс-сенсорный», «кросс-команды», «кросс-

рынки». Кросс-технология является вторым слоем (уровнем) интеграции компонентов. Например, взаимодействие зрения и слуха может интегрироваться в процессе обучения с одновременным использованием лево- и правополушарных методик представления информации.

Одно из направлений дальнейшего развития управления человеческими ресурсами связано с построением «машин» и технологий, ингерентных [2] субъектам управления. Это требует, в свою очередь, наличия технологий оперативного выбора и построения базиса, адекватного задачам, которые ставит и решает субъект. В качестве таких «машин» мы видим ситуационные центры.

В качестве варианта «жёсткой» формализации, ориентированной на сфокусированное рассмотрение, предложена система формальных методов [7]. В качестве примера одного из методов здесь рассмотрен формальный рефлексивный анализ В.А. Лефевра. На противоположный результат — расфокусирование — ориентирован «мягкий» вариант: рефлексивный театр ситуационного центра (РТСЦ) [9, 10].

2 Рефлексивный анализ В.А. Лефевра и его реализация

Описанный в книгах [11, 12] математический аппарат рефлексивного анализа В.А. Лефевр квалифицировал как «контуры фундаментальной психологии». Концепция анализа основана на термодинамической модели нейронной сети мозга. Исходные предпосылки опираются на такие фундаментальные понятия-полюсы как «положительный» (добро) и «отрицательный» (зло), а также «союз» и «конфликт». На основе этих понятий и нескольких достаточно естественных аксиом строится система рефлексивного анализа, которая позволила, в частности, объяснить феномен «золотого сечения», а также обнаружить существование двух этических систем, различающихся классификацией взаимодействия «добра» и «зла».

Одним из ключевых понятий в науке является понятие субъекта. При всём обилии трактовок понятия субъекта представляется исключительно интересным подход В.А. Лефевра. С одной стороны, феномены сознания, обычно ассоциируемые с субъектностью, представлены универсальным формальным аппаратом, основанным на законах термодинамики. С другой стороны, представлено обоснование гипотезы о существовании у физических тел внешних эйдосов-навигаторов, которые потенциально могут формировать субъектность [13].

Рефлексивный анализ позволяет повысить «глубину переработки» результатов экспериментальных исследований за счёт формализации логики и детализации процесса оценки. Так, описанный в [14] эксперимент по влиянию магнитного воздействия на суждения о степени виновности субъектов был соответствующим образом формализован, что позволило получить дополнительную информацию о процессе оценки [15]. В частности, для данного эксперимента была обнаружена инверсия шкалы оценки «присяжных»: позитивным полюсом вместо «невиновности обвиняемого» стала «суровость наказания». Данный пример может быть использован для формализации аналогичных исследований. Результаты служат также основанием для проведения более масштабного эксперимента по категориальной оценке ситуаций, который планируется осуществить в рамках очередной ежегодной конференции «Рефлексивный театр ситуационного центра-2013».

Превращение теории в рабочий инструмент достигается созданием технологий её использования и обучения. По инициативе В.А. Лефевра было создано учебное пособие по математике для школьников [16]. В настоящее время при поддержке РГНФ реализуется проект «Создание интерактивной версии модели поведения группы на основе теории рефлексивных игр В.А. Лефевра с использованием кросс-технологий». В ноябре 2013 г. модель и учебные материалы будут доступны на сайте *www.trizkin.ru*.

3 Рефлексивный театр ситуационного центра

Для достижения баланса «жёстких» и «мягких» методов мы используем концепцию рефлексивного театра ситуационного центра. Концепция основана на том, что участники по созданным «жёстким» схемам своего исследования создают варианты художественной реализации сценариев, соответствующих этим схемам. От проектов типа «Станцуй свою диссертацию» (Dance your PhD - *http://gonzolabs.org/dance/*) РТСЦ отличается разнообразием форматов представления, использованием полиэкранов, и, главное, рефлексивным комментарием, а также мониторингом процессов исполнения и комментирования как целого. Рефлексивные операции инициируются и выполняются сервисной командой ситуационного центра, а также самими участниками.

Отличия рефлексивного театра от аналогов, использующих идею театра и мобилизацию креативности, следующие:

- основной режим работы – длительное сопровождение сложного проекта, который реализуется достаточно стабильным коллективом, причём каждая сессия – не изолированное мероприятие, а часть «*проектного сериала*», история которого сохраняется и анализируется;
- одновременно и параллельно используются аналитические инструменты, в особенности схематизация, а также художественные средства (фрагменты художественных произведений, притчи, коаны, аудио- и видеофрагменты фильмов и т. п.);
- актёры (методологи и игротехники сервисной команды ситуационного центра) могут использовать театральные технологии и реквизит;
- строятся «*зеркала*» (в частности психологические портреты и характеристики компетентности), всех участников процесса;
- наконец, театр является именно рефлексивным, поскольку все действия, рефлексивные в том числе, сопровождаются рефлексивными комментариями, логическими и/или художественными, на соответствующих полиэкранах.

Использование параметров, измеряемых с помощью медицинских приборов, даёт возможность дополнительного исследования и мобилизации человеческих ресурсов.

Ещё одним примером создания базиса, адекватного субъекту, как индивидуальному, так и коллективному, а также адекватного задаче, решаемой этим субъектом, является тай-цзы – китайская философия, позволяющая ставить и решать задачи различного уровня. Схемы тайцзи являются достаточно универсальными инструментами достижения ингерентности, поскольку всегда ориентированы на использование естественных механизмов функционирования и развития различных систем.

Конференции «РТСЦ», включающие как научные доклады, так и демонстрацию фильмов, инсталляции и т.п., проводятся ежегодно, начиная с 2007 г. Часть конференционных мероприятий проводится дистанционно. В 2011 г. на сайте конференции *http://www.ofim.oscsbras.ru/~rtsc2007* был размещён секретарь конференции Бенедикт – интеллектуальный агент-инф, разработанный с использованием средств фирмы «Наносемантика» *http://nanosemantics.ru/solutions/infs/*.

Заключение

Дальнейшее развитие подхода ориентировано, в первую очередь, на повышение доступности его использования [17]. На это нацелена облачная реализация компонентов, использование когнитивной графики [18], создание объясняющих текстов и кейсов, по примеру «бизнес-романов» Э. Голдратта [19]. Отдельным направлением является кинематографическая реализация соответствующих сюжетов, для чего в рамках РТСЦ создана киностудия.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РГНФ (грант 13-06-12009).

Список литературы

[1] Филимонов В.А. Исследовательский комплекс «Ген-Гуру» (эскиз многодисциплинарного проекта) // «Знания-Онтологии-Теории» (ЗОНТ-07). Матер. Всеросс. конф. с междун. участием 14-16 сентября 2007 г., Новосибирск // Новосибирск: Ин-т математики им. С.Л.Соболева СО РАН, Т.1, с. 24-31.

[2] Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ. – М.: КНОРУС, 2010. – 234 с.

[3] Филимонов В.А. Учебно-исследовательский ситуационный центр – полигон для команды системных аналитиков // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического ун-та, Вып. 5 (31), 2010, с. 156 – 159.

[4] Информационные технологии для ситуационных центров / Анисимов О.С., Берс А.А., Жирков О.А. и др. /Под науч. ред. В.А. Филимонова // Омск : Изд-во ОГИС, 2010. - 215 с. *http://www.ofim.oscsbras.ru/~filimono (дата обращения 30.03.2013).*

[5] Филимонов В.А. Кросс-технологии ситуационного центра для искусственного интеллекта /| Тринадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012 (16-20 октября 2012 г., г. Белгород, Россия): Труды конференции. Т.4. - Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. С.188-194.

[6] Филимонов В.А. Спинной мозг ситуационного центра // «Ситуационные центры и перспективные информационно-аналитические средства поддержки принятия решений». Сб. материалов Междун. науч.-практ. конф. 7 - 9 апреля 2008 г. // М.: Российская Академия гос. службы, 2009, с. 361-366.

[7] Мухаметдинова С.Х., Филимонов В.А. Кросс-технологии ситуационного центра в управлении коллективной проектной деятельностью. - Омск: Омский гос. ин-т сервиса, 2012. - 120 с.

[8] Зиновьев А.А. Логический интеллект – М. : Изд-во Московского гуманитарного ун-та, 2005. – 284 с.

[9] Рефлексивный театр ситуационного центра (РТСЦ-2007) // Материалы Всеросс. конф. с междун. участием. - Омск: Омский гос. ин-т сервиса, 2007.- 140 с. *http://www.ofim.oscsbras.ru/~filimono* (дата обращения 30.03.2013)

[10] Рефлексивный театр ситуационного центра (РТСЦ-2011) // Материалы 5-й Всеросс. конф. с междун. участием. - Омск: Омский гос. ин-т сервиса, 2012.- 110 с. *http://www.ofim.oscsbras.ru/~filimono* (дата обращения 30.03.2013)

[11] Лефевр В.А. Алгебра совести. – М.: Когито-центр, 2003. – 426 с.

[12] Лефевр В.А. Лекции по теории рефлексивных игр. – М.: Когито-центр, 2009. – 218 с.

[13] Лефевр В.А. Что такое одушевлённость. – М.: Когито-центр, 2013. – 125 с.

[14] Young L., Camprodon J.A., Hauser M., Pascual-Leone A., Saxe R. Disruption of the right temporoparietal junction with transcranial magnetic stimulation reduces the role of beliefs in moral judgments // *PNAS* 107 (15): 6753–6758. doi:10.1073/pnas.0914826107. PMC 2872442. PMID 20351278.

[15] Филимонов В.А. Пример применения рефлексивного анализа для экспертизы, связанной с категоризацией // Материалы междун. науч.-практ. конф. «Профессиональное образование в развитии региона и общества». - Омск: Омский гос. ин-т сервиса, 2012. - С. 43-44.

[16] Филимонов В.А. Алгебра логики и совести / Вступительное слово В.А.Лефевра // Учеб. пособие для старших классов общеобразовательных и профильных школ. - Омск: ОГИС, 2006.- 72 с. *http://www.ofim.oscsbras.ru/~filimono* (дата обращения 30.03.2013).

[17] Филимонов В.А. Технологии ситуационного центра для социальной инженерии // Проблемы управления в социальных системах, Т. 1, Вып. 2, 2009. - С. 63–74. *http://www.lib.tsu.ru/mminfo/2011/000393746/02/image/02-063.pdf* (дата обращения 30.03.2013)

[18] Филимонов В.А. Организация когнитивной экспертизы в исследовательском комплексе «Ген-Гуру» // «Знания-Онтологии-Теории» (ЗОНТ-2011). Матер. Всеросс. конф. с междун. участием 3-5 октября 2011 г., Новосибирск. - Новосибирск: Ин-т математики им. С.Л.Соболева СО РАН, Т. 2. - С. 113-116.

[19] Голдратт Э. Критическая цепь. – М.: Изд-во ТОС Центр, 2006. – 272 с.

СООТНОШЕНИЕ ПОНЯТИЙ ЗНАК И ЗНАЧЕНИЕ В ИНТЕРСУБЪЕКТИВНОМ УПРАВЛЕНИИ И ОПИСАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОЗНАВАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СУБЪЕКТОВ

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: *интерсубъективное управление, знак и значение, сознание*

Abstract

Determination of the external and internal space of the subject and evolution layers of the matter. Attention of the subject and its information, time, and physiological characteristics. The ratio of signs and meanings in the external and internal spaces of the subject. The influence of the areas intersection of signs and meanings of subjects on inter-subjective understanding in communication and control. This article gives an subjects types description according to their cognitive performance and the need to consider the impact of these differences in the inter-subjective control.

Введение

Управление в системе, в которой присутствуют субъекты, может иметь два аспекта:

- психологический (витальный);
- сознательный (ментальный), напрямую связанный с познавательными способностями субъектов и способностями адекватно реагировать на ситуацию интеллектуально, вне влияния психологических факторов.

Психологический аспект связан с рассмотрением различных типов психики субъектов и связи этих типов с поведением на психологическом уровне.

В этой работе делается попытка определить различные познавательные характеристики субъектов на уровне сознания (ментальном). При исследовании интерсубъективного управления в системах, элементами которых могут являться субъекты, в данный момент предполагается, что все субъекты обладают равными внутренними характеристиками по отношению к пониманию текущей ситуации и к применению собственного опыта для управления в текущей ситуации. Различия в этих характеристиках будут определять особенности принятия решений и управления у различных типов субъектов.

В самом начале целесообразно уточнить определения некоторых понятий в контексте задач именно этой статьи.

Субъект – выделенная в пространстве форма живой материи.

Объект – выделенная в пространстве форма (поток) неживой материи.

Информация - любое изменение внешнего или внутреннего пространства субъекта или объекта, фиксирующееся в памяти внутреннего пространства.

Управление – совершение определенного ментального действия и/или движения формы или части формы субъекта (внутреннее пространство) во внешнем пространстве на основе информации о состоянии внешнего и внутреннего пространства в пределах единицы времени внимания.

Проблема перекодировки образов объектов внешнего пространства, прошедшие через органы чувств, в образы и смыслы внутреннего пространства, т.н. психофизическая проблема, не рассматривается в данной работе. Предполагается, что органы чувств и способность мозга к

сохранению (память) и интерпретации информации от органов чувств, сформировавшиеся в процессе эволюции, также совершенствовались в процессе естественного отбора по принципу адекватности восприятия и принятия решений, в пределах достаточных для выживания субъектов. С другой стороны, постоянное изменение внешнего пространства вызывают изменения внутреннего состояния субъекта, как на физическом уровне, так и на психическом уровне. В этом смысле внешнее пространство постоянно становится частью внутреннего.

1 Внешнее и внутреннее пространство субъекта и многослойность материи

Прежде чем перейти к основной теме статьи хотелось бы отметить, что к фундаментальному свойству материи можно отнести её многослойность. Бесконечность материи проявляется как в пределах одного слоя, так и в количестве слоев. Каждый слой имеет свои особенности реализации физических законов. Существуют законы, общие для всех слоев, в различные времена по-разному называемые, и дошедшие до наших дней в виде законов философии. В процессе эволюционных изменений при переходе материи от неживой к живой материи животного мира и в последующем к человеку можно представить многослойность материи в виде нескольких слоев, имеющих между собой определенные различия (рисунок 1).

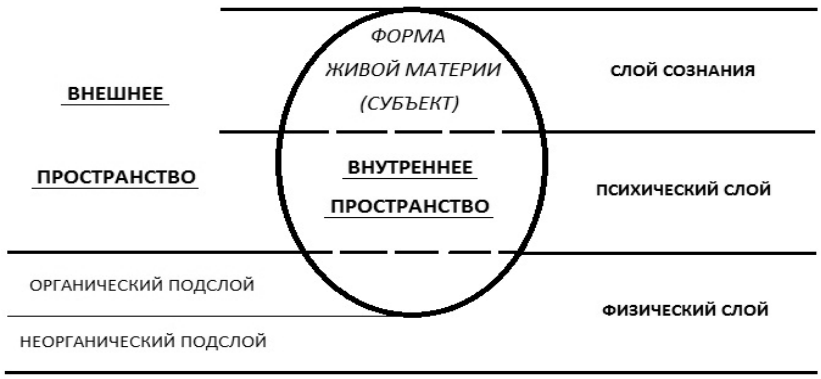


Рисунок 1 – Многослойность внешнего и внутреннего пространства

Названия слоям даны с некоторой степенью условности. Также нужно уточнить, что в научной традиции два верхних слоя на рисунке 1 в данный момент чаще всего относят к функции физического слоя, а в религиозной традиции два верхних слоя обладают своей субстанциональностью со своими механизмами (законами) взаимодействия и реализации причинно-следственных связей. Процесс реализации действия у человека в физическом слое всегда проходит через слой сознания как соединение информации о текущей ситуации с прошлым опытом, а потом идет реализация принятия решения в физический слой. В религиозных традициях понимания реальности слой сознания также субстанционален, как и физический слой, и причины, созданные на уровне мысли или чувства, на уровне сознания будут иметь тоже свои следствия и на этом же уровне и в дальнейшем на физическом.

Если рассматривать эти три слоя с научных позиций, то к физическому слою можно отнести органическую и неорганическую материю, к психическому слою - те свойства, отличающие *функционально* органическую материю животного мира от неорганической материи, и к слою сознания можно отнести те особенные *функциональные* свойства 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 же, нужно понимать, 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.

В чем же основные функциональные различия материи между слоями, которые можно описать с помощью понятий материя, энергия, информация, пространство, движение, время, управление, форма?

Объекты неживой материи осуществляют свое движение в пространстве-времени на основании законов физики (или реализации свойств энергии в соответствии с законами физики). Форма (объект или поток) неживой материи не управляет собственным движением в пространстве-времени.

В слое психической эволюции живой материи животного мира мы видим, что живая материя совершенствует управление движением собственной формы для реализации движения этой формы во внешнем пространстве вопреки действию законов физики на основе *информации* о внешнем пространстве. Камень не может забежать на гору и не может получить и использовать информацию о том, что на горе прыгает мышка, которую можно съесть.

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 [1]. Это управление материей внешнего пространства сегодня превышает на порядки простую потребность выживания человечества и даже начинает угрожать его существованию. Но научившись управлять рукой, а точнее своим вниманием (или осознанностью) в процессе обучения управления рукой, и видя внешний результат этого управления, человек получил *возможность управления 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 объекте в течение длительного времени. Сложность удержания внимания на одном объекте длительное время каждый может проверить на себе. Тренировкам управления внимания особое место отводится в различных направлениях йогических практик.

2 Внимание субъекта и осознание настоящего времени

Что же такое внимание и каковы его характеристики?

Во-первых, мы ощущаем «жизнь» и материю внутреннего и внешнего пространства только в пространственных и временных пределах нашего внимания. Это осознанное внимание имеет у человека вполне определенные *пространственные, временные* характеристики и характеристики *движения*. В работе К. Анохина [2] показано, что для формирования ощущения осознанности на данном этапе эволюции человека необходимо возникновение устойчивого циклического возбуждения (реверберации) между двумя зонами коры головного мозга – зоной, принимающей информацию о материи внешнего пространства от органов чувств и зоной памяти, которая семантически связана с поступающей информацией. Время, необходимое для создания такого циклического возбуждения равно около 200-400 миллисекунд. Это и есть реальный *диапазон «настоящего» времени* у субъекта человеческого этапа эволюции. Косвенно, немного в другом временном диапазоне, с этим связана и способность воспринимать покадровый показ слайдов в виде непрерывного кино (у человека 24 кадра в секунду создают ощущение непрерывности изменения изображения, у мухи для этого необходимо уже 300 кадров в секунду). Если информационно событие меньше этого времени, то, скорее всего, оно не попадет в наше осознание и останется как бы незамеченным. Таким образом, осознанность связана с определенными временными свойствами скорости сравнения поступающей от органов чувств информации с памятью (прошлым опытом). Кстати у ранних форм живой материи, в

частности у мух, зрительное восприятие фиксирует более короткие по времени события, но с гораздо меньшим разрешением (дискретностью). В художественной литературе есть очень интересный рассказ И. Тургенева «Разговор» [3] о беседе двух горных вершин, для которых осознание одного кадра внешнего пространства происходит раз в тысячу лет. *Диапазон «настоящего» времени* составляет 1000 лет. Соответственно в осознание попадают события и объекты только с тысячелетним периодом. Это наводит на мысль о том, каким будет восприниматься мир, если время сравнения информации органов чувств и информации памяти будет 10 000 лет, 1 000 000 лет?

Время сравнения информации органов чувств и информации памяти можно назвать единицей времени внимания (кадра осознанности) для данного вида субъектов живой материи. Таким образом, *единица времени внимания вида субъектов* есть минимальная длительность внешнего или внутреннего по отношению к форме субъекта, события при котором это событие попадает в осознание (внимание) субъекта.

Исходя из наличия единицы времени внимания можно сказать, что субъект планирует свое поведение (движение) исходя из прошлых событий внешнего пространства (с задержкой пропорциональной скорости распространения информации во внешнем пространстве) в диапазоне единицы собственного времени внимания. Разные временные периоды осознанности (или внимания) в процессе эволюции так же давали определенные преимущества или недостатки в борьбе субъекта за выживание. Например, человек только делает замах, а муха уже улетает. Для неё это движение длится уже слишком долго в единицах времени её внимания, и она спокойно успевает среагировать. Наверное, можно говорить о наличии у каждого вида субъектов живой материи своей единицы времени осознанности (внимания), соотнесенной с периодом планетарного вращения (день, год) и с размерами и скоростями движения собственной формы.

Временной параметр осознанности восприятия (единица времени внимания) живой материи наряду с *пространственными размерами формы* и *скоростями движения формы в пространстве* в сравнении со скоростями движения других объектов и субъектов тоже создает определенные условия выживания вида субъектов.

Другим параметром осознанности (внимания) может быть *информационная емкость внимания* в единицу времени внимания для данного вида субъектов. Косвенно эта емкость связана с площадью возбуждения коры головного мозга субъекта. И это расширение фиксируется на физиологическом уровне. В состоянии обычной активности сознания субъекта томограф фиксирует очаговое возбуждение отдельных участков коры головного мозга. При переходе субъекта к рисованию активность коры головного мозга охватывает гораздо большие участки, что увеличивает информационную емкость внимания и обеспечивает более широкое, целостное и непрерывное восприятие мира. Видимо для рисования нужна увеличенная информационная емкость внимания, связанная с увеличением пространства внимания.

В связи с тем, что наше ощущение жизни, управление телом и умственная деятельность ограничена этой единицей времени внимания, то от того насколько расширено или сужено внимание зависит *степень фрагментарности восприятия мира.* Чем более узкое внимание, тем меньше его информационная емкость в единицу времени внимания и тем более фрагментарной (дискретной) будет текущая «картина» мира.

Фрагментарность восприятия усложняет осознание целостных непрерывных взаимосвязей между фрагментами. Представьте пазлы одной картины разбросанные на столе. Смысл изображения на каждом пазле не соответствует и даже в чем-то искажает смысл всей картины. Если говорить только о научном знании, то сейчас фрагментация достигла такой степени, что с одной стороны, невозможно осмыслить и попытаться нарисовать целостную картину научного знания, а с другой, возникает серьезное расхождение между терминологией (знаками) и смыслами (значениями) этих терминов даже в рамках одного научного направления.

3 Соотношение Знака и Значения во внешнем и внутреннем пространстве субъекта

Теперь можно перейти к рассмотрению соотношения Знака и Значения. В аналитической философии обычно рассматривается семантический треугольник Г. Фрегге Знак-Значение-Смысл [4]. В данной работе смысл рассматривается просто как функция субъекта живой материи по адекватному соотнесению Знака и Значения, сформированной и совершенствующейся в процессе эволюции по принципу естественного отбора – неадекватность работы этой функции уменьшает шансы на выживание.

Также обязательно нужно учитывать, что форма субъекта разделяет пространство на внутреннее и внешнее по отношению к самому субъекту и соотношение Знак-Значение имеет различный смысл во внутреннем и внешнем пространстве (рисунок 2).

Рисунок 2 – Знак и Значение во внешнем и внутреннем пространстве

Группу Значений1 ВНЕП образуют объекты и потоки (процессы) физического слоя материи. Соответственно Значения1 ВНУП это субъективные образы, прошедшие через органы чувств (мембрану) и интерпретированные во внутреннее представление (психическое), а также комплекс качественных и количественных характеристик материи этих объектов, который становится научным знанием при его выражении в Знаках1 ВНЕП. Научный Опыт – знаковое описание и применение (смысл по треугольнику Г. Фрегге) значений при совершении действий во внутреннем или внешнем пространстве с пониманием их последствий (понимание следствий при создании определенной причины). Т.е. знание не просто знаковое описание закономерностей, но и опознание их в реальном мире и возможность применения этих знаний как причинно-следственных связей.

Значение1 ВНЕП бесконечно для познания субъектом, если не принимать во внимание тот фантастический момент, когда субъект сам сможет создать идентичное Значение1 ВНЕП для его использования в интерсубъективном общении вместо Знака1. На этом бесконечность исчерпывается и познание Значения1 ВНЕП заканчивается. Значение1 ВНЕП будет равно Значению1 ВНУП и Значение1 ВНУП из субъективного образа становится объективным.

Группу Значений2 ВНУП образуют наши субъективные ощущения радости, горя, цвета, вкусовые и т.п. ментальные (сознание), витальные (психическое), физические, значений которых нет во внешнем пространстве.

Коммуникация субъектов, включающая передачу информации и управление, требует перехода от Значений 1 и 2 ВНУП во внешнее пространство к Знакам 1 и 2 ВНЕП и через них передается информация другим субъектам. На данном этапе эволюции у субъектов нет возможности для взаимопонимания и управления друг другом обмениваться субъективными Зна-

чениями 1 и 2 ВНУП. В связи с этим используются объективные для всех субъектов Знаки1 ВНЕП для Значений1 ВНУП и ВНЕП. Но Знаки сами по себе без субъектов и объектов не несут, в данный момент эволюции, в себе Значений.

Знаки2 ВНЕП для выражения во внешнем пространстве Значений2 ВНУП больше связаны с художественным творчеством, с музыкой, с живописью, когда субъект свои ощущения переносит в музыкальное произведение или на холст (одно из направлений живописи так и называется «импрессионизм») и субъект, имеющий сходный жизненный опыт, получает от этих Знаков2 ВНЕП сходные Значения2 ВНУП. Художественное творчество имеет свои закономерности и в данной статье в дальнейшем мы не будем его касаться, остановившись на рассмотрении соотношения Знаков1 и Значений1.

Отсюда можно сделать такие общие определения:

- *Знак* – это присваивание определенного одного простого дискретного фрагмента восприятия органов чувств (изображение, звук, …) или действия, объединяющего разнообразный сложный непрерывный опыт, по какому-либо признаку, в однородный опыт (Значение), т.е. это есть определенная редукция;
- *Значение* – объект (или процесс (поток)) *внешнего пространства* (физическое) или совокупность ощущений - опыта (витального, ментального, духовного) или комплекса знаковых описаний (ментальных), принадлежащих *внутреннему пространству* (психическое).

4 Эволюционное изменение соотношения знака и значения

На ранних стадиях эволюционного развития живой материи у субъектов животного мира Знак1 ВНУП совпадал со Значением1 ВНУП. Из-за неразвитости органов чувств объекты внешнего пространства переводились во внутренние образы упрощенно – лягушка воспринимает большую темную поверхность как врага (летящая птица), а быстро движущуюся точку как пищу (муха). Хотя во внешнем пространстве это может быть совсем не птица и не муха. Знак здесь по определенному пространственному признаку объединял родовые Значения – опасность или пища. Эволюционное усложнение органов чувств и обработки информации на психическом уровне позволило воспринимать мир более разнообразным и произошло постепенное разделение простого дискретного одно-образного Знака и более сложных непрерывных разно-образных объектов. Опыты З. Зориной с животными [5], показывают, что они легко обучаются различать различные Знаки и соединять их со Значением при поиске пищи. Существуют и звуковые Знаки. Они первоначально больше были связаны непосредственно с ощущениями субъектов. Но ощущение страха или агрессии меняло и форму субъекта. Страх придает одну форму телу (Знак), агрессия – другую.

При переходе к человеческому этапу эволюции живой материи субъект, развивая способность к изменению внешнего пространства, еще дальше, чем у высших субъектов животного мира, развел Знак и Значение, создавая и модифицируя формы своих Знаков, уже далеко оторванные от форм своих Значений.

Знаки, вынесенные за пределы внутреннего пространства, приобретают свое Значение как средство внешнего сохранения знаний и интерсубъективного общения. Но нужно совершенно четко понимать, что на данной ступени эволюционного развития человека, субъекты в основном при общении обмениваются только Знаками и не могут передавать Значения из собственного внутреннего пространства, ни во внешнее, ни во внутреннее пространство другого субъекта. Эволюционный процесс идет по спирали и если принять за реальность действия индийского святого Сатья Саи Бабы по материализации физических предметов с уровня сознания, то эти предметы для него перестали быть «вещью в себе» по Канту и внешнее Значение соединилось с внутренним и также он смог своими действиями понимая Значение1 ВНУП создать Знак1 ВНЕП равный Значению1 ВНЕП и перейти от субстанции слоя сознания к суб-

станции физического слоя. Пока же в интерсубъективном общении мы обмениваемся Знаками ВНЕП, т.к. не можем обмениваться Значениями ВНУП.

Итак, Знак1 ВНЕП указывает на Значение1 ВНЕП – объект или поток – и через Знак1 ВНУП указывает на Значение1 ВНУП.

В самом простом варианте по пространству Знаков1 ВНЕП субъекты, носители одного языка, имеют наибольшее совпадающее пересечение (рисунок 3). Соответственно у каждого субъекта максимально однозначно интерпретируется переход от Знака1 ВНЕП к Знаку1 ВНУП. А вот Значения1 ВНЕП и Значения1 ВНУП этих понятных всем Знаков1 не совпадают в личном опыте (внутреннем пространстве) в гораздо большей степени чем Знаки1 (рисунок 4). И если на уровне Знаков1 при интерсубъективном общении мы вроде бы понимаем друг друга, то на уровне Значений1 ВНУП всё гораздо сложнее. И если в древности для разобщения людей при строительстве Вавилонской башни им дали разные языки, то сейчас можно констатировать, что имея один язык (Знаки) люди очень часто не понимают друг друга, т.к. одному Знаку соответствует совершенно другое субъективное Значение. Пересечение зон Знака для разных субъектов, во-первых, и, во-вторых, зон Значений ВНУП соответствующих Знаков в итоге дает понимание при интерсубъективном общении.

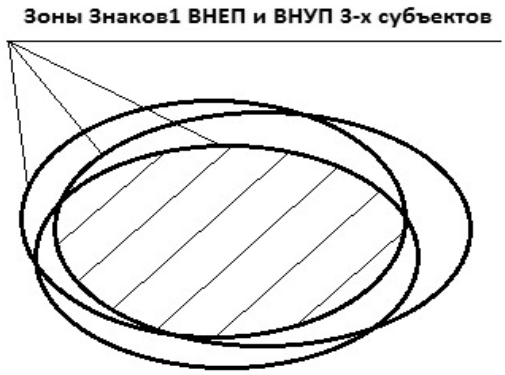


Рисунок 3 – Зона пересечений Знаков1 ВНУП и ВНЕП 3-х субъектов

Рисунок 4 – Зона пересечения Значений1 ВНУП 3-х субъектов

Но главное в том, что зону пересечения Значений1 ВНУП 3-х субъектов на рисунке 4 будут составлять в основном простые бытовые Значения. Существует группа бытовых общеупотребительных Значений для которых опыт большого множества субъектов совпадает и на базе этого возникает иллюзия взаимопонимания. Но когда дело доходит до других Значений, запечатленных в субъективном опыте, выясняется, что очень много Значений просто не совпадают у разных субъектов и нужно иметь «расширенное» сознание и опыт, чтобы понять и вместить весь опыт Значений субъектов и чтобы достаточно объективно, хотя бы для себя, вступать в интерсубъективное общение.

Современное образование, кстати, направлено на приведение к максимальному соответствию Знаков и Значений у различных субъектов. Одной из основных задач любого обучения (школы религиозной, философской, научной) является решение проблемы создания и удержания совпадающих зон Значений для одинаковых Знаков для различных субъектов этой школы.

Несовпадение полей Значений ВНУП при совпадении полей Знаков ВНЕП и ВНУП у субъектов это одна из познавательных характеристик в группе субъектов, показывающая серьезные проблемы интерсубъективной коммуникации и управления.

5 Познавательные характеристики субъектов

Следующей характеристикой субъекта может быть наличие границы познания у субъекта, определив её как разницу Значения1 ВНЕП и Значения1 ВНУП. Также условно можно определить границу познания группы субъектов или даже всех субъектов как единого целого по отношению к объективному миру. Но в последнем случае есть одна проблема: какими познавательными характеристиками или попросту сознанием должен обладать такой субъект, чтобы попытаться оценить границу познания всех субъектов в текущий исторический момент? Обычно, осознание общей границы познания в определенный исторический момент происходит через некоторое (100-500 лет) время в будущем, за счет естественного отмирания массы незначительного знания. Но граница познания настоящего времени постоянно остается недоступной для субъектов этого времени.

Границу познания субъекта с учетом многослойности материи можно представить как:

- граница познания в пределах одного слоя;
- граница познания при переходе в другие слои или просто незнание других слоев.

Очевидно, существует на данный исторический момент общечеловеческая граница познания внутреннего пространства и внешнего пространства, подтвержденная практическими опытами и обобщенная теоретическими описаниями.

С другой стороны, мы имеем множество границ познания субъектов, формирующих общечеловеческую границу.

Наверное, ни один субъект не может полностью осознать опыт общечеловеческий. Но и в границах познания субъекта есть две задачи – постоянное расширение границы познания, а вторая – это преодоление фрагментарности внутри собственной границы познания, достижение большей связанности фрагментов (иначе говоря – можно знать много частей, но не видеть при этом общей картины).

Когда некоторые Знаки, а это в основном философские Знаки, имеют наиболее высокий уровень обобщения и соответственно высочайшую информационную ёмкость, то получается такая ситуация, когда до сих пор в философии не формируются «новые» знания, а субъекты лишь пытаются приблизится к Значениям (субъективному опыту) Знаков и их соотношениям уже сформированными давно в истории субъектами с расширенным сознанием. В естественных науках за счет дальнейшей фрагментации Знаков и Значений, действительно создаются новые отношения знаков и опыта, а в философии этого не получается. Иллюзия развития философского знания создается его дальнейшей фрагментацией и проработке деталей, хотя философия по сути своей является наоборот синтетическим знанием.

В итоге можно перечислить несколько типов сознания субъектов:

1) по отношению к границе познания (динамическая характеристика):
   - субъекты с самостоятельно расширяющими собственную границу познания (эти субъекты вводят новые Знаки1, обращая внимание других субъектов на не выделенные ими «новые» Значения1;
   - действующие в существующей границе познания, сформированной обучением (эти субъекты в основном не создают новых Знаков1 и уточняют Значения1 не выходя далеко за их пределы);
2) по отношению к фрагментарности восприятия (статическая характеристика):
   - узко фрагментарное (дискретное) восприятие мира (такие субъекты присваивают сильно ограниченные диапазоны Значениям1 по отношению к реально возможным диапазонам);
   - широкое целостное (непрерывное) восприятие мира (в идеале это философское восприятие мира, когда в Знак1 обозначает «бездну» смысла (Значения1) и эти смыслы продолжают расширяться); вышеперечисленные типы сознаний субъектов были прекрасно описаны Г. Селье [6];
3) по направленности сознания на:
   - физический слой (предпочтение субъект отдает материальному);
   - психический слой (предпочтение субъект отдает получению удовольствия);
   - слой сознания (предпочтение субъект отдает знанию).

Также можно выделить три типа сознания по отношению к будущей динамике внешнего пространства на период управления:

- статическое внешнее пространство (физическое, экономическое, психологическое и т.п.);
- линейно изменяющееся внешнее пространство (т.е. если рост благосостояния, то он будет всегда и всегда прямолинейный);
- и только некоторые субъекты реально понимают и прогнозируют изменение будущих показателей по волновой траектории или по спирали.

Соответственно в первом случае мы имеем статические Значения1 ВНУП, во-втором - динамические прямолинейные, в третьем – динамические криволинейные. Каждый вариант пригоден в зависимости от периода времени для управления. Наиболее долгосрочное управление возможно только по динамическим криволинейным изменениям.

Заключение

Семантический треугольник Г.Фрегге Знак-Значение-Смысл имеет Смысл только при наличии в пространстве субъектов биологической материи. Субъект биологической материи и является той функцией смысла, связывающей Знак и Значение как в своем субъективном опыте (внутреннее пространство), так и в объективной реальности (внешнее пространство). Попытки аналитической философии создать базис для описания «объективного» знания не учитывают свойств субъекта биологической материи и также медленной эволюции этих свойств, что оказывает серьезное влияние на функцию смысла. С другой стороны, средствами знаковых систем никогда не будет возможности полностью описать объективную и субъективную реальность ввиду:

- ее бесконечности как в многослойности, так и внутри слоя;
- невозможности полностью непротиворечиво описать (алгоритмизировать) дискретными знаковыми средствами реальность, которая сочетает в себе и свойства дискретности и свойства непрерывности;
- ограниченности знаний субъекта, создающего знаковую систему на основе субъективного опыта, в пространстве знания всего человечества (субъективный опыт почти всегда будет объективно меньше).

В интерсубъективном управлении мы сталкиваемся с необходимостью учитывать особенности соотношения одной и той же пары Знак – Значение во внутреннем пространстве различных субъектов и внешнем пространстве мира.

Перечисленные познавательные характеристики субъектов не оказывают серьезного влияния в бытовой интерсубъективной коммуникации и управлении, но как только мы переходим к более сложной научной или технической коммуникации и управлению, то различие в текущих познавательных характеристиках субъектов приводит в лучшем случае к непониманию друг друга, а в худшем – к неадекватному управлению и возможно более тяжелым последствиям с включением в действие закона естественного отбора. Поэтому желательно учитывать наличие различных типов субъектов по их познавательным характеристикам в теории интерсубъективного управления.

Список литературы

[1] Чекалов Л.Л. Способы принятия решений в биологических системах, их эволюция и проблема описания. «Вестник Томского государственного университета. Философия. Политология. Социология» № 4, 2012. Избранные материалы всероссийской конференции. «Методология познания сложных саморазвивающихся систем». 7–9 ноября 2012 г. (Томск, 2012). с.122-129.

[2] Анохин К.В. Что происходит в мозге, когда рождается мысль? Популярная механика №11(121), ноябрь 2012. С.66-67.

[3] Тургенев И. С. Произведения в 12 томах // Полное собрание сочинений и писем в 30 томах. — М.: Наука, 1982. — Т. 10. Повести и рассказы. 1881—1883. Стихотворения в прозе. 1878—1883. Произведения разных годов. — С. 127—128

[4] Аналитическая философия / Под ред. М. В. Лебедева, А. З. Черняка. — М.: ИПК РУДН, 2006. — 622 с.

[5] Зорина З.А. Полетаева И.И. Элементарное мышление животных. Пособие по зоопсихологии и высшей нервной деятельности. М.: Аспект Пресс. 2001. 320 с.

[6] Селье Г. От мечты к открытию: Как стать ученым / Пер. с англ. Н. И. Войскунской; Общ. ред. М. Н. Кондрашовой, И. С. Хорола; Послесл. М. Г. Ярошевского, И. С. Хорола. М.: Прогресс, 1987. 368 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЫШЛЕНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ: ИНФОРМАЦИОННО-ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ

А.Е. Баранович, Д.Б. Ханковский

Институт информационных наук и технологий безопасности (ИИНТБ)
Российского государственного гуманитарного университета (РГГУ)
117534, Москва, ул. Кировоградская 25-2, Россия
barae@rambler.ru
+7 906-734-35-00, факс: +7 (495) 388-06-77

Ключевые слова: *знание, информация, мышление, моделирование, интеллектуальные системы, сложные системы, эволюция*

Abstract
A brief review of the studies carried out in recent years at the SAMT Center which modeling of thought processes in intelligent systems of different origins. The necessity of transition to the new information-evolutionary paradigm of systems analysis and modeling of complex systems and declared its phenomenological grounds. Presents a universal apparatus of the mathematical modeling of complex dynamical systems, as well as his pragmatic projections on the application of different subject areas.

Введение

Проблема организации эффективного интеллектуального управления сложными системами в целом ряде областей до сих пор не получила окончательного разрешения и относится к наиболее актуальным в теории и практике информационных наук по настоящее время.

К классу наиболее сложных из известных систем в рамках постнеклассической фазы развития науки, относятся автономные интеллектуальные системы с биологическим носителем. Интеллектуальные системы (ИС) занимают высшую иерархическую ступень по сложности вложенных классов кибернетических и физических систем в отношении их информационной характеризации. Соответственно, результаты разрешения проблемы построения эффективных и адекватных действительности моделей функционирования и поведения ИС могут быть спроецированы и на иные области моделирования и управления сложными системами различного генезиса, включая обширный класс антропогенных технических.

Целью проводимых исследований является синтез универсальных механизмов и моделей интеллектуальной деятельности (мышления) высокоорганизованных кибернетических систем. В перечень основных решаемых задач включены: алгебраическое и автоматно-сетевое моделирование автономных самоорганизующихся интеллектуальных систем, системный анализ и моделирование различных форм представления информации, знаний и информационных процессов мышления (уровней «сознание» – «подсознание»), обобщение и интеграция вышеупомянутых моделей различного генезиса.

Новизна исследований отражена в целенаправленном переходе от использования логико-бионической (нейрокибернетической) парадигмы в моделировании ИС к новой, информационно-эволюционной и разработке новой методологии исследования сложных систем, основанной на информационно-эволюционном подходе (ИЭП) к анализу и моделированию объективной реальности.

Теоретическая и практическая значимость проведенных работ заключается в разработке аппарата конструктивного синтеза и использования универсальной информационной модели сложных макросистем произвольного генезиса – *одно- и многоосновных метаалгебраических*

(метаавтоматных) систем на k-гиперпространстве семиотико-хроматических гипертопографов и семиотико-хроматических гипертопосетей (развитие теории алгебраических систем, обобщения теории графов).

В рамках ИЭП синтезированы универсальные модели образно-логического мышления уровня «сознания», интерпретирована модель информационной самоорганизации ИС – *p*-адическая модель «подсознательного» мышления («бессознательное»), конечная проекция которой изоморфна модели, построенной в рамках нейросемантического (нейросетевого) подхода, предложены механизмы интеграции выше введенных моделей мышления уровней «сознание» - «подсознание».

1 Феноменологические основания

Наиболее распространенные на сегодняшний день семиотико-логический (антропогенный) и, в меньшей мере, бионический (нейрокибернетический) подходы в предметной области, номинированной как «искусственный интеллект» (ИИ), включая гибридные на их основе, и отчасти, имитационный, до настоящего времени не сумели предложить универсальные механизмы решения целого ряда актуальных проблем в исследовании глубинных механизмов функционирования ИС [6-7].

1.1 Информационно-эволюционный подход

В работах [1-4] рассмотрены основы аксиоматической теории обобщения класса теоретико-графовых объектов, предназначенных для моделирования информационной составляющей сложных систем (уровня Стандартной физической модели), от информационных форм (прообразов) существования физических систем неживой («косной» по В.И. Вернадскому) природы, характеризующих их структуру и организацию, через сигналы процессов информирования (системного взаимодействия) до данных и знаний ИС различного уровня эволюции.

Феноменологический базис конструктивного синтеза предложенного класса моделей составляет ИЭП к системному анализу и моделированию (САМ) объективной реальности (ОР) в рамках её Метаистории (MetaHistory), сформулированный в [5, 6, 7] и основанный на общих механизмах генезиса, существования и эволюции систем ОР (СОР).

Сущность предлагаемого ИЭП («действие») к САМ ОР заключается в использовании в процессе анализа и моделирования СОР трёх базовых методологических компонентов:

1) информационной характеризации ОР,
2) информационной интерпретации эволюции ОР,
3) информационного моделирования ОР,

необходимо сильно связанных общей категорией «информация» (И.).

В основание аксиоматико-терминологической платформы ИЭП положены следующие «три кита»: *информация, эволюция, моделирование* [8]. Первичные категории «объективная реальность» и «система» естественным образом позаимствованы из предметных областей философии и общей теории систем и получают в контексте ИЭП собственную, вполне определенную, уточненную интерпретацию [19].

С позиции ИЭП системы ОР в процессе своего развития прошли три основных этапа эволюции, порождая на каждом из них собственный подкласс СОР: физических систем неживой природы, телеологических кибернетических систем, характеризуемых наличием механизмов энергоинформационного адаптивного управления собственным существованием во внешней среде и, ИС как КС, обладающих способностью в процессе адаптивного управления собственным существованием во внешней среде оперировать информационными моделями ОР различного уровня генезиса. Тем самым, отделяя себя от «внешнего» к «пространству моделей» (субъект) мира объектов.

Само понятие «искусственный» (интеллект) в контексте ИЭП теряет свой онтологический смысл, ибо уже не является таковым, переходя в разряд естественного в отношении

предшествующего этапа эволюции, вследствие принадлежности существующего класса систем ИИ к весьма ограниченному подклассу антропогенных технических ИС антропоморфного типа. Соответственно, «ИИ» должен быть охарактеризован как антропогенный естественный, в ближайшей прогностической перспективе, «вычислительный» или «технический» («машинный» по Дж. Маккарти). Что подтверждается естественным генезисом предметной области «ИИ» из области информатики (информационных и компьютерных наук). В то время как область ИС есть порождение (развитие) предметной области кибернетики («кибернетических систем») и входит, как следствие, в область «общая теория систем (системный анализ)».

Декларируемое направление, основанное на общих механизмах эволюции ИС в ОР, предлагает принципиально новые механизмы обобщения и интеграции апробированных логического (базирующегося на исторических корнях ЕЯ и вторичного к механизму информационного моделирования ИС) и нейрокибернетического (бионического / функционально-системного) направлений [9-13]. При этом в рамках ИЭП возникает конструктивная гипотеза (2) об универсальном эволюционирующем информационном механизме (базисе) интеллектуальной деятельности любых представителей ИС с произвольным носителем интеллекта [6].

1.2 Атрибутивно-ингредиентная концепция информации

Результаты информационной характеризации ОР представлены *атрибутивно-ингредиентной концепцией информации* (АИКИ, 1995-2010). Аксиоматическая система АИКИ базируется на совокупности 6 постулатов и включает базовый терминологический аппарат теории: информация, информирование, информатизация, информационный образ / прообраз, информациология [5]. В контексте АИКИ явление «искусственной» (социальной) информатизации является одним из промежуточных этапов информатизации естественной. Этапов, рекурсивно порождаемых ИС, различного уровня генезиса. В интерпретации АИКИ, всё «искусственное», созданное антропными ИС настоящего этапа эволюции, является вовсе не неестественным, а лишь вторично (антропогенно-) естественным. Соответственно, «искусственные» ИС (естественные ИС 2-го порядка), порожденные антропными ИС, в процессе эволюции могут породить естественные ИС 3-го порядка эволюции и т.д. [5, 6].

Сущность информационной интерпретации процесса эволюции ОР (в рамках общей теории систем и системного анализа) заключается в следующем: последовательные (частично упорядоченные) этапы эволюции СОР классифицируются по значениям системных параметров, характеризующих сложность и эффективность информационного взаимодействия эволюционирующих систем с ОР. В качестве интегрального показателя эффективности эволюции, можно предложить, в частности, различные варианты эволюционного потенциала сложных систем [5, 14, 15].

Согласно АИКИ, эволюция («изменение») ОР априорно характеризуется процессом естественной (объективной) информатизации ОР, что не ограничивает возможность включения на определенном этапе в процесс эволюции ИС. В антропоцентрической парадигме [16] постнеклассической науки появление антропоморфных ИС есть закономерный результат актуальной реализации ОР. Конструктивная гипотеза об информационно-управляемом циклическом характере Метаистории ОР, согласованная с антропным принципом, изложена в [5, 6].

Аппарат информационного моделирования «внешней среды» характеризует качественный эволюционный сдвиг в информационном взаимодействии СОР. Возможность формирования семейств редуцируемых друг в друга гомоморфных информационных моделей ОР, от первичных сенсорных до знаний, позволяет осуществлять эффективную адаптацию к изменениям внешней среды, целевое планирование поведения на информационном уровне и, что, весьма важно, прогнозировать будущее путем оперирования существующим «пространством» моделей в режиме «опережающего времени».

2 Аспекты математического моделирования

Большинство используемых в настоящее время моделей представления знаний базируются на вербальной характеризации и интерпретации знаний в ИС. В свою очередь, искусственные нейронные сети, их производные и аналоги (как модели функционирования нейронной структуры биологического мозга), в первоначальном, историческом контексте ориентировались на моделирование отдельных компонент сенсориума ИС и распознавание, в частности, оптических образов (в том числе, с самообучением). Исследование процессов функционирования интегрированных ИС, в частности, в отношении проблемы измеримости семантико-прагматических характеристик информации в ИС показало [17, 18], что одним из важных элементов ее решения является синтез универсальной модели всех взаимосвязанных информационных компонент ИС в динамике ее существования. Различные проекции модели-универсума должны обеспечить моделирование и сенсориума, и подсистем знаний и коммуникации, и пространство целей, и объектов внешней среды, их свойств и отношений.

В основу концепции синтеза модели-универсума И. [1, 5, 18, 20, 21], характеризующей и отображающей основные свойства информационной организации и взаимодействия произвольных систем объективной реальности (СОР) положен тезис о вторичности языка (как основы сигнально-семиотической коммуникации антропоморфных ИС) и его формальных моделей по отношению к первично-гомоморфным проективно-сенсорным и семантико-образным моделям информации в подсистемах знаний ИС. Ключевые элементы предлагаемого подхода к синтезу модели И. базируются на совокупности принципов, изложенных и обоснованных в [18, 22] и информационно-эволюционном подходе к системному анализу и моделированию сложных систем.

Абстрактной экспликацией модели-универсума И. в контексте представления и моделирования знаний является *k-гиперпространство семиотико-хроматических (СХ-) гипертопографов* $Гs$. *Гипертопограф* (с носителем V) HTG_V есть двойка вида $(V_\tau, E_{\eta\tau})$, где $V_\tau \equiv \{v_\tau\}$ - есть некоторое подмножество элементов булеана B^V с носителем V, $|V| < n$, $V_\tau \subseteq \mathsf{B}^V$, $|V_\tau| < N \le 2^n$, и $E_{\eta\tau} \equiv \{e^k_{\eta\tau}\}$ - заданное множество подмножеств $e^k_{\eta\tau}$ множества V_τ, $e^k_{\eta\tau} \subseteq V_\tau$, различной мощности $|e^k_{\eta\tau}| < k$, $1 \le k \le N$, $e^k_{\eta\tau} \in V^{(k)}_\tau$, $|E_{\eta\tau}| < m$, $E_{\eta\tau} \subseteq \mathsf{B}^{V_\tau}$, $m \le 2^N \le 2^{2^n} < \infty$.

Хроматизация гипертопографа ($\eta\tau$-графа) множеством P, где P суть вполне определенное множество («цветов») с элементами $p \in P$, областями допустимых значений p - $\lambda(p)$ и выделенными *i*-ми значениями (в случае их существования) $\lambda_i(p) \in \lambda(p)$, есть процесс приписывания различных цветов из P элементам $HTG_V : (V_\tau, E_{\eta\tau})$, когда каждому элементу может быть поставлено в соответствие некоторое подмножество цветов из заданного множества P. Гипертопограф HTG_V, хроматизированный заданным множеством цветов, есть *хроматический* $\eta\tau$*-граф* (Х-$\eta\tau$-граф) $HTG_V x : (V_\tau, E_{\eta\tau}, P)$. *Семиотизация Х-*$\eta\tau$*-графов*, осуществляется путем конструктивного поименования как элементов порождающих его множеств, так и непосредственно Х-$\eta\tau$-графа как элемента множества $\{HTG_V x\}$. Вполне определенные проекции синтезированной модели СХ-$\eta\tau$-графа порождают всех известных представителей класса теоретико-графовых моделей [1].

Семиотико-хроматическое k-гиперпространство СХ-$\eta\tau$*-графов* $Гs$ есть допустимое множество семиотико-хроматических $\eta\tau$*-графов* $\{HTG^k_V x\}$ уровня топологизации *k*, порождающие

объекты представителей $HTG_V^k x : (V_\tau^k x, E_{\eta\tau}^k x, P_\tau^k)$, $HTG_V^k x$ [1] $\in \{ HTG_V^k x \}$, $V_\tau^k x \subseteq V_\tau^k \times P^{V_\tau^k}$, $E_{\eta\tau}^k x \subseteq E_{\eta\tau}^k \times P^{E_{\eta\tau}^k}$, $P_\tau^k \equiv P^{V_\tau^k} \cup P^{E_{\eta\tau}^k}$, которого, а именно V_τ^k и $E_{\eta\tau}^k$, есть элементы соответственно булеанов B_k^V и B_{k+1}^V k-го и $k+1$-го уровней топологизации множества-носителя V.

Синтез модели потенциального *монохромного* k-гиперпространства Γs^m проведен с использованием категорий «тождества / различия» по Г.Лейбницу и теоретико-множественной парадигмы Г.Кантора путем последовательной топологизации множества-носителя гипертопографа V в булеан B_k^V уровня топологизации k ($V \equiv \mathsf{B}_0^V \subset \mathsf{B}_1^V \subset \mathsf{B}_2^V \subset ... \subset \mathsf{B}_k^V$)[2]. Булеан B_k^V уровня топологизации k, есть результат последовательной k-топологизации *множества-носителя* $\eta\tau$-графа $V \equiv \mathsf{B}_0^V$, $|V| = n$, когда на очередном этапе топологизации $i+1$ в качестве исходных неделимых и различимых элементов множества, порождающих булеан B_{i+1}^V, выступают непустые элементы булеана B_i^V. Модель k-гиперпространства Γs учитывает как особенности структуризации информационных объектов произвольного уровня вложенности, так произвольные свойства и многоместные отношения элементов исследуемых структур.

Термин «гиперпространство» задействован вследствие доказанного изоморфизма алгебр $< \mathsf{B}_{k+1}^V, (\cup, \cap) >$ и $< [GF(2)]^{|\mathsf{B}_k^V|}, (\vee, \wedge) >$, определенных относительно отображения φ: $X_i \to \vec{X}_i$, где X_i есть произвольный элемент булеана B_{k+1}^V (подмножество B_k^V) и $\vec{X}_i$ есть элемент булева k-гиперпространства $[GF(2)]^{|\mathsf{B}_k^V|}$ размерности $|\mathsf{B}_k^V|$, при биективном соответствии монохромного $G_{\eta\tau}^k \leftrightarrow \mathsf{B}_{k+1}^V \leftrightarrow [GF(2)]^{|\mathsf{B}_k^V|}$.

Развитие (обобщение) теории гипертопографов привело к формированию механизма представления двух- и более объектной произвольной монохромной теоретико-графовой модели *однообъектной* (одноточечной) *моделью*, а именно представление гипертопографа HTG_V^k уровня топологизации k элементом (представителем) булеана B_{k+2}^V $k+2$ уровня топологизации множества-носителя V и далее элементом булева гиперпространства $[GF(2)]^{|\mathsf{B}_{k+1}^V|}$ [1, 4, 23].

Модель k-гиперпространства СХ-$\eta\tau$-*графов* Γs поглощает все основные классы моделей представления декларативных знаний и посредством биективных алгоритмических процедур прямой и обратной редукции связана с семиотико-лингвистическими моделями коммуникации Дж. фон Неймана - К.Шеннона. Отношения порядка, определенные на Γs и, параметричность интервала топологизации позволяют синтезировать семейство моделей вложенных СХ-$\eta\tau$-графов, число уровней иерархии которых, определяется требованиями детализации и четкости в условиях ограничений («вычислимость») на их реализацию.

Синтез ряда новых мер и метрик на элементах Γs проецирует модель на область измеримых метрических гиперпространств, что позволяет свести задачи количественного анализа атрибутов информации к исследованию свойств k-гиперпространства Γs, а задачи исчисления метрик на Γs к задаче исчисления метрических характеристик булева пространства $[GF(2)]^{|\mathsf{B}_k^V|}$.

В работе [3] показано, что разработанный аппарат моделирования динамических систем с использованием формализма k-гиперпространства Γs представляет собой *развитие классиче-*

---

[1] В ином обозначении - $g_{\eta\tau}^k x$.

[2] $V \equiv \mathsf{B}_0^V$ - искусственный прием для граничного случая.

ской алгебраической системы $\langle A, \Psi_A, \Phi_A \rangle$ на основном множестве A, с сигнатурами операций Ψ_A и отношений Φ_A, до *метаалгебраической системы* $\langle V, \{HTG_V^k\}, \Psi_{\{HTG_V^k\}}, \Phi_{\{HTG_V^k\}} \rangle$, включающей *множество-носитель* V («urelement» в *ZFU* [23]), *основное множество* $\{HTG_V^k\}$, сигнатуры *метаопераций* $\Psi_{HTG_V^k}$ и *метаотношений* $\Phi_{HTG_V^k}$ на $\{HTG_V^k\}$ и, имплицитно, параметр топологизации k, $k \in \mathbb{N}_0$. Для финитных систем параметр топологизации k можно ввести явным образом $\langle V, k, \{HTG_V^k\}, \Psi_{\{HTG_V^k\}}, \Phi_{\{HTG_V^k\}} \rangle$.

Там же предложено использовать в качестве альтернативной динамической модели сложной системы СХ-*гипертопосеть*. Динамические процессы преобразования информации в сети моделируются *функциональными* («процедурными») *преобразователями* как *топовершинной*, так и *гипертопореберной* принадлежности (в моделях как «квантованного времени», так и времени по «наступлению события»).

Множество функциональных преобразователей информации (процедур) декларировано расширением обобщенного множества хроматических атрибутов (и их значений) СХ-$\eta\tau$-графа $P_\tau^k \equiv \{ {}_{Dc}P_\tau^k \cup {}_{Pr}P_\tau^k \}$, где *декларативные знания (Dc)* образуют известное подмножество ${}_{Dc}P_\tau^k$, ${}_{Dc}P_\tau^k \equiv {}_{Dc}P^{V_\tau^k} \cup {}_{Dc}P^{E_{\eta\tau}^k}$, а *процедурные (Pr)* - подмножество ${}_{Pr}P_\tau^k$, ${}_{Pr}P_\tau^k \equiv {}_{Pr}P^{V_\tau^k} \cup {}_{Pr}P^{E_{\eta\tau}^k}$. В результате, наряду с *подклассом данных (фактов)*, представленных известными хроматическими атрибутами совместно с их значениями, в *класс хроматических атрибутов* вводится дополнительный *подкласс - функциональных преобразований* (процедур, отображений, операций на абстрактных типах данных, алгоритмов). Последние есть алгоритмически разрешимые процедуры (формальные дискретные и неформальные, технологические, алгоритмы) преобразования некоторой совокупности хроматических атрибутов данных - *вход*, в некоторую совокупность хроматических атрибутов (и их значений) - *выход*. Причем, в процессе функционирования модели инициируется исполнение вполне определенных *информационно-вычислительных процессов* на алгебраической *модели* СХ-гипертопографов. В качестве входящих атрибутов процедур могут быть и *хроматические атрибуты – процедуры*. Тем самым реализуется класс, так называемых, вложенных процедур или рекурсивный вывод.

СХ-$\eta\tau$-граф на *Dc*, моделирующий фиксированное состояние системы в «текущем настоящем», расширяется до *СХ-гипертопосети* на *Dc* и *Pr* (их преобразования). Динамика *изменения элементов* k-гиперпространства СХ-$\eta\tau$-графов $Гs$, моделируемая автоматно-алгебраическим механизмом с конструктивными метаоперациями на $\{HTG_V^k x\}$ типа «*трансформации*», «*развития*», «*соединения*», «*слияния*», «*о-структуризации*» и «*о-реконфигурации*», реализуется в модели *СХ-гипертопосети* в виде информационного процесса, инициирующего сквозные *сетевые транзакции в точках входа* (вполне определенное подмножество *полюсов - топовершин*) *гипертопосети.* Последние активируются, в частности, поступающей в систему информацией в модели времени «по наступлению события», но реализуемого далее (при сформированном входе) в модели «квантованного времени». Модель *СХ-гипертопосети* является *apriori динамической*, ориентирована на характеризацию процессов преобразования «предследующего» состояния системы в «следущее» в моделях дискретного времени и включает мощный аппарат моделирования статических состояний (в отличие от существующих *псевдодинамических интерпретаций семантических сетей*) [3]. Вследствие обоснованного изоморфизма всех вышеупомянутых классов моделей (метаалгебра, метаавтомат, гипертопосеть), выбор предпочтительного из них связан с вполне определенными прагматическими соображениями.

В рамках актуальной проблемы конструктивного синтеза модели автономной самоорганизующейся и самообучаемой ИС произвольного генезиса исследована задача объединения вышерассмотренных моделей с *p*-адической моделью «подсознательного» («бессознательного») мышления [24] в гибридную модель более высокого порядка. Основное внимание было сосредоточено на прагматическом аспекте синтеза модели информационного запроса из области «сознания» в область «подсознания», то есть формирования начального («стартового») состояния модели динамической системы «подсознания».

Моделирование процесса мышления на уровне «подсознания» реализуется посредством динамической системы $\overrightarrow{x_n} = f(\overrightarrow{x_{n-1}})$, $f : \mathbb{Z}_2 \to \mathbb{Z}_2$, $\vec{x} \to f(\vec{x})$ в ультраметрическом неархимедовом пространстве целых *2*-адических чисел $(\mathbb{Z}_2, \rho_2)$, где $\rho_2(\vec{x}, \vec{y})$ – 2-адическая метрика, $\vec{x}, \vec{y} \in \mathbb{Z}_2$. Множество всех конечных векторов в $\mathbb{Z}_2$ отождествлено с множеством $\mathbb{N}$ (плотным подмножеством в $\mathbb{Z}_2$). Тогда, в качестве упрощенной модели процесса мышления уровня «подсознания» используется динамическая система, определенная на $\mathbb{N}$.

Реализация 2-адической модели мышления (уровня «подсознания») может быть спроецирована на аппарат нейронных сетей (в рамках естественных ограничений на конечность нейронных структур). Каждый нейрон, в простейшей дискретной интерпретации, имеет две степени возбуждения: 1 – возбуждение, 0 – отсутствие возбуждения. Когнитивная информация представляется цепью нейронов. Каждая цепь имеет иерархическую структуру, которая основывается на способности нейрона возбудить последовательность нейронов в цепи (первый нейрон наиболее «важен», так как способен возбудить все последующие нейроны в цепи, второй менее «важен», чем первый, так как не может возбудить предшествующий нейрон и так далее).

В процессе анализа механизмов взаимодействия процессов мышления уровней «сознание – подсознание», исследованы морфизмы моделей мышления различных уровней и предложен ряд формальных процедур их реализующих [25]. Синтезированные процедуры позволяют сформировать корректный информационный запрос из подпроцесса уровня «сознания» в подпроцесс уровня «подсознания» с сохранением прагматической разнозначимости структуры запроса. Обратное отображение результата функционирования модели «подсознания» на уровень «сознания» носит «диффузный» характер, вследствие представления результата работы модели динамической системы «подсознания» точкой $[GF(2)]^n$ при $n \to \infty$, не позволяющей в настоящих условиях однозначным образом идентифицировать конкретный Γs-объект. При этом появляется возможность идентифицировать «размытый» результат работы «подсознания» некоторым классом гипертопографов. Такая «размытость» вполне соответствует эмпирическим наблюдениям в психологии в отношении характеризации интуитивно-образного мышления. Механизмы формирования информационного запроса из подпроцесса уровня «сознания» в подпроцесс уровень «подсознания» реализуются алгоритмически на классической архитектуре Тьюринга – фон Неймана, формируя запрос сколь угодно большого информационного объема, ограниченного лишь прагматическими соображениями.

3 Прагматические проекции

3.1 Исчисление ценности информации

Сложность решения проблемы количественной оценки ценности информации (ЦИ) в ИС определяется, прежде всего, ее многопараметричностью, когда в качестве параметров обобщенного функционала ЦИ выступают множественные характеристические свойства И., проявляющиеся в процессе взаимодействия воспринимающей ИС с окружающей средой [17, 18]. При этом процесс моделирования объективных параметров СОР необходимым образом связан

с индивидуальными особенностями взаимодействующих систем (объектов, приобретающих субъективные и рефлексивные свойства).

В основу феноменологии проблемы положена система постулатов, характеризующая сущность понятия «ценность И.» с общих телеологических позиций [18]. Ценность информации определена как индивидуальная прагматическая характеристика результата информационного взаимодействия телеологической ИС (τ-ИС) с системой ОР - внешней средой, определяющая изменение возможностей достижения системой вполне определенных, имманентных или навязанных целей своего существования при использовании воспринимаемой И.

Образцом работоспособного программного продукта (исследовательский прототип), осуществляющего численную оценку ценности входящей в ИС информации, является интеллектуальная программная среда «АКСИОН», ядро которой может быть использовано как для семантико-аксиологического отбора необходимой для потребителя информации (синтез семантических браузеров и поисковых систем), так и при создании прототипа потокового сетевого аксиологического фильтра [26, 27].

3.2 Семантико-аксиологическая фильтрация информации

В качестве модели-универсума семантической информации (объективная и субъективно-прагматическая интерпретации) используется вышеописанная модель *k*-гиперпространства СХ-гипертопографов произвольного порядка *k*-топологизации множества-носителя, позволяющая эффективно интерпретировать известные модели представления декларативных знаний (семантические сети / метасети, системы продукций, фреймы, категориальные модели, концептуальные структуры, онтологии (OWL) и т. п.) [2].

Участки исследуемого входящего документального контекста (последовательные семиотико-лингвистические модели вербальной коммуникации) преобразуются в семантические образы модели-универсума, которые сравниваются с семантическими образами пространства целевых состояний.

Использование «плавающего» интервала топологизации множества-носителя, наряду с использованием «нечетких» вычислений и формальными практическими ограничениями, налагаемыми на мощности задействованных множеств, обеспечивают «работоспособность» модели на существующих средствах вычислительной техники [37].

3.3 Концентрация знаний

Сущность реализуемой концепции заключается в управляемой эволюции «информационной реальности» социума, характеризуемой использованием механизмов существенного сокращения объема циркулирующей в нем И. (отвечая динамике полиномиального или, более того, линейного роста И. во времени - в противовес неуправляемому экспоненциальному) [28].

В качестве основных механизмов реализации концепции определены антропогенно-технические ИС (АГИС), обеспечивающие как пассивную (в локальных информационно-коммуникационных узлах), так и активную (в распределенном сетевом пространстве) фильтрацию-концентрацию информации (знаний) с задействованием среды «агентов-мусорщиков» и «агентов-концентраторов». Использование технологии разработки АГИС, основанной на «архитектуре, обусловленной моделированием», предопределяет выбор в качестве центрального звена проектирования механизмов «фильтрации-концентрации» - универсальной семантической модели информации, позволяющей формализовать и алгоритмически описать вышеупомянутые процедуры в отношении самого широкого круга приложений.

В процессе реализации процедур «фильтрации / концентрации знаний» АГИС формирует семантический образ входящей информации, проверяет ее на истинность / ложность (в рамках своих «интеллектуальных» возможностей) и выявляет полезную, бесполезную и вредную И. Вычленив полезную информацию, АГИС приступает к процедуре «концентрации знаний», объединяя полезную входящую информации с индивидуальной (или внешней, коллективной) подсистемой знаний. Осуществляя далее её оптимизационную реструктуризацию с использо-

ванием алгоритмов сокращения информационного объема знаний (в частности, путём объединения - поглощения их тождественных экземпляров и сокращения опровергнутых) и повышения эффективности их использования (в отношении, например, поиска и доступа).

3.4 Моделирование семантики полифонического музыкального текста

В работах [30-32] излагается механизм проекции модели *k*-гиперпространства СХ-гипертопографов на весьма слабо исследованную с естественнонаучных позиций область музыкального творчества. На начальном этапе исследовалась модель музыкального текста (МТ) строгого стиля, представленный моделью дискретных сообщений Дж. фон Неймана нулевого и первого приближений [29]. Модель относится к классу последовательных семиотических моделей («семантически тривиальных») и, с одной стороны, требует упрощения МТ до уровня модели конечного алфавита, а с другой стороны, не отражает разнообразия структурных связей в нем, а лишь отношения *n* последовательных символов (разрешенные и запрещенные *n*-граммы).

В качестве модели «глубинной семантики» выбрана модель *k*-гиперпространства СХ-гипертопографов. Предложено использовать модифицированную модель СХ-гипертопографа, с расширенным множеством-носителем, характеризующим множественность различимых (посредством хроматических атрибутов) экземпляров односортных элементов [4] (дальнейшая топологизация реализуется согласно классической модели СХ-гипертопографа). В качестве элементов множества-носителя берутся все нотные знаки произведения, а различные уровни топологизации отражают иерархию вертикальных связей между ними. Динамика МТ моделируется адаптированной моделью СХ-гипертопосети.

3.5 Моделирование информационных составляющих состояний сложных систем

Область моделирования информационных составляющих состояний сложных динамических систем, представлена задачей мониторинга поведения (функционирования) биологических систем, включая антропоморфные. Общая постановка задачи в рамках разработанного формального аппарата представлена в работах [26, 33], где предложен ряд современных технологических решений по реализации национальной программы постоянного (в модели времени «по наступлению события») мониторинга социума с использованием индивидуального защищенного электронного персонального реестра, обеспечивающего информационное сопровождение полного жизненного цикла субъекта.

Важнейшим принципом реализации процесса мониторинга является представление и использованием информации не формате классических данных, но в формате формализованных знаний. Причем в основу аппарата формализации должны быть положены математические модели представления знаний в соответствующей подсистеме ИС. С точки зрения перспективных тенденций в создании современных автоматизированных информационных систем (АИС), речь идет о целесообразности задействования в системе мониторинга общей для всех участников процесса модели, определяющей основные принципы развития информационной базы АИС и интеграции различных приложений в систему.

Возможны два варианта использования знаний в системе. Первый реализуется в режиме ввода, хранения и использования информации в формате модели представления знаний. В этом случае, мы имеем дело с элементом подсистемы знаний интегрированной ИС, использование и преобразование, которого осуществляется соответствующими интеллектуальными средствами. Второй реализуется в режимах ввода и хранения информации в стандартизованных форматах данных, соответствующих представлению реальных данных, использование которых в прикладных приложениях (например, с целью диагностики или организации лечения) в данном случае связано с преобразованием накопленных данных в совокупность знаний.

Выбор того или иного механизма накопления и использования знаний определяется емкостными параметрами моделей данных и носителей информации, а также скоростью прямого / обратного преобразования данных в знания и обратно (реализуемых, в частности, лингвис-

тическими процессорами с вполне определенными операционными характеристиками эффективности реализации).

В качестве аппарата моделирования использованы модели измеримого метрического k-гиперпространства $Гs$ и метаавтомат на базе одноосновной метаалгебры, [1, 26], обеспечивающей моделирование динамических процессов функционирования системы. Поступающая в ИС информация преобразуется в формат «входящего» СХ-гипертопографа, сравнивается с текущим состоянием ИС (возможно и с иными целевыми или эталонными состояниями) и интегрируется в базу знаний ИС с использованием операций «объединения», «пересечения», «развития», «слияния» и «трансформации» СХ-гипертопографов [34, 35]. Элементы $Гs$, спроецированные на области формирования, хранения, модификации и использования знаний, моделируют как состояния и цели контролируемой системы в период ее жизненного цикла, так и произвольные информационные объекты ИС, в частности, эталоны синдромов заболеваний.

Метрические свойства использованной модели позволяют путем задействования вполне определенного класса нормированных метрик и мер на $Гs$ исчислять вполне определенные количественные отклонения контролируемых текущих состояний от предшествующих или эталонных, тем самым осуществляя интегральную диагностику на множестве заданных синдромов.

Заключение

В результате проведенных в Центре системного анализа и моделирования мышления Института информационных наук и технологий безопасности РГГУ [36] исследований разработан методологический аппарат нового поколения, позволяющий успешно решать задачи ранее не разрешимые в рамках традиционных парадигм теории ИС. К таким задачам можно отнести комплексное моделирование открытых, автономно эволюционирующих, самоорганизующихся систем высшего порядка, в частности, интеллектуальных, наиболее развитыми реальными представителями которых, являются антропные системы.

Опора на дедуктивный аксиоматико-терминологический базис ИЭП позволяет взглянуть на задачи информационной самоорганизации и телеологической эволюции ИС произвольного генезиса с новых позиций, обеспечивая универсальность механизмов моделирования информации, мышления, сенсориума, подсистем знаний и коммуникации, пространства целей, объектов внешней среды, их свойств и отношений. Атрибутивно-ингредиентная концепция (теория) информации и информационно-эволюционный подход к системному анализу и моделированию ОР естественным образом развивают постнеклассические основания современной науки, в определенном смысле, поглощая, превалирующие до настоящего времени в «искусственном интеллекте» и теории ИС - «логико-лингвистический» (вторичный в отношении аппарата информационной эволюции сложных систем) и «нейробионический» (генетически связанный с «геобиосферным» носителем интеллекта) подходы. Всесторонний учет феноменологических особенностей АИКИ и ИЭП в абстрактной экспликации модели информации предопределяет и перспективу использования в самых различных приложениях конструктивных моделей k-гиперпространства СХ-гипертопографов $Г_S$, метаавтоматов и метаалгебраических систем на $Г_S$, а также СХ-гипертопосетей.

Благодарности

Статья подготовлена в рамках реализации Программы стратегического развития РГГУ, проект 2.1.1 «Решение комплексных проблем в области общественных и информационных наук».

Список литературы

[1] Баранович А.Е. Семиотико-хроматические гипертопографы. Введение в аксиоматическую теорию: информационный аспект [Электрон. ресурс] = Semiotic chromatic hypertopographs. Introduction into the axiomatic theory: an information aspect. - 2-е изд., испр. и доп. - 1-е изд., М., 2003. Электрон. дан. - [М., Центр САММ, РГГУ, 2012]. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). Гос. рег. № 0321300055 ФГУП НТЦ "Информрегистр".

[2] Баранович А.Е. К-гиперпространство семиотико-хроматических гипертопографов как универсальная модель представления фактографических знаний / Мат. IX Междунар. конф. «Интеллект. сист. и компьют. науки». Т. 1. Ч. 1. — М., МГУ, 2006. - С. 53-55.

[3] Баранович А.Е. Семиотико-хроматические гипертопосети: унифицированная модель представления знаний / Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2011): матер. Междунар. научн.-техн. конф. / редкол.: В.В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. - Минск: БГУИР, 2011. - С. 71-86.

[4] Баранович А.Е. Многоосновные СХ-гипертопографы - однообъектная парадигма / Тр. III Междунар. конгресса по интеллект, системам и информ. технологиям (AIS'11). Т.1. — М.: Физматлит, 2011. - С. 377-385.

[5] Баранович А.Е. Введение в информациологию и ее специальные приложения: дидактические материалы к специальному курсу. — М., РГГУ, 2011.

[6] Баранович А.Е. О систематизации аксиоматического аппарата предметной области «Искусственный интеллект» / Интеллектуальные системы. Т. 14. Вып. 1-4. — М., 2010. - С. 5-34.

[7] Баранович А.Е. Информационно-эволюционный подход в теории интеллектуальных систем // Интеллектуальные системы. 2011. Т. 15, вып. 1-4. - С. 15-52.

[8] Баранович А.Е. «Три кита» постнеклассической парадигмы теории интеллектуальных систем // Тр. IV Междунар. конгресса по интеллект. системам и информ. технол. / XII Междунар. научн.-техн. конф. “Интеллектуальные системы” (AIS'12). Т. 1. – М., Физматлит, 2012. - С. 306-312.

[9] Поспелов Д.А. “Десять горячих точек” в исследованиях по искусственному интеллекту / Интеллектуальные системы. Т. 1. Вып. 1-4. — М., 1996. - С. 47-56.

[10] Новая философская энциклопедия: в 4 т. / Ин-т философии РАН; Нац. обществ.-науч. фонд; Предс. научно-ред. совета В. С. Степин. — М.: Мысль, 2000 — 2001.

[11] Редько В. Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект. Модели и концепции эволюционной кибернетики / В.Г. Редько. — М.: Эдиториал УРСС, 2006.

[12] Редько В.Г. Модели адаптивного поведения - бионический подход к искусственному интеллекту // В сб. «Моделирование процессов» / Под ред. В.А. Райхлина. Казань, Изд. КГУ, 2007. - С. 109-134.

[13] Тарасов В.Б. Логико-лингвистические модели: прошлое, настоящее и будущее // Политехн. чтения: Сб. тр. Вып. 7. Искусств. интеллект - проблемы и перспективы / Политехн. музей; науч. ред. Г.Г. Григорян, В.Л. Стефанюк. — М.: 2006. - С. 48-54.

[14] Baranovich A.E. Pragmatic potential of verbal information: aspects of mathematical modeling // Proc. of the 12th Intern. Conf. “Speech and Computer” SPECOM’2007. — M., MSLU, 2007. Vol. 2. - PP. 844-852.

[15] Бодякин В.И. Направленность эволюции информационных систем // Всероссийский симпозиум «Современные проблемы неравновесной термодинамики и эволюции сложных систем». — М., МАКС Пресс, 2004. - С. 15-16.

[16] Казютинский В.В. Антропный принцип в неклассической и постнеклассической науке // Проблемы методологии постнеклассической науки: Сб. ст. / Отв. ред. Е.А. Мамчур. — М.: ИФ РАН, 1992. - С. 146-153.

[17] Баранович А.Е. Универсальный подход к структурному моделированию директивно-целевых информационных процессов. Автоматная модель интеллектуального процесса оценки ценности информации на Х-гиперграфах. Сб. тр. — М., МО РФ, 1997. - С. 3-47.

[18] Баранович А.Е. Структурное метамоделирование телеологических информационных процессов в интеллектуальных системах. — М.: МО РФ, 2002.

[19] Баранович А.Е. О новом феноменологическом словаре теории интеллектуальных систем // Вестник РГГУ, серия «Информатика. Защита информации. Математика». Научный журнал. – М.: РГГУ, 2013 (в печ.).

[20] Баранович А.Е. Элементы сущностной теории информации // Тр. XIII Всерос. межведом. науч. конф. — М., 1995. - С. 76-78.

[21] Баранович А.Е. Атрибутивно-категориальная концепция информации. В кн. авт.: Введение в предметно-ориентированные анализ, синтез и оптимизацию элементов архитектур потоковых систем обработки данных. 2-е изд., доп. и испр. — М., МО РФ, 2001. - С. 233-242.
[22] Baranovich A.E., Sidorov O.V. Basic principles of knowledge's representation and speech information processing within integrated intelligent system // Proc. of Intern. conf. «Speech & Computer» (SPECOM' 2006). — St.-Petersburg, 2006. - PP. 467- 470.
[23] Баранович А.Е. К вопросу идентификации тождественных объектов в модели k-гиперпространства СХ-гипертопографов // Тр. I Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «AIS-IT'09». Т. 1. - М.: Физматлит, 2009. - С. 481-490.
[24] Хренников А.Ю. Моделирование процессов мышления в р-адических системах координат. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
[25] Баранович А.Е., Ханковский Д.Б. О моделировании взаимодействия подпроцессов мышления уровней «сознание» – «подсознание» // Вестник РГГУ № 14/12, серия «Информатика. Защита информации. Математика». Научный журнал. – М.: РГГУ, 2012. – С. 169-186.
[26] Баранович А.А., Кузнецова И.А., Лишин Н.А. Мониторинг жизненного цикла биологической системы в ИПС «Аксион». Тр. VIII Междунар. научн.-техн. конф. "Интеллектуальные системы" (AIS'08). – М., Физматлит, 2008. – С. 238-245.
[27] Баранович А.А., Лишин Н.А. Исчисление ценности прагматической информации в интеллектуальной программной среде «Аксион» // Тр. XI национ. конф. по ИИ с междунар. участ. (КИИ-08). Т.2. - М., ЛЕНАНД, 2008. - С. 364-372.
[28] Баранович А.Е. Семантические аспекты информационной безопасности: концентрация знаний // Вестник РГГУ № № 13(75)/11, серия «Информатика. Защита информации. Математика». Научный журнал. – М.: РГГУ, 2011. – С. 38-58.
[29] Иглицкая С.М. К вопросу структурно-алгебраического и семантико-прагматического анализа музыкального текста // Вестник РГГУ № 13(75)/11, серия «Информатика. Защита информации. Математика». Научный журнал. – М.: РГГУ, 2011. – С. 128-145.
[30] Иглицкая С.М. Об одном подходе к моделированию семантики полифонического музыкального текста // Вестник РГГУ № 14/12, серия «Информатика. Защита информации. Математика». Научный журнал. - М.: РГГУ, 2012. - С. 187-198.
[31] Баранович А.Е, Иглицкая С.М. Моделирование музыкального текста строгого стиля аппаратом семиотико-хроматических гипертопосетей // Тр. IV Междунар. конгресса по интеллект. системам и информ. технол. / XII Междунар. научн.-техн. конф. "Интеллектуальные системы" (AIS'12). Т. 2. – М., Физматлит, 2012. - С. 60-66.
[32] Иглицкая С.М. Проекция модели семиотико-хроматических гипертопосетей на область синтеза музыкального текста строгого стиля // Вестник РГГУ, серия «Информатика. Защита информации. Математика». Научный журнал. – М.: РГГУ, 2013 (в печ.).
[33] Баранович А.Е., Баранович А.А, Кузнецова И.А., Мерзликин В.Г. Моделирование процесса информационного сопровождения жизненного цикла биологической системы // Матер. 8-ой междунар. науч.-техн. конф. "Кибернетика и высокие технологии XXI века" C&T-2007. – Воронеж, ВГУ, 2007. - С. 129-143.
[34] Баранович А.Е., Боровиков Д.В., Лакуша Е.Л. Об алгебраизации модели k-гиперпространства СХ-гипертопографов: операции трансформация – развития // Матер. X междунар. конф. "Интеллект. сист. и компьют. науки" (5-10 декабря 2011 г.). - Электрон. дан. - [М., мех.-мат. фак-т МГУ, 2011]. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - С. 22-25.
[35] Никитин Н.О. К вопросу моделирования динамических процессов накопления знаний в интеллектуальных системах // Вестник РГГУ, серия «Информатика. Защита информации. Математика». Научный журнал. – М.: РГГУ, 2013 (в печ.).
[36] Центр системного анализа и моделирования мышления (www.samtcenter.ru, 2013).
[37] Баранович А.Е., Никитин Н.О. О некоторых областях приложений алгебраической модели k-гиперпространства СХ-гипертопографов / Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2012): матер. II Междунар. научн.-техн. конф. / редкол.: В.В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. - Минск: БГУИР, 2012. - С. 91-98.

ОНТОЛОГИЯ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ КОЛЛЕКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ В ДЕЛОВЫХ ПРОЦЕССАХ

Л.Р. Черняховская, Н.И. Федорова, И.П. Владимирова

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул. К.Маркса, 12
ooo-flaming@mail.ru, *nf_2002@mail.ru*, *lrchern@yandex.ru*
тел: +7 (347) 273-78-35

***Ключевые слова**: поддержка принятия решений с применением онтологии; управление деловым процессом; метод группового многокритериального выбора; информационный поиск прецедентов принятия коллективных решений*

Abstract
This paper represents an approach to improve the efficiency and quality of group management solutions with clearly defined formal procedures based on the retrieval and application of appropriate methods of optimizing on base of ontology.

Введение

Эффективность управления сложными динамическими системами во многом определяется качеством решений, принимаемых управляющими в проблемных ситуациях [1]. 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. Поэтому предлагается разработка методологии интеллектуального управления взаимодействием сложных процессов на основе онтологического анализа и обработки знаний с целью обеспечения качества и своевременности коллективных управленческих решений. В соответствии с методологией осуществляется разработка моделей, методов и алгоритмов онтологического анализа и обработки знаний. База знаний, созданная на основе онтологии, обеспечивает возможность поддержки принятия решений с применением методов и алгоритмов поиска решений, а также моделей и методов оптимизации и интеллектуального анализа данных, представленных в онтологии. В результате использования единого информационного пространства, адаптации процессов к изменяющимся внешним условиям, а также возможности интеграции информационных потоков с применением современных средств информационно-коммуникационных технологий при совместном решении задач управления в реальном времени повышается качество принимаемых решений.

1 Онтологический анализ процесса аналитической поддержки принятия решений

Функционирование сложных динамических систем (технических, производственных, энергетических, телекоммуникационных, транспортных, систем комплексной безопасности) определяется реализацией многих взаимодействующих деловых процессов, основных и вспомогательных. Процессы могут быть представлены в виде последовательности действий, необходимых для выполнения определенных задач (организационного управления, оптимизации ресурсов, управления качеством продуктов или услуг, предназначенных для внешнего потребителя, либо используемых в других деловых процессах). В большинстве задач компьютерная

поддержка решений, принимаемых отдельными лицами или группами лиц на всех уровнях управления, возможна и необходима, так как направлена на повышение оперативности и улучшение качества решений. Знания, нужные для поддержки принятия решений, представляются в форме правил, в условной части которых содержатся указания возможности действий, входящих в процессы в определенных отношениях следования, условий, управляющих их выполнением, ограничений на значения атрибутов классов объектов, а в заключительной части – варианты управляющих решений. Опыт экспертов по решению конкретных задач в рассматриваемой предметной области, представляется в форме прецедентов принятия управленческих решений. Взаимодействие этих двух форм представления знаний позволяет объединить суждения экспертов и объективную информацию.

Проблема поддержки принятия решений в управлении взаимодействием сложных деловых процессов обусловлена сложностью представления интегрированной, своевременной и точной информации коллективом управляющих, обеспечения ясного и однозначного понимания понятий, используемых в совместной работе, и оперативного согласования коллективных решений. В данных исследованиях применяется онтологический подход к организации ситуационного управления взаимодействием сложных процессов, в соответствие с которым разрабатывается онтология поддержки принятия решений, с целью обеспечения ясного и однозначного понимания понятий в рассматриваемой предметной области, используемых в совместной работе, а также построенных в онтологии правил и прецедентов принятия решений. Семантическая сеть понятий и отношений между ними отображает процессы деятельности предприятий и экземпляры понятий для формирования прецедентов принятия решений с применением аналитических моделей. База знаний отображает опыт, накопленный коллективами управляющих сложными процессами, а также способствует принятию согласованных коллективных управленческих решений.

В онтологии поддержки принятия решений содержатся аксиомы терминологической иерархии понятий (множество аксиом *T-Box*), аксиомы описания отношений ассоциации, аксиомы, накладываемые на свойства (множество аксиом *A-Box*). Аксиомы, описывающие конкретные ситуации предметной области и отношения между экземплярами классов, сформулированы в соответствии с теорией дескриптивной логики. Для разработки правил в данном исследовании использован язык описания правил *SWRL* (*Semantic Web Rule Language*). Полученные правила записаны на языке формализации онтологических правил *SWRL* в виде дизъюнктов Хорна:

(1) *Rule:* $C1(?x)$ $C2(?y)$ $P1(?x, ?y)$ $C3(?x, ?z) \rightarrow C2(?z, ?y)$,

где $(C1, C2, C3) \in C$, $P1 \in P$, x, y – экземпляры классов или переменные, z – переменные или значения.

В области поддержки принятия решений возможны следующие вопросы для проверки адекватности онтологии или осуществления информационного поиска: «Какие характеристики процесса следует учитывать при выборе модели?», «Какая модель математического программирования обеспечивает поиск решений с учетом неопределенности целевой функции?», «Какие методы решения задач линейного программирования существуют?», «Какая математическая модель использована для решения задачи выбора поставщика?», «Какие разновидности игровых моделей существуют?», «Влияет ли наличие конфликта сторон на выбор модели принятия решений?».

Для формирования цепочек заключений на онтологии, ведущих к желаемой цели, например, к распознаванию класса проблемной ситуации для выбора класса математических моделей, используется логический вывод на основе метода резолюции.

Разработка онтологии осуществляется с применением современных технологий *Semantic Web*, в том числе онтологического редактора *Protégé*, языков разработки онтологии и баз знаний. На рисунке 1 отображен фрагмент терминологической иерархии понятий в области поддержки принятия решений, построенный с применением онтологического редактора *Protégé* 4.2. Для формального описания запросов к онтологии используется язык *SPARQL* (англ. *SPARQL Protocol and RDF Query Language*).

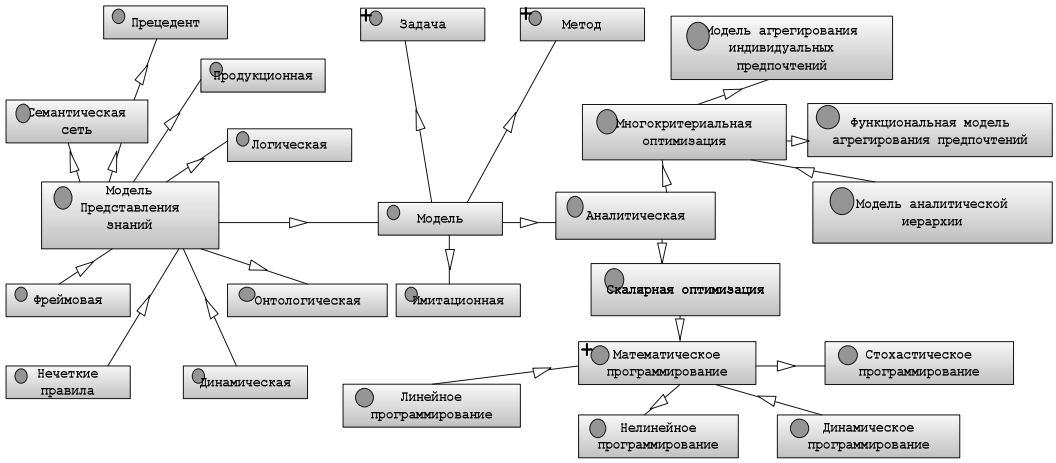


Рисунок 1 – Пример представления иерархии классов моделей

С применением онтологии решается задача интеграции моделей и методов поиска решений в базе знаний с применением методов оптимизации и интеллектуального анализа данных, представленных в онтологии, с целью обеспечения обоснованности и точности принимаемых коллективных решений.

2 Прецеденты оптимизации коллективных решений в деловых процессах

Задачи принятия решений, в которых результаты выбора вариантов определяются мнениями или действиями не одного человека, а многих людей, часто возникают в управлении деловыми процессами, при этом эффективность управления зависит от точности, обоснованности и своевременности решений. Таким образом, процедура принятия решения, основанная на совместном учете и/или согласовании индивидуальных предпочтений членов коллектива, принимающего решение, является актуальной [2, 3]. Предлагается подход к повышению эффективности и качества управленческих решений с помощью явно определенных формальных процедур, основанных на поиске и применении адекватных методов оптимизации с применением онтологии. Формализованное представление прецедентов применения математических методов основано на разработке иерархии классов сущностей и отношений между ними, наиболее характерных для процессов математического моделирования.

Задача принятия решений D^{PS} на основе множества найденных k ближайших прецедентах, представима кортежем следующего вида (2):

(2) $D^{PS}=<D^{Case}, F, Sim^{X}, M, R^{A}>,$ *с учетом* $\xi=\{\xi 1, ..., \xi S\},$

где: D^{Case} – множество альтернатив решений, содержащихся в найденных k ближайших прецедентах; F – множество критериев оценки альтернатив решений; Sim^{X} – множество значений сходства между признаками проблемной ситуации и соответствующими признаками прецедентов; M – множество методов, позволяющих получить отображение множества альтернатив в множество векторных оценок эффективности решений в соответствии с множеством критериев F; R^{A} – множество решающих правил адаптации, устанавливающих отношения между значениями сходства, полученными в результате сопоставления признаков проблемной ситуации и признаков прецедентов и действиями, корректирующими атрибуты классов решений; ξ – множество S типов вариантов среды решения задачи (детерминированная, вероятностная,

нечеткая и др.). При поиске ближайших прецедентов используются отношения «экземпляр класса» («*is-a*»).

Совокупность экземпляров класса «Прецедент» определяет множество прецедентов классов принятия решений с применением аналитических моделей и моделей представления знаний, включающих описание конкретной проблемной ситуации и принятых решений. Значения признаков описания проблемных ситуаций формируются в результате запросов к базам данных, содержащих характеристики деловых процессов, а также в результате ответов пользователя на запросы по уточнению или пополнению признаков. Процесс поиска ближайшего прецедента позволяет выполнять стандартные процедуры поиска прецедентов: как экземпляров классов проблемных ситуаций в онтологии, а также как поиск ближайших прецедентов принятия решений по аналогии, что дает возможность сопоставить текущую проблемную ситуацию с прецедентами в базе знаний и выбрать наиболее подходящий из них. Далее решение из ближайшего прецедента адаптируется по специальным правилам к реальной проблемной ситуации. В случае, если ближайший прецедент не найден, описание проблемной ситуации запоминается как нераспознанный прецедент, а лицо, принимающее решение (ЛПР), находит решение самостоятельно или с помощью экспертов, и система поддержки принятия коллективных решений предлагает сохранить описание задачи принятия решений как новый прецедент.

Решения, полученные в результате поддержки принятия решений, извлекаются из прецедентов, а также, в случае необходимости, адаптируются к текущей ситуации.

Онтология задач, моделей и методов предоставляет коллективам разработчиков и аналитиков возможности обмена результатами моделирования, применения средств моделирования, включая пакеты прикладных программ моделирования для работы в диалоговом режиме [4]. Классификационная схема объектов моделирования позволяет осуществлять информационный поиск средств моделирования, а также поиск наиболее близких прецедентов применения адекватных математических моделей для решения конкретной задачи.

Заключение

Проведен онтологический анализ процесса поддержки принятия решений с применением существующих математических методов принятия решений, в том числе коллективных. Сделан вывод о том, что при поиске решений предлагается объединить фундаментальный принцип поиска оптимального решения, характерный для полностью формализованных задач, с принципом использования экспертных знаний, предназначенных для решения слабоструктурированных задач. Предложенный подход используется при разработке системы поддержки принятия решений в различных предметных областях.

Благодарности

Работа выполнена в соответствии с грантом РФФИ 13-08-00321 «Интеллектуальное управление взаимодействием сложных процессов на основе онтологического анализа и обработки знаний в условиях неопределенности».

Список литературы

[1] Поддержка принятия решений при стратегическом управлении предприятием на основе инженерии знаний /под редакцией Черняховской Л.Р. – Уфа: Гилем, 2010. – 180 с.

[2] Петровский А.Б. Теория принятия решений / Петровский А. Б. // Университетский учебник. Сер. Прикладная математика и информатика. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 400 с.

[3] Волкова В.Н. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Волковой В.Н., Козлова В.Н. – М.: Высшая школа, 2004. – 616 с.

[4] Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: Учеб. для вузов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – 4-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2005. – 343 с.: ил.

ФОРМИРОВАНИЕ ПРАВИЛ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УПРАВЛЕНИИ ПРОЕКТАМИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Л.Р. Черняховская, А.И. Малахова

Уфимский государственный авиационный технический университет

450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия

lrchern@yandex.ru, aimalakhova@gmail.com

тел.: +7 (347) 2737835

Ключевые слова: *управление проектами, онтология, правило, поддержка принятия решений*

Abstract

This paper considers the question of decision-making support in project management based on the results of ontological analysis. The approach to the decision support ontology development based on the domain object models and existing management goals, criterion, task, models and methods is offered. The set of decision-making rules in project management is developed.

Введение

Сложность управления проектами обусловлена наличием большого класса разнородных задач проектирования, в решении которых принимают участие специалисты из различных областей знаний, зачастую использующих понятия из разных профессиональных тезаурусов, а также находящихся в составе территориально распределенных групп разработки проектов. Представление в онтологии управления проектами коллективных корпоративных знаний и опыта персонала, связанных со структурой проекта и проектной организации, позволяет повысить эффективность проектного менеджмента.

Таким образом, исследования, направленные на разработку правил управления проектами на основе онтологии, являются актуальными.

1 Разработка онтологии поддержки принятия решений

Целью исследований является повышение эффективности управления программными проектами на основе разработки моделей и методов управления знаниями о проектном менеджменте. Системы управления разработкой программных проектов могут быть отнесены к сложным организационным системам, поскольку для них характерны наличие большого класса разнородных управляемых задач, большого количества связей между участниками процесса разработки программных проектов и выполняемых ими в ходе выполнения процесса разработки функции, а также зачастую обширная территориальная удаленность групп разработки программных проектов.

На современном уровне развития организационных систем среди основных задач управления при разработке программных проектов можно выделить следующие:

- задачи по сбору, обработке и хранению информации;
- задачи по планированию и контролю работ;
- задачи по распределению людских, временных и других видов ресурсов;
- задачи по организации взаимодействия между рабочими группами и территориально-распределенными подразделениями;
- задачи по управлению качеством проектов;

- задачи по управлению персоналом: разработка системы мотиваций, борьба с конфликтными ситуациями, контроль деятельности членов организации и групп разработки.

В данных исследованиях применяется модельно-ориентированный подход, состоящий в разработке интегрированной модели, включающей в себя объектно-ориентированные модели предметной области и процесса поддержки принятия решений; онтологию поддержки принятия решений, базу правил поддержки принятия решений в области разработки программных проектов и организационного управления [1].

На основе предложенного подхода к оказанию поддержки принятия решений при разработке программных проектов предполагается выполнение следующих действий:

1) сбор знаний в области проектного менеджмента и организационного управления, и построение на их основе объектно-ориентированных моделей управления программными проектами и поддержки принятия решений;
2) преобразование полученных моделей в онтологию поддержки принятия решений, т.е. представление их в виде семантической сети однозначно понимаемых понятий и отношений между ними на языке *OWL DL*;
3) организация информационной поддержки принятия решений с помощью модуля информационного поиска и *SPARQL*-запросов;
4) формирование на основе разработанной онтологии правил поддержки принятия решений для отражения причинно-следственных связей, возникающих в процессе разработки программных проектов.

В качестве примера подробно рассмотрим процесс разработки программного проекта. Диаграмма требований, показывающая распределение функций при разработке программного проекта, представлена на рисунке 1.

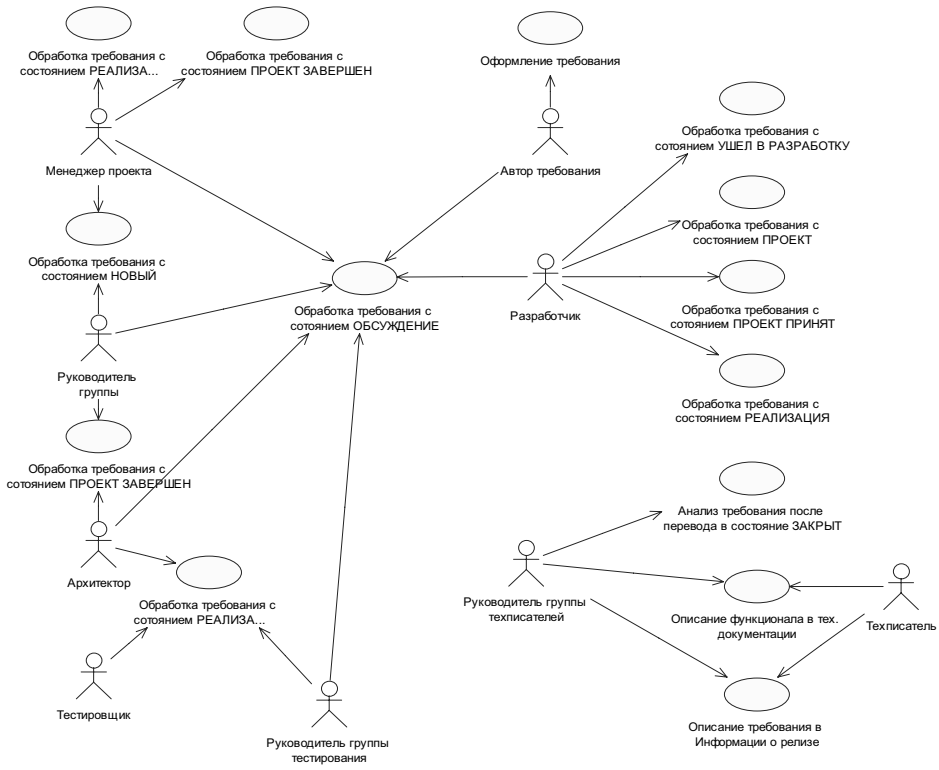


Рисунок 1 – Диаграмма требований при разработке программного проекта

Исходные объектные модели содержат требования к организации интеллектуальной поддержки принятия решений и включают когнитивные элементы поддержки принятия решений. Объектные модели преобразуются в онтологию поддержки принятия решений в соответствии с формальной моделью дескриптивной логики. Исходя из данного подхода, можно говорить об интеграции онтологии и объектных моделей, когда объекты и классы, содержащиеся в моделях, отображаются в виде понятий создаваемой онтологии. Интеграция элементов онтологической и объектной моделей выполняется на основе взаимосвязи элементов этих моделей, предложенной в таблице 1.

Таблица 1 – Взаимосвязь элементов объектной и онтологической моделей

Элемент объектной модели	Элемент онтологии
Класс (class) или объект на диаграмме классов Компонент (component) на диаграмме компонентов	Класс (class) (*T-Box* уровень)
Отношения между классами объектов: обобщение, зависимость, ассоциация, реализация	Отношения между классами сущностей: обобщение, ассоциация
Атрибут класса (attribute) на диаграмме классов Операция класса на диаграмме классов Вариант использования (use case) на диаграмме вариантов использования	Свойство класса – свойства типов данных (slot)
Нет	Свойство класса объектное
Тип данных значений атрибута класса на диаграмме классов	Тип данных значения слота (value type)
Объект (object) на диаграмме вариантов использования Компонент (component) на диаграмме компонентов	Экземпляр (instance) (*A-Box* уровень)

Описание онтологии производится на языке *OWL DL* (*Ontology Web Language based on Description Logic*). Язык *OWL DL* в соответствии с возможностями дескриптивной логики, позволяет задавать ограничения на использование классов и их свойств, а также позволяет описывать различные характеристики классов и их свойств, которые обычно задаются как разного рода ограничения на структуру связей между своими экземплярами. Эти ограничения выражаются в виде предопределенных соотношений, называемых *аксиомами* [2]. Аксиомы концептуальной схемы (*T-Box*) представляют описания таксономии классов, отношения обобщения, репрезентативные примеры классов. Между классами сущностей, принадлежащих к различным подсетям онтологии, устанавливаются отношения, принадлежащие к нескольким типам ассоциативных отношений: отношения агрегации, причинно-следственные отношения, отношения сходства, отношения семантического подобия. Такие отношения устанавливаются в форме аксиом, образующих ассоциативную сеть (*A-Box*).

На основе предложенного выше подхода была разработана онтология поддержки принятия решений при разработке программных проектов (рисунок 2). Для программной реализации онтологии был выбран программный инструментарий Protégé, который является удобным редактором онтологий, поддерживает язык *OWL DL* и удовлетворяет таким требованиям, как ясность, декларативность, предметная независимость, наличие приложений, обеспечивающих визуализацию онтологии, реализацию запросов пользователей и другие.

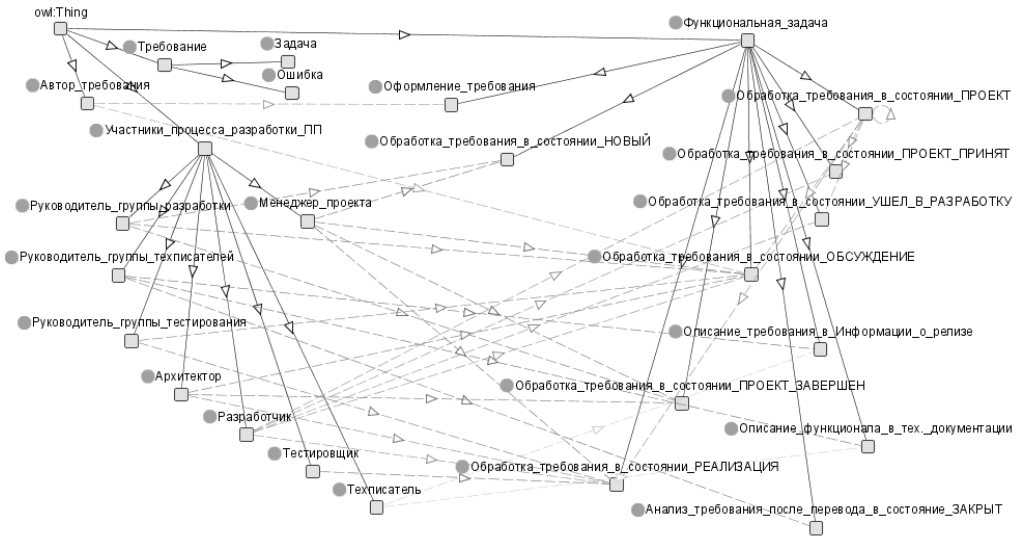


Рисунок 2 – Онтология поддержки принятия решений

Таким образом, разработанная онтология может быть представлена как набор элементов:

$$Onto = < C, Pr, V, I, R, A, D >,$$

где C – множество классов $\{C_1, C_2, ..., C_n\}$ и их интерпретаций в определенной области знаний;

R – множество отношений $\{R_1, R_2, ..., R_n\}$; примеры бинарных отношений: «is an instance of» («быть экземпляром класса»), «subclass of» («подкласс класса»), «is a part of» («быть частью»), «is consequent» («следовать за»), «connected to» («связанный с»), «is a cause of» («являться причиной»), «has similarity with» («иметь сходство с»);

Pr – свойства классов;

V – значения свойств; в OWL существует разделение свойств на два класса: объектные свойства (экземпляры класса owl:ObjectProperty) и свойства типов данных (экземпляры класса owl:DatatypeProperty);

I – множество экземпляров класса $\{I_1, I_2, ..., I_n\}$, определяется при помощи аксиом и определения конкретных свойств классов (т.н. фактов);

A – множество аксиом $\{A_1, A_2, ..., A_n\}$;

D – множество алгоритмов вывода на онтологии $\{D_1, D_2, ..., D_n\}$.

Сущность становится экземпляром класса $C_i \in C$ путем присвоения ее свойствам конкретных значений.

2 Формирование правил поддержки принятия решений

В онтологию поддержки принятия решений в виде классов предметной области также включаются задачи, модели и методы принятия решений; возникающие в ходе разработки программных проектов критические и проблемные ситуации; а также организационные, регламентирующие и распорядительные документы по процессу. Каждой проблемной ситуации, по которой принимается решение, в онтологии соответствует документ, в котором содержатся

правила и рекомендации по реализации данного решения. Данная классификация позволяет найти общий подход к идентификации проблемной ситуации, определить полный перечень ее участников и определить регламентирующие документы, позволяющие осуществить, используя результаты объектного моделирования, информационную поддержку процессов управления на основе онтологии.

Для отражения причинно-следственных связей в процессе разработки программных проектов на основе разработанной онтологии формируются правила принятия решений на языке *SWRL* (*Semantic Web Rule Language*), которые обеспечат необходимую гибкость процесса принятия решений и взаимодействия территориально удаленных пользователей в процессе управления знаниями.

Целью интеллектуального анализа данных является также классификация проблемных ситуаций, возникающих в процессе управления, и отображение множества задач принятия решений в критических ситуациях на множество правил принятия решений. Таким образом, в зависимости от класса критической ситуации правила разделены на блоки, которые позволяют связать конкретный процесс с соответствующим набором правил в базе знаний, а также организовать иерархию правил и ускорить поиск необходимых решений с применением базы знаний.

Таким образом, каждой задаче принятия решений соответствует регламентирующий выполнение данной задачи документ, блок правил принятия решений, а также документ, в котором отражается реализация принятого решения (рисунок 3).

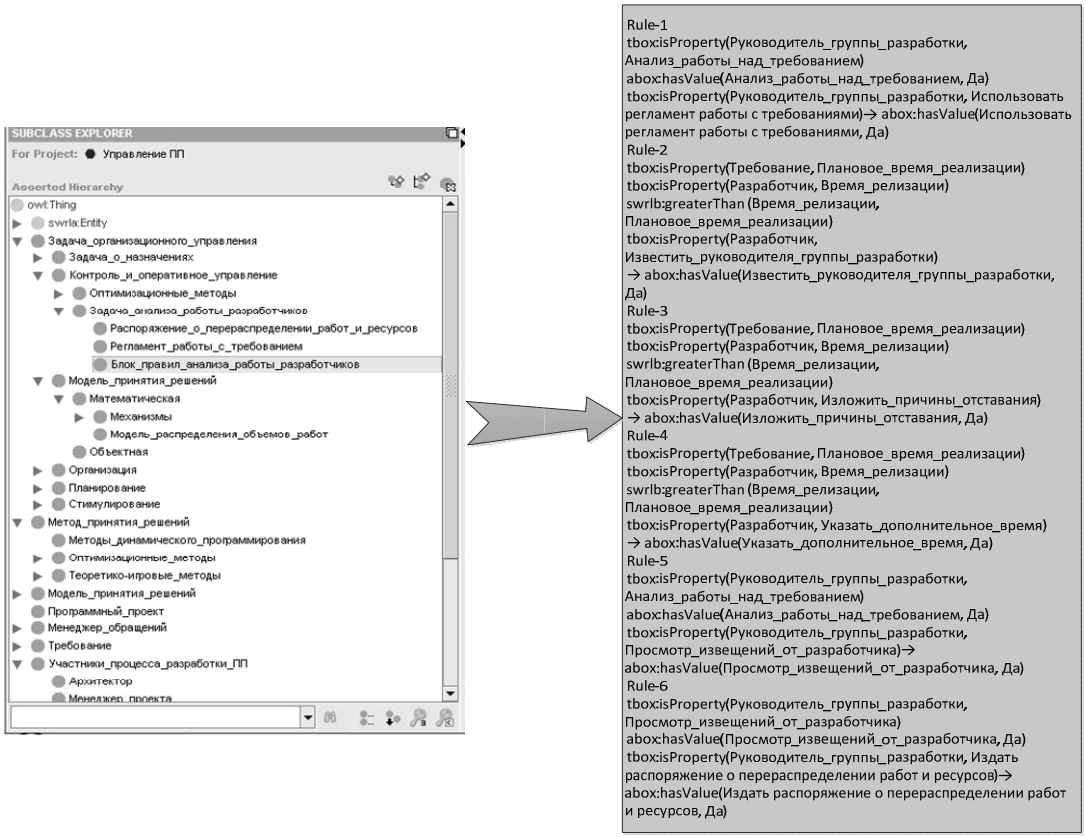


Рисунок 3– Правила поддержки принятия решений

3 Организация информационной поддержки принятия решений

Для оказания поддержки принятия решений на уровне терминологии предметной области в *Protégé* используется модуль информационного поиска. Модуль информационного поиска позволяет извлекать информацию из онтологии на основе запросов к данным на языке *SPARQL* (*SPARQL – Protocol and RDF Query Language*, англ.). При помощи *SPARQL*-запросов можно определить связи между понятиями (классами онтологии) предметной области или определить множество понятий, удовлетворяющих определенным критериям. Для этого нужно выбрать соответствующий класс в форме поиска, указать соответствующий слот и ввести требуемое значение слота. Например, для поиска задач по контролю и оперативному управлению проекта, которые в качестве регламентирующего документа имеют регламент работы с требованием, необходимо в форме поиска выбрать класс «Контроль_и_оперативное_управление» и ввести значение слота «имеет_ регламентирующий _документ». Сформулированный запрос можно сохранить путем добавления его в библиотеку запросов онтологии. Результат поиска показан на рисунке 4.

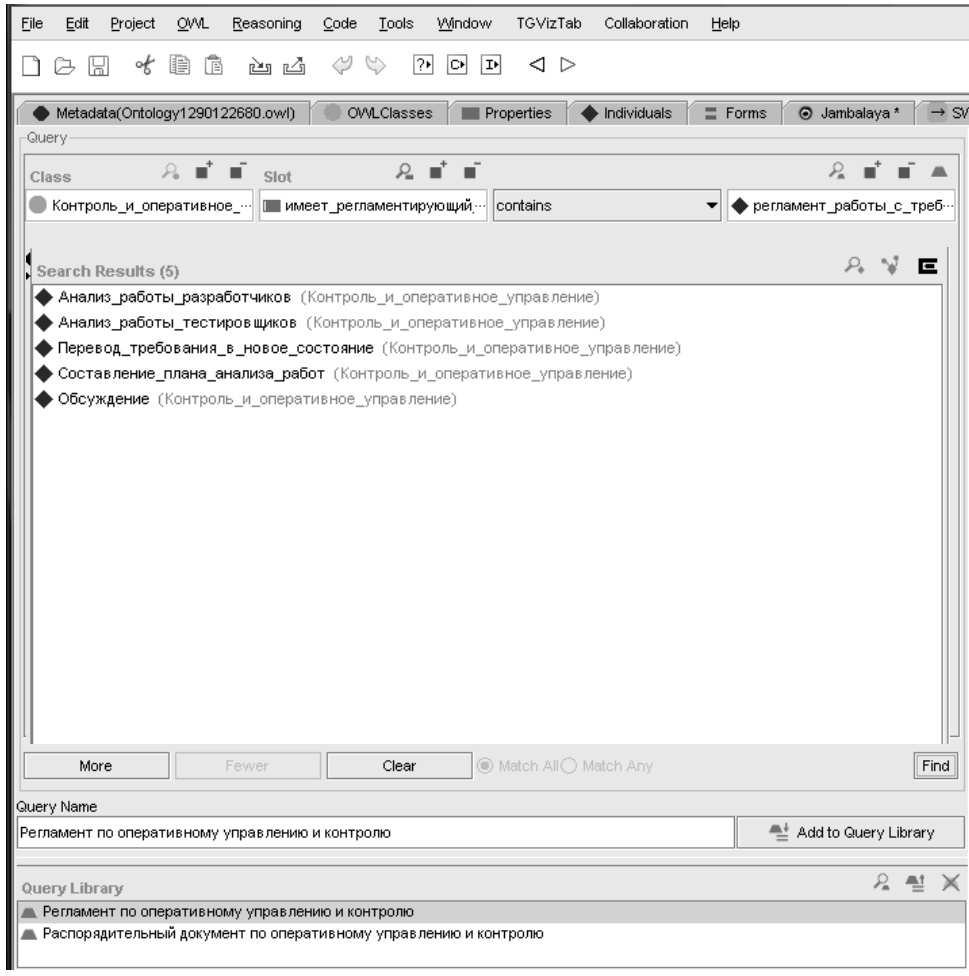


Рисунок 4 – Пример информационного поиска на онтологии

Заключение

В выполняемых исследованиях был предложен подход к разработке онтологии поддержки принятия решений при управлении программными проектами, базирующийся на использовании объектных моделей, а также существующих целей и критериев, задач, моделей и методов управления.

В соответствии с предложенным подходом была разработана онтология поддержки принятия решений с применением языков представления знаний в семантических сетях (*OWLDL, SWRL, SPARQL*), на основе которой осуществляется поиск решения для возникающих в ходе процесса разработки программных проектов проблемных ситуаций.

Благодарности

Работа выполнена в соответствии с грантом РФФИ 13-08-00321: «Интеллектуальное управление взаимодействием сложных процессов на основе онтологического анализа и обработки знаний в условиях неопределенности».

Список литературы

[1] Поддержка принятия решений при стратегическом управлении предприятием на основе инженерии знаний / Под редакцией Черняховской Л.Р. – Уфа: АНРБ, Гилем, 2010. – 128 с.

[2] Spinning the Semantic Web. Bringing the World Wide Web to Its Full Potential. Edited by Dieter Fensel, James A. Hendler, Henry Lieberman and Wolfgang Wahlster. Foreword by Tim Berners-Lee. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2003, 503 pp.

ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ОНТОЛОГИЙ ПРЕДМЕТНЫХ ОБЛАСТЕЙ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

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: *концептуальная информационная система, операция объединения онтологий, метамодель запросов к разнородным базам данных*

Abstract
Conceptual Information Systems unfold the conceptual structure of data stored in relational database. This article presents support of the FCA-merging of ontology from difference types of relational databases.

Введение

Для решения задач управления сложными системами требуется множество различных источников информации. В качестве таких источников сегодня чаще всего выступают реляционные базы данных (РБД). Анализ формальных понятий (АФП) расширяет диапазон возможностей работы с РБД, особенно в части реализации навигации по хранимым в них данным на основе онтологического подхода [1, 2]. Разнородность существующих промышленных систем управления базами данных (СУБД), таких как Oracle, MS SQL, Informics и др., ограничивает применение АФП в сфере анализа данных (Data Mining), поэтому крайне необходима возможность построения интегрированных онтологий из РБД с любым типом СУБД. Такой механизм предлагается в данной статье. Он реализован в операции объединения онтологий и включает универсальную метамодель для построения запросов к различным РБД.

1 Понятие концептуальной информационной системы

Концептуальная информационная система (КИС) [3, 4] призвана обеспечить извлечение знаний, которые заключены в базах данных и явным образом в них не представлены. Явно знания в базах данных присутствуют в форме концептуальных схем, описываемых с помощью диаграмм «сущность-связь». Однако для получения интегрированного структурированного представления хранимых данных, нужны специальные CASE-средства извлечения знаний в форме онтологий. Рассмотрим существующие подходы построения онтологий из баз данных.

1) Отображение схем баз данных в концептуальные модели и их объединение в единую интегрированную концептуальную схему, которая далее преобразуется в форму онтологии. Данный подход ставит целью создание универсального единого информационного пространства для решения задач управления. Однако вследствие своей сложности и высокой стоимости не может быть применим на многих предприятиях. Главным его недостатком является интеграция только явно заданных знаний, представленных в РБД в форме концептуальных схем. Знания, заложенные в самих хранимых данных, при этом не извлекаются [5, 6].
2) Построение онтологий с помощью применения онтологического терминологического словаря (ОТС) [7]. Данный подход устраняет главный недостаток предыдущего подхода, поскольку выявляет понятия, которые явно не описаны в РБД. Однако для генерации онто-

логии здесь требуется использование дополнительных знаний в форме ОТС. Недостатками данного подхода являются сложность реализации средств интеграции знаний и исключение конечного пользователя из стадии разработки онтологии.

3) Построение концептуальных информационных систем. Здесь для построения онтологии не нужно знать концептуальную схему РБД. Достаточно определить необходимые срезы хранимых данных, интересующие пользователя или в терминах OLAP-систем - измерения. Такие измерения получили название концептуальных шкал (conceptual scales).

КИС строятся на принципе представления в базе данных мультиаспектного описания предметной области. Каждого пользователя интересует лишь конкретный аспект хранимой информации, поэтому КИС предоставляет ему инструменты для извлечения необходимых ему знаний из РБД, в основе которых лежит методология АФП [2]. Согласно этой методологии РБД представляются в форме многозначных формальных контекстов, на основе которых извлекаются онтологии предметных областей.

В качестве CASE-средств построения КИС в настоящее время наиболее популярны Toskana J и Anaconda, а также их аналоги [8]. Их недостатком является невозможность одновременной работы с разнородными РБД, что не дает возможность автоматизированной поддержки построения интегрированных онтологий. Данный недостаток устраняется реализацией в КИС операции объединения онтологий с поддержкой запросов к различным источникам данных.

2 Операция объединения онтологий

Технология извлечения онтологий из реляционных баз данных с помощью АФП получила название *концептуального шкалирования* (conceptual scaling) [3, 4]. Реляционные отношения базы данных рассматриваются как многозначные контексты (many-valued context), которые посредством применения концептуальных шкал приводятся к однозначному виду (one-valued context). Каждая концептуальная шкала извлекает онтологию из множества значений одного или более атрибутов реляционного отношения. Однако для получения целостной картины о предметной области, которую отображают хранимые данные необходимо построение интегрированных онтологий. Для этого применяют операцию объединения онтологий. Рассмотрим алгоритм данной операции, представленный в [9].

Пусть имеем две исходные онтологии Ω_{R_i} и Ω_{R_j}, принадлежащие конечному множеству всех онтологий концептуальной информационной системы, извлеченные соответственно из реляционных отношений R_i и R_j. В общем виде процесс их объединения состоит из следующих этапов:

- реконструирование формальных контекстов исходных онтологий $\Omega_{R_i} \to K_{R_i}(G_{R_i}, M_{R_i}, I_{R_i})$ и $\Omega_{R_j} \to K_{R_j}(G_{R_j}, M_{R_j}, I_{R_j})$;
- формирование объединенного формального контекста из реконструированных контекстов исходных онтологий: $K = K_{R_i} \oplus K_{R_j} = (G_{R_i} \bigcup G_{R_j}, M_{R_i} \bigcup M_{R_j}, I_{R_i} \oplus I_{R_j})$;
- построение интегрированной онтологии на основе объединенного контекста $K \to \Omega$.

Процесс формирования объединенного контекста показан на рисунке 1.

На первом шаге производится теоретико-множественное объединение реконструированных контекстов. В случае $(M_{R_i} \neq M_{R_j} \wedge G_{R_i} \not\subset G_{R_j} \wedge G_{R_j} \not\subset G_{R_i}) \vee (G_{R_i} \neq G_{R_j} \wedge M_{R_i} \not\subset M_{R_j} \wedge M_{R_j} \not\subset M_{R_i})$ результатом шага будет нечеткий объединенный контекст.

Снятие неопределенности (см. рисунок 1б) производится путем приведения нечетких ФК $K_{R_{ij}} = (G_{R_i}, M_{R_j}, I_{R_{ij}})$ и $K_{R_{ji}} = (G_{R_j}, M_{R_i}, I_{R_{ji}})$ со значениями инцидентности равными 0.5 к бинарному виду. Вообще говоря, данная операция должна осуществляется при участии экс-

перта ПрО. Вместе с тем, наличие общего первичного источника данных – РБД, позволяет обеспечить эффективную информационную поддержку эксперта за счет автоматического извлечения этих ФК из базы данных по концептуальным шкалам, на основании которых были построены исходные онтологии.

В первичном источнике данных для объединяемых онтологий – РБД, может присутствовать информация об отношениях между множествами объектов G_{R_i} и G_{R_j} реконструированных ФК. Именно в этом случае для дальнейшего семантического насыщения объединенного ФК возможно и целесообразно привлечение методологии реляционного концептуального анализа (РКА) [10]. Результат применения РКА показан на рисунке 1в.

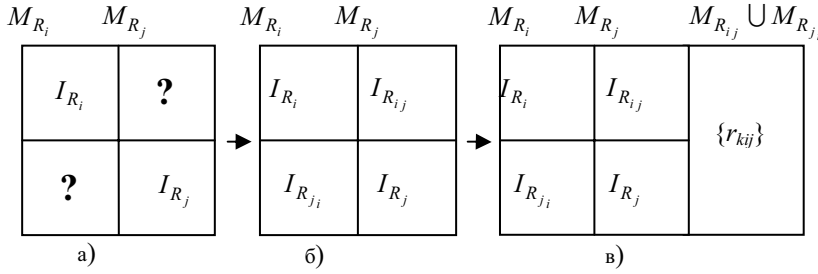


Рисунок 1 – Шаги формирования объединенного формального контекста для построения интегрированной онтологии

В общем случае, построение формальных контекстов производится путем формирования запросов к разнородным источникам данных. Семантические конфликты, возникающие при формировании формального контекста, разрешаются путем его дальнейшей обработки с применением процедур кларификации и редуцирования.

3 Реализация поддержки запросов к различным источникам информации в КИС

Представим формальный контекст в виде множества реляционных запросов к источникам данных вида $K = \{Q\}$, где Q запрос есть кортеж вида: $Q = \{E_o, E_p, E_i\}$, где E_o – домен объектов; E_p – домен свойств; E_i – домен инцидентности объектов и свойств. Для простоты понимания назовем домены элементами данных источников информации. Если предположить, что элементы данных могут принадлежать разным базам данных, то возникает необходимость в некотором универсальном подходе к извлечению данных. В результате анализа CASE-средств построения запросов, была предложена ER-модель, позволяющая не только хранить информацию о каждом источнике данных, но однозначно определять принадлежность к источнику той или иной записи (рисунок 2). Рассмотрим основные понятия этой модели.

DataSources – класс, описывающий источники информации, к которым имеет доступ КИС. Его основными атрибутами является тип (DS_TYPE), соответствующий типу используемой РБД СУБД (ORACLE, MSSQL, DB2, Sybase, Informix и др.), псевдоним базы данных DS_ALIAS, имя сервера DS_SERVER (или его ip- адрес) и атрибуты идентификации пользователя DS_LOGIN и DS_PASSWORD.

Следующий класс DataElements представляет описание элементов источников данных. Он содержит наименование реляционной таблицы DE_TABLE, наименование поля таблицы DE_FIELD и ограничения на отбор значений этого поля DE_LIMITS. Между классами источников и элементов данных установлено отношение «один-ко-многим». Кардинальность отношения дает возможность существования «пустого» источника данных, т.е. не имеющего элементов. Элемент данных всегда принадлежит только одному источнику.

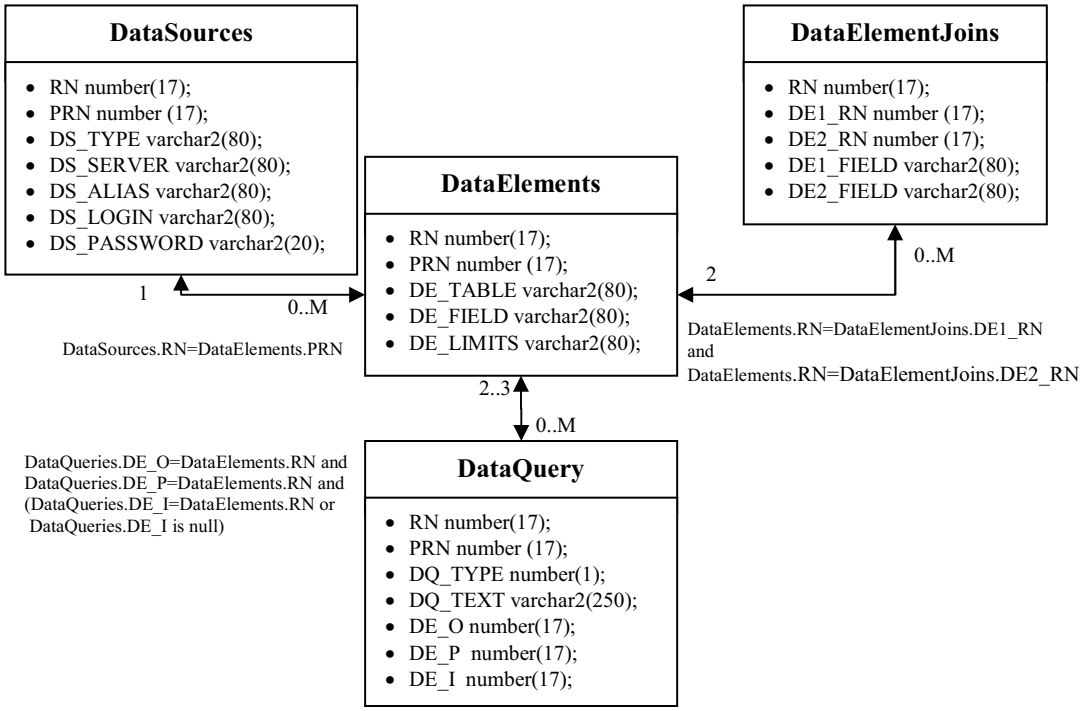


Рисунок 2 - ER-модель построителя запросов

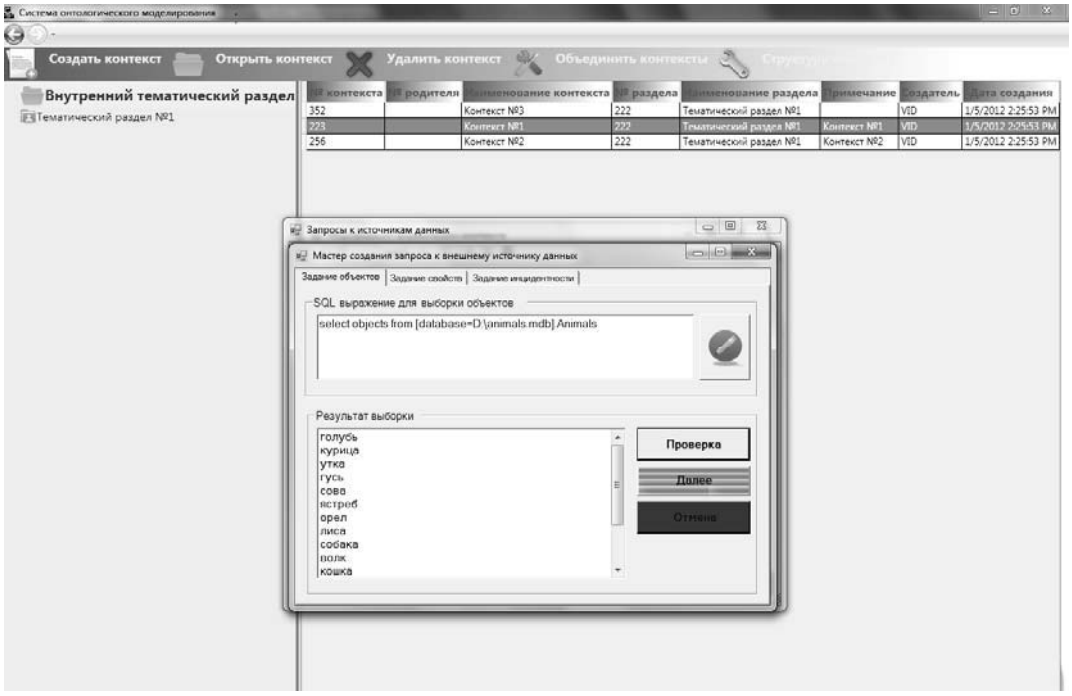


Рисунок 3 - Скриншот мастера запросов к источникам данных

Класс DataElementJoins предназначен для установки бинарных реляционных соединений между элементами данных, в общем случае принадлежащих к разным источникам. Поля DE1_RN и DE2_RN -это внешние ссылки на элементы данных, а поля DE1_FIELD и DE2_FIELD указывают связываемые поля элементов.

Наконец, класс DataQueries представляет собой базовый класс описания запросов к источникам информации. Каждый запрос должен включать в себя элемент данных, для отбора объектов DE_O, элемент данных для отбора свойств объектов DE_P и элемент данных для отбора инцидентности объектов и их свойств DE_I. В частности, последний элемент не обязателен для случая. когда два предыдущих элемента принадлежат одной и той же таблице одного и того же источника данных.

Процедура извлечения онтологии из РБД на базе этой модели, включает вызов мастера запросов (рисунок 3), посредством которого, пользователь самостоятельно создает или выбирает элементы данных для автоматического создания формального контекста, что значительно повышает эффективность процесса построения онтологий предметных областей. Конечному пользователю не нужно знать язык SQL, поскольку все запросы формируются автоматически. Формат формируемого запроса:

Select <имя поля> from [<имя источника>].<имя таблицы>;

Например, так выглядит запрос к базе данных о животных в MS ACCESS:

Select q_cathes from [database=D:\animals.mdb].catches;

Заключение

Поддержка извлечения онтологий из различных источников информации в КИС расширяет возможность применения АФП для построения интегрированных онтологий. Таким образом, создание онтологий становится более эффективным и не требует от пользователя знаний технологий баз данных для формирования SQL-запросов. Результаты работы могут быть применены в средствах построения концептуальных информационных систем, таких как, Toscana J, Anaconda и др., работающих с РБД.

Список литературы

[1] Stumme G., Wille R., Wille U. Conceptual knowledge discovery in databases using formal concept analysis methods // LNCS 1510. - Berlin-Heidelberg: Springer, 1998. - P. 450-458.

[2] Ganter B., Wille R. Formal Concept Analysis. Mathematical foundations. - Berlin-Heidelberg: Springer, 1999.

[3] Stumme G. On-Line Analytical Processing with Conceptual Information Systems.

[4] Stumme G. Acquiring Expert Knowledge for the Design of Conceptual Information Systems. - Springer-Verlag Berlin-Heidelberg 1999.

[5] Stefanoni G. Web ontology mediated extraction of relational data // Faculty of Computer Science. July 2009.

[6] Mapping Relational Data to RDF with Virtuoso's RDF Views (http://virtuoso.openlinksw.com/whitepapers/relational%20rdf%20views%20mapping.html)

[7] Габдрахманов, И.Н. Технология генерации онтологии базы данных с помощью онтологического словаря / И.Н. Габдрахманов, В.Н. Кучуганов, Д.В. Медведев и др. // Онтология проектирования. – 2012. - №4. – С. 28-38.

[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] Виноградов, И.Д. Алгоритм объединения концептуальных схем на основе реконструкции их формального контекста / И.Д. Виноградов, С.В. Смирнов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды III международной конф. (Самара, 4-9 сентября, 2001 г.) – Самара: СамНЦ РАН, 2001. - С. 213-220.

[10] Vinogradov, I.D. The extension of ontology integration method by means of relation conceptual analysis / I.D. Vinogradov, S.V.Smirnov // 13-я Национальная конф. по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012 (16-20 октября 2012 г., Белгород, Россия): Труды конф. Т. 4. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. - С. 220.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ОБЛАЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СОПРОВОЖДЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ СИТУАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ

И.А. Степановская

Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН
117997, Москва, Профсоюзная 65, Россия
av245573@comtv.ru, irstepan@ipu.ru
тел: +7 (495) 334-91-69

Ключевые слова: *облачные технологии, техногенная и экологическая безопасность, риски, grid-проекты, ситуационные центры*

Abstract
The problem of creation of basis cloudy service of support of the distributed system of the situational centers s is considered. Cloud programming model for analysis and implementation of converged applications is introduced.

Введение

Вместе с развитием мировой экономики неуклонно растут масштабы техногенных и экологических рисков, быстро распространяющихся и захватывающих территории сопредельных государств. Определяющей тенденцией в области обеспечения безопасности становится разработка grid-проектов разных масштабов, направленных на формирование распределенных систем ситуационных центров (РССЦ), способных контролировать возникновение и развитие интегрированных рисков. В этой расширяющейся сфере задач и приложений контроля безопасности явно прослеживаются признаки конвергентности, т.е. сочетания большого разнообразия с общностью, взаимодополняемостью и единым направлением развития [1-4]. Существенную проблему практической реализации концепции конвергентного управления составляет формализация критериев, выбор принципов и показателей, а также разработка типовых методов и моделей. В рамках предлагаемого методологического подхода под конвергентным управлением понимается «программируемое» облако конвергентных информационно-управляющих услуг, формируемое на основе единого технологического процесса построения системы контроля безопасности в соответствии с ключевыми принципами системного подхода, включая модульность, адаптируемость, оперативная модернизация, формализация и типизация проектных решений, автоматизацию, этапность и др.

В работе описывается разработанная в соответствии с предлагаемым подходом облачная система «Виртуальный офис РССЦ».

1 Принципы организации облачной системы «Виртуальный офис РССЦ»

Архитектурно облачная система «Виртуальный офис РССЦ» характеризуется как многоуровневая облачная среда, обладающая механизмами предоставления сервисов в соответствии с некоторой концептуальной моделью, определяющей стратегию тиражирования, конфигурирования, вложения и взаимодействия облаков в пределах одной системы.

Облако виртуального офиса построено в соответствии с концепцией инфраструктуры пространственных данных (ИПД), адекватной приложениям пространственно-распределенного наблюдения, контроля и мониторинга раннего оповещения и быстрого реагирования. Согласно определению [5-7], ИПД представляет собой организационную структуру, нормативно-правовое обеспечение, технологии, технические средства и территориально-

распределенную систему сбора, обработки, хранения и предоставления потребителям пространственных данных. Уточняя это определение, под ИПД виртуального офиса будем понимать информационные ресурсы, содержащие данные об объектах, событиях и явлениях, являющихся источниками или последствиями распространения загрязнений, связанные с конкретным географическим положением, моментом или периодом времени, допускающие электронную обработку и представление результатов в формате геопортала с 2D/3D/4D-визуализацией данных.

Центральным облаком, поддерживающим настройку на информационные ресурсы виртуального офиса, является ***облако геоинформационного хранилища данных (ГХД)***. Оно сочетает в себе несколько функциональных возможностей:

- сервис сбора, интеграции и представления данных о процессах пространственного развития и распространения;
- сервис сбора, управления, хранения и передачи информации;
- сервис OLAP (on-line analytical processing) геоинформационного анализа и пользовательского интерфейса геопортала.

Как сервис сбора, интеграции и представления данных о процессах пространственного развития и распространения, ГХД представляет собой объектно-ориентированную систему, объектом которой служит полимасштабное множество (фрактал).

Фрактальный объект в информационной технологии ГХД формально описывается «индикаторным» графом, способным представлять как структуру и атрибутивные данные о территориально-распределенных и территориально-развивающихся объектах, процессах, явлениях и др.

Примерами индикаторных графов могут служить следующие:

- стволовидные графы, описывающие структуру водных бассейнов с размещенными водозаборами, постами контроля качества воды;
- ризомные структуры, представляющие закономерности «причинно-следственных отношений», по которым могут развиваться события и явления (например, вследствие интегрированных рисков);
- полигоны, используемые для картографического оконтуривания зон (климатических, природных, административных, производственных и др.);
- анимационные полигоны, используемые для картографической визуализации динамики контуров пространственного распространения с дискретными промежуточными этапами (фазами) развития (например, рисков), в том числе твиннинг (перемещение, масштабирование, поворот, искажение) и шейпинг.

Среди специализированных атрибутов фракталов - масштаб, пространственная конфигурация распространения, топологические данных об относительном пространственном размещении. Система сопровождения ГХД предусматривает ведение реестра пространственных объектов и импорт картографической топологической информации о контролируемых объектах.

Как сервис сбора, управления, хранения и передачи информации ГХД представляет собой набор конфигурируемых между собой специализированных накопителей информации типа «Электронная библиотека», «Архив сводок мониторинга», «Электронный план», «Журнал сообщений», «Графический процессор», «Мониторинг динамики параметров объекта», «Список рассылки» и др.

Вся классическая технология аналитической обработки хранилищ данных, включая ретроспективный анализ и OLAP, в рамках ГХД настроена на задачи мониторинга и анализа динамики атрибутов объектов и событий, формально представленных индикаторными графами. Такой подход облегчает планирование автоматизированных процедур комплексного монит-

ринга, ситуационного анализа и принятия решений на глубоком содержательном уровне, а также обеспечивает интероперабельность между конфигурируемыми облаками.

2 Стратегия конфигурирования облачной системы «Виртуальный офис РССЦ»

Базовая облачная композиция для приложений ИПД формально определяется парой {S, D}, где S - автоматическая измерительно-информационная сеть, D - ГХД, используемое для приема и интеграции данных сети.

Облако «Автоматическая измерительная система» представляет собой процедуру настройки на архитектурную модель автоматических измерительных информационно-управляющих сетей (ИИУС), способных к системному контролю и оперативной доставке данных о распространении рисков. Модель описывает иерархическую территориально-распределенную сеть стационарных и мобильных измерительных автоматических постов мониторинга, находящихся в плавающем или погружном, подземном, наземном или воздушном положении. Объект типа «Пост» представляется совокупностью датчиков, контрольно-измерительных приборов, контроллера управления и системы сигнализации. Функционально «Пост» рассматривается как система сбора и хранения информации, поступающей от датчиков (первичных преобразователей) и контрольно-измерительных приборов (вторичных преобразователей), а также регистрации нарушений норм контролируемого процесса.

В системе сопровождения данных об объекте типа «ИИУС» предусматривается поддержка свойств гибкой функционально-территориальной расширяемости и трансформируемости (за счет добавления новых функций контроля и включение в состав территориально распределенных систем), совместимости по форматам представления результатов и семантической (картографической) интерпретируемости результатов.

Основное назначение облака «Автоматическая измерительная система» в конфигурации D обеспечение коммутационной функции приема данных от пространственно распределенной системы источников.

Непрерывность измерений распределенных ИИУС создает предпосылки для организации обработки данных в режиме автоматизированного контроллинга, позволяющего оперативно идентифицировать динамику состояния пространственно распределения загрязнителей, оценивать интегрированные риски разных профилей, фиксировать риски возникновения чрезвычайных ситуаций и инициировать деятельность по планированию и организации принятия своевременных мер по предотвращению их роста. Однако основным препятствием на этом пути оказывается несогласованность измерительного потенциала ИИУС и информационных потребностей систем поддержки принятия решений. Она приводит к тому, что измерительный потенциал ИИУС используется не полностью, а для адекватного принятия решений не хватает информации. При этом необходимо иметь в виду, что измерительная информация, интегрируемая в ГХД, представляет собой большую научную, экономическую и социальную значимость. Речь идет о широком круге задач информатизации, связанных с организацией совместной работы экспертных советов, государственных ведомств и частных компаний, которые объективно не располагают автономией в принятии решений. Все это определяет необходимость использования облака «Система поддержки коммуникативных действий (СПКД)» [8-10].

Главной задачей облака СПКД является организация сбора данных не «от данных», а «от задач и стиля принятия решений». Для контроля и управления крупномасштабными процессами экологической безопасности наиболее адекватным является стиль интерсубъективного [11] коллективного анализа, принятия и исполнения оперативных, среднесрочных и долгосрочных решений.

К числу принципов интерсубъективного стиля управления относятся следующие: разграничение компетентности и ответственности в управленческом процессе (по уровню, масштабам и отдельным тематическим направлениям);

- планирование совместного обсуждения и принятия согласованных решений на основе клиент-ориентированных стратегий участия в управленческом процессе (информирование, консультация, обсуждение, возражение, согласие, утверждение, выдвижение нестандартного решения, принятие индивидуального решения и др.);
- демонстрация роли, задач и сценария деятельности «субъекта» в управленческом процессе;
- заказ персонализированных услуг мониторинга со стороны каждого субъекта, обеспечивающих его аргументированную позицию на всех этапах сценария.

На рисунке 1 представлена обобщенная структура облака СПКД по аналитическому планированию автоматизированного контроллинга.

Рисунок 1 – Структура облака СПКД

Задача системы планирования ИПД заключается в выборе состава и конфигурации измерительно-информационной сети S, ориентированной на тематику управленческих задач и специфику организации процесса принятия решений. Выбор сервисных средств доступа к данным ГХД осуществляется в ориентации на специализированные «рабочие места» web-клиентов, составляющих единую экспертно-аналитическую рабочую группу, ориентированную на определенный круг задач принятия решения. В целом процедура планирования приобретает характер заказа на услуги ИПД для принятия решений.

Сервис обеспечивает планирование следующих компонент*:*

- организационная структура (состав рабочей группы; тематические направления экспертно-аналитической деятельности);
- технология процесса принятия решений (схема и правила проведения делового процесса с учетом клиент-ориентированных стратегий участия);
- планирование системы персонализированных сервисных и информационных услуг геопортала (обеспечивающих информатизацию и поддержку исполнительной деятельности каждого из членов рабочей группы);
- планирование территориально-распределенной системы сбора, обработки, визуализации данных (настройка системы сопровождения ГХД КЭМ РО).

Подсистема реализации запланированной технологии включает следующие облачные сервисы:

- диспетчер приема измерительных данных;
- диспетчер делового экспертно-аналитического процесса;
- диспетчер рассылки электронной периодической отчетности;
- система подготовки материалов для геопортала и видеоконференций.

Рассматриваемое облако демонстрирует пример конфигурирования независимых облаков в самоорганизующуюся конвергентную систему, представляющую собой параллельную и взаимосвязанную систему независимых облачных диспетчеров с единой системой настройки. Любое изменение в системе настройки тотчас же включается в список директив и влияет на ход процесса диспетчеризации.

В рамках данной консолидированной облачной системы диспетчеризации осуществляется формирование запросов на привлекаемые потоки измерительных и информационных данных, необходимых для полной информатизации принятия решений, связанных с проведением комплексного мониторинга раннего оповещения и быстрого реагирования. Привлекаемые ресурсы оказываются оптимизированными под решение некоторого набора конкретных задач анализа и принятия решений. По ходу экспертно-аналитического процесса в созданные заранее планы могут быть внесены оперативные коррекции.

Сам экспертно-аналитический процесс приобретает характер динамической интегрированной экспертной системы, формируемой в автоматизированном режиме на основе привлечения данных из распределенных информационных источников под текущие информационные потребности управления.

3 Примеры приложений облачной системы «Виртуальный офис РССЦ»

Описанная стратегия конфигурирования управленческого облака позволяет формировать практически неограниченное множество частных облаков, различающихся профилем интегрированных рисков и характером принимаемых управляющих решений.

Для примера рассмотрим несколько частных облаков, сформированных на основе облачной системы.

Виртуальный офис предприятия промышленного мониторинга (ПЭМ) территорий, подверженных влиянию процессов уничтожения химического оружия [12]. Функциональная роль ПЭМ - мониторинг раннего оповещения и быстрого реагирования на загрязнения атмосферного воздуха, вызванные авариями или нарушениями технологического процесса уничтожения химического оружия. Соответствующий экспертно-аналитический процесс реализован в виде «Автоматизированной системы документооборота предприятий типа ПЭМ», ориентированной на типовые рабочие места сотрудников ПЭМ и внешних организаций регионального и отраслевого уровня и Гидромета.

Система настройки включает следующие блоки:

- блок настройки на организационную структуру и конкретный состав участников;
- блок настройки на организационный регламент работы и взаимодействия персона в штатных и нештатных условиях;
- блок настройки на регламент деловых процессов обработки и согласования входных и выходных пакетов электронной документации;
- блок настройки на структуру и параметры ИИУС РО непрерывного контроля атмосферного воздуха, а также системы отбора проб почвы и воды на территории размещения техногенно опасного производства;
- блок настройки на календарный план автоматизированного синтеза отчетно-аналитических оперативных и ретроспективных материалов об экологическом состоянии контролируемой территории в штатных и нештатных условиях (со встроенным блоком

оценки рисков чрезвычайных ситуаций, отражающем директивы распорядительных документов, поступающих от внешних природоохранных организаций, Гидромета и органов МЧС);

- блок настройки на нормативные документы и акты, регламентирующие процессы материально-технического снабжения и обеспечения сопровождения измерительной техники и других технических средств по этапам их жизненного цикла;
- блок настройки на процедуру автоматизированной обработки документов по планированию и контролю антропогенной нагрузки, оказываемой контролируемым техногенно опасным производством (по форме 2 ТП).

Система автоматизированного синтеза ретроспективных справочных данных и оперативных документальных сводок о рисках трансграничного распространения тотального химического загрязнения (цинкового, свинцового, нефтяного и др.) для ***виртуального офиса аналитического центра контроля рисков трансграничных переносов в пределах водосборных и речных бассейнов*** [13,14]**.** Система настраивается на фрактальную модель водного бассейна, на набор контролируемых загрязнителей, на структуру измерительных постов. Функциями данной системы являются автоматическая оценка и подготовка документальной информации о риске тотального химического загрязнения на ранней стадии его возникновения и оповещении ответственных лиц, занимающихся организацией мероприятий по предотвращения развития и ликвидации последствий и др.

К числу перспективных частных облаков, требующих планирования и автоматизированной реализации крупномасштабной копроративной деятельности, можно отнести ***виртуальный офис контроля и управления качеством технологического сопровождения ИИУС РССЦ.*** Функциональная роль офиса - автоматизированный контроль материально-технического снабжения и сопровождения измерительной техники, оценка уровня соответствия действующим нормам и стандартам, выдача рекомендаций по соответствующим направлениям совершенствования.

4 Стратегия управления задачами в облачной системе «Виртуальный офис РССЦ»

Очевидно, что несмотря на значительную роль частных облаков, системный подход к контролю требует их многоуровневой структуризации и в распределенные, параллельные и многослойные структуры, соответствующие задачам перспективных классов программ безопасности, обеспечивающих контроль рисков функционально-полных профилей.

Предлагаемая стратегия управления задачами состоит в выборе типовых grid-проектов, ориентированных на контроль и принятие решений по снижению рисков с набором взаимодополняющих профилей. К такой совокупности отнесем grid-проекты отраслевого, межотраслевого и трансграничного уровня.

Задачам grid-проектов отраслевого уровня соответствуют программы импактного (объектного) и стратегического контроля. Программы импактного уровня направлены на контроль рисков специфических профилей интегрированных рисков, связанных с постоянно действующим объектом хозяйственной деятельности.

Программы импактного контроля типовых объектов отрасли рассматриваются как составные компоненты отраслевых программ стратегического контроля в пределах территорий разного уровня (регионов, природных и индустриальных зон и др.). Цель отраслевых программ стратегического контроля состоит в организации наиболее широкого использования упреждающих мер по снижению рисков, источниками которых оказываются объекты отраслевой инфраструктуры. Решения, принимаемые на основе отраслевых программ стратегического контроля группируются по следующим направлениям:

- развитие и совершенствование системы охрана труда и производственной безопасности, регламентирующих действия персонала;
- переход на экологически безопасные технологии;
- управление повышение эксплуатационной надежности систем повышенной техногенной и экологической опасности;
- программно-целевое управление ликвидацией ущерба, нанесенного экономическим системам и природной среде и др.

Отраслевые программы стратегического контроля требуют использования информационно-статистических услуг мониторингов следующих типов*:*

- мониторинг состояния безопасности объектов отраслевой инфраструктуры;
- мониторинг экологического ущерба, нанесенного природной среде в ходе эксплуатации объектов отраслевой инфраструктуры и проектов по его ликвидации;
- мониторинг качества процессов ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на объектах отраслевой инфраструктуры и анализ темпов и оценка эффективности мероприятий по их смягчению и ликвидации последствий;
- мониторинг проектов и проблем реализации программно-целевого управления экологическим сопровождением развития отраслевой инфраструктуры, направленным на снижение рисков безопасности;
- мониторинг уровня технологического и аппаратно-методологического оснащения как объектов отраслевой инфраструктуры и сравнение с уровнем предложений фирм-поставщиков изделий на мировой и отечественный рынок.

Предложенный состав системы информационного мониторинга имеет существенное значение для организации эффективного взаимодействия управляющих организаций отрасли по обоснованию, согласованию и выработке предложений по стратегическому развитию безопасности объектов отраслевой индустрии.

Программы grid-проектов межотраслевого уровня предназначены для контроля рисков безопасности территорий, подверженных интенсивному хозяйственному освоению.

Программы grid-проектов контроля трансграничных рисков разрабатываются в интересах поддержки функционирования распределенных межрегиональных и межнациональных сетей ИИУС, ориентированных на контроль и принятие своевременных мер по снижению рисков в районах трансграничного переноса загрязнителей атмосферы и водных ресурсов (например, на прибрежных территориях водных бассейнов).

Заключение

Проблема эффективного разработки комплексного, согласованного и централизованного характера управления снижением интегрированных техногенных и экологических рисков, как сложной организационно-технической системой давно находится в фокусе внимания. Однако глобальность и сложность практически исключают возможность ее решения традиционными методами. В работе предложен подход, заключающийся в разработке облачных технологий, позволяющих осуществить аналитическую систематизацию и планирование конструктивного решения неограниченного множества управленческих задач, рассматриваемого с позиций конвергентных систем.

Список литературы

[1] Райков А.Н. Конвергентное управление и поддержка решений // Москва: Издательство ИКАР, 2009. – 245 с.

[2] Кобякова Н.Г., Сараев В.Н. Конвергентные системы управления - инфраструктура XXI века // Экономические стратегии, №4, 2009 (http://www.intelros.ru/pdf/Reyting/Saraev-7.pdf).

[3] Яшенкова Н. Конвергентные услуги в сервисно-ориентированной архитектуре (http://www.netris.ru/downloads/articles/t-comm_oss.pdf).
[4] Самсонов М.С. О терминах real-time, prepaid, конвергентное решение // "Мобильные системы", №12, 2004, стр. 44-49.
[5] Концепция создания и развития ИПД РФ // Пространственные данные. — 2006. — № 3.
[6] Giff G., Loenen B. van, Crompvoets J., Zevenbergen J. Geoportals in selected European states: A non-technical comparative analysis:http://www.gsdi.org/gsdi10/papers/TS41.3paper.pdf
[7] Кошкарев А.В. Геопортал как инструмент управления пространственными данными и геосервисами // Пространственные данные. — 2008. — № 1.
[8] Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами: Учебник под ред. Д.А.Новикова. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 264 с.
[9] Виттих В.А. Ситуационное управление с позиций постнеклассической науки // Онтология проектирования, №2(4)/2012, с.7-16.
[10] Виттих В.А. Разработка систем поддержки коммутативных действий // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIV Международной конференции (19-22 июня 2012 г., Самара, Россия). – Самара: Самарский НЦ РАН, 2012. - С. 125-130.
[11] Виттих В.А. К определению понятия «Ситуационное управление» // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIV Международной конференции (19-22 июня 2012 г., Самара, Россия). – Самара: Самарский НЦ РАН, 2012. - С. 112-115.
[12] Управление развитием крупномасштабных систем. М.: Физматлит, 2012. – 496 с.
[13] Степановская И.А., Баренбойм Г.М., Авандеева О.П. Web-технологии для мониторинга водных объектов // Методы оценки соответствия. 2012. № 3. С. 24-30.
[14] Авандеева О.П., Степановская И.А., Баренбойм Г.М. Проектирование информационной системы мониторинга качества вод (с учетом особенностей нефтегенного загрязнения) / Сборник трудов Второй открытой конференции Научно-образовательного центра. 20-21 декабря 2012 г. М.: ИВП РАН, Кафедра гидрологии МГУ им. М.В.Ломоносова, 2012. С. 12-26.

СТАРТАП ПРОЕКТА ОНТОРИТОР

Н.М. Боргест[1,2], **С.В. Смирнов**[1]

[1]Институт проблем управления сложными системами РАН,
443020, г. Самара, ул. Садовая, 61, Россия
borgest@yandex.ru, smirnov@iccs.ru
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

[2]Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)
443086, Самара, Московское ш. 34, корп. 10, Россия
тел: +7 (846) 267-46-47

Ключевые слова: *онтология, речевые технологии, коммуникация, семантика, риторика, неформальная логика*

Abstract
The paper analyzes legacy of ancient thinkers in the area of rhetoric and ontologies. Modern advances in development of Support Decision-Making Systems and Communication Actions Support Systems estimated. On this basis expressed the idea of a new project “OntoRhetor”.

1 Общие положения

Лавинообразное накопление знаний во многих областях человеческой деятельности наметило в конце 20-го столетия перспективу смены парадигмы процесса научных исследований в отношении сложных развивающихся систем, обозначился новый тип научной рациональности – постнеклассическая научная мысль. Суть новой парадигмы не только включенность человека в познаваемую систему отношений и бытия в целом, но и первичность онтологического анализа исследуемой предметной области.

Продолжается начавшаяся с Аристотеля дифференциация наук, демонстрируя высочайшую эффективность такого подхода. Но и интегративные процессы со своей стороны также дают плодотворные импульсы научной мысли, способствуют появлению новых знаний. В этом смысле возросший в последние годы интерес к онтологиям – это новый этап переосмысления бытия на новом витке научной спирали, поиск нового «Органона», нового инструментария, новых эффективных техник. В этом «хорошо забытом» и общем лоне ищут и находят свои истоки различные модные ныне теории, которые развивают, дополняют, а во многом и повторяют в новой культурно-технической среде научные подвиги антиков.

Анонсируемый проект *ОнтоРитор* (онтология + ритор) – это, по мнению авторов, не дань моде, а естественный, ныне легко идентифицируемый в научной периодике и научных дискуссиях процесс обновления подхода к накоплению, передаче и повторному использованию знаний; подходу, расширяющему возможности будущих человеко-машинных систем.

2 Наследие Аристотеля

В настоящее время цитируемость Аристотеля многократно возросла в связи с бурным развитие информационных технологий, захлёстывающим нашу цивилизацию непомерным объёмом информации, поиском путей фиксации достигнутых знаний. Всё это вернуло нас всех, разбежавшихся по своим научным и отраслевым дорожкам, на исходную позицию, на анализ бытия предметных областей, в онтологию. Появившиеся международные научные журналы «Прикладные онтологии», «Онтология проектирования», ассоциации, лаборатории,

компании, сайты, форумы и другие объединения, свидетельствуют о росте интереса к онтологии, как в научном, так и в прикладном плане.

Известная аристотелева онтологическая триада «концепт-атрибут-отношение» стала основой всех современных достижений онтологов, начиная от языка OWL и онтологического редактора Protégé до мультиагентных технологий и прикладных информационных систем.

Другой важный научный вклад Аристотеля, на который авторы хотели бы опереться, это научные основы риторики. В известном труде «Риторика» Аристотель определил «риторику, как возможность находить способы убеждения относительно каждого данного предмета» [1, кн. 1, гл. 2]. Из способов убеждения Аристотель выделил нетехнические и технические. «Нетехническими я называю те способы убеждения, которые не нами изобретены, но существовали раньше [помимо нас]; сюда относятся: свидетели, показания, данные под пыткой, письменные договоры и т.п.; техническими же [я называю] те, которые могут быть созданы нами с помощью метода и наших собственных средств, так что первыми из доказательств нужно только пользоваться, вторые же нужно [предварительно] найти». Способы убеждения по Аристотелю «находятся в зависимости от характера говорящего, от настроения слушателя, от самой речи. Эти последние заключаются в действительном или *кажущемся доказывании*».

Не менее значим более ранний труд «Топика» - это одна из книг аристотелевского «Органона», посвященная вопросам логической организации мышления в коммуникативных ситуациях: в устной беседе, философской дискуссии, при публичном изложении некоторой темы и т.п. Изложенная в труде техника ведения диалога, теория *диалектического* (трактуемого как разговорного) силлогизма, исходящего не из «научных», а из вероятных посылок. Конечная цель такого диалога не достичь истины, а *убедить* собеседника. Трактат получил свое название от так называемых *«общих мест»* – специфических оснований, которыми, по Аристотелю, пользуются участники дискуссии. Особенность коммуникативного содержания состоит, по Аристотелю, в том, что оно основано не на *онтологических* началах и истинных положениях, а лишь на *правдоподобных*, т.е. кажущихся правильными большинству людей или мудрейшим из них. Поэтому в коммуникации, считал Аристотель, необходимо использовать особую логическую технику [2-4].

Топы по Аристотелю задают общую структуру в пространстве коммуникативного содержания. Высказывание доводов и положений предполагает фиксацию определенного топа. Неконтролируемые переходы из топа в топ запрещались, но предполагался параллелизм между строением мыслительного содержания и строением речевой формы.

Свою современную интерпретацию топика получила в *системомыследеятельностной* методологии (СМД-методологии). В СМД-методологии выделяются несколько этапов организации интеллектуальных процессов (мышления, понимания, рефлексии) [3].

Принципиальным допущением в диалоге является «возможность двоякого решения», а также отсутствие «строго определенных правил». Рассматривая «блаженство, как цель человеческой деятельности», Аристотель трактует «цель речи совещательной - польза», а «польза - благо». «…для каждого отдельного человека благо то, что ему указывает разум относительно каждого частного случая; благо - нечто такое, присутствие чего делает человека спокойным и самоудовлетворенным; оно есть нечто самодовлеющее, нечто способствующее возникновению и продолжению такого состояния, нечто сопутствующее подобному состоянию, мешающее противоположному состоянию и устраняющее его». Важные категории доверия в диалоге определяются Аристотелем как «разум, добродетель и благорасположение» [2].

Высоко оценивая это наследие с позиций современных достижений в информатике, системном анализе и других дисциплинах, можно утверждать, что ещё не всё ценное в трудах великого мыслителя нашло своё воплощение в ведущихся сегодня разработках и готовых продуктах. И пример тому - риторика, как перспективный инструмент коммуникативного взаимодействия в человеко-машинных системах.

Своё дальнейшее развитие риторики в современных системах поддержки коммуникативных действий (СПКД) [5] авторы видят в интеграции разрабатываемых онтологий предметных областей в сочетании с алгоритмизированными инструментариями иллукативной и нейтрософичной логик и бурно прогрессирующих технологий обработки текстов, а также речевых технологий.

3 Нейтрософия

Форсируя длинный путь развития логики, получившей свое начальное оформление еще у антиков, вслед за многозначными логиками и нечеткостью Заде в 90-е годы прошлого века в работах Флорентина Смарандаке оформилось научное направление, названное нейтрософичная логика [6].

Нейтрософия - это наука или знание о нейтральных объектах, теория, созданная как обобщение диалектики. Эта теория рассматривает каждое понятие или идею «A» вместе с соответствующей противоположностью или отрицанием «antiA» и спектром нейтральностей «neutA». Как «neutA», так и «antiA» отсылают к «nonA». В этой теории каждая идея «A» имеет тенденцию нейтрализоваться и уравновешиваться посредством «antiA» и «nonA». Следовательно, нейтрософия базируется не только на анализе противоположных суждений, как это имеет место в диалектике, но также и на анализе нейтральностей, промежуточных между ними. В классическом смысле «A», «neutA», «antiA» между собой не пересекаются. Но с учетом того, что границы между понятиями часто являются нечеткими, случается, что «A», «neutA», «antiA» имеют общие части. Нейтрософия может быть расширена до нейтрософичной логики, нейтрософичного множества, нейтрософичной вероятности и нейтрософичной статистики, которые сейчас начали использоваться в технических приложениях (особенно в программном обеспечении).

По мнению протагонистов нейтрософичная логика позволяет унифицировать множество существующих логических систем, таких как нечеткая логика, паранепротиворечивая логика, интуиционистская логика и т.д.

4 Иллокутивная логика

Безусловно, одной из опор человеко-машинной системы, ориентированной на взаимопонимание и передачу смысла должна стать неформальная логика. Подобные логики изучают речевые акты – высказывания, которыми пользуется человек в своей повседневной практике. Неформальная логика представляет собой теорию, в основе исследований которой - аргументы, доводы в том виде, как они используются в обыденном языке, в отличие от представления аргументов в формальном или техническом языке.

Перспективные синтаксис и семантика неформальной логики задаются в рамках иллокутивной логики, строящейся с использованием основных понятий теории речевых актов. Частичная операция присоединения следствия в неформальной логике рассматривается в рамках двух подходов: *иллокутивной логики убеждения* и *иллокутивной логики влияния* [7].

Познавательная деятельность человека неотделима от коммуникативных процессов, которые существуют лишь в языке. Это позволило объединить формальный подход к анализу языка и подход неформальный, в котором сочетались бы достоинства строгих аналитических процедур, осуществляемых в формализованных языках, и исследований, основанных на методе «лингвистической феноменологии».

Иллокутивная логика – далеко не первая попытка организации формального подхода к естественному языку, но именно ей, посредством введения в логическую теорию значения таких понятий как успешность и удовлетворительность речевого акта, удалось шагнуть дальше всех прочих логических теорий, занимающихся естественным языком. Данная логическая система содержит новую теорию значения для естественного языка, объединяющую в себе

подходы классической истинностно-функциональной семантической теории и теории способов употребления языка, еще должным образом не исследованную и неоцененную [7].

5 ОнтоРитор - интеллектуальный агент и партнер

Очеловечивание машин приводит нас к дальнейшей их интеллектуализации, к уточнению и формализации процессов понимания [8]. Анонсируемый стартап (*start up*) проекта *ОнтоРитор* (*OntoRhetor*) ставит целью найти и исследовать научные основы создания систем поддержки коммуникативных действий, способных убеждать, влиять, обосновывать предлагаемые решения, давать аргументированную информацию и в целом ориентированных на компьютерное представление интерсубъективных *ad hoc* теорий [9].

Фактически это дальнейшее развитие существующих разработок в области автоматизированных систем проектирования [10], технологий агентов, гидов виртуальной реальности, проектов дополненной реальности и т.д., это обязательное совмещение различных способов чувственного восприятия. Отличие заключается в выявлении и построении внутренних для информационной системы онтологий-топиков, выявляемых научной риторикой и теорией интерсубъективного взаимодействия [9, 11], широком применении мультиагентных систем не только как средства повышения вычислительной эффективности, но и для решения семантических задач, например, понимании текстов [12].

В определенном смысле авторами обозначается задача научной постановки и решения подобных вопросов на основе и за счет построения формальных онтологий, применения современной логики и интеграции технологий человекомашинного взаимодействия в СПКД.

Список литературы

[1] *Аристотель.* Риторика. / Книги 1-3: Пер. с гр. Н. Платоновой. - Античные риторики. - М.: 1978. - С. 15–164.

[2] *Аристотель.* Топика (Τοπικά, Topica) / Уточненный пер. М. И. Иткина — М., 1978.

[3] Философский энциклопедический словарь. — М.: Советская энциклопедия, 1983. http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/4636/«ОРГАНОН»

[4] Новейший философский словарь. 2009 http://dic.academic.ru/contents.nsf/dic_new_philosophy/

[5] *Виттих, В.А.* Разработка систем поддержки коммуникативных действий / В.А. Виттих, М.В. Игнатьев, С.В. Смирнов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIV международной конф. (19-22 июня 2012 г., Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН, 2012. - С. 125-130.

[6] *Smarandache, F.* A Unifying Field in Logics: Neutrosophic Logic. Neutrosophic Set, Probability and Statistics / F. Smarandache. - Am. Res. Press, 1998.

[7] *Шуман, А.Н.* Современная логика: теория и практика / А.Н. Шуман. – Мн.: Экономпресс, 2004. – 416 с.

[8] *Нестеров, А.Ю.* Понятие и проблема понимания для инженеров и специалистов по искусственному интеллекту / А.Ю. Нестеров – См. настоящий сборник.

[9] *Виттих, В.А.* Введение в теорию интерсубъективного управления / В.А. Виттих // Самара: СамНЦ РАН, 2013. – 64 с.

[10] *Боргест, Н.М.* Робот проектант: фантазия и реальность / Н.М. Боргест, Ал.А. Громов, Ан.А. Громов, Р.Х. Морено, М.Д. Коровин, Д.В. Шустова, С.А. Одинцова, Ю.Е. Князихина // Онтология проектирования. – 2012. - № 4(6). – С. 73-94.

[11] *Виттих, В.А.* Онтологии в интерсубъективных теориях / В.А. Виттих, М.В. Игнатьев, С.В. Смирнов // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2012. - №5. – С. 69-70.

[12] *Андреев, В.В.* Разработка мультиагентной системы понимания текста / В.В. Андреев, К.В. Ивкушкин, Д.В. Карягин, И.А. Минаков, Г.А. Ржевский, П.О. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды III международной конф. (4-9 сентября 2001 г., Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН, 2001. - С. 489-495.

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА – ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОКАЗАНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ НА АМБУЛАТОРНОМ ЭТАПЕ

Л.С. Федосеева[1], В.Е. Романов[2], И.М. Назаркина[1]

[1]ММУ «Городская клиническая поликлиника № 15» г.о. Самары
443111, Самара, ул. Фадеева, 56а, Россия
polik15@saminfo.ru
тел: +7 (846) 251-97-35

[2]Министерство здравоохранения и социального развития Самарской области
443010, Самара, ул. Чапаевская, 181, Россия
zdravso@samregion.ru
тел: +7 (846) 334-27-02, тел/факс: +7 (846) 270-91-14

Ключевые слова: *здравоохранение, информатизация, перспективное планирование, экономическая целесообразность, первичная медико-санитарная помощь*

Abstract

The paper presents many years of experience creating and operating an information system based on multi-city clinic. The structure of the information system anaticheskoy acting GBUZ CO SGKP number '15 Samara, discussed aspects of problem solving vnedrenieya and exploitation of the system for the analysis of health prikrplennogo population, assessing the effectiveness of medical interventions and manipulations to achieve clinical control of the disease and the cost-effectiveness of health facilities.

«…информатизация здравоохранения не должна рассматриваться
как некое абстрактное понятие,доступное только посвященным.
Правильно говорить об информатизации бизнес-процессов в этой сфере.
Сегодня устранены все основные препятствия
к развитию информатизации здравоохранения.
Меры, принимаемы «сверху» должны найти отклик и
продолжение на каждом рабочем месте».
В. Путин

Введение новых хозяйственных механизмов, как и переход на принципы страховой медицины вообще, не мыслимы без хорошо отработанных систем учета и экономического анализа деятельности врачей и медицинских коллективов на основе компьютерной технологии. Перед руководителями всех уровней встает задача решения проблем проведение реорганизационных мероприятий в лечебно-профилактических учреждениях с целью улучшения качества оказания медицинской помощи в условиях явно недостаточного финансирования.

Современное представление об управлении, как о процессе сбора, хранения и анализа представленной информации, не только требует применения компьютерных технологий, но и подразумевает их реконструкцию и модернизацию с учетом возрастающих потребностей.

Информация, характеризующая деятельность учреждения является основой для принятия судьбоносных управленческих решений, следовательно она должна быть объективной, достоверной, доступной и востребованной сотрудниками, достаточной и аналитически ценной.

Особую значимость своевременное информирование приобретает в лечебных учреждениях амбулаторного звена, где врач должен принять единственно верное решение за максимально короткий временной промежуток.

Государственное бюджетное учреждение здравоохранения самарской области Самарская городская клиническая поликлиника №15 – лечебно-профилактическое учреждение, обслуживающее 58 тысяч взрослого и 16 тысяч детского населения. Начиная с 1996 года, работа поликлиники организована по принципу врачей общей практики. Использование новых организационных и управленческих технологий стало отправной точкой в развитии поликлиники. Основываясь на необходимости самоорганизации и самосовершенствования в рыночных условиях жесткой конкуренции, в поликлинике получили развитие стационарозамещающие и ресурсосберегающие технологии, позволяющие не только повысить доступность медицинской помощи для населения, но достичь должных показателей качества при сохранении экономической рентабельности. Так, с 1999 года в ЛПУ функционирует система дневного стационара, работает отделение неотложной помощи. Положительный опыт использования международных стандартов ведения больных с различными заболеваниями позволило открыть на базе учреждения несколько специализированных центров городского значения. С 1998 года на базе поликлиники функционирует городской амбулаторный «Астма-центр», в 2000 году на базе хирургического отделения, при совместной деятельности с кафедрами СамГМУ открыт специализированный ангиологический дневной стационар. Продолжением традиций стало открытие Центра профилактики и лечения артериальной гипертензии, а в 2010 году поликлинике доверили открытие Центра здоровья для детей по формированию здорового образа жизни и снижению употребления алкоголя и табака.

Расширение спектра оказываемых услуг неизменно потребовало создания системы, способной хранить и анализировать информацию о состоянии здоровья населения и оценивать эффективность применяемых технологий.

Формирование новых, не только функциональных, но и экономических отношений внутри поликлиники, со страховыми компаниями, другими лечебно-профилактическими учреждениями, развитие стационарзамещающих технологий, анализ медико-экономической эффективности не только ЛПУ в целом, подразделений, но и каждого врача в отдельности, определение приоритетных направлений развития, необходимость анализа большого количества показателей явились предпосылкой к созданию АИС «Поликлиника».

В 1997 году был установлен комплекс программных средств разработанный, ООО «Парус», функционирующий в локальной сети. Сегодня эта система включает в себя более 300 компьютеров с автоматизацией всех рабочих мест отделений врачей и медицинских сестер общей практики, так и параклиник.

К исходной версии сотрудниками поликлиники, по мере необходимости разработано более 80 программ, позволяющие выполнить любой запрос для оценки эффективности лечебно-диагностических мероприятий, позволяющих объединить всю информацию в регламентируемые отчетно-учетные формы, а также выполнять аналитические выборки по всем параметрам деятельности. Это позволяет объединить всю информацию в единые отчетно-учетные формы, которые ранее формировались вручную, а также выполнять аналитические выборки по всем параметрам деятельности. Часть из них проводятся с определенной периодичностью (ККФ, вакцинация, проведение онкологических осмотров и др.), другие проводятся по отдельным запросам ВОП, МОП, руководителей подразделений или главного врача.

Начиная с января 2004 года, врачи и медицинские сестры поликлиники полностью перешли на электронный вариант амбулаторной карты с позволяющая описать соматический статус больного. Для удобства внесения и обработки информации специалистами поликлиники были разработаны стандарты описания, выполненные в виде справочников по различным нозологиям. Такой подход позволяет врачу, даже не владеющему техникой печати, грамотно и

быстро внести необходимую информацию о пациенте. Имеющееся поле комментариев позволяет расширить диапазон вносимых данных.

Условно структуру информационной системы можно представить в виде следующих подсистем:

- ***базовая*,** включающая в себя регистр обслуживаемого населения и ресурсы поликлиники;
- ***финансово–экономическая***, в которую входят сведения о медицинском страховании каждого пациента, оказанных медицинских услуг в поликлинике и в других ЛПУ, вызовах скорой медицинской помощи, случаях госпитализации;
- ***медицинская*,** включающая регистр состояния здоровья обслуживаемого населения, факторов риска развития хронических заболеваний, учет законченных случаев с регистрацией основных и сопутствующих диагнозов, дневники наблюдения по каждому конкретному посещению, результаты исследований, перечень выписанных и заказанных медикаментах, учет проведения профилактических мероприятий;
- ***аналитическая подсистема***, представлена комплексом программ, позволяющих проводить всесторонний анализ работы врачей и оценивать лечебно-профилактическую деятельность учреждения и определять приоритетные направления развития.

В деятельности ЛПУ, каждый сотрудник выполняет функцию менеджера, решая организационные, медицинские и финансовые проблемы. Для максимального использования возможностей АИС при выполнении функциональных обязанностей сотрудниками поликлиники разработаны отдельные автоматизирование рабочие места менеджера, врача и медицинской сестры, заведующего отделением, главного врача, экономиста и медицинского статистика.

Современная информационно-аналитическая система отражает все лечебно-диагностические процессы и позволяет проводить не только оценку каждого из них, но и анализировать эффективности с позиции обеспеченности ресурсами, технологии исполнения и оценки качества медицинских услуг, то есть реализовывать принципы процессного подхода к управлению.

Процессный подход к управлению качеством подразумевает так же оценку промежуточных показателей деятельности и формирование системы экономической мотивации деятельности сотрудников.

С целью реализации этих условий нами разработана система промежуточных критериев, которые положены в основу дифференцированного подхода к оплате труда. Наличие информационной системы дает возможность внедрять эти принципы, соблюдая основные требования к избранным критериям, такие как актуальность, достоверность, объективность и своевременность.

Особая ценность созданной системы – это сформированное единое информационное пространство поликлиники, способное изменяться в зависимости от поставленных задач, не нарушая своей принципиальной структуры. Кроме того, информацию, заложенную в нее можно использовать и при реализации связи с другими ЛПУ города, органами управления здравоохранения.

Таким образом, информационно-аналитическая система реализует принципы системного подхода к управлению качеством, позволяя единой системе быть открытой для контакта с внешними партнерами (рисунок 1).

Таким образом, созданная система сегодня существует в многомодульном формате. Каждый из этих модулей способен либо функционировать самостоятельно, либо быть задействованным в решении задач по сопровождению отдельных процессов.

Наиболее наглядным примером отражения эффективности созданной системы является её использование при осуществлении льготного лекарственного обеспечения пациентов. При помощи разработки дополнительных программ и модулей, удалось решить одну из самых важных проблем – своевременного информирования врача о наличии препаратов в аптеке (данные ИС АПТЕКА), состоянии социального статуса пациента имеющего льготную катего-

рию (данные пенсионного фонда Самарской области), сведения о состоянии здоровья больного (АС ПОЛИКЛИНИКА), информацию о заявленных и отпущенных препаратах (АС ПУНКТА ВЫПИСКИ И ПУНКТА ОТПУСКА).

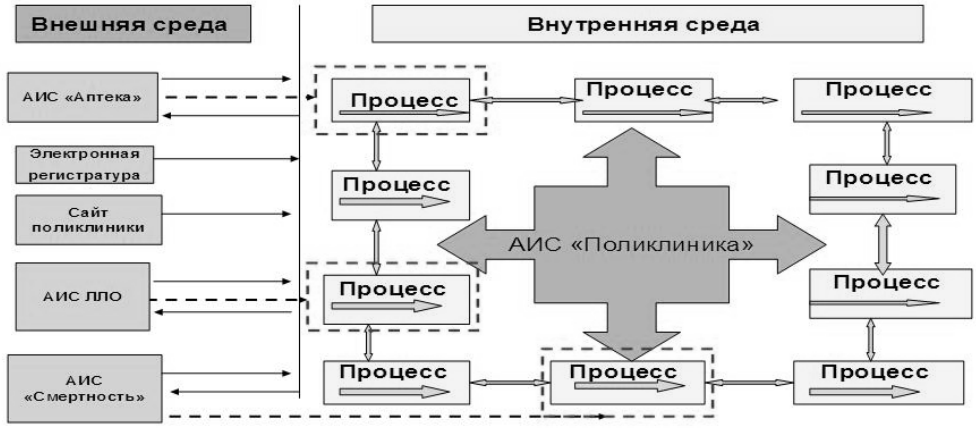


Рисунок 1 – Интеграция системного, процессного и ситуационного подходов в АИС

Таким образом, были значительно сокращены временные и ресурсные затраты врачей и медицинских сестер, уменьшено количество оформляемых медицинских и парамедицинских документов, а также сократилось количество пациентов, неудовлетворенных качеством лекарственного обеспечения.

Демонстрацией гибкости системы и её мобильности является использование информационно-аналитической системы в реализации одного из направлений ПНП «Здоровье» - дополнительной диспансеризации граждан. Данный процесс, сопровождался не только большим количеством оформляемых документов, но и потребовал проведения мониторинга эффективности всех мероприятий в режиме реального времени.

Сегодня созданные программные дополнения к АИС «Поликлиника» будут использованы для сопровождения диспансеризации отдельных категорий граждан и проведения профилактических осмотров.

Необходимо отметить, что все изменения, вносимые в программу или в структуру АС ПОЛИКЛИНИКА ориентированы прежде всего на достижение удовлетворенности её основного потребителя – врача и медицинской сестры. Именно по этому, за последние несколько лет удалось преодолеть некоторый негативизм, который ощущался на ранних этапах её внедрения. Современные врачи – не просто уверенные пользователи предлагаемого программного продукта, но и его активные соразработчики.

Таким образом, созданная информационно-аналитическая модель программного обеспечения полностью отражает сложные функциональные связи между участниками и позволяет реализовать её основные направления, направленные на улучшение качества оказания медицинской помощи, рациональное расходование имеющихся ресурсов и достижение удовлетворенности пациентов.

Новым этапом в развитии информационно-аналитической системы поликлиники следует считать внедрение баз знаний и мультиагентных технологий, в которых информация не лежит мертвым грузом до момента внесения изменений менеджером или формирования запроса по статистическим отчетам. Она становится основанием для активизации программных агентов системы, формирования различных обращений и предложений к врачам, менеджерам и пациентам со стороны системы.

Новая автоматизированная система должна строится на базе накопленных информационных ресурсов о состоянии здоровья каждого пациента, интегрировать проверенную практикой функционирующую систему АИС «Поликлиника» с адресностью и практичностью системы СУПРЕМА.

Следующим этапом развития нашей системы является создание программы эффективного планирования, в которой найдут отражение наиболее актуальные проблемы управления лечебным учреждением: управление кадрами и техническими ресурсами, изучение потребности во внедрении новых медицинских технологий, формирование дохода и рационального расходования имеющихся средств.

В заключении ещё раз отметим, что только непрерывный процесс взаимодействия всех служб и организаций, связанных с лечебным процессом, в сочетании с индивидуальным адресным подходом к каждому пациенту, способен существенно поднять качество и эффективность лечения и профилактики населения.

INTELLECTUAL TECHNOLOGIES IN COMPLEX SYSTEMS

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

П.О. Скобелев

Институт проблем управления сложными системами РАН
443020 Россия, Самара, ул. Садовая, 61
Научно-производственная компания «Разумные решения»
443013 Россия, Самара, Московское шоссе, 17
petr.skobelev@gmail.com
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

Ключевые слова: *интеллектуальные системы, мультиагентные технологии, онтологии, адаптивное планирование*

Abstract

The overview of the new generation of multi-agent systems for real time enterprise resource management is presented. The developed solutions are based on multi-agent technology which is applied for allocation, scheduling, optimization and control of resources in real time. Developed methods and tools allow to improve the efficiency of resource utilization and quality of client service, reduce costs and risks, minimize human errors in decision making.

Введение

В настоящей статье дается краткий обзор мультиагентных систем второго поколения, разработанных в Самарской школе мультиаегнтных сиистем (МАС) в 2009-2012 гг.

Представленные системы развивают идеи построения и области применения МАС, реализованные в первом поколении наших систем (2000-2008), которое предназначалось преимущественно для планирования ресурсов в транспортной логистике [1].

В основе проводимых в последнее время разработок, дающих возможность ответить на новые вызовы новой глобальной экономики, такие, как рост сложности и динамики в принятии решений, лежит метод сопряженных взаимодействий [2], позволяющий представить процесс решения любой сложной проблемы (в данном случае – в сфере управления ресурсами) как процесс самоорганизации и поиска баланса противоположных интересов базовых агентов потребностей и возможностей, реализуемый через механизмы переговоров с уступками, на основе рыночных механизмов предоставления услуг.

Более подробное описание разработанных промышленных МАС можно найти в [3].

1 Особенности нового поколения интеллектуальных систем на основе мультиагентных технологий

Целью создания разрабатываемых систем является поддержка поэтапного перехода предприятий к управлению ресурсами в реальном времени, когда качество и эффективность принимаемых решений напрямую зависят от самого момента времени.

Как показывают результаты теоретических исследований и практических внедрений, возможный выигрыш от перехода к принятию решений в реальном времени может достигать 20-40%, что означает значительное повышение прибыли для многих предприятий.

Для примера рассмотрим новую современную постановку задачи управления мобильными ресурсами в реальном времени, к числу которых могут быть отнесены такси, грузовые перевозки, ремонтные бригады водоканала, энергетиков и газовиков и многие другие:

1) Имеется флотилия мобильных ресурсов с GPS/ГЛОНАСС датчиками на борту, положение которых отражается на электронной карте (рисунок 1).

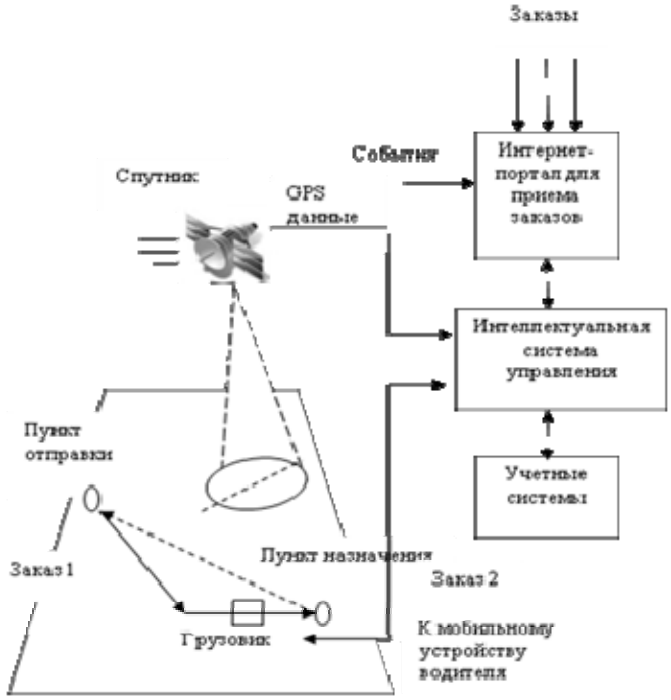


Рисунок 1 – Типовая постановка современной задачи управления мобильными ресурсами в реальном времени

2) В заранее не известные моменты времени в диспетчерский центр предприятия поступают новые заказы и любые другие события (задержки, поломки и т.д.), которые необходимо планировать, учитывая текущие планы, индивидуальные предпочтения и ограничения заказов и ресурсов, число которых может динамически изменяться (даже принятые и уже выполняемые заказы могут отзываться, а ресурсы выходить из строя на неопределенный период времени или вновь возвращаться в строй).
3) Изменения, обусловленные событиями, должны адаптивно вноситься в создаваемый план использования ресурсов без останова и перезапуска системы, путем адаптивного изменения расписания «на лету» с использованием как свободных окон времени, так и подвижками во времени и переброской на другие ресурсы ранее распределенных заказов.
4) В этих целях должен быть реализован полный цикл автономного управления ресурсами:
   - восприятие, как индивидуальная реакция системы на событие,
   - динамическое планирование (перепланирование) как процесс начального построения или адаптивной и гибкой корректировки плана «на лету» без останова системы;
   - согласование планов или их корректировки с исполнителями, например, посредством планшетов или сотовых телефонов;
   - проактивное улучшение (оптимизация) планов при наличии времени на принятие решений;

- мониторинг и контроль исполнения создаваемых и изменяемых планов, когда система контролирует исполнение ею же созданного плана (т.н. «катящееся расписание»);
- перепланирование в случае возникновения расхождения между планом и фактом;
- обучение (в будущем) из опыта (например, назначать на важную заявку в определенный район в первую очередь водителя, который знает дорогу и не опаздывает).

5) Разрабатываемая система должна размещаться на сервере и предоставлять удобный интерфейс пользователю как через десктоп клиента («толстый клиент» - для наглядной и интерактивной визуализации), так и через браузер («тонкий клиент» - меньше возможностей, но зато с любого компьютера, без какой-либо предустановки). Перспективным является предоставление услуг такой интеллектуальной виртуальной диспетчерской через бизнес-модель SaaS (Software-As-A-Service), когда заказчик оплачивает небольшую сумму с «головы» каждого мобильного ресурса в день (порядка десяти рублей) или даже по конечному результату (например, как процент от прибыли).
6) Система должна легко интегрироваться с существующими учетными системами предприятия (например, 1С бухгалтерией).

В настоящее время доминирующие программные решения, направленные на автоматизацию распределенного планирования и оптимизации ресурсов, разработанные такими известными компаниями как SAP, Manugistics, i-Log, i2, Paragon и другие, представляют собой пакетные системы, не предназначенные к работе в реальном времени, в которых для расчета делается полный комбинаторный перебор вариантов или испорльзуются эвристики. Например, для транспортной сети в 600 точек развозки для 300 грузовиков новые расчеты в одной из известных систем могут потребовать 8-12 часов, а за это время ситуация может поменяться.

Главной особенностью предлагаемого подхода применительно к управлению ресурсами является адаптивное построение и модификация плана использования ресурсов по событиям в реальном времени. В этом случае план не строится всякий раз заново, а только непрерывно корректируется путем выявления и анализа конфликтов и поиска компромиссов между заказами и ресурсами, при этом процессы планирования сочетаются с исполнением планов.

2 Оценка преимуществ перехода к реальному времени при управлении ресурсами (на примере грузовых перевозок)

Для оценки преимуществ от перехода к управлению ресурсами была разработана моделирующая мультиагентная система, которая позволила сравнивать различные модели традиционного и адаптивного управления ресурсами организации [4].

Как и ранее, здесь с каждым грузовиком связан агент грузовика, с каждым заказом – агент заказа. Агенты могут отправлять и получать сообщения в среде MAC и принимать решения согласно своей логике и текущей ситуации, которая определяется внутренним состоянием каждого агента. Для некоторого упрощения не учитываются агенты операций и некоторые другие, которые важны в основном для реального времени.

Пусть имеется парк грузовиков из M машин, базирующихся в городах транспортной сети. Стоимость эксплуатации каждого грузовика известна и заранее задана. В систему поступают заказы, характеризующиеся пунктом отправления, пунктом доставки, временем поступления, моментом начала (погрузки), моментом окончания (разгрузки), стоимостью и величиной штрафа за опоздание. Расстояния между пунктами заданы матрицей расстояний.

Требуется строить план грузоперевозок по мере прихода событий в реальном времени и найти прибыль транспортной компании в зависимости от стратегий планирования и числа грузовиков, сопоставляя адаптивный и не адаптивный подходы. Планирование в реальном времени означает, что в каждый момент времени известны только те заказы, время поступления которых раньше данного момента. Критерием оптимизации является максимизация суммарной

прибыли всех агентов грузовиков. Эксперименты проведены для грузовых междугородних перевозок для четырех различных моделей организации процесса грузоперевозок [5].

- Модель 1 («С возвращением на базу») – после выполнения заказа грузовик возвращается в пункт базирования.
- Модель 2 («Без возвращения на базу») – после выполнения заказа грузовик остается в конечном пункте заказа, где ожидает следующий заказ, неся постоянные расходы.
- Модель 3 («Опоздания со штрафами») – допускается планирование заказов с опозданиями с учетом штрафов.
- Модель 4 («Адаптивное планирование со штрафами») – допускается перебронирование грузовика в случае, если прибыль от нового заказа превышает прибыль от ранее запланированного.

На рисунке. 2 построена зависимость числа выполненных заказов от числа грузовиков для рассматриваемых моделей.

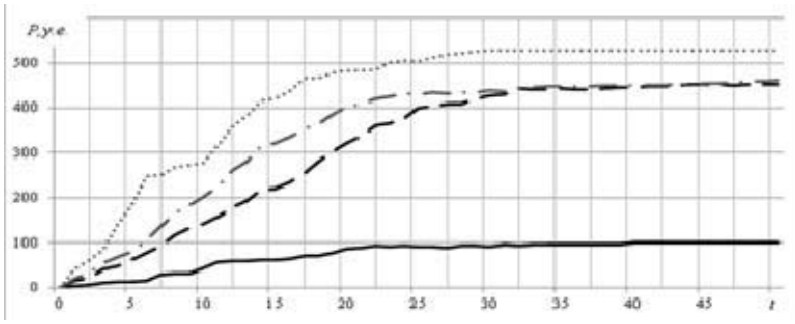


Рисунок 2 – Зависимость прибыли от числа используемых грузовиков в различных моделях организации грузовых перевозок: ——— – модель 1; – – – – модель 2; — · — – модель 3; ····· – модель 4

Как наглядно видно из графика, наилучшей является модель планирования 4, которая даёт примерно на 20% большую прибыль, чем модели 2 и 3. При выполнении плана она позволяет обойтись меньшим количеством грузовиков, что объясняется возрастанием степени адаптивности принятия решений.

Эти результаты моделирования подтверждаются в промышленных разработках и внедрениях, рассматриваемых далее.

3 Промышленные применения интеллектуальных систем управления предприятиями

3.1 Интеллектуальная система управления грузовыми перевозками *Smart Trucks*

Данная система разработана для междугородних перевозчиков, обладающих собственным флотом из более 100 грузовиков, оснащенных датчиками GPS/ГЛОНАСС навигации, использующих привлеченных перевозчиков, для перепродажи менее выгодных заказов [5].

Система реализует рассмотренный выше полный цикл управления ресурсами в реальном времени и предоставляет возможность автоматически контролировать бизнес-процесс получения заявки, загрузки и выгрузки груза через связь с водителем посредством сотового телефона, при этом водитель должен вводить сигналы начала и окончания соответствующих операций (получил заказ, доехал до места погрузки, успешно погрузил груз, выполнил перевозку, раз-

грузился и т.д.). При этом в случае расхождения плана и факта система автоматически перепланирует цепочки зависимых операций, формируя постоянно изменяющееся расписание.

В числе заказчиков системы – транспортно-экспедиционные компании «Prologics» (Москва), «Лорри» (Екатеринбург), «Монополия» (Санкт Петербург) и некоторые другие отечественные и зарубежные компании.

В результате внедрения системы уже в первый год работы примерно на 4.5% возрастает число выполненных заказов, причем наряду с общим ростом числа заявок на 2.7 % увеличивается и коэффициент использования грузовика собственного флота, снижается на 3.5% число опозданий к клиенту, бизнес компании становится менее зависим от человеческого фактора, уменьшается трудоемкость расчетов и число ошибок, у диспетчеров появляется больше времени для достижения лучших результатов.

Результаты разработки могут быть применимы также для мобильных бригад полиции и скорой помощи, служб МЧС и многих других.

3.2 Интеллектуальная система управления аварийными и ремонтными бригадами Smart Field Service

Интеллектуальная система управления аварийными и ремонтными бригадами была разработана по заказу регионального диспетчерского центра службы газа 04 Средневолжской газовой компании (СВГК) [6].

Функции системы позволяют осуществлять быструю реакцию на непредвиденные события, распределение бригад по заявкам с учетом их технической оснащенности, оптимизацию расписаний, коммуникацию с мастерами через сотовые телефоны для согласования решений и контроля бизнес-процессов, мониторинг и контроль исполнения планов, выявления расхождений между планом и фактом. Важной особенностью работы системы является поддержка обратной связи с бригадами через мобильное приложение.

В результате внедрения системы эффективность использования мобильных бригад увеличилась на 40% и теперь бригады вместо 5-7 заявок выполняют 10-12 заявок в день. Кроме того, переход к работе в режиме реального времени позволил повысить оперативность принятия решений и качество обслуживания заявок, сократить затраты, снизить риски и возможные потери от несвоевременного или неквалифицированного выполнения заявки.

3.3 Интеллектуальная система построения программы полета, планирования грузопотока и расчета ресурсов МКС Smart Aerospace

Данный проект для РКК «Энергия» был направлен на решение задачи построения программы полета и планирования грузопотока Международной космической станции (МКС) [7].

Построение программы полета, планирование грузопотока и ресурсов МКС начинается с создания стратегической модели грузопотока, на основе которой рассчитывается требуемое количество грузовых транспортных средств в год на основе числа предполагаемых экспедиций. На этом этапе определяется количество и времена стыковок космических кораблей к сегментам МКС, которые согласовываются с учетом временных окон на возможные старты космических кораблей, активности Солнца, конфигурации и ожидаемого положения МКС, требований к экипажу и т.п.

На этой основе строится программа уточненного грузопотока (топлива, воды, продовольствия, оборудования для научных экспериментов и других), которая далее постоянно адаптивно дорабатывается, формируются и сравниваются разные версии. Основной особенностью системы стал тот факт, что она позволяет создавать программу грузопотока адаптивно, по мере выявления новых потребностей станции, когда новые грузы могут вытеснять уже распределенные, имеющие меньший приоритет или сроки доставки на станцию, с учетом наличия места на ближайшем корабле или места размещения на борту, утилизации грузов и т.д.

В настоящее время в системе, используемой в штатной эксплуатации, уже более 100 пользователей, ежедневно решающих вопросы обеспечения станции важнейшими грузами.

3.4 Интеллектуальная система управления производственными цехами Smart Factory

Первая версия системы управления ресурсами для производственных цехов была разработана для ФГУП «ЦСКБ-Прогресс» (Самара) и внедрена в ОАО «Тяжмаш» (Сызрань).

На этой основе в короткие сроки была разработана интеллектуальная система управления инструментальным цехом [8] машиностроительного предприятия для ОАО «Аксион-холдинг (Ижевский мотозавод)», одного из крупнейших в России по выпуску электронной продукции,.

По мнению руководства завода, главными результатами проекта стало достижение полной прозрачности в планировании деятельности цеха, что позволяет с опережением видеть «узкие места» производства и своевременно, гибко и оперативно перераспределять ресурсы и планировать работу цеха в реальном времени. В результате экономия от внедрения для одного цеха составляет не менее 1163 нормо-часов в месяц, или 7 человек ежемесячно, что соответствует 84 * 40 000 = 3 360 000 руб. в год (без учета выпуска дополнительной продукции).

Проводимые разработки позволили, в консорциуме с корпорациями EADS (Германия) и Airbus (Франция), университетами Кельна (Германия), Манчестера (Великобритания), Праги (Чехия), Браганки (Португалия) и Карлсруе (Германия), компаниями MGS-Jacobbuchi (Италия), Tie и Альменде (Голландия), Сертикон (Чехия) и P3 (Германия), выиграть конкурс IP проектов FP7 Европейской программы Smart Factory с проектом «Adaptive Ramp-Up Management». Стадия RAMP-UP изделия (в буквальном переводе «выход на магистраль») – означает постановку промышленного производства опытного образца, когда вносятся изменения в технологию, подводят поставщики, нет еще умений у мастеров и рабочих и действует ряд других препятствующих факторов.

В ходе проекта предполагается создать сеть планировщиков цехов, которая сможет также пополнять базу знаний о процессе в ходе применения *www.arum-project.eu*.

3.5 Интеллектуальная система управления цепочками поставок Smart Supply Chain

Данная система была разработана по заказу международной корпорации Лего, заинтересованной в повышении эффективности работы цепочек поставок товаров в магазины.

В качестве первой задачи была выбрана розничная сеть магазинов компании на территории США и Канады, в которой были выбраны 20 крупнейших магазинов Brand Retail Store и несколько центров дистрибуции (DC). Ежедневно в каждом магазине совершается около 1000 покупок (2000 товаров), информация о которых сохраняется в базах учетной SAP системы. Поскольку процесс планирования поставок достаточно трудоемок и автоматизирован на уровне Excel - таблиц, то в результате в каждом магазине из-за неточностей прогноза и жесткой периодичности поставок возникает недостаток некоторых наименований товаров или, наоборот, накопление излишков товаров по некоторым позициям. Это приводит к снижению возможной прибыли и дополнительным расходам на перераспределение остатков.

Предлагаемая система позволяет гибко реагировать на изменения спроса в каждом магазине, адаптивно создавать и пересматривать планы и прогнозы продажи и поставки 600 наименований товаров в режиме реального времени, по мере того, как покупатели приобретают товары с целью удовлетворить спрос с меньшими издержками. В результате было показано, что переход к реальному времени позволяет перестраивать график поставок адаптивно, меняя расписания и маршруты доставок, что на данных за 1 год продаж показывает [9]:

- снижение убытков от потерянных продаж с 40% до 16%;
- повышение уровня сервиса магазинов с 66% до 86%;
- повышение рентабельности продаж с 56% до 81%.

Полученные данные позволяют оценить потенциал для повышения эффективности продаж в цепочках поставок при переходе к адаптивному планированию даже для компаний с весьма совершенными бизнес-процессами, большим бизнес-опытом и высоко квалифицированным персоналом.

3.6 Интеллектуальная система управления ресурсами РЖД Smart Railways

Распределенная интеллектуальная система управления железнодорожными перевозками в реальном времени предназначена для согласованного построения и адаптации многосвязных расписаний работы подразделений РЖД при возникновении непредвиденных событий.

Различные версии этой интеллектуальной системы, разрабатываемые в настоящее время на платформе «Вектор» компании «Программ-Парк» для решения наиболее актуальных задач РЖД, охватывают как грузовые, так и пассажирские перевозки [10].

Распределенная интеллектуальная система управления ресурсами РЖД проектируется как адаптивная p2p сеть интеллектуальных систем управления отдельными подразделениями РЖД, от уровня ресурсов сети дорог в целом – до уровня отдельных станций и конкретных локомотивов, вагонов и машинистов.

Первое применение интеллектуальной системы управления ресурсами РЖД связано с управлением высокоскоростными поездами «Сапсан», а именно, для минимизации отклонения ВСП «Сапсан» от графика движения под влиянием непредвиденных внешних событий.

Интеллектуальная система осуществляет построение начального графика движения поездов, а далее выполняет его корректировку по событиям, например, поступлению заявок на ремонт участков пути. При этом в системе реализуется как логика реакции на события, когда каждое событие запускает цепочку перепланирований ресурсов в системе, так и проактивная оптимизация планов, позволяющая улучшать варианты, пока есть время для работы системы и принятия окончательных решений.

Предлагаемый подход по созданию интеллектуальных систем управлением ресурсами ОАО «РЖД» призван:

- обеспечить более высокий уровень сервиса РЖД;
- сократить время реакции и повысить гибкость и оперативность в принятии решений в ответ на непредвиденные события;
- повысить эффективности использования имеющихся ресурсов РЖД (поездов, стоянок, локомотивов и т.д.);
- сократить затраты ручного труда по перепланированию движения;
- создать качественно новую программную платформу для управления движением в реальном времени.

В настоящее время готовиться внедрение системы на перегоне Москва-Санкт-Петербург.

3.7 Интеллектуальная система управления группировкой спутников Smart Satellites

Одно из перспективных аэрокосмических применений связано с созданием интеллектуальной системы для управления группировкой космических аппаратов (МКА) [11].

В разработанной системе каждый спутник может действовать как полностью автономно, так и коллективно сообща решать задачи, которые каждый из них в отдельности решить не способен, для этого каждый может взаимодействовать с каждым напрямую или через ретрансляторы, находящиеся на геостационарных орбитах.

В рассматриваемом подходе сигнал из ЦУПа, задающий новую задачу для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), подхватывается первым ближайшим спутником, который проверяет, может ли он выполнить задачу. Если нет – сигнал распространяется по сети другим спутникам, пока не находит того, кто может выполнить хотя бы часть задачи первым, который фактически становится лидером в образующейся группе для решения задачи. Выполнив часть задачи, спутник договаривается с другими, кто может продолжить или закончить работу, с учетом их текущей загрузки, после чего результаты подобным же образом по сети передаются назад в центр управления.

Основными компонентами архитектуры системы являются модули создания онтологий и сцен, а также модули динамического планирования для каждого спутника, формирующие

согласованные планы для обработки потока входных событий и осуществляющие динамическое адаптивное изменение созданного плана при появлении новых непредвиденных событий.

Таким образом, в рассматриваемом подходе задача ДЗЗ решается путем создания самоорганизующейся команды («роя») интеллектуальных спутников, способных как индивидуально планировать свое поведение в реальном времени, так и работать в группе, обеспечивая согласованность принимаемых решений.

В результате проекта на примере решения задачи ДЗЗ были показаны важные преимущества коллективного взаимодействия в группировке спутников:

- сложность: решаются сложные задачи ДЗЗ, требующие взаимодействия нескольких спутников, например, с распределением задач в пространстве и времени, с разными возможностями наблюдения и т.д.;
- оперативность, гибкость и эффективность: более быстрая реакция на задачу, поступающую из ЦУПа;
- надежность и живучесть: в случае выхода из строя одного из спутников его задачи перераспределяются другим спутникам.

Результаты данной разработки могут быть использованы и в других задачах, требующих коллективного взаимодействия спутников.

Заключение

Практические результаты внедрения МАС для управления ресурсами в реальном времени показывают их высокую эффективность и определяют направления дальнейшего развития:

- создание повторно используемой мультиагентной платформы управления ресурсами;
- развитие теории, методов и средств ситуационного управления, позволяющей создавать и исследовать модели принятия и согласования решений по управлению ресурсами предприятий в реальном времени;
- разработка методов и средств многокритериального адаптивного планирования с регулируемой эластичностью для преодоления ограничений и саморегулировкой по критериям;
- разработка инструментария для поддержки онтологий и методов машинного обучения для пополнения знаний «на лету»;
- разработка сетецентрической архитектуры для создания распределенных интеллектуальных систем управления ресурсами;
- поддержка работы с неопределенными, конфликтными и плохо структурированными данными;
- применение средств высокопроизводительных облачных вычислений для реализации естественного параллелизма МАС и повышения производительности создаваемых систем.

Указанные направления работы позволят сделать рассматриваемые интеллектуальные системы для управления ресурсами более интеллектуальными, гибкими и эффективными, а также обеспечить более высокую производительность в реальных применениях.

Благодарности

Автор выражает благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку в рамках грантов №10-08-01015а и №11-07-13119-офи-м-2011-РЖД, а также Министерству образования и науки РФ за поддержку в рамках проектов №07.514.11.4094, №07.524.12.4022 и №14.514.11.4005.

Список литературы

[1] Скобелев П.О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 12. – С. 33-46.

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

[3] Скобелев П.О. 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.

[4] Амелина Н., Лада А., Майоров И., Скобелев П., Царев А. Исследование моделей организации грузовых перевозок в мультиагентной системе для адаптивного планирования мобильных ресурсов в реальном времени // Проблемы управления. 2011. №6. – С. 31-37.

[5] Иващенко А. В,. Лада А., Майоров И., Скобелев П., Царев А. Анализ эффективности применения мультиагентной системы управления региональными перевозками в реальном времени // Материалы 4-й мультиконференции по проблемам управления МКПУ-2011, 3-8 октября 2011 г., с.Дивноморское, Геленджик, Россия. Т.1. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 353-356.

[6] Диязитдинова А. Р., Иващенко А. В., Кожевников С. С., Ларюхин В. Б.,. Очков Д. С, Скобелев П. О., Царев А. В Мультиагентное управление ресурсами на примере автоматизированной диспетчерской ремонтных бригад // Труды XIII Международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах".Самара. 2011. – С.443-450.

[7] Ivashenko A., Khamits I., Skobelev P., Sychova M. Multi-Agent System for Scheduling of Flight Program, Cargo Flow and Resources of International Space Station. 5-th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2011). – Springer Verlag, France, Toulouse, 2011. – P. 165 - 174.

[8] И.Ю. Тюрин, А.С. Вылегжанин, Э.В. Кольбова, П.О. Скобелев, Я.Ю. Шепилов. Опыт разработки и внедрения мультиагентной системы для оперативного управления инструментальным цехом ОАО «ИЖЕВСКИЙ МОТОЗАВОД – АКСИОН ХОЛДИНГ» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. № 11. – С. 15-19.

[9] Bjorn Madsen, George Rzevski, Petr Skobelev, Alexander Tsarev. Real-time Multi-Agent Forecasting & Replenishment Solution for LEGOs Branded Retail Outlets // Proc. of the 13th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD 2012), August 8-10, 2012, Kyoto, Japan. – P. 451-456.

[10] А.Б. Шабунин, Н.А. Кузнецов, П.О. Скобелев, И.О. Бабанин, С.С. Кожевников, Е.В. Симонова, М.Е. Степанов, А.В. Царев. Разработка мультиагентной системы адаптивного управления ресурсами ОАО «РЖД» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. №1. – С. 23–29.

[11] Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е., Жиляев А.А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. – 2013. №1(62). – С. 16-26.

ЛОГИКА РАБОТЫ АГЕНТОВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППИРОВКОЙ МАЛОРАЗМЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.В. Соллогуб[1], П.О. Скобелев[2], Е.В. Симонова[2], М.Е. Степанов[2], А.А. Жиляев[2], А.В. Царев[2]

[1]ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»
443009, г. Самара, ул. Земеца, 18, Россия

[2]Научно-производственная компания «Разумные решения»
443013, Россия, Самара, Московское шоссе, 17, офис 1201
simonova@smartsolutions-123.ru
тел: + 7 (846) 279-37-79

Ключевые слова: *дистанционное зондирование Земли, распределение ресурсов, динамическое планирование, мультиагентная технология, онтология*

Abstract
This paper describes new principles are provided of how to organize an interaction of decision makers on the basis of ontology and multi-agent technology. The logic of agents operation in the intelligent system for distributed control of grouping of small satellites is described. The example of scenario for conducting the experiments in the system is given.

Введение

Вопросы реализации распределенных сетей мониторинга Земли с помощью группировок малоразмерных спутников активно изучаются в последнее время. Группировки нано и пико спутников, рассматриваемые в соответствии с концепцией «интеллекта роя» (*swarm intelligence*), могут быть многофункциональными и гибко конфигурируемыми под задачи, дешевыми в исполнении, надежными и живучими в самых различных ситуациях при наблюдении Земли (дистанционном зондировании), исследовании объектов в космосе, решении телекоммуникационных и разнообразных других задач [1–3].

Для управления группировкой малоразмерных космических аппаратов (МКА) предлагается парадигма «распределенного динамического» управления, когда задачи ставятся не только отдельным КА, но и всей группировке КА в целом. Данный подход позволяет динамически перераспределять задачи внутри группировки путем переговоров между спутниками непосредственно в процессе выполнения этих задач, причем в такой системе могут возникать незапланированные заранее события, например, появление новой срочной задачи, выход из строя одного из аппаратов, вывод на орбиту нового аппарата и др.

Для исследования методов распределенного управления подвижными объектами в группировках МКА разработана интеллектуальная система (ИС), построенная на основе мультиагентных технологий и онтологий, принципы создания которой были изложены ранее [4–9]. В данной статье описывается логика работы агентов, использующих онтологию для представления знаний предметной области, общую память объектов данных (сцену), отражающую текущую ситуацию во внешней среде, и формирующих сети связей в ходе прямых переговоров.

1 Описание концептуальной модели предметной области

В разработанной системе онтология используется для описания основных концептов и отношений предметной области (классы концептов организованы в иерархию на принципах наследования, концепт характеризуется свойствами (атрибутами)). Базовыми являются три

класса сущностей: «*Sat*» (спутник), «*TargetOnEarth*» (цель на Земле), «*ControlCenter*» (центр обработки данных – ЦОД).

Спутник представляет собой малоразмерный космический аппарат (КА), обладающий определенными параметрами орбиты и возможностями аппаратуры, позволяющими ему производить распознавание наземных объектов в различных спектрах исследования. Техническая оснащенность КА также определяет его способность к коммуникации с другими спутниками или наземными центрами. *Целью* является область на поверхности Земли, которую необходимо исследовать с помощью имеющейся группировки спутников. Задача исследования сводится к установлению соответствия между заданным в онтологии описанием искомого объекта и данными, полученными при распознавании цели. К атрибутам цели относятся ее расположение, приоритет и временной интервал, в рамках которого исследование будет актуальным. *Центры обработки данных* характеризуются только расположением.

На основе базовых концептов путем уточнения свойств можно определить специализированные концепты, например, концепт «Радиационный наземный объект» наследует от концепта «*TargetOnEarth*», описывает основные характеристики объектов, излучающих радиацию; концепт «Составной наземный объект» описывает основные характеристики объектов, состоящих из базовых наземных объектов, находящихся между собой в какой-либо семантической связи, и т.п.

Для реализации мультиагентной системы каждой сущности ставится в соответствие один или несколько агентов, действующих от лица своего владельца, и способных принимать компромиссные решения в порождаемых ими ситуациях, формирующиеся на основе определенных протоколов взаимодействия и проведения переговоров. При этом всё множество агентов действует в общей среде – сцене.

Интеллектуальная система управления группировкой КА представляет собой глобальную пространственно распределённую сеть, агенты (узлы) которой либо совершают вращение вокруг Земли (КА, выполняющие задачу обнаружения цели, КА–ретрансляторы), либо, находясь на поверхности Земли, вращаются вместе с ней (объекты наблюдения (ОН), центры обработки данных (ЦОДы)), либо совершают своё движение в соответствии с законами небесной механики (Земля, Солнце, звёзды).

Каждый агент–МКА может автономно определять свои координаты в пространстве в любой момент времени, имеет в своём составе устройства двусторонней связи с другими агентами, что позволяет обмениваться с ними сообщениями. Задачи и роли каждого МКА в группе могут адаптивно изменяться в зависимости от ситуации посредством переговоров между агентами. Для организации переговоров используются способы коммуникации, различающиеся по необходимым условиям применения и энергозатратам. Если космический аппарат не способен выполнять свои функции, задачи, поставленные перед ним, решаются силами оставшейся группировки.

Ниже приведен перечень агентов и выполняемые ими функции:

- агент ЦОД – выдача задания и получение результатов исследования,
- агент шеф (спутник-инициатор) – сбор и отправка в ЦОД результатов исследования цели,
- агент инспектор – обнаружение цели и принятие решения о привлечении к ее исследованию спутников других типов зондирования,
- агент кандидат – исследование цели в соответствии с полученным от спутника-инициатора заданием и возврат результата шефу.
- агент ретранслятор – обеспечение коммуникации между спутниками при отсутствии взаимной прямой видимости, ретрансляторы находятся на геостационарной орбите.

Созданная ИС основана на использовании метода согласованного взаимодействия коллектива подвижных агентов, в котором промежуточные спутники (агенты) выполняют функции ретрансляции и доставки сигнала для других спутников к заданному месту решения задачи, а спутники, приближающиеся к зоне действий, динамически формируют команду, состоя-

щую из кластеров КА и одиночных КА, распределяют между собой поставленную задачу и решают ее по частям, в зависимости от своей позиции, возможностей, имеющегося на борту оборудования и других параметров. При этом задачи и роли каждого объекта в группе определяются в распределенном взаимодействии динамически, в реальном времени, причем могут адаптивно изменяться при изменении ситуации.

2 Логика работы агентов

Процесс исследования цели начинается после формирования агентом ЦОДа *(ControlCenter*) соответствующего задания. Информация о задании представляется в виде сообщения *TargetPositionMessage,* содержащего координаты цели и онтологическое описание искомого объекта. Так как агент ЦОДа не обладает данными о текущем расположении спутников из группировки, то сообщение передается специальным КА-ретрансляторам, положение которых в любой момент времени определено их геостационарной орбитой. В дальнейшем процессе исследования ЦОД участия не принимает, а лишь ожидает получения результатов и, при необходимости, выступает в роли ретранслятора при передаче сообщений между КА. Работу агента ЦОДа можно представить следующим набором состояний:

1) Получая управление, агент специфицирует сформулированные пользователем задачи и передает их в виде сообщения *TargetPositionMessage* ближайшему КА-ретранслятору.
2) При получении сообщения *PacketMessage* агент ретранслирует его указанному спутнику, тем самым выступая в роли посредника при коммуникации, если другие способы обмена сообщениями между КА недоступны.
3) После получения сообщения *AcceptMessage* агент сообщает пользователю о результатах исследования цели.

Протокол переговоров агента ЦОДа с агентом КА-ретранслятора и системой представлен на рисунке 1.

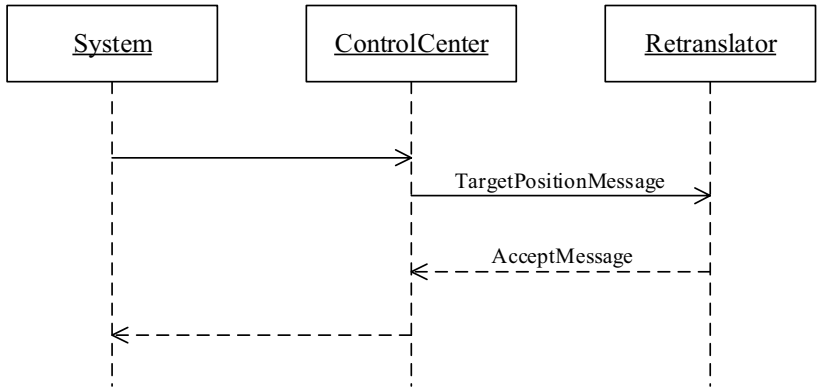


Рисунок 1 – Протокол переговоров агента ЦОДа

КА-ретрансляторы (*Retranslator*) – это геостационарные КА, предназначенные для передачи сообщений между спутниками группировки. Работа агента КА-ретранслятора представляется следующим набором состояний:

1) Взаимодействие с агентом ЦОДа. При получении сообщения *TargetPositionMessage* агент КА-ретранслятора на основании имеющихся у него данных производит выбор первоначальных спутников-инспекторов, которые вместе смогут обеспечить наиболее продолжительное по времени покрытие цели. Затем исходное сообщение рассылается всем выбран-

ным спутникам. После проведения исследования его результат передается через ретрансляторы в ЦОД.

2) Ретрансляция сообщений. Получая от агента КА сообщение *PacketMessage*, ретранслятор проверяет, виден ли его конечный адресат. Если спутник-получатель виден, то сообщение отправляется напрямую, если нет – через сеть таких же ретрансляторов.

Протокол взаимодействия агента КА-ретранслятора с системой и агентом спутника показан на рисунке 2.

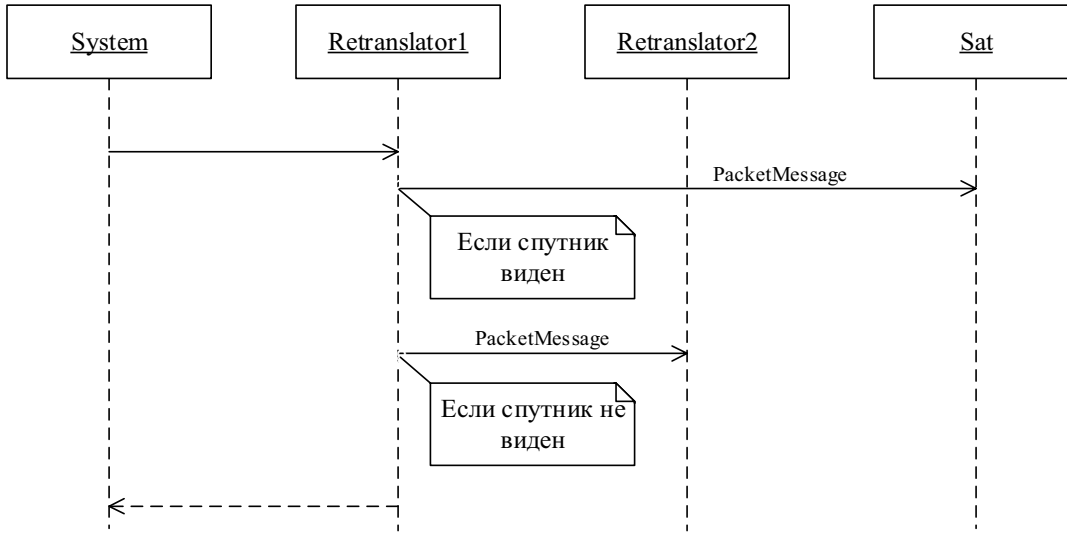


Рисунок 2 – Протокол передачи сообщения через ретранслятор

Процесс исследования цели в зависимости от вида искомого объекта разбивается на несколько составляющих. При этом любой спутник из группировки способен одновременно работать с множеством целей, играя в исследовании каждой из них определенную роль. Все роли спутника представляются в виде совокупности агентов, действующих от его лица. Ниже приводится их описание.

Свободный агент (*FreeAgent*) реализует базовые (не зависящие от контекста решаемой задачи) функции. Этот агент сохраняет активность даже в случае отсутствия у спутника каких-либо текущих заданий. Он следит за общей загруженностью спутника, инициирует и участвует в процессе переговоров о перераспределении задач. Работа свободного агента представляется следующим набором состояний:

1) Получение задания на исследование цели. При получении сообщения *TargetPositionMessage* агент помещает ее в общий пул задач спутника. После этого проверяется текущий уровень загруженности КА, определяемый количеством находящихся в пуле заданий. Если этот уровень выше установленного в системе значения, агент инициирует процесс перераспределения, происходит переход в состояние 2. Иначе агент переходит в состояние 4.
2) Выбор передаваемой задачи. На этом этапе агент формирует сообщение *IndexRequestMessage*, в которое помещает информацию об одной из текущих задач спутника. Выбор задачи производится из условия минимума критерия, количественно измеряющего степень пригодности спутника для исследования данной цели. Сформированное сообщение рассылается всем ближайшим агентам КА, и агент переходит в состояние 3.

3) Сбор информации и принятие решения о передаче задания. Получая ответные сообщения *IndexAnswerMessage*, агент собирает данные о приспособленности опрашиваемых спутников к решению передаваемой задачи. После получения всей информации агент выбирает среди них лучшего (из условия максимума критерия) и пересылает ему задание в виде сообщения *TargetPositionMessage*. Если ни один из опрошенных агентов спутников не смог предложить лучших условий исследования, задача остается у текущего спутника, но к ее выполнению он приступает только после завершения работы с более приоритетными с точки зрения критерия целями. Происходит переход в состояние 4.
4) При получении сообщения *IndexRequestMessage* агент отправляет ответное сообщение *IndexAnswerMessage*, в котором содержится информация об имеющейся у спутника возможности для исследования указанной в исходном сообщении цели (значение величины критерия).

Протокол переговоров между свободными агентами спутников при передаче задания показан на рисунке 3.

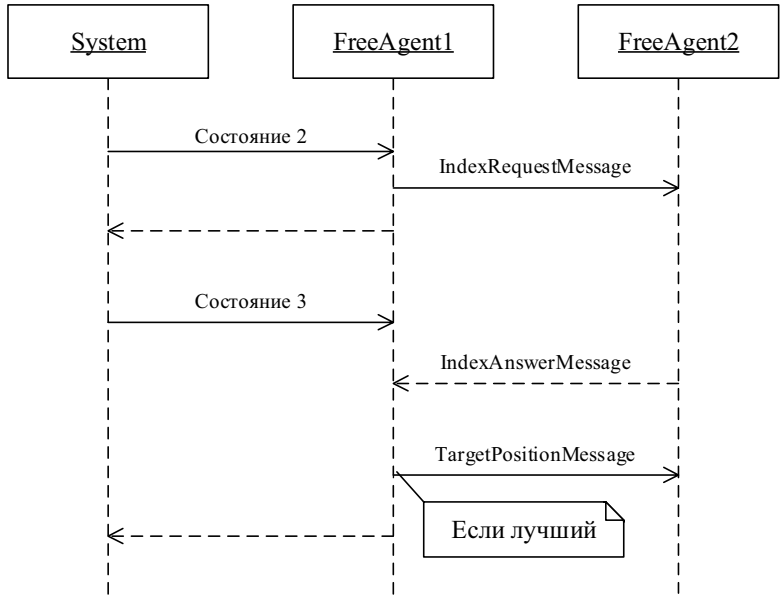


Рисунок 3 – Протокол переговоров при перераспределении задач

Агент-инспектор (*SpyAgent*) активизируется после принятия спутником сообщения *TargetPositionMessage*. В его функции входит обнаружение указанной цели и принятие решения о привлечении к ее исследованию спутников других спектров. Работа агента инспектора представляется следующим набором состояний:

1) Поиск. В процессе перемещения КА по орбите агент инспектора отслеживает видимость имеющихся в пуле целей.
2) Обнаружение и исследование. В течение интервала времени, когда спутник проходит над целью, агент инспектора выполняет задачу идентификации цели, исследуя целевой объект в доступном для КА диапазоне длин волн. При обнаружении объекта, подходящего под заданное онтологическое описание, агент инспектора параллельно передает сообщение *VerifyTargetMessage* на исследование цели другим КА, работающим в оставшихся спектрах.

Аагент-инициатор (*ChiefAgent*) активизируется после принятия решения о привлечении к исследованию цели КА других диапазонов длин волн. Исследовав цель в своем спектре, они передают полученные данные агенту-инициатору в виде сообщения *SuccessfulTestMessage*. Агент-инициатор объединяет все имеющиеся данные и на их основе приходит к выводу о соответствии или несоответствии цели онтологическому описанию. Результат передается агенту ЦОДа посредством сообщения *AcceptMessage.*

Агент-кандидат (*CandidateAgent*) активизируется после принятия спутником сообщения *VerifyTargetMessage* и производит исследование цели в соответствии с полученным от спутника-инициатора заданием, после чего отправляет ему результат в виде сообщения *Successful-TestMessage.*

Протокол переговоров между агентом инспектора, кандидата, инициатора и ЦОДа показан на рисунке 4.

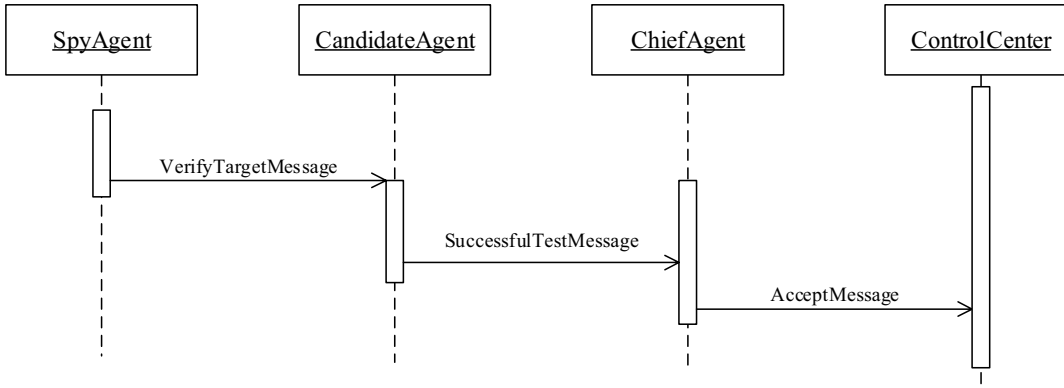


Рисунок 4 – Протокол переговоров агента инспектора, кандидата, инициатора и ЦОДа

3 Экспериментальные исследования методов распределенного управления группировкой МКА

Рассмотрим пример сценария проведения экспериментов в интеллектуальной системе распределенного управления группировкой МКА. Используем следующую модель группировки спутников. Пусть в задаче дистанционного зондирования Земли участвуют 32 МКА и три спутника-ретранслятора, находящихся на геостационарной орбите. КА размещаются по 8 единиц по четырем орбитам, расположенным перпендикулярно экваториальной плоскости, и повернутым относительно друг друга на 45 градусов. По первой орбите перемещаются спутники кластера радиотехнического зондирования, по второй орбите — спутники кластера видового зондирования, по третьей орбите — спутники кластера радиолокационного зондирования, по четвертой орбите — спутники разных типов.

В рамках разработанной системы проведены следующие эксперименты, которые описаны в [10]:

- оценка продолжительности исследования ОН при использовании переговоров между агентами МКА;
- сравнение продолжительности исследования ОН при передаче информации с помощью ретрансляторов и через ЦОД;
- сравнение энергозатрат группировки МКА при различных способах коммуникаций;

- оценка продолжительности исследования ОН в условиях выхода ряда МКА из состава группировки в процессе зондирования.

Рассмотрим эксперимент по исследованию ОН в условиях выхода ряда МКА из состава группировки на примере задачи исследования четырех ОН, равномерно распределенных по экватору Земли. Количество объектов и их расположение во всех сериях эксперимента остается неизменным. Каждому спутнику разрешено одновременно исследовать не более двух целей. Из группировки удаляются несколько спутников. Количество удаляемых спутников увеличивается в каждой последующей серии эксперимента. Критерием выбора удаляемого спутника является его обязательное участие в исследовании хотя бы одного из объектов. Результатом каждого опыта является общее время исследования всех целей силами оставшейся группировки МКА.

В таблице 1 приведены полученные в ходе эксперимента значения времени (в часах модельного времени), затраченного на исследование группы объектов.

Таблица 1 – Результаты эксперимента

Номер опыта \ Удалено КА	0	1	2	3	4	5	6	7
1	72	114	110	142	130	165	197	364
2	80	95	118	126	169	174	238	411
3	69	92	129	138	134	168	226	376
4	70	101	115	131	126	189	245	382
5	81	117	134	122	151	175	223	447
Среднее время (час мод. вр.)	74,4	103,8	121,2	131,8	142	174,2	225,8	396

Графическое представление результатов эксперимента показано на рисунке 5.

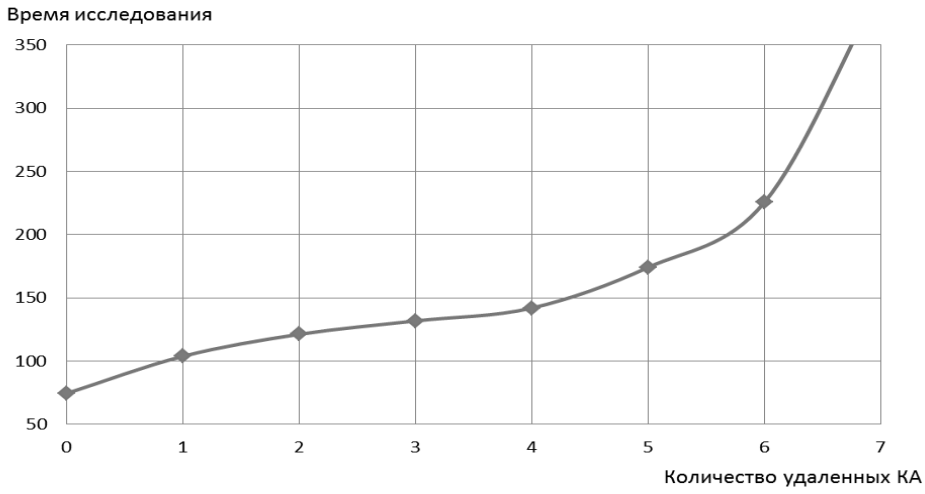


Рисунок 5 – Графическое представление результатов эксперимента

Сравнение продолжительности исследования группы объектов в различных сериях эксперимента, отличающихся количеством удаленных спутников, показало:

- при удалении очередного спутника поставленные перед ним задачи перераспределяются посредством переговоров между другими МКА из группировки; при этом в новых условиях задача исследования решается за более продолжительное время, так как новые исполнители наблюдают цель в течение меньшего интервала времени, чем удаленные.
- существует предельное количество спутников, при удалении которых задача зондирования все еще может быть решена с помощью оставшихся МКА. В рассматриваемых условиях исследование всех объектов возможно при удалении не более 7 спутников.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований, полученные в ходе моделирования, подтвердили новые возможности гибкого и адаптивного планирования работы взаимодействующих аппаратов группировки в условиях априорной неопределенности и высокой динамики возникновения непредвиденных событий. Разработанный подход открывает широкие перспективы создания самоорганизующихся систем управления сложными объектами, пригодных для решения целого спектра новых задач в аэрокосмических приложениях.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку в рамках гранта №10-08-01015а.

Список литературы

[1] Schilling K. Networked Distributed Pico-Satellite Systems for Earth Observation and Telecommunication Applications // Airspace Guidance, Navigation and Flight Control Systems Workshop (IFAC 2009), June 30–July 02, 2009. – Samara, Russia.

[2] De Florio S. Performances Optimization of Remote Sensing Satellite Constellations: a Heuristic Method // Proc. of 5th International Workshop on Planning and Scheduling for Space (IWPSS 2006), October 22–25, 2006. — Space Telescope Science Institute Baltimore, USA.

[3] Schilling K. Preparing Technologies for preparing cooperating pico-satellites networks: the UWE-3 and UWE-4 missions // Proc. of the 7th International Workshop on Satellite and Formation Flying (IWSCFF'2013), March 13-15. 2003. – Lisbon, Portugal.

[4] Скобелев, П.О. Решение задач дистанционного зондирования Земли с применением мультиагентных технологий / П.О.Скобелев, А.В.Соллогуб, Е.В.Симонова, М.Е.Степанов, А.В.Царев // – Самара: Вестник СамГТУ, серия «Технические науки», №7(28), 2010. – С. 47-54.

[5] Соллогуб А. В., Симонова Е. В., Степанов М. Е. Применение мультиагентной системы коллективного управления группировкой малоразмерных космических аппаратов при решении задач дистанционного зондирования Земли // Материалы международной научно-практической конференции «Управление большими системами-2011». – Т.3. М., 2011. – С. 259-262.

[6] Скобелев П.О., Соллогуб А В., Иващенко А.В., Симонова Е.В., Степанов М.Е., Царев А.В. Мультиагентные технологии в задачах дистанционного зондирования Земли // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIII Международной конф. – Самара: 2011. – С. 426-434.

[7] Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е. Модели сетецентрических задач планирования и управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов при решении задач дистанционного зондирования Земли. // Информационно-управляющие системы. – №1(56), 2012. – С. 34-38.

[8] Соллогуб А. В. Скобелев П. О., Симонова Е. В., Степанов М.Е., Царев А. В., Жиляев А.А. Оценка эффективности кластера малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. – №5(60), 2012. – С. 24-28.

[9] Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е., Жиляев А.А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. – 2013. №1(62). – С. 16-26.

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОВЫМИ ПЕРЕВОЗКАМИ ДЛЯ ПОЛИГОНА «ВОСТОЧНЫЙ»

П.О. Скобелев[1], А.А. Белоусов[2], С.О. Лисицын[2], А.В. Царев[2]

[1]Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
skobelev@gmail.com
тел: +7 (846) 332-39-27, факс: +7 (846) 333-27-70

[2]ООО «НПК «Разумные решения»
443080, Самара, Московское шоссе, 17, Россия
belousov@smartsolutions-123.ru,
тел: +7 (846) 332-21-01

Ключевые слова: *сетецентрический подход, интеллектуальные системы, мультиагентные системы, адаптивное планирование, железнодорожный транспорт*

Abstract

In this paper we describe the initial design of the intelligent multi-agent system for railroad scheduling in the Russian Railways JSC. The main aim of the system is to significantly reduce the cost of inefficient logistics through near real-time scheduling of railway equipment. The system is based on the actor model to provide scalability and access simplicity of the implementation. We approach the stated problem with the emergent intelligence principle instead of complex logic based agents architecture which keeps the implementation simple yet efficient. Technically, the system runs under the Java platform, messaging is based on the Akka concurrent event-driven middleware [1] and behavior state machines are powered by the SCXML standard [2] for state charts.

Введение

Железнодорожные перевозки имеют чрезвычайное значение в развитии экономики Российской Федерации. При этом особую роль играет восточное направление железнодорожных перевозок, связывающее многочисленные промышленные и добывающие предприятия страны между собой и обеспечивающее доставку производимых товаров как в западную часть России, так и по экспортным направлениям юга и востока, включающим Индию, Китай и Японию. Полигон «Восточный» Российских Железных Дорог включает в себя Восточно-Сибирскую, Красноярскую, Забайкальскую, и Дальневосточную железные дороги и обеспечивает более 30% общесетевого грузооборота страны, причем тоннаж экспортных грузоперевозок достигает более 100 млн. тонн в год [1].

Высокая важность Восточного полигона задаёт требования на эффективное, интенсивное и опережающее развитие для обеспечения возможности дальнейшего роста грузопотока, развития внутренней и экспортной экономики региона, а значит и общей экономики страны. Для выполнения поставленных задач развития составлены стратегические направления научно-технического развития ОАО «Российский железные дороги» на период до 2015 г. [1] и транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г. [2].

При этом в развитии инфраструктуры, безусловно, особую роль играют средства контроля и планирования эффективного использования ресурсов. Можно отметить следующие направления, соответствующие поставленным задачам развития железнодорожных перевозок:

- разработка адаптивной технологии планирования использования имеющихся ресурсов в реальном времени, позволяющая в полной мере использовать существующую инфра-

структуру и существенно снизить возникающие в настоящий момент при перевозках издержки;

- разработка методов построения вариантных графиков движения поездов для обеспечения баланса между объемом грузопотока и надежностью.

Именно в соответствии с этими направлениями развития, в данной работе рассмотрен подход к построению интеллектуальной системы управления грузовыми перевозками в ОАО «РЖД» на основе мультиагентной системы.

1 Специфика задачи управления ресурсами в ОАО «РЖД»

Одной из главных особенностей устройства систем управления процессами в ОАО «РЖД» является исключительная гетерогенность общей совокупности систем, решающих задачи автоматизации, что усложняет процессы разработки и эксплуатации новых подсистем. Для преодоления этого недостатка разрабатывается и вводится в эксплуатацию программная платформа «Вектор», предоставляющая гибкие возможности для разработки модульных подсистем. Разрабатываемая интеллектуальная система планирования перевозок для полигона «Восточный» является именно такой подсистемой программной платформы «Вектор» [3].

Неотъемлемым свойством грузоперевозок в ОАО «РЖД» является их колоссальный объем. Данное свойство задаёт требование масштабируемости системы управления ресурсами, то есть способности выполнять свои функции даже при наличии очень большого количества доступных ресурсов и их возможных потребителей.

Сложность взаимосвязей, существенные масштабы транспортной сети и большое количество объектов системы (локомотивов, локомотивных бригад, составов, вагонов и других) означает, что даже небольшие проблемы, возникающие на одной станции, могут распространяться по сети станций и многократно усиливаться, отражаясь на других показателях, порождая предельные нагрузки на железнодорожные пути, задержки и срывы в поставках, нежелательные простои и дорогостоящий холостой пробег локомотивов. Таким образом, система управления грузовыми перевозками должна быть максимально устойчивой. Для этого при её проектировании должны быть учтены следующие свойства задачи управления ресурсами [4]:

1) Неопределенность: поведение системы в будущем не является предсказуемым, поэтому планирование должно превентивно снижать энтропию системы;
2) Событийность (*event-driven model*): практически все действия системы являются реакцией на поступление некоторых событий (появление задачи перевозки, появление фактических данных о местоположении некоторого объекта и др.);
3) Многофакторность: существует множество различных критериев, предпочтений и ограничений, влияние каждого из которых не определено жестким образом и может регулироваться в ходе эксплуатации системы;
4) Высокая связность сети: принятие оперативного решения на одном участке (станции) требует согласования и учёта принятых или планируемых решений на связанных участках (станциях), что может вызывать изменение решений многих других участников;
5) Индивидуальность: практически все сущности системы, такие как заказчики, диспетчеры, машинисты, бригады и др. зачастую требуют индивидуального подхода, связанного со спецификой контрактных обязательств, заключенных с ними;
6) Наличие конфликтов: большое количество конкурирующих сущностей в системе приводит к возникновению ещё большего количества конфликтов;
7) Большие масштабы: предварительные оценки грузопотока на полигоне “Восточный” позволяют утверждать, что разрабатываемая система при её вводе в эксплуатацию может производить планирование нескольких тысяч локомотивов и поездов и сотен тысяч вагонов.

Таким образом, специфика рассматриваемой задачи определяет высокую сложность конечного решения. Однако стоит отметить, что согласно предварительным оценкам, решение этой задачи может обеспечить существенное повышение эффективности транспортной системы (от 5% до 20% по различным показателям), без дополнительных инвестиций в материальную транспортную инфраструктуру.

2 Основные принципы построения системы

Основу разрабатываемой системы составляет распределённая сетецентрическая мультиагентная среда, основанная на специализированной онтологии для решения транспортных задач [4-7]. Каждая сущность предметной среды представляются в системе некоторым управляющим агентом, действующим от ее имени. При этом любой агент обладает такими свойствами как собственные цели, механизмы поведения, предпочтения, ограничения, память. Отметим, что проектируемая система должна обладать присущим сложным системам свойством эмерджентности, возникающим из простых поведенческих свойств сообщества агентов.

Процесс управления базируется не на традиционном иерархическом принципе, а на достижении результата за счёт согласованного выполнения задач управления с учетом фактической обстановки. Важным условием является самосинхронизация, под которой понимается возможность обеспечения наибольшей эффективности как своих действий, так и действий других систем на основе их взаимного согласования. В качестве основного условия для достижения требуемой самосинхронизации рассматривается необходимость наличия единых правил согласования действий и единого языка (протокола) взаимодействия. Такой принцип управления обеспечивает повышение оперативности реакции на изменившуюся ситуацию или параметры окружающей среды, возможность реализации адаптивного поведения каждого узла системы, приводящего к повышению интеллектуальности всей системы в целом [8].

Агенты базовых сущностей системы характеризуются следующими целями:

1) Агент локомотива – выполнение задач перевозки состава по мере своих возможностей;
2) Агент задачи по перевозке состава – поиск исполнителей (локомотивов), способных выполнить некоторую часть задачи в соответствии с наложенными ограничениями и предпочтениями;
3) Агент станции – координация действий и балансировка нагрузки*;*
4) Агент нити, или временного слота, то есть временного окна, во время которого возможен переезд по некоторому железнодорожному пути, ожидание на станции либо любое другое действие – предоставление возможностей по выполнению транспортировки, ожидания или любых других действий*;*
5) Агент операции (то есть некоторого атомарного действия, примерами которого являются переезды между соседними станциями и стоянки) – поиск временного слота для ассоциации, способной минимизировать время ожидания, время выполнения и другие характеристики при соблюдении ограничений, возникающих в системе.
6) Агент пути (однонаправленный путь между соседними станциями) – координация распределения операций по нитям, принадлежащим пути, в соответствии с равномерностью нагрузки и снижением рисков.
7) Агент участка оборота (некоторой логической совокупности путей, объединяющей общую инфраструктуру: локомотивный парк, тип путей и другие характерные особенности) – соблюдение равномерности нагрузки на инфраструктуру, координация расписания, выделение потенциально критических ситуаций.

Одной из особенностей, специфических для разрабатываемой системы, является определение цепочек операций, то есть последовательностей неразрывных во времени атомарных действий, как сущностей системы (рисунок 1). При этом можно определить следующие основные варианты цепочек операций для сущностей системы:

1) Цепочка операций локомотива, состоящая из всех операций, которые запланированы для выполнения конкретным локомотивом – *динамическая цепочка, подлежащая многократному перестроению;*
2) Цепочка операций задачи, состоящая из всех операций, которые необходимо выполнить для перевозки груза – *менее динамичная цепочка, как правило, подлежащая лишь небольшому согласованию;*
3) Цепочка операций локомотивной бригады, состоящая из всех операций, выполняемых конкретной локомотивной бригадой – *крайне динамичная цепочка, подлежащая многократному перестроению при изменении назначений задач локомотивам.*

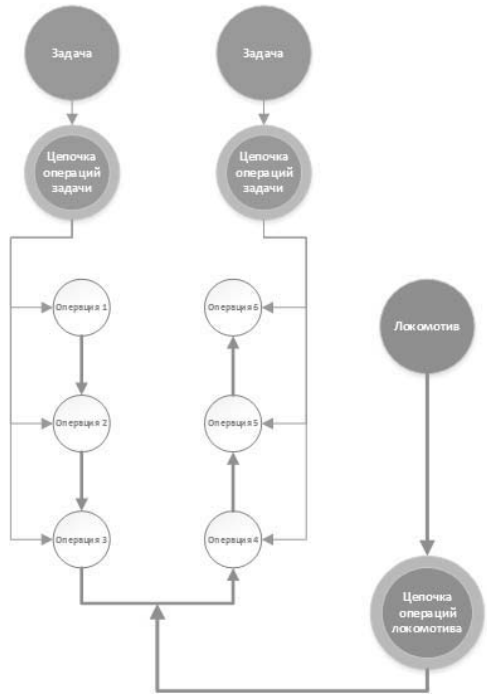


Рисунок 1 – Схематическое отображение взаимосвязей цепочек операций задач

Кроме того, для эффективного функционирования системы определены агенты, реализующие вспомогательные функции, такие как координация, маршрутизация сообщений и фильтрация. К вспомогательным агентам можно отнести:

1) Супервизоры локомотивов, составов, задач по перевозке, участков оборота, пересчитывающие показатели эффективности при обновлении конфигурации системы и выделяющие области и ситуации, потенциально нарушающие ограничения или предпочтения;
2) Агенты цепочек операций, маршрутизирующие и фильтрующие сообщения агентов операций для сокращения нагрузки на общую сеть;
3) Другие вспомогательные агенты, маршрутизирующие и фильтрующие сообщения между разными сущностями с учетом возможных ограничений.

Программные средства распределенных и параллельных вычислений достигли существенного развития в последние годы, что позволяет разрабатывать масштабируемые и высокоскоростные системы сравнительно легко. Данный факт задаёт одно из основных требований к программной реализации системы – она должна эффективно использовать многопроцессорные, многоядерные и распределённые среды (в общем случае гетерогенные). Для практической реализации такого требования обработка сообщений в системе должна быть асинхронной

и глобально неблокирующей, то есть любые действия, производимые внутри системы одной из её частей, не должны синхронно зависеть от состояния других её частей. Одним из наиболее эффективных подходов является широко известная модель акторов, определяющая систему как совокупность сущностей, способных реагировать на получаемые сообщения некоторыми операциями (в том числе, посылкой новых сообщений). При разработке системы управления ресурсами выбрана именно эта архитектура.

Отметим, что поведенческие свойства агентов в динамических мультиагентных системах не являются статическими, любой агент обладает состоянием, которое может меняться в соответствии с поступлением новой информации в виде сообщений. Например, отправка сообщения, как правило, приводит агента в состояние ожидания ответа. Требование масштабируемости ограничивает сложность реакций агентов, производимых при поступлении нового сообщения – они должны быть максимально простыми (что, однако, полностью соответствует принципу эмержентности).

Кроме того, важным требованием, которому должна удовлетворять система планирования, является большая гибкость как к онтологическим, так и к поведенческим изменениям. Для обеспечения выполнения этого требования в системе должны быть разработаны удобные средства визуального и текстового редактирования конфигурации системы.

3 Краткое описание программной архитектуры системы

В качестве языка программирования для реализации системы используется объектно-ориентированный кроссплатформенный язык Java. Выбор языка программирования и, в частности, его платформы объясняется рядом факторов:

1) Интеграционная платформа «Вектор» реализована на языке JRuby, исполняющемся под управлением платформы Java, поэтому использование этой платформы упрощает дальнейшую интеграцию разрабатываемого модуля управления ресурсами;
2) Для платформы Java существует большое количество надежных программных библиотек, что снижает затраты на разработку прикладного программного обеспечения;
3) К настоящему моменту для платформы Java было разработано множество языков высокого уровня (таких как Scala и Groovy), использование которых может существенно снизить объём кода и потенциально позволяет улучшить его качество.

Для обеспечения масштабируемости разрабатываемой реализации системы используется система исполнителей (*executors*) задач, возникающих при получении агентами сообщений. Система исполнителей задач образована пулом потоков (*thread pool*) виртуальной машины, то есть набором подготовленных потоков (как правило, таких потоков чуть больше, чем доступных ядер процессора), постоянно выполняющих задачи в соответствии с их приоритетами. Пример работы такой системы приведен на рисунок 2. В отличие от схемы «один актор – один поток», данный подход позволяет существенно улучшить масштабируемость всей системы, допуская работу большого количества акторов.

Для реализации поведенческой модели конечных автоматов в ходе работы предложено использование стандарта описания диаграмм состояний SCXML и его реализации в библиотеке Apache Commons SCXML [9, 10]. Редактирование поведенческих схем работы агентов в системе осуществляется с помощью конфигурационных файлов в формате SCXML, допускающих как текстовое, так и визуальное редактирование. Данное свойство обеспечивает высокую гибкость решения и предоставляет широкие возможности для эволюционного усложнения конечной системы.

Заключение

В статье приведено краткое описание разрабатываемой системы управления ресурсов для полигона «Восточный» ОАО «РЖД». Приведён ряд специфических характеристик поставлен-

ной задачи. Сформулированы основные требования к системе, приведены основные принципы проектирования. Приведено краткое описание технических деталей разрабатываемого решения, позволяющего удовлетворить поставленным требованиям.

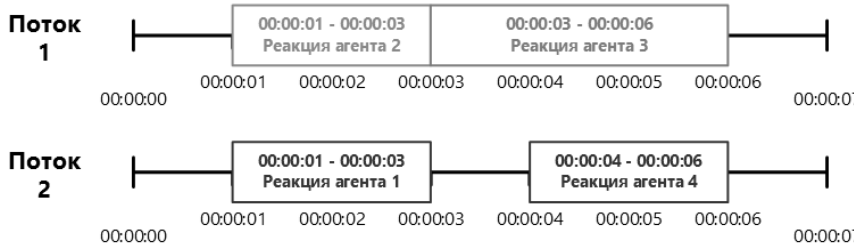


Рисунок 2 – Пример работы системы исполнителей

Благодарности

Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку в рамках гранта №11-07-13119-офи-м-2011-РЖД.

Список литературы

[1] Белая книга ОАО «РЖД». – 2010. – 54 с.
[2] Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. – Режим доступа: http://rosavtodor.ru/information/Osnovnye_dokumenty/transportnaya_strategiya_rf_na_period_do_2030_goda.html
[3] Автоматизированная информационная система управления «Вектор. – Режим доступа: http://www.programpark.ru/vector.
[4] Шабунин, А.Б. Разработка сетецентрического подхода к созданию интеграционной платформы и интеллектуальной системы управления ресурсами грузовых сортировочных станций в реальном времени / А.Б.Шабунин, А.В.Чехов, С.В.Сазуров, Е.В.Курбатов, Д.В.Дмитриев, Н.А.Кузнецов, П.О.Скобелев, И.О.Бабанин, С.С.Кожевников, Е.В.Симонова, М.Е.Степанов, А.В.Царев // Труды Третьей российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (УКИ’ 12). Москва, 16-19 апреля 2012. – М.:ИПУ РАН, 2012. – С. 1560-1572.
[5] А.Б. Шабунин, В.А.Чехов, П.О. Скобелев, Н.А. Кузнецов, Е.В. Симонова, И.О. Бабанин, С.С. Кожевников, М.Е. Степанов, А.В. Царев, С.В. Сазуров, Е.В. Курбатов, Д.В. Дмитриев. Сетецентрический подход к созданию распределенных систем управления ресурсами ОАО «РЖД» на основе мультиагентных технологий // Труды XIV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 22-25 июня 2012г. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. – С. 724-734.
[6] А.Б. Шабунин, С.Н. Марков, Д.В.Дмитриев, Н.А. Кузнецов, П.О. Скобелев, С.С. Кожевников, Е.В. Симонова, А.В. Царев. Интеграционная платформа для реализации сетецентрического подхода к созданию распределенных интеллектуальных систем управления ресурсами ОАО «РЖД» // Программная инженерия. – 2012. №9. – С. 23 – 28.
[7] А.Б. Шабунин, Н.А. Кузнецов, П.О. Скобелев, И.О. Бабанин, С.С. Кожевников, Е.В. Симонова, М.Е. Степанов, А.В. Царев. Разработка онтологии для мультиагентной системы управления ресурсами ОАО «РЖД» // Информационные технологии. – 2012. №12. – С. 42 – 45.
[8] А.Б. Шабунин, Н.А. Кузнецов, П.О. Скобелев, И.О. Бабанин, С.С. Кожевников, Е.В. Симонова, М.Е. Степанов, А.В. Царев. Разработка мультиагентной системы адаптивного управления ресурсами ОАО «РЖД» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. №1. – С. 23–29.
[9] What is Akka. – Режим доступа: http://doc.akka.io/docs/akka/snapshot/intro/what-is-akka.html.
[10] State Chart XML (SCXML): State Machine Notation for Control Abstraction. – http://www.w3.org/TR/scxml/.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ МУЛЬТИАГЕТННЫХ СИСТЕМ НА ПЛАТФОРМЕ JADE SEMANTIC AGENT FRAMEWORK

А.Б. Филимонов, О.А. Кромин

Московский государственный университет приборостроения и информатики
107996, Москва, ул. Стромынка, д. 20, Россия
filimon_ab@mail.ru
тел: +7 (903) 292-91-25

Ключевые слова: *мультиагентные системы, архитектура семантических агентов, язык коммуникаций, структура сообщений, семантические репрезентации*

Abstract

The structure of communication acts on the agents software platform JADE are considered. The singularities of semantic language of communications of agents FIPA-SL are stated. The possibilities of realization of semantic interaction of agents using framework of programming of multi-agent systems JSA are discussed.

Введение

Важнейшим аспектом разработки мультиагентных систем (МАС) являются вопросы реализации взаимодействия агентов. Здесь возможности реактивных агентов весьма ограничены - они способны воспринимать только сообщения, предусмотренные коммуникационным протоколом. Более гибкий механизм взаимодействия удается реализовать посредством агентов с BDI-архитектурой - частном типе делиберативных архитектур, базирующемся на расширениях модальных логик и позволяющем выражать *ментальные* свойства агента: убеждения, намерения, обязательства [1]. Такую возможность предоставляет семантическая платформа JADE Semantic Agent framework. В ней воплощена BDI-подобная абстракция агентов, причем семантическая интерпретация сообщений основывается на логическом языке FIPA-SL, предложения которого выражаются логикой ментальных отношений и действий. Целью статьи является обсуждение архитектуры JSA-агентов и особенностей механизма семантической обработки сообщений, реализуемого фреймворком JSA.

1 Коммуникации между агентами

Коммуникации между агентами могут быть основаны на теории речевых актов Дж.Остина [2, 7], согласно которой языковой (речевой) акт рассматривается как минимальная и базисная единица коммуникации.

Спецификации FIPA определяют язык коммуникаций агентов ACL (Agent Communication Language). FIPA ACL основан на теории речевых актов: сообщения предназначены для выполнения некоторых действий на основании содержимого сообщения. Сообщения, которыми обмениваются между собой агенты JADE, имеют формат языка ACL. Этот формат включает следующие поля [1]:

(<performative> // тип коммуникативного акта;
:sender // отправитель сообщения,
:receiver // получатели сообщения,
:content // содержание сообщения,
:reply-with // метка исходящего сообщения,
:reply-to // адреса агентов, которым отправляется ответ,

:in-reply-to // ссылка на входящее сообщение,
:reply-by // лимит времени на ответ,
:language // язык сообщения,
:encoding // кодировка сообщения,
:ontology // онтология,
:protocol // используемый протокол общения,
:conversation-id // идентификатор разговора
)

Performative выражает коммуникативные намерения отправителя сообщения и может принимать следующие значения:

inform - информирование,
request - запрос выполнения действия,
query_ref - запрос на получение информации,
query_if - запрос на получение информации по условию,
cfp (call for proposal) - звонок по предложению,
propose - предложение,
accept_proposal - принятие предложения,
reject_proposal - отклонение предложения и др.

Простой пример сообщения FIPA-ACL:

```
(inform
:sender (agent-identifier :name i)
:receiver (agent-identifier :name j)
:content "door(now, open)"
:language Prolog)
```

Здесь агент i на языке Prolog сообщает агенту j, что сейчас дверь открыта.

Языки контента ACL-сообщений необходимы агентам для обмена знаниями, намерениями, опытом, интерпретации сообщений и формализации рассуждений. Таковыми являются языки KIF, Prolog, Clips, SQL, FIPA-SL, FIPA-CCL, FIPA-KIF, DAML.

2 Структура языка FIPA-SL

FIPA ACL обеспечивает семантическую детализацию смысла возможных коммуникативных актов посредством семантического языка FIPA-SL, который, в сущности, является модальной логикой, оперирующей с убеждениями (beliefs), намерениями (intentions) и действиями (action).

FIPA-SL - расширенный язык первого порядка с синтаксисом, подобным LISP. SL-предложения выражаются логикой ментальных отношений и действий. Конструкции языка:

```
FORMULA ::= ATOMIC_FORMULA
                        | UNARY_LOGICAL_FORMULA
                        | MODAL_LOGIC_FORMULA
                        | ACTION_FORMULA
                        | QUANTIFIED_FORMULA
                        | BINARY_LOGICAL_FORMULA;
ATOMIC_FORMULA ::= proposition_symbol
                        | result
                        | predicate
                        | true
                        | false
                        | equals;
MODAL_LOGIC_FORMULA ::= belief
```

| uncertainty
| intention
| persistent_goal;
UNARY_LOGICAL_FORMULA ::= not (логический оператор);
BINARY_LOGICAL_FORMULA ::= and | or | implies | equiv (логические операции);
QUANTIFIED_FORMULA ::= forall | exists (кванторы);
ACTION_FORMULA ::= feasible | done (характеристики action - «осуществимо», «готово»).

Ментальная модель агента основана на представлении трех примитивов: убеждение, неопределенность, выбор.

FIPA-SL определяет следующие модальности [3]:
(B i φ): агент i убежден (believe) в φ;
(U i φ): агент i не уверен (uncertain) в φ;
(I i φ): агент i намерен (intend) сделать φ;
(done a φ): действие a только что произошло, а φ уже выполнено;
(feasible a φ): действие a может произойти, φ будет иметь место.

3 Фреймворк JSA

Агентные платформы являются промежуточным исполнительным уровнем (middleware) между программными агентами и операционной системой. МАС работает «поверх» агентной платформы и использует ее сервисы. Для многих приложений наиболее предпочтительной является агентная платформа JADE (Java Agent Development Framework), разработанная компанией TILAB (сайт http://jade.tilab.com/) и предназначенная для создания распределенных мультиагентных приложений на основе транспортной архитектуры «точка-точка». JADE полностью реализованная на языке Java и поддерживает FIPA-стандарты создания МАС.

Фреймворк JADE Semantic Add-on/ JADE Semantic Agent framework (JSA) разработан компанией France Telecom Research & Development [1, 4-6] как надстройка над платформой JADE и дополнен набором инструментов, необходимых для семантической обработки сообщений FIPA-ACL. Архитектуру JSA-агента поясняет рисунок 1.

Основу функционирования JSA-агентов составляет механизм *семантической интерпретации* (Interpreter Behaviour), который базируется на двух ключевых понятиях - *семантической репрезентации* (SR - Semantic Representation) и *правила семантической интерпретации* (SIP - Semantic Interpretation Principle). Семантические репрезентации (SRs) являются фактами FIPA-SL формул.

Основная деятельность агента (activity) состоит в дедукции воспринимаемых событий и соответствующей модификации убеждений и шаблонов поведения агента на основе обработки SRs, которая осуществляется посредством применения правил семантической интерпретации (SIPs). Данные правила реализуются *SIP-адаптерами*.

Основные компоненты фреймворка JSA (рисунок 1):

- *База убеждений* (Belief base) хранит убеждения агента. Убеждения являются предикатными формулами.
- *Таблица действий* (Action table) хранит описания (пред- и постусловия) и коды всех действий, которые может выполнять агент.
- *Типовая настройка* (Standard customization) - средства настройки JSA.
- *Таблица семантических правил интерпретации* (Semantic Interpretation Principles table) - содержит базовые SIPs. Каждое такое правило предназначено для управления частным видом SR. Соответствующий SIP-адаптер может порождать другие SRs, добавлять или удалять образцы поведения, обновлять базу убеждений.

В реализуемых посредством SIPs циклах интерпретации задействованы функции производства (production function) и потребления (consumption function) семантических репрезента-

ций. Цикл интерпретации имеет доступ к базе убеждений (Belief base), которая хранит факты и ведет историю ранее выполненных действий (actions).

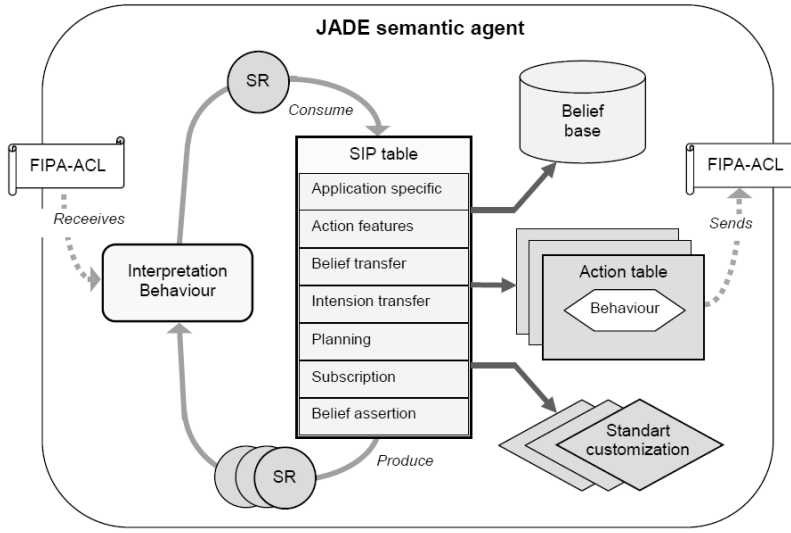


Рисунок 1 – Схема обработки сообщений в JSA

При создании SIP-адаптера задается вид SR, которую данный адаптер будет обрабатывать. После обработки SIP-адаптером сообщение попадает в базу убеждений. В JSA существует 27 предопределённых SIP-адаптеров, причем каждый из них имеет свою область применения и обрабатывает определённый тип сообщений.

Различают SIPs двух типов: предопределённые, которые определены FIPA-ACL семантикой, и пользовательские, которые могут быть использованы для настройки поведения агентов в конкретной предметной области, осуществления действий или планирования.

SIP таблица разбита на классы, основными из которых являются:

- *Application-Specific*. Содержит SIPs, специфичные для данного агента или приложения.
- *Action Features*. Эти SIPs производят несколько SRs из полученного сообщения, которые представляют собой семантические особенности соответствующего коммуникативного действия согласно FIPA-ACL спецификациям. Сгенерированные SRs далее интерпретируются другими SIPs.
- *BeliefTransfer*. Эти SIPs управляют принятием убеждений, предложенными внешними агентами. Они применяются к SRs, утверждающим (stating), что некий внешний агент намеревается убедить данного агента в конкретном факте. SIP-адаптер проверяет, что семантический агент убежден в данном факте и производит SRs с соответствующим назначением. Такие SRs полезны при интерпретации входящих информационных сообщений (Inform messages).
- *Intention Transfer*. Эти SIPs применяются к SRs, утверждающим, что намерения некоего внешнего агента включают конкретную цель. Они проверяют, что семантический агент принял (adopt) эту цель и производит SRs с соответствующим назначением. Такие SRs являются средством формирования кооперации и полезны при интерпретации всех форм запросов (Request messages).

- *Planning*. Эти SIPs применяются к SRs, утверждающим, что семантический агент намеревается достигнуть конкретной цели. Они добавляют соответствующий шаблон поведения. Среди предоопределенных SIPs - Action Performance SIP и Rationality Principle SIP, которые выполняют примитивное действие, выбранное из таблицы действий (action table). Разработчики комплектуют этот класс SIPs, чтобы управлять (handle) более тонко возможностями планирования.
- *Subsription*. Эти SIPs применяются к SRs, утверждающим, что некий внешний агент намеревается быть уведомленным (notified) о некотором событии. SIP-адаптеры устанавливают поведение семантического агента, выполняющее мониторинг событий и посылают ожидаемые уведомления. В частности, такие предопределенные SRs интерпретируют акты подписки (Subscribe) и запросы типа «когда» (Request-When) и «всякий раз» (Request-Whenever).
- *Belief Assertion*. Эти SIPs применяются к SRs, утверждающим, что семантический агент уверен в конкретном факте и поэтому добавляют его в базу убеждений.

Кроме SIP-адаптеров в обработке семантических репрезентаций участвуют фильтры. *Фильтры* - один из механизмов пополнения базы убеждений агента. Отправке запроса в базу убеждений предваряет проверка наличия фильтров, подходящих под данный запрос. По сути, фильтры это обходной механизм, позволяющий сформировать ответ на запрос минуя базу убеждений.

Рассмотрим схему обработки сообщений в JSA-агенте (рисунок 1). Входящее FIPA-ACL сообщение сначала проверяется на соответствие FIPA-SL спецификациям. Предопределенные SIPs выполняют его семантический разбор. Выделенные из него SRs передаются соответствующим SIP-адаптерам. Последние генерируют новые SRs, которые передаются в основной цикл интерпретации JSA-агента. На их основе пополняется база убеждений либо выполняются пользовательские SIP-адаптеры и фильтры, которые создают исходящие FIPA-ACL сообщения и далее передают его внешнему агенту.

Первым всегда выполняется SIP «ActionFeature». Оно применяется к исходной SR входящего FIPA-ACL сообщения - проверяется возможность выполнения данной SR и создаются четыре новых SR:

- предварительное условие (Feasibility precondition) (не используется);
- постоянное условие осуществимости (Persistent precondition);
- рациональное действие (Rational effect);
- постусловие (Postcondition).

SIP «ActionFeature» в случае входящих сообщений-запросов (Request messages) создает SR для SIP «IntentionTransfer».

При взаимодействии агентов чаще всего используются сообщения об убеждениях (Belief) и о намерениях (Intention). Соответствующие SRs имеют вид «(B ??myself …)» или «(I ??myself …)», где мета-ссылка ??myself подставляет имя агента, отправившего сообщение.

Выделим еще два типа SIP-адаптеров. SIP-адаптеры типа «BeliefTransferSIPAdapter» обрабатывают SRs, которые содержат факты и имеют вид «(??fact ??value)». Генерируемые такими SIP-адаптерами SRs попадают в базу убеждений. SIP-адаптеры типа «IntentionTransfer» обрабатывают высказывания о намерениях вида «(I <agentname> (<выражение>))», давая возможность принять этот перформатив к исполнению или отказать, сгенерировав сообщение о таком намерении. Этих двух типов SIP-адаптеров достаточно для реализации агентов - они обеспечивают необходимую функциональность для пополнения базы убеждений и обработки информационных сообщений.

Среди составных термов языка FIPA-SL отметим формулы «<quant><выражение>», где <quant> - один из квантификаторов any/all/itoa/some. Данные формулы позволяют представлять множества объектов, удовлетворяющих некоторым ограничениям. При обработке запросов такого типа сначала будет осуществляться поиск подходящего результата с помощью

фильтров, для чего формируются шаблоны убеждений. И только в случае неудачи осуществляется поиск в базе убеждений. Например, из запроса «(any ?x (sensor ?x))» будет сформирован шаблон поиска «(B ??myself (sensor ??x))». Если будет найден фильтр вида «(B ??myself (sensor ??x))», то значение ??x будет подставлено данным фильтром. Если же подходящий фильтра отсутствует, то запрос будет направлен в базу убеждений. Агент, отправивший запрос, получит сообщение в формате убеждения, например «(B AgentName (sensor 200))» [3].

В случае, если требуется особое поведение агента, существует возможность дополнения SIP таблицы SIP-адаптерами для специфических SRs.

Заключение

Фреймворк JSA берет на себя функцию семантического разбора сообщений, устраняя ее из функциональности JSA-агентов. Кроме этого он автоматически осуществляет маршрутизацию сообщений между агентами после начала и их взаимодействия, снимая с них необходимость выполнения коммуникационных актов, что позволяет ограничивать деятельность агента семантической обработкой SL-формул. Это позволяет абстрагировать архитектуру агента от специфики MAC, в которой он функционирует. Таким образом, онтология JSA-агента может охватывать лишь узкую область знаний, т.е. он может действовать автономно, не имея представления о всей системе в целом. Такой подход открывает возможности для унификации архитектуры агентов, существенно упрощая их разработку и понимание функционирования.

Таким образом, агент может отвечать за узкую область знаний, не имея представлений о всей системе в целом, действуя автономно, а коммуникативную функцию берет на себя JSA, не ограничивая сложность запросов агентов.

Основным недостатком JSA является избыточность получаемого программного кода. В связи с этим представляет интерес дальнейшее развитие JSA-технологии по пути создания надстройки над классами агентов JSA, позволяющей скрывать неиспользуемые возможности фреймворка и сводить к минимуму количество обработчиков, необходимое для организации взаимодействия агентов.

Список литературы

[1] Bellifemine F., Caire G., Greenwood D. Developing Multi-Agent Systems with Jade. – West Sussex: John Wiley & Sons, 2007. - 286 p.

[2] Harnish R.M. Commitments and speech acts // Philosophica, 2005, 75. - P. 11-41.

[3] Lespérance Y., Shapiro S. On Agent Programming Language Support for Rational Communication. In N.Maudet, P.-Y.Schobbens, and M.Guyomard (Eds.), Modèles formels de l'interaction (MFI-09), p. 223-232, University of Rennes 1 Press, Rennes, France, 2009.

[4] Louis V., Martinez T. The JADE Semantic Agent: towards an agent communication oriented middleware // AgentLink News, 2005. - Vol. 18. - P. 16-18.

[5] Pautret V. Jade Semantics Add-on Programmer's guide. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: // http://jade.tilab.com/doc/tutorials/SemanticsProgrammerGuide.pdf.

[6] Programming institutional semantic agents. Tracking number 118, 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.

[7] Winograd T., Flores F. Understanding Computers and Cognition: a New Foundation for Design. – Norwood: Ablex, 1986.

МЕТОДОЛОГИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОАКТИВНОГО МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

М.Ю. Охтилев, В.А. Зеленцов, Б.В. Соколов, С.А. Потрясаев

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
199178, Санкт-Петербург, 14 линия, В.О., д.39, Россия
v.a.zelentsov@gmail.com, oxt@mail.ru, semp@mail.ru, sokol@iias.spb.su
тел: +7 (812) 328-01-03, факс: +7 (812) 328-44-50

Ключевые слова: *проактивный мониторинг и управление, сложный технический объект, интеллектуальная информационная технология*

Abstract

In the report the developed authors methodological and methodical basics of the theory of monitoring and management of structural dynamics of complex objects (CO), including multiple-model complexes, the combined methods, algorithms, are considered, and also the new intellectual information technology (IIT), applied techniques and tools, supporting IIT and intended for the automated design of systems of space and ground based monitoring and management by CO in various conditions of situation change are offered. Examples of practical realization of IIT are proposed.

Введение

Главная особенность управления сложными техническими объектами (СТО) в кризисных ситуациях состоит в том, что оно происходит в условиях неполноты, неопределенности, неточности и противоречивости информации о складывающейся обстановке и при наличии неустранимого порогового ограничения времени на цикл формирования и реализации решений по предотвращению возможных катастроф, чрезвычайных и аварийных ситуаций. Это определяет принципиальное отличие технологий принятия решений в данных обстоятельствах от технологий управления при единичных отказах отдельных элементов и подсистем в СТО, базирующихся на классических положениях теории надежности и отказоустойчивости [1-2].

В условиях кризисных ситуаций снижение возможных негативных последствий природных и техногенных катастроф достигается только при использовании *проактивного управления*, которое в отличие от традиционно используемого на практике *реактивного управления* СТО, ориентированного на оперативное реагирование и последующее недопущение инцидентов, предполагает предотвращение возникновения инцидентов за счет создания в соответствующих системах мониторинга и управления (СМУ) СТО принципиально новых прогнозирующих и упреждающих возможностей при формировании и реализации управляющих воздействий, базирующихся на концепции комплексного моделирования.

Предлагаемый авторами подход к решению перечисленных проблем основывается на разработанной ими *междисциплинарной методологии* создания и применения интеллектуальных технологий мониторинга, прогнозирования структурной динамики СТО, а также *проактивного управления* указанными инфраструктурами в реальном масштабе времени (РМВ). Использование этой методологии дает возможность осуществить переход от эвристических методов описания процессов мониторинга и управления в кризисных ситуациях к целенаправленной последовательности построения моделей и алгоритмов анализа состояний, адаптивных к возможным изменениям структуры критически важных объектов различного назначения.

В связи со сказанным, в докладе представлены основные результаты авторов, которые были получены ими за последнее десятилетие при поиске конкретных путей решения проблем

комплексной автоматизации мониторинга и управления состояниями СТО. В докладе в качестве основного объекта рассмотрения предлагается разработанная сотрудниками СПИИРАН и ЗАО “СКБ “ОРИОН” интеллектуальная информационная технология (ИИТ) проактивного мониторинга и управления (ПМУ) СТО, которая базируется на комбинированном использовании логических, лингвистических и математических моделей и методов, обеспечивающих параллельную, распределенную обработку и анализ в реальном времени сверхбольших объемов измерительной информации при наличии в них некорректных, неточных и противоречивых данных, а также упреждающее предсказательное комплексное моделирование развивающейся ситуации.

Главное достоинство и отличительная черта разработанной ИИТ ПМУ СТО состоит в том, что она основывается на отечественных технологиях и многолетних промышленных разработках в области системотехники и инженирии знаний. Использование данной ИИТ обеспечивает на конструктивном уровне интеграцию данных, информации и знаний, получаемых из различных источников при мониторинге и управлении СТО. На рисунке 1 показано как на основе единой среды обработки и анализа данных, созданной на основе применения ИИТ, формируется целостный образ объекта мониторинга.

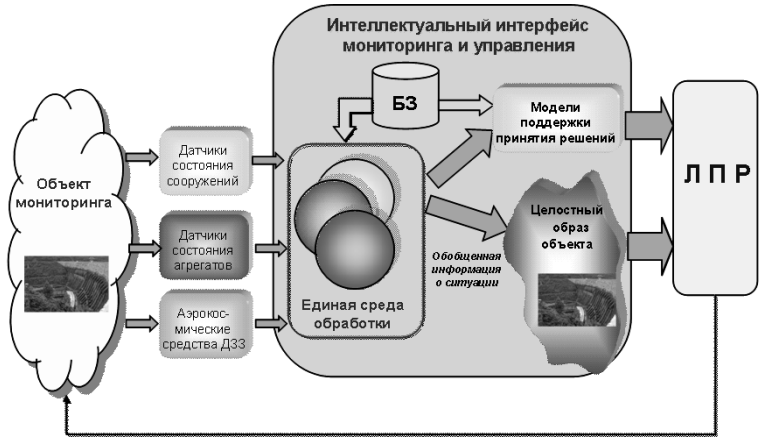


Рисунок 1 – Предлагаемая интеллектуальная информационная технология наземно-космического мониторинга состояния сложного объекта

В докладе приводится детализация описания методологических и методических основ использования рассматриваемой ИИТ ПМУ СТО применительно к процессам подготовки и запуска существующих и перспективных ракет-носителей космического назначения (РКН). Также авторы, базируясь на методологических и методических основах развиваемой ими теории управления структурной динамикой СТО, показывают как сформулированные ими концепции, принципы, способы, модели, методы и алгоритмы могут быть реализованы и в других прикладных областях (атомная энергетика, логистика, наземно-космический мониторинг объектов).

1 Анализ исследований, связанных с проблематикой автоматизированной обработки и интеграции данных о состоянии сложных организационно-технических объектов

Одним из наиболее актуальных видов автоматизации всегда была и остается автоматизация управления различными сложными технологическими процессами (промышленными линиями, удаленными техническими средствами и т.п.). К их числу в полной мере можно отне-

сти и СТО. Говоря конкретно об основных объектах исследований, рассматриваемых в данном докладе, то ими являются – существующие (перспективные) автоматизированные системах управления (АСУ) полигонами (АСУП), АСУ подготовки и пуска ракет космического назначения (АСУ ПП РКН), АСУ технологическими процессами на технических и стартовых комплексах (АСУ ТК и АСУ СК), которые эксплуатируются (планируются к использованию) на Северном и Южном космодромах (в г. Плесецке и Байконуре) [3-4] , а также в перспективе на Восточном космодроме. При этом следует сразу же отметить, что развитие перечисленных АС в последние годы шло практически обособленно и независимо друг от друга. Каналы обмена между ними, особенно оперативные, либо отсутствовали, либо обладали низкой пропускной способностью. Созданные на разной программно-аппаратной платформе системы не были включены в единый цикл подготовки и пуска (от прибытия РКН на космодром до применения по целевому назначению) и не образовывали комплексную систему автоматизации всех технологических процессов подготовки и пуска РКН.

При этом на полигонах (космодромах) отсутствуют интегрированные унифицированные автоматизированные средства систематизации, накопления, хранения и доведения сведений о техническом состоянии и надежности космических средств (КСр) и входящих в их состав изделий, что практически делает невозможным обобщение и распространение опыта разработки, изготовления и эксплуатации комплексов, особенно в условиях реформирования и модернизации ракетно-космической отрасли. Также, к сожалению, в рассматриваемых АСУ космодромов нет единых для всех потребителей баз данных и знаний обо всех этапах жизненного цикла СТО, что ограничивает оперативный доступ к информации о причинах имеющихся замечаний, отказов и аварий СТО, эффективности проведенных доработок, направленных на устранения этих причин [5].

В чём же состоят причины существования перечисленных выше недостатков (проблем), связанных с проектированием и применением перечисленных АСУ различными классами КСр? Одна из главных причин указанных недостатков имеет *методологический характер* и состоит в том, что при разработке данных АС зачастую игнорируются требования системного подхода к проектированию сложных организационно-технических комплексов. Это, в частности, проявляется в автоматизации лишь отдельных этапов процесса сбора и обработки информации или в решении на ЭВМ некоторых расчётных задач без рассмотрения проблемы автоматизации процессов управления в целом. Другими словами, не осуществляется комплексная автоматизация соответствующих процессов. Практика показывает, что автоматизации должны подвергаться только хорошо изученные и достаточно стабильные процессы и технологии, для которых разработаны конструктивные формальные средства описания (модели), методы, алгоритмы и методики решения соответствующих прикладных задач.

Таким образом, проблемы создания и развития АС – это, прежде всего модельно-алгоритмические и информационные проблемы, требующие для своего решения разработки фундаментальной теоретической базы. Это означает, что создание качественного специального программного обеспечения (СПО) автоматизации процессов мониторинга и управления состояниями различными классами КСр необходимо начинать с разработки прикладной теории управления, в которой должны быть учтены все особенности соответствующей предметной области. В рамках указанной теории следует сформировать методологические и методические основы решения рассматриваемых задач мониторинга и управления КСр. В противном случае каждый раз будет разрабатываться СПО, базирующееся на эвристических подходах, основанных, в свою очередь, на интуиции и практическом опыте прикладных программистов и операторов, эксплуатирующих КСр. Данные ИТ и подходы позволяют, к сожалению, лишь облегчить труд программиста по конструированию программных модулей, но не предоставляют возможности проверки корректности описания предметной области, автоматического синтеза программ вычислений и в целом не обеспечивают в нужной степени повышение эффективности функционирования КСр на основе соответствующей автоматизации.

Таким образом, в настоящее время стала очевидной необходимость автоматизированного сбора, интеграции и комплексного анализа всех видов информации, циркулирующей в контуре как отдельных АСУ ТП, так и АСУ ПП и АСУ космодрома в целом, и создания многоуровневой АСУ космодрома с использованием современных принципов организации интегрированных АСУ (ИАСУ, в зарубежной терминологии - корпоративных информационных систем (КИС)) [5].

2 Методология и интеллектуальные информационные технологии комплексной автоматизации решения задач наземно-космического мониторинга состояний сложных технических объектов

Проведенный анализ показал, что в настоящее время можно выделить несколько подходов к построению новых АСУ подготовки пуска (ПП) ракет космического назначения (РКН [10-11, 14]. В рамках существующих традиционных процедур проектирования разрабатываются локальные АСУ технологическими процессами, обеспечивающие подготовку и пуск РКН, а затем для каждой АСУ ТП создаются отдельные автоматизированные рабочие места (АРМы) АСУ ПП, интеграция которых осуществляется на базе локальной вычислительной сети.

При таком подходе, созданные на разных аппаратно-программных платформах АСУ ТП и АСУ ПП слабо взаимодействуют между собой, их сложно включить в единый цикл подготовки и пуска и образовать комплексную систему автоматизации всех рассматриваемых процессов. В этом случае, АСУ ПП практически превращается в систему информационного обеспечения, а не информационно-управляющую систему, при этом возрастает избыточность аппаратно-программных средств, снижается их надежность, возрастает стоимость разработки, эксплуатации АСУ ПП и содержания ЗИП.

Более перспективным представляется подход, в рамках которого перечисленные АСУ ТП и АСУ ПП должны создаваться на интегрированной аппаратно-программной платформе в едином информационном пространстве. При этом деление на верхний и нижний уровни информационного взаимодействия и управления в АСУ ПП РКН СК ПГ (в общем случае довольно условное) должно осуществляться, исходя из технологии проведения всех видов испытаний РКН СК ПГ на ТК и СК. Такой подход позволяет не дублировать рабочие места АСУ ТП рабочими местами АСУ ПП, а эффективно распределять (перераспределять) задачи мониторинга и управления в едином информационном пространстве процессов подготовки и пуска РКН СК на космодроме исходя из складывающейся обстановки.

В целом разработка и внедрение АСУ ПП на принципах интегрированных (корпоративных) информационных систем позволит сократить количество аппаратно-программных средств и, соответственно, численность персонала, унифицировать аппаратные и программные средства, сократить затраты на эксплуатацию АСУ ПП и содержание ЗИП.

Кроме того, в этом случае можно будет в РМВ проводить ПМУ процессами подготовки и пуска РКН, осуществлять комплексное моделирование соответствующих КСр на различных этапах их жизненного цикла, выявлять критические участки и слабые звенья в конкретных процессах подготовки и пуска, организовывать доступ к оперативным данным о ходе их реализации. В рамках данных интегрированных АСУ будет также обеспечен доступ ко всему объему конструкторской, эксплуатационно-технической и методической документации, результатам заводских, стендовых, автономных, комплексных и летных испытаний РКН, а, также появится возможность накопления и использования опыта персонала, полученного при проектировании, производстве и эксплуатации систем и агрегатов РКН.

Анализ существующих тенденций в области создания современных информационных технологий и систем показал, что перспективы в области автоматизации процессов мониторинга и управления КСр на полигонах запуска РФ связаны с разработкой и внедрением следующей иерархии автоматизированных систем:

1) АСУ космодрома — это интегрированная (*корпоративная*) автоматизированная *система*, предназначенная для автоматизации учёта и управления всеми ресурсами космодрома (в зарубежной интерпретации - ERP-система, - англ. Enterprise Resource Planning System — система планирования ресурсов предприятия). Система должна строиться по модульному принципу и в той или иной степени охватывать все ключевые процессы деятельности космодрома. В основе ИАСУП (ERP-систем) лежит принцип создания единого хранилища данных, содержащего всю информацию о ракетно-космическом комплексе (РКК) в целом.

2) АСУ ПП – это часть интегрированной (корпоративной) информационной системы космодрома (MES-система, - сокр. от англ. Manufacturing Execution System - производственная исполнительная система или АСУ производственными процессами (ПрП) в РФ), которая в реальном масштабе времени (РМВ) обеспечивает инициирование, отслеживание, оптимизацию, документирование процессов подготовки и пуска РКН от прибытия составных частей РКН на космодром до применения по назначению.

АСУ ПП должна быть ядром интеграции всех основных подсистем современного космодрома, связующим звеном между АСУ космодрома, ориентированной на управление ресурсами космодрома и укрупненное планирование процессов жизнедеятельности космодрома, и оперативной испытательной деятельностью космодрома на уровне лабораторий, отделов, подразделений, руководителей и номеров боевых расчетов. Интеграция функций АСУ ПП с другими системами АСУ космодрома позволит обеспечить оперативное и достоверное наблюдение за критическими технологическими процессами подготовки и пуска РКН и выработку оперативного и эффективного управленческого решения, создание интеллектуального информационного пространства для взаимодействия операторов, участвующих в процессах подготовки и пуска РКН.

При этом ужесточаются требования к руководителям подготовки и пуска РКН, как лицам, принимающим решение в критических, потенциально опасных и аварийных ситуациях. От руководителей требуются уже не только профессиональные знания технологических процессов, основ управления, но и опыт работы в информационных системах, умение принимать решение в диалоге с вычислительными средствами АСУ, как в штатных, так и в нештатных и аварийных ситуациях. Поэтому наличие дружественного человеко-машинного интерфейса в АСУ ПП, полнота и наглядность представляемой информации, наличие баз данных и знаний об объекте управления, доступность «рычагов» управления, удобство и оперативность использования всех видов информации и т.д., позволят повысить эффективность взаимодействия руководителя подготовки и пуска РКН с различными АСУ ТП, а также существенно сократить его ошибки.

Разработанная ИИТ, как показывает практика, позволяет осуществить переход от эвристических методов алгоритмизации этих процессов к последовательности целенаправленных теоретически и методически обоснованных этапов построения алгоритмов анализа и управления состояний. Предлагаемая ИИТ [3-5], ориентированная на использование базы знаний (БЗ) ОУ, обеспечивает существенное сокращение сроков и расходов на создание или модификацию систем мониторинга и управления состояниями сложных технологических объектов и процессов. Суть ее состоит в предоставлении технологу (управленцу, анализатору) удобного интеллектуального пользовательского интерфейса при создании и наполнении БЗ, а также при решении непосредственно задач ПМУ. Предлагаемая «сквозная» модель проектирования позволяет максимально учитывать специфику задач АСУ ПП (учет требования скорости разработки, удобства, малой стоимости проектирования и т.д.) и формировать оптимальную архитектуру АСУ ПП [3,4], легко адаптируясь к возможным изменениям структуры как РКК, так и объектов наземной космической инфраструктуры существующих и создаваемых в РФ космодромов.

3) *АСУ ТП – это часть* корпоративной *информационной системы космодрома (SCADA-система* - от англ. Supervisory Control And Data Acquisition – система диспетчерского управления и сбора данных), которая позволяет достичь высокого уровня автоматизации в решении задач, сбора, обработки, передачи, хранения и отображения информации, разработки автоматических и автоматизированных систем управления системами и подсистемами РКК. Данный вид АСУ ТП обеспечивает контроль технического состояния и управление отдельными системами и агрегатами РКН и технологическим оборудованием, задействованным при подготовке и пуске РКН. В настоящее время указанный вид АСУ ТП представлен на Северном и Южном космодромах (в г. Плесецке и г. Байконуре) многочисленными вариантами реализации АСУ технологическими процессами на технических и стартовых комплексах.

Заключение

В докладе представлены методологические и методические основы теории проактивного мониторинга и управления структурной динамикой СТО, включающие в себя полимодельные комплексы, комбинированные методы, алгоритмы, а также предложены новая интеллектуальная информационная технология, прикладные методики и инструментальные средства, её поддерживающие и предназначенные для автоматизированного проектирования систем мониторинга и управления КСр в различных условиях изменения обстановки, которые уже в настоящее время находят широкое применение на практике на космодромах РФ.

В докладе конструктивность разработанного концептуального и модельно-алгоритмического обеспечения проиллюстрирована применительно к задачам автоматизированного оценивания и анализа измерительной информации, используемой при подготовке и пуске ракет-носителей космического назначения.

Благодарности

Исследования по рассматриваемой тематике проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-08-01016, 11-08-00767, 12-07-13119-офи-м-РЖД, 12-07-00302, 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250), Программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект №2.11), проекта ESTLATRUS 2.1/ELRI -184/2011/14 «Integrated Intelligent Platform for Monitoring the Cross-Border Natural-Technological Systems» (2012-2013 гг.), проекта ESTLATRUS/1.2./ELRI-121/2011/13 «Baltic ICT Platform».

Список литературы

[1] Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунов Б.Е. Интеллектуальное управление динамическими системами. М.: Физматлит, 2000.

[2] Велихов Е.П., Бетелин В.Б., Кушниренко А.Г. Промышленность, инновации, образование и наука в Росси/ Е.П. Велихов, В.Б. Бетелин, А.Г. Кушниренко; Научно-исследовательский институт системных исследований РАН – М.: Наука, 2009.- 141 с.

[3] Охтилев М.Ю. Основы теории автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени. Синтез системы анализа. – СПб.: ВИКУ им. А.Ф.Можайского. – 1999.– 160 с.

[4] Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.

[5] Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики, 2002. №5. С. 24–41.

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ РЕШЕНИЯ ПОСТУПАЮЩЕГО ПОТОКА СВЯЗНЫХ ЗАДАЧ В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ GRID

А.И. Каляев
НИИ МВС ЮФУ
347900, Таганрог, ул. Чехова, 2, Россия
anatoly.kaliaev@gmail.com
тел: +7 (952) 566-66-99

Ключевые слова: *GRID, мультиагентность, децентрализованная система, связные задачи*

Abstract
The new method of the organization of the distributed computations is offered in the presented paper. The method allows using resources of computers united by a network for solving coherent tasks. The main feature of the given method is adaptive correcting of process of computation if parameters of computing nodes are varying or nodes fail. This ability is achieved because of system decentralization and multiagent approach: all nodes of computing system are equal and nodes have to unite to solve incoming tasks.

Введение

В середине 1990-х годов Ян Фостер и Карл Кессельман предложили термин, который стал символом новой эпохи компьютерных технологий - GRID. Основной идеей GRID-компьютинга является объединение и предоставление путем удаленного доступа заинтересованным пользователям разнообразных вычислительных ресурсов. С тех пор было создано множество различных GRID-систем, однако принципы организации подобных систем практически не изменились. Современные GRID строятся, как правило, по иерархической схеме: имеется некоторое количество (от одного и более) выделенных служебных вычислительных узлов (СВУ) - серверов, реализующих функции управления работой GRID, а так же множество исполнительных вычислительных узлов (ИВУ) - компьютеров, выполняющих непосредственно вычисления. Основным управляющим элементом системы при этом является диспетчер GRID – набор программных средств, отвечающих за распределение вычислительных ресурсов GRID при решении поступающих пользовательских задач. Эффективность работы GRID, как правило, оценивается исходя из уровня загрузки ИВУ системы и может быть определена коэффициентом полезной нагрузки (КПЗ) ИВУ, который рассчитывается как отношение процессорного времени, потраченного ИВУ системы на решение полезных задач, поступающих в GRID, к общему времени их работы.

В современных GRID диспетчер имеет, как правило, централизованную организацию при которой все ИВУ системы контролируются с помощью выделенных СВУ, реализующих функции диспетчирования [1]. Такая организация диспетчера существенно усложняет процедуры прямого взаимодействия между ИВУ. Поэтому высокая эффективность работы в таких GRID достигается в основном при решении несвязных задач не требующих интенсивных информационных обменов ИВУ. Однако в последнее время появляется все больше задач, в которых подзадачи информационно связаны друг с другом, так называемых «связных задач». [2] Решение таких задач в современных GRID приводит к существенному снижению КПЗ, поскольку на диспетчер в данном случае возлагаются функции планирования последовательности решения подзадач, согласования информационных обменов между ними, так как одни подзадачи не могут быть запущены без входных данных, которые в свою очередь будут получены только по итогам выполнения других подзадач. Результаты исследований в области

загрузки современных GRID показывают, что в среднем КПЗ ИВУ GRID при решении несвязных задач колеблется в пределах от 75 до 90% [3], в то время как при решении связных задач этот параметр оказывается существенно ниже – менее 40%. При этом процессы передачи данных между узлами GRID занимают порядка 30% времени работы, а около 20% времени ИВУ GRID простаивает [4].

На этапе своего становления GRID-системы строились в основном на базе оборудования, выделенного лицом, заинтересованным в решении своих задач, однако со временем за счет распространения локальных и глобальных сетей стали появляться системы, ориентированные на использование компьютеров, находящихся в частных руках, т.е. ИВУ-«фрилансеров» (по аналогии с фрилансерами, работающими удаленно). Использование таких ресурсов является экономически выгодным, т.к. резко снижаются затраты на их содержание и обслуживание. Однако, с другой стороны использование таких ресурсов существенно усложняет процесс диспетчирования GRID, так как параметры ИВУ-«фрилансеров» могут непредсказуемо изменяться в процессе решения задачи по воле их владельцев. Поэтому, при решении связных задач в GRID, построенных на базе таких ИВУ-«фрилансеров», составленный диспетчером план решения задачи может в любой момент потерять свою актуальность в случае изменении параметров ИВУ, задействованных в ее решении, а это в свою очередь вызовет дополнительные простои оборудования, что еще сильнее снизит КПЗ системы.

Указанные недостатки могут быть частично устранены, если переместить часть функций диспетчирования с выделенных служебных серверов непосредственно на множество ИВУ. Для этого предлагается использовать мультиагентный подход: на каждом ИВУ системы необходимо разместить специальное ПО – агента, представляющего интересы данного ИВУ в процессе диспетчирования. Тогда процесс диспетчирования системы будет осуществляться путем прямого взаимодействия отдельных агентов, т.е. децентрализованно. Такая мультиагентная организация диспетчера позволит каждому агенту оперативно отслеживать изменения параметров его ИВУ и учитывать эти изменения в процессе диспетчирования. Кроме того, прямое взаимодействие агентов друг с другом позволит минимизировать временные потери при решении связных задач. Таким образом, актуальной проблемой является разработка методов и средств децентрализованного диспетчирования ресурсов GRID-систем на базе мультиагентного подхода.

1 Метод мультиагентной организации диспетчера GRID

В процессе исследования возможности повышения эффективности решения связных задач в GRID был проведен анализ ряда современных GRID-систем и предложена их обобщенная модель, позволяющая оценить коэффициент полезной загрузки (КПЗ) системы при решении пользовательских задач. С помощью данной модели показано, что КПЗ современных GRID-систем существенно снижается в случае решения связных задач, требующих интенсивных информационных обменов между подзадачами, а так же в случае организации GRID на базе ПК частных владельцев (ИВУ- «фрилансеров»), параметры которых могут динамически изменяться в процессе работы GRID.

Для того, чтобы повысить КПЗ GRID при решении связных задач, предложено переместить большую часть функций диспетчирования со служебного уровня СВУ непосредственно на уровень исполнителей – ИВУ-фрилансеров [5]. При этом основными взаимодействующими элементами системы становятся реализуемые на ИВУ программные агенты, представляющие интересы владельцев ИВУ-фрилансеров в процессе работы GRID. Основными отличиями предложенной схемы построения GRID-системы от существующих является то, диспетчирование работы GRID будет осуществляться за счет прямого взаимодействия агентов друг с другом, что , в сою очередь, позволяет снизить непродуктивные потери времени при организации информационных обменов между ИВУ и , как следствие, повысить КПЗ. Кроме того, каждый

из агентов может самостоятельно осуществлять мониторинг параметров своего ИВУ и оперативно учитывать все эти изменения в процессе диспетчирования. Предлагаемая схема организации GRID представлена на рисунке 1.

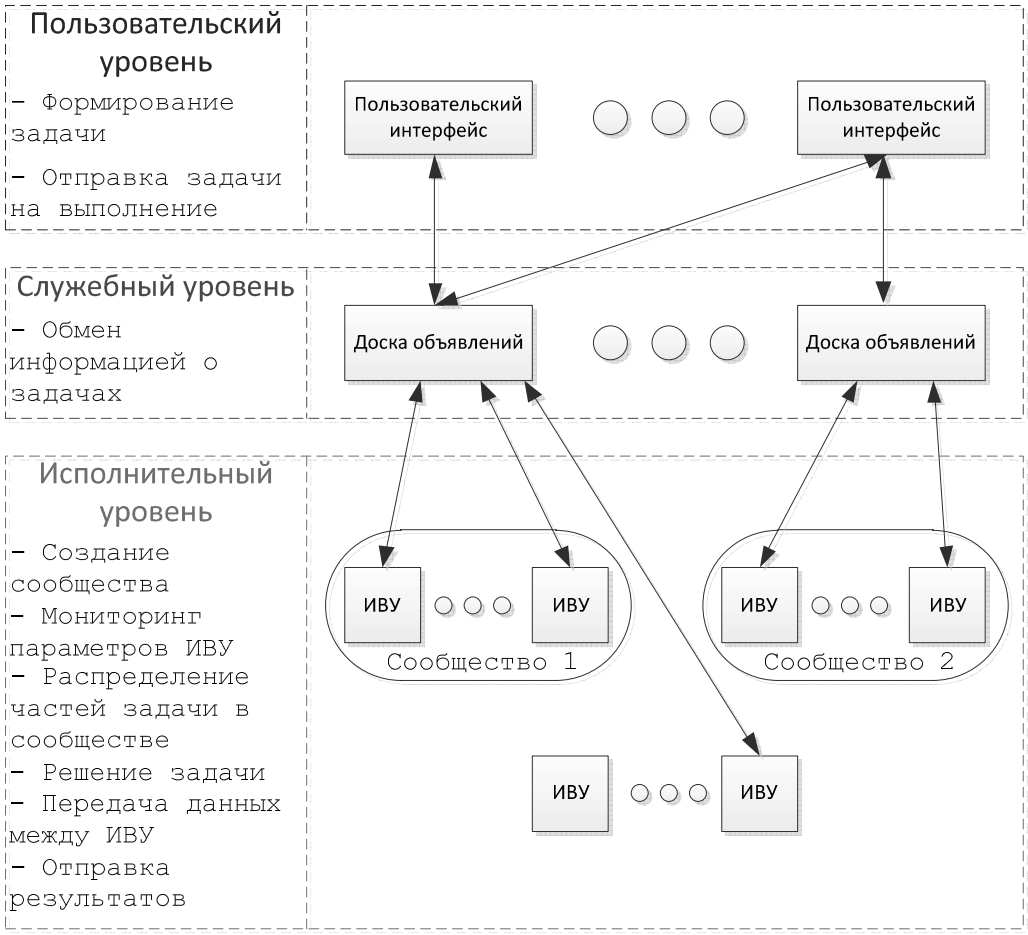


Рисунок 1 – Схема GRID-системы с децентрализованным мультиагентным диспетчером

Однако мультиагентная организация диспетчера системы существенно усложняет процесс взаимодействия пользователей и GRID: пользователь не может взаимодействовать с системой через выделенные СВУ, реализующие функции диспетчера, как это происходит в классических GRID. Для решения этой проблемы предложен способ организации взаимодействия в GRID с помощью пассивных служебных серверов – досок объявлений (ДО). За счет пассивности функциональная нагрузка этих узлов будет сведена к минимуму и для их реализации будет достаточно производительности обыкновенного ПК (см. рисунок 1).

На базе предложенных принципов разработан метод децентрализованного мультиагентного диспетчирования ресурсов в GRID [6]. Суть метода заключается в следующем (см. рисунок 1). Пользователь GRID у себя на ПК формирует задачу для решения, задает требования по времени ее решения в GRID и предлагаемую оплату, которую он готов заплатить за ее решение. После этого он отправляет эту информацию на ДО. Основными активны-

ми элементами системы являются агенты, физически реализуемые на ИВУ. Агенты GRID, не занятые решением каких-либо задач, с некоторой периодичностью опрашивают ДО на предмет наличия нерешенных пользовательских задач. Если такая задача обнаруживается, то для ее решения создается сообщество агентов, причем агенты включаются в сообщество до тех пор, пока оценочное время решения задачи сообществом не станет меньше времени, указанного пользователем.

Когда в сообществе набирается количество агентов, достаточное для решения задачи в указанный пользователем срок, расширение сообщества прекращается. В созданном таким образом сообществе агенты совместно производят распределение подзадач между их ИВУ, при этом распределение осуществляется таким образом, чтобы минимизировать общее время решения пользовательской задачи [7]. Как только части пользовательской задачи (подзадачи) размещены по ИВУ, агенты запускают процесс их решения. При этом агенты производят постоянный мониторинг параметров своих ИВУ (производительность, скорость доступа к сети и т.п.). В случае если параметры какого-либо ИВУ сообщества существенно изменяются, то его агент оповещает остальных членов сообщества об этом и сообщество может перераспределить подзадачи с учетом этих изменений, либо вообще изменить свой состав в случае необходимости, например добавить новых агентов. После того, как задача полностью решена, результат ее решения отправляется на ДО и далее пользователю, а сообщество распускается.

2 Исследование эффективности предложенного метода мультиагентной организации диспетчера GRID

Для исследования эффективности предложенного метода, была разработана программная модель GRID с мультиагентным диспетчером, позволяющая моделировать GRID с различными размерами и параметрами при решении потоков поступающих задач. Интерфейс программной модели показан на рисунке 2.

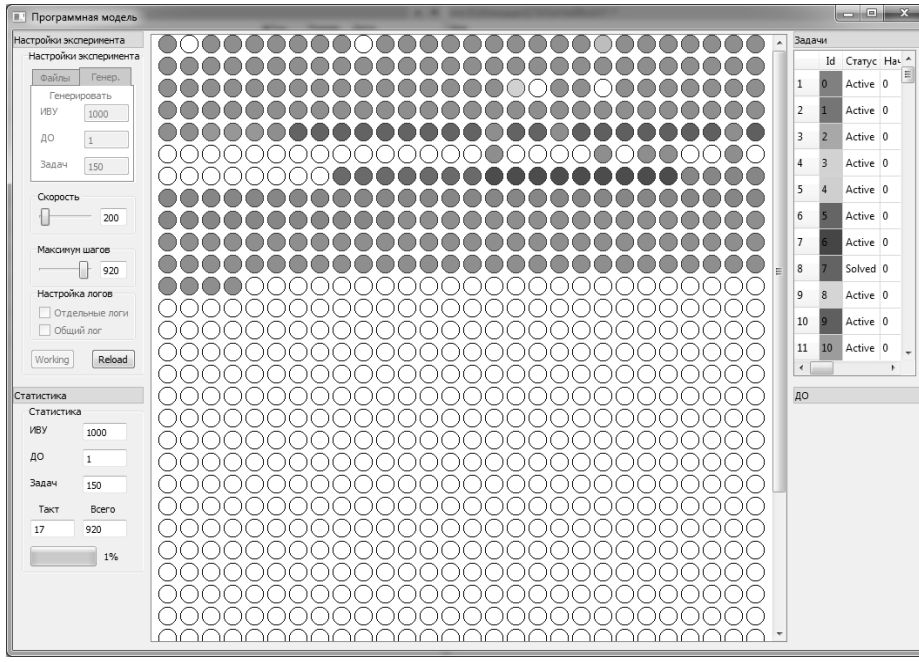


Рисунок 2 – интерфейс программной модели

Эффективность работы GRID было предложено оценивать с помощью двух критериев. Первым критерием является среднее значение КПЗ всех ИВУ системы, то есть отношение количества процессорного времени, потраченного на решение полезных задач всеми ИВУ к суммарному процессорному времени, затраченному всеми ИВУ в процессе работы системы. Этот критерий определяет эффективность работы с точки зрения владельцев ИВУ-фрилансеров, поскольку, чем больше будет значение КПЗ, тем больше баллов они получат за выполненную работу. Для пользователя эффективность работы GRID будет зависеть от того, будут ли задачи, отправленные им на решение в GRID, решены за указанное им время. Поэтому вторым критерием является процентное соотношение количества задач, решенных за требуемое время, к общему количеству задач, поступившему на решение.

В связи с тем, что моделируемая вычислительная среда представляет собой сложную систему, то для полноценного исследования такой системы необходима целенаправленная организация эксперимента [8]. Поэтому в работе был определен перечень наиболее важных параметров GRID, оказывающих наиболее существенное влияние на значение указанных выше критериев и на их основе предложена методика проведения экспериментов. В общем счете в процессе исследования проведено12 серий по 48 экспериментов в каждой при различных значениях следующих параметров: количество ИВУ в GRID, производительность ИВУ, пропускная способность канала связи ИВУ, частота поступления задач, трудоемкость задач, объемы данных, передаваемые между задачами, оплата за решение задачи, количество подзадач в задаче, ограничение на время решения задачи.

Результаты экспериментов показали, что средний КПЗ ИВУ системы при решении связных задач практически не опускается ниже 75%, что существенно превышает аналогичный показатель для современных GRID с централизованным диспетчером. При этом процент решенных за отведенное пользователем время задач в среднем составил 97%.

Заключение

В работе была решена актуальная задачи разработки методов и алгоритмов мультиагентного диспетчирования ресурсов в GRID для решения связных задач в условиях динамически изменяющихся числа и параметров исполнительных вычислительных узлов. Предложенные в работе методы и алгоритмы позволяют строить GRID-системы на базе вычислительных ресурсов ИВУ, находящихся в частных руках, что позволяет заметно снизить стоимость вычислений в GRID, а также существенно повысить КПЗ ИВУ при решении связных задач, требующих интенсивных информационных обменов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 11-07-00463.

Автор выражает признательность сотрудникам НИИ МВС ЮФУ Мельнику Э. В., Левину И. И., Капустяну С. Г., а так же Каляеву И.А. за неоценимую помощь в процессе разработки.

Список литературы

[1] Коваленко В.Н., Коваленко Е.И., Корягин Д.А., Любимский Э.З., Хухлаев Е.В., Шорин О.Н. Грид-диспетчер: реализация службы диспетчеризации заданий в грид, Труды международной конференции "Распределенные вычисления и Грид-технологии в науке и образовании" (Дубна, 29 июня - 2 июля 2004 г.). - Дубна: 11-2004-205, ОИЯИ, 2004, сс. 133-139.

[2] И.М. ГОРЮНОВ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ГТД И ЭУ Вестник УГАТУ Т. 11, №2 (29). С. 30–38

[3] Полежаев Петр Николаевич Экспериментальное исследование алгоритмов планирования задач для грид-систем с использованием симулятора // Материалы Международная конференция «Высокопроизводительные вычисления» HPC-UA'2012 (Украина, Киев, 8-10 октября 2012 года)
[4] Ивашко Е.Е., Головин А.С. Вычислительная эффективность BOINC-GRID / Материалы Международная конференция «Высокопроизводительные вычисления» HPC-UA'2012 (Украина, Киев, 8-10 октября 2012 года) С187-193
[5] Каляев А.И. Метод и алгоритмы адаптивной организации распределенных вычислений в децентрализованной GRID / Вестник компьютерных и информационных технологий. №4, 2012г.– Москва: Изд-во "СПЕКТР".– С. 28-33.
[6] Kalyaev A.I. METHOD AND ALGORITHMS OF THE ADAPTIVE ORGANIZATION OF THE DISTRIBUTED COMPUTATIONS IN A DECENTRALIZED GRID / International Young Scientists Conference High Performance Computing and Simulation 2012. Book of abstracts. - C.55-56
[7] Каляев А.И. Децентрализованная организация диспетчера GRID на базе сообществ агентов / Известия ЮФУ. Технические науки. №8, 2011г.– Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ.– С. 230-238.
[8] Горелова Г.В., Мельник Э.В., Радченко С.А, Каляев А.И. Планирование эксперимента при исследовании новых методов и алгоритмов организации распределенных вычислений / Вестник информационных и компьютерных технологий - М.: Машиностроение, 2007, №10,2007г. - С.49-56

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗНАНИЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В ОБЛАСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ИНТЕРНЕТ-РЕКЛАМЫ

И.А. Минаков[1], Д.А. Ёлкин[2], С.И. Вольман[2]

[1]Институт проблем управления сложными системами РАН
443020, Самара, ул. Садовая, 61, Россия
cscmp@iccs.ru
тел: +7 (8462) 32-39-27, факс: +7 (8462) 33-27-70

[2]ООО НПК «Максифаер Девелопмент»
443125, Самара, ул. Ново-Садовая 349, 3-й этаж
dmitry.yolkin@maxifier.com
тел: ++7 (846) 342-51-74; 342-51-75

Ключевые слова: *Интернет реклама, рекламная кампания, извлечение знаний, if-then правила*

Abstract
The article presents different methods of data mining applicable in the field of online advertising. It covers typical applications and samples as well as real-life results of analysis and improvements on client networks. It also discusses possibilities of the approach.

Введение

В настоящее время все более широкое распространение получает Интернет реклама. С каждым днем все большее число рекламодателей наряду с рекламой в печати и телевидении, предпочитают рекламировать свои товары и услуги через Интернет.

Для повышения эффективности рекламы требуется ее оптимизация – т.е. настройка параметров рекламных кампаний таким образом, чтобы максимально достичь поставленных целей – показать определенной категории пользователей или добиться определенного числа кликов и действий от заинтересованных пользователей.

Оптимизация Интернет рекламы имеет ряд проблем и сложностей, связанных в первую очередь с большим числом и размерностью оптимизируемых объектов. Но есть и более глубинные причины – в силу сложной взаимозависимости и связности сети рекламных кампаний, не очевиден эффект от каждого конкретного изменения. Поэтому действия, реально приносящие пользу с точки зрения оптимизации, не лежат на поверхности и, чтобы их понять, требуется много сил и времени.

Зачастую люди, оптимизируя рекламу, подсознательно выполняют набор специфических приемов и действий, который при первоначальном взгляде тяжело выявить и обобщить на больших объемах рекламных кампаний [1]. Выявление этих скрытых действий позволяет доставлять рекламу более эффективно,, в результате чего рекламодатели могут получать от нее большую отдачу. От успешности и эффективности рекламной кампании того или иного предприятия или продукта напрямую зависит его финансовый успех, его живучесть в условиях жестокой конкуренции на рынке.

Поэтому в данной статье мы опишем типовые способы извлечения знаний, применимые в области оптимизации Интернет-рекламы, и приведем примеры того, как реальное применение их позволило повысить эффективность.

1 Обзор методов извлечения знаний, применяемых в области оптимизации Интернет-рекламы

Существует огромное разнообразие методов и задач извлечения знаний [2], описанием которых занимались различные авторы и ученые. Наиболее типичными задачами Data Mining в области Интернет – рекламы могут являться:

- Описание (Description) – пытается найти зависимости и шаблоны в данных как комбинацию ряда заранее заданных шаблонов. Найденные шаблоны используются для построения модели предметной области. Построенные модели должны быть максимально прозрачны и интуитивно понятны для пользователя. *Пример: Описание заранее заданного шаблона, устанавливающего зависимость успешной доставки рекламной кампании от её приоритета, веса или позиции, с целью нахождения закономерностей между этими параметрами и вероятностью успешной доставки кампании.*
- Классификация (Classification) – целью классификации является установление принадлежности объектов к уже существующим группам (или группе объектов). Данная группа будет являться целевой переменной. Обычно при этом на основании анализа уже классифицированных событий формулируются некие правила. *Пример: Классификация предметной области (спорт, культура, кино и т.д.), к которой относится данная рекламная кампания, в зависимости от ее текстового описания, предоставленного в виде набора ключевых слов или ссылки на страницу с рекламным предложением.*
- Предсказание (Prediction / Forecast) – аналогично классификации, но результат лежит в будущем. *Пример: Предсказание процента увеличения CTR [3] или показов рекламной кампании вследствие применения пользователем некоторого оптимизирующего действия;*
- Кластеризация (Clustering) - закономерность, сходная с классификацией и отличающаяся от нее тем, что сами группы при этом не заданы — они выявляются автоматически в процессе обработки данных; *Пример: Рекламные кампании, стоимость которых лежит в определенном диапазоне, имеют заданные уровни приоритетов или вероятность доставки;*
- Ассоциация (Association) – ищет связь различных событий друг с другом. *Пример: оператор, задающий и контролирующий ход своих рекламных кампаний, типично задает у них изначально характерную для себя совокупность параметров (приоритет, вес, способ распределения показов в течение дня и т.д.);*
- Временные закономерности (Time trends) — наличие шаблонов в динамике поведения тех или иных данных. *Типичный пример — сезонные колебания стоимости рекламных кампаний или более частого появления рекламных кампаний определенного типа (например, реклама курортов в разгар отпусков)*. Очень часто результаты используются для прогнозирования;
- Поиск аномалий (Abnormality / Fraud detection) – поиск случаев, выбивающихся из общих закономерностей. *Пример: стоимость большинства рекламных кампаний не превосходит 10-20$ за тысячу показов, но есть кампания, стоимость которой больше 100$, что свидетельствует либо об ошибке при задании параметров для этой кампании, либо некоторой специфике этой кампании, не лежащей на поверхности.*

Граница между задачами очень часто довольно условна. Например, методы, используемые для классификации, могут быть также использованы для предсказания. Сегодня существует довольно большое количество разнообразных методов исследования данных. Среди них можно выделить:

- регрессионный, дисперсионный и корреляционный анализ (реализованы в большинстве современных статистических пакетов, в частности в продуктах компаний SAS Institute, StatSoft, Oracle, Microsoft и др.); Данные методы чаще всего используются для анализа

предметной области и построения математической модели, с последующим использованием её для предсказания какой-нибудь критичной для стратегического планирования величины (например, спроса на продукцию в следующем квартале). Пример применения данного метода можно посмотреть в [4];

- нейросетевые алгоритмы, идея которых основана на аналогии с функционированием нервной ткани и заключается в том, что исходные параметры рассматриваются как сигналы, преобразующиеся в соответствии с имеющимися связями между «нейронами», а в качестве ответа, являющегося результатом анализа, рассматривается отклик всей сети на исходные данные. Связи в этом случае создаются с помощью так называемого обучения сети посредством выборки большого объема, содержащей как исходные данные, так и правильные ответы. Нейросетевые алгоритмы используют для задач классификации, ожидания и предсказания. Нейросетевые алгоритмы обладают меньшей объяснимостью конечных результатов для пользователя, чем статистические методы, но в тоже время позволяет учитывать в модели более сложные и нелинейные закономерности;
- методы анализа в конкретной предметной области, базирующиеся на эмпирических моделях - часто применяются, например, в различных системах анализа и планирования. Пример данного метода можно посмотреть в [1];
- деревья решений — иерархическая структура, базирующаяся на наборе вопросов, подразумевающих ответ «Да» или «Нет»; несмотря на то, что данный способ обработки данных далеко не всегда идеально находит существующие закономерности, он довольно часто используется в системах прогнозирования в силу наглядности получаемого ответа;
- эволюционное программирование — поиск и генерация алгоритма, выражающего взаимозависимость данных, на основании изначально заданного алгоритма, модифицируемого в процессе поиска; иногда поиск взаимозависимостей осуществляется среди каких-либо определенных видов функций (например, полиномов).
- кластерные модели (иногда также называемые моделями сегментации) применяются для объединения сходных событий в группы на основании сходных значений нескольких полей в наборе данных; также весьма популярны при создании систем прогнозирования. Кластеризация может эффективно применятся для поиска и выявления различных закономерностей в области оптимизации Интернет рекламы, о чем подробнее будет сказано в статье далее. Также кластеризация может эффективно применятся в других задачах, например, задачах составления логистических расписаний для снижения сложности [2].

Данные методы могут использоваться как по отдельности, так и в комплексе, для достижения лучших результатов в процессе извлечения знаний.

2 Примеры практического применения методов извлечения знаний для поиска закономерностей в области оптимизации Интернет-рекламы

2.1 Использование методов описания и ассоциации

Цель данного исследования заключается в том, чтобы:

- Проверить на различных рекламных сетях некоторую гипотезу, описывающую закономерности между различными параметрами рекламной кампании и параметрами, характеризующими эффективность хода этой кампании.
- Определить, насколько вероятна и достоверна эта гипотеза для различных рекламных сетей.
- В случае недостоверности гипотезы установить причину ее невыполнимости на данной конкретной рекламной сети.

Для того чтобы выполнить поставленные цели, мы решили воспользоваться методами извлечения знаний, такими как описание и ассоциация, которые применили к совокупности дан-

ных, собранных на основе нескольких реально существующих рекламных сетей. В данном примере рассматривалось четыре рекламные сети, каждая из которых обладала своим набором рекламных кампаний с присущими им свойствами и настройками. В качестве исследуемых гипотез, мы выбрали две наиболее интересных с практической точки зрения гипотезы:

1) Гипотеза 1 говорит, что **ЕСЛИ** CTR в результате применения совета повысился, **И** на момент применения совета кампания не отставала от плана по доставке, **ТО** CTR повысится на момент окончания кампании **И** кампания будет доставлена полностью.
2) Гипотеза 2 говорит, что **ЕСЛИ** CTR кампании после совета понизился, **И** на момент применения совета кампания отставала, **ТО** на момент окончания кампании CTR кампании будет ниже, чем до применения совета

Обратите внимание, что под фразой CTR стало выше/ниже означает, что CTR в течение недели после применения совета (либо в течение недели до завершения кампании) повысился/понизился, по сравнению с CTR за неделю до применения совета.

Извлечение знаний осуществлялось при помощи программного продукта, разработанного авторами, и известного как «Pattern Seeker» [5]. Данный программный продукт позволяет извлекать закономерности из набора данных, который передается на вход системы в виде CSV файла, сформированного в нужном формате. В данном исследовании вся входная информация представлялась в следующем виде:

1) Каждая строка в исходном файле содержала информацию о действии, которое совершил оператор для улучшения эффективности рекламной кампании, о результатах/последствиях этого действия и состоянии кампании на момент применения данного действия.
2) Параметры действия включают в себя:
   - Дату, идентификатор действия и список параметров кампании, которое это действие меняло;
   - Конкретные изменения, которые были сделаны данным действием.
3) Результирующие параметры включали всевозможные индикаторы изменения CTR и доставки кампании через различные промежутки времени после применения данного действия;
4) Параметры кампании включали наиболее значимые с точки зрения определения интересующих нас закономерностей параметры, такие как: идентификатор оператора, приоритет и вес кампании, сайты, страницы и позиции, на которых идет кампания и т.д.

С помощью инструмента «Pattern Seeker» мы задали шаблоны, описывающие данные гипотезы и проверили их на каждой из 4 сетей различных клиентов, в результате чего получили результаты, представленные в таблице 1.

Все данные реальны, но в силу конфиденциальности коммерческой информации, мы указываем только общие и обфусцированные данные.

Таблица 1 – Результаты исследования шаблонов гипотез

Гипотеза	Сеть 1	Сеть 2	Сеть 3	Сеть 4
1	149 (88.6%)	110 (88.0%)	562 (76.8%)	3 (100.0%)
2	214 (93.4%)	120 (95.2%)	196 (65.3%)	52 (88.1%)

В подтверждение данных таблицы 1 приведем графический экран, демонстрирующий пример работы программы «Pattern Seeker» (рисунок 1).

Из результатов таблицы 1 и рисунка 1 видно, что:

- на выбранных 4 сетях гипотеза **«1»** срабатывает с min вероятностью **76.8%** на сети 3. На остальных сетях гипотеза работает со средней вероятностью ~**92%**;
- на выбранных 4 сетях гипотеза **«2»** срабатывает с min вероятностью **65.3%** на сети 3. на остальных сетях гипотеза работает со средней вероятностью ~**92%**.

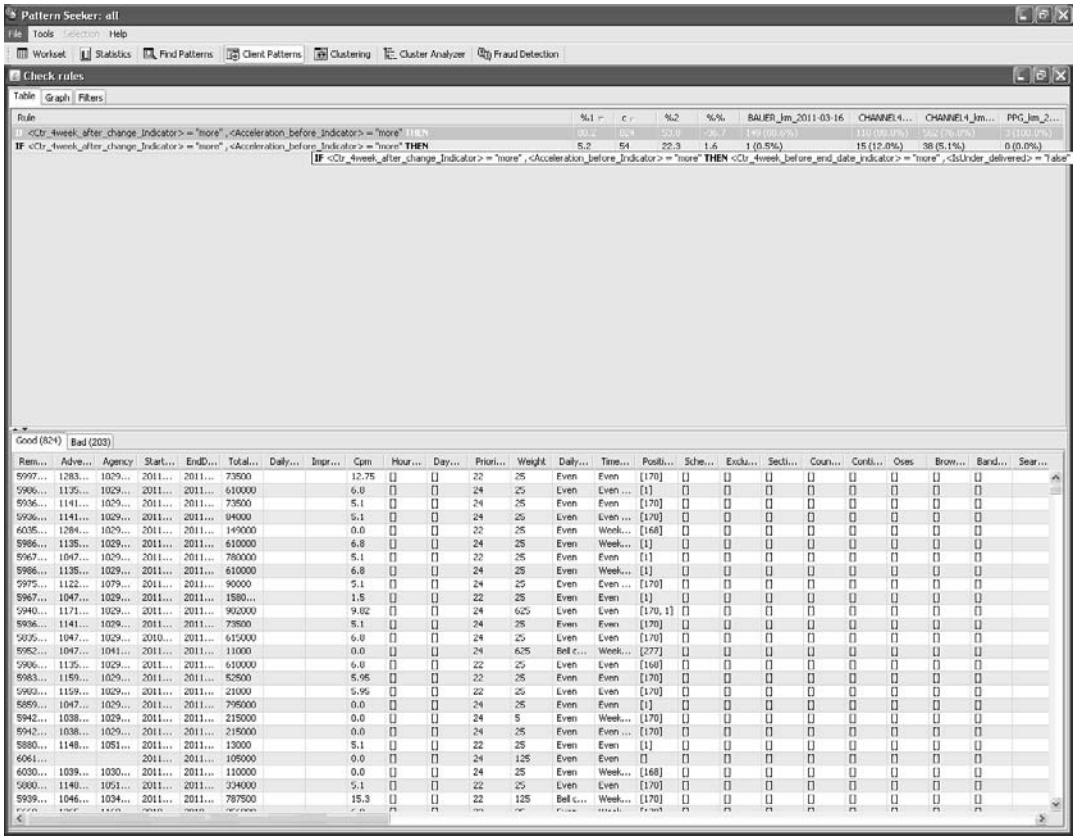


Рисунок 1 – Результаты работы «Pattern Seeker», анализирующего гипотезы 1 и 2

Заметим, что на Сетях «1» и «2» оба правила имеют высокую степень вероятности и при этом подтверждаются на значительном количестве примеров (в каждой сети более 100 примеров, подтверждающих каждую из гипотез). Т.о. справедливо считать, что на этих сетях обе гипотезы выполнимы с высокой степенью вероятности.

Сеть «4» хотя и имеет высокую степень вероятности по обеим гипотезам, но данная вероятность подтверждается малым количеством примером (для первой гипотезы всего 3 примера, для второй 52, что также немного). Поэтому нельзя однозначно судить о достоверности этих гипотез для сети «4». Данные результаты могут не подтверждаться на больших объемах и могут быть следствием шума.

Сеть «3» имеет наименьшую вероятность по обеим гипотезам из всех остальных сетей. И, следовательно, справедливо считать, что данные гипотезы в меньшей степени справедливы и правомерны для данной сети. В результате дополнительного исследования мы установили, что причинами невыполнения этих гипотез для Сети «3» могут являться:

1) По первой гипотезе, CTR может быть ниже в конце жизни кампании, чем после применения некоторого совета, или кампания может не доставиться полностью из-за того, что данная сеть более связана и применение одного совета, который привел к увеличению CTR в середине жизни кампании, не достаточно для полной уверенности в том, что и в конце жизни кампании она не будет иметь проблем с доставкой и CTR.

2) Не очень высокая вероятность второй гипотезы говорит о том, что для Сети «3» далеко не всегда справедливо утверждение, что если после некоторого совета для отстающей кампании CTR становится ниже, то и в конце жизни CTR будет еще ниже.
Заметим, что данные выводы делаются абстрактно, на основе данных, не беря во внимание наши дополнительные знания о предметной области. И действительно, когда мы начали анализировать результаты, мы выявили очевидный фактор, почему Сеть 3 так сильно отличается по поведению от остальных сетей.

Дело в том, что в Сети 3 оптимизировалась видео-реклама, в то время, как во всех остальных сетях – баннерная реклама. Поведение пользователей, просматривающих видео, существенно отличается от остальных, что означает, что их надо выделять в отдельную группу использовать другие методы оптимизации.

2.2 Использование методов кластеризации

Методы извлечения знаний, такие как кластеризация, мы рассмотрим на примере данных описывающих одну конкретную сеть (Сеть 1) из примера выше. Нашей целью было проанализировать данную сеть на предмет наличия интересных и ранее неизвестных зависимостей для того, чтобы на основе новых найденных знаний мы могли лучше понимать предметную область и специфику данных клиента и в результате найти практическое применение этим знаниям.

Чтобы не перегружать входную информацию и не вводить потенциально ошибочных гипотез, мы не стали задавать конкретных шаблонов, как в предыдущем примере, не вводили дополнительной информации, которая классифицировала бы некоторые целочисленные и интервальные значения величин, например, как низкое, среднее, высокое. Вместо этого для анализа интересующих нас зависимостей, как и в предыдущем примере, мы воспользовались системой «Pattern Seeker», на вход которой был передан CSV файл, каждая строка которого представляла собой запись об отдельной рекламной кампании и содержала значения таких параметров, как: приоритет, вес, оператор, признак успешности доставки, сайт, страница и позиции, на которых идет кампания и т.д.. В результате анализа данной входной информации система «Pattern Seeker» выявила множество разнообразных кластеров, объединяющих схожую информацию в отдельные группы. По данным кластерам система позволила выявить разнообразные логические правила с разной степенью вероятности и достоверности. Наиболее интересным стало правило, описывающее зависимость между:

- приоритетом рекламных кампаний,
- операторами, которые оптимизируют данные кампании;
- и признаком успеха доставки кампаний.

Результаты анализа данного правила приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты анализа зависимости между приоритетом кампании, оператором и признаком успешной доставки кампании

Оператор	Процент успешной доставки кампаний [17..18] приоритета	Процент успешной доставки кампаний [19..20] приоритета
Оператор Е.	77,50%	68%
Оператор Д.	100%	85,20%
Оператор Дж.	91,40%	77,40%
Оператор Джес.	89,40%	78,60%
Оператор Л.	80%	71%
Оператор М.	100%	88,60%

Согласно этой таблице, механизмы, используемые программой «Pattern Seeker», позволили автоматически объединить все кампании по группам приоритетов (без дополнительных затрат времени со стороны исследователя на выявления правил, по которым эти группы будут

формироваться) и вывести зависимости между данными группами приоритетов, операторами и успешностью доставки кампаний. Наглядно эти закономерности видны на диаграмме, представленной на рисунке 2.

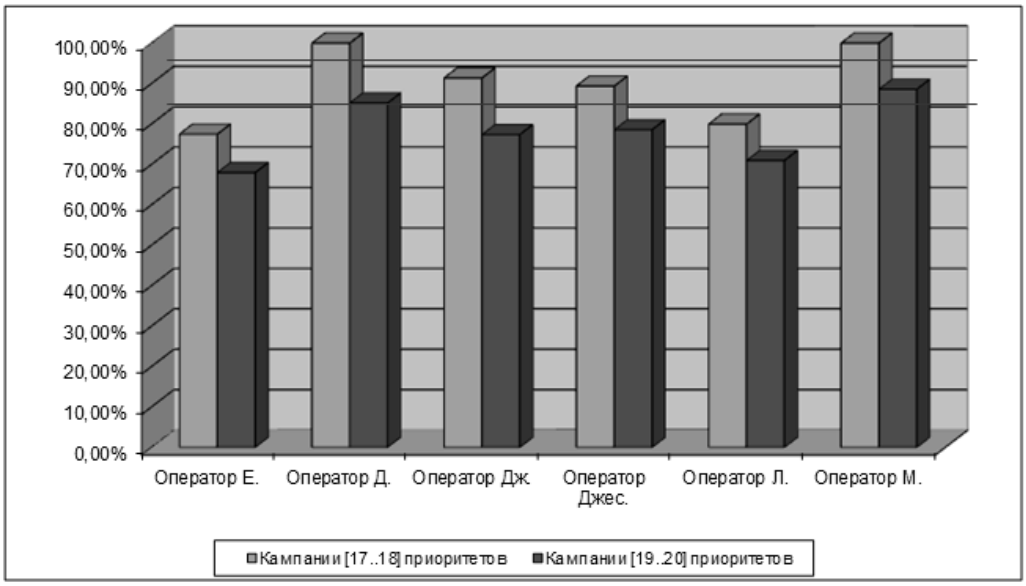


Рисунок 2 – Диаграмма зависимости между приоритетом кампании и оператором

Из данной диаграммы видно, что для кампаний [17..18] и [19..20] приоритетов все операторы условно могут быть разбиты на три группы:

- Оператор М., Оператор Д. – операторы, которые с большей вероятностью и в большинстве случаев успешно доставляют свои кампании;
- Оператор Дж., Оператор Джес. – операторы, которые доставляют кампании на среднем стабильном уровне;
- Оператор Е., Оператор Л. – операторы, которые наиболее плохо относительно остальных доставляют свои кампании.

Остальные приоритеты не удалось объединить в группы и выявить четкой закономерности, поэтому мы не стали приводить их в данной статье. Как видно из диаграммы, методы кластеризации позволили без введения дополнительных шаблонов и анализа определить группы приоритетов, в пределах которых прослеживаются одинаковые закономерности поведения операторов, и разделить всех операторов на 3 условные группы по успешности доставки их кампаний.

При этом отметим, что простой анализ числа успешных кампаний каждого оператора не дал бы подобного результата – т.к. успех кампании существенно зависит от ряда дополнительных факторов, как-то приоритет, настройки, состояние сети и пр. И именно выявление сложных закономерностей позволяет сделать обоснованный вывод об эффективности работы каждого сотрудника.

Что важно - данная диаграмма находит подтверждение в реальной жизни. Проанализировав компанию-клиента, владеющего исследованной рекламной сетью, мы установили, что, действительно, Оператор М. и Д. – являются наиболее опытными, Операторы Дж. и Джес. – средними по производительности, а Оператор Е. – лишь недавно принят на работу и обладает недостаточным опытом для успешной доставки своих кампаний, а Оператор Л. действительно не справляется и вскоре был уволен.

До проведения данного исследования, мы не обладали никакой информацией относительно квалификации каждого оператора. Но, благодаря анализу, мы смогли выборочно внедрить новую функциональность клиенту, т.к. внедряли ее не всем операторам одновременно, а начиная с наиболее опытных, тем самым получая наиболее компетентную и полную обратную связь. Что в конечном итоге позволило максимально быстро и эффективно настроить новую функциональность системы полностью в соответствии с нуждами и требованиями клиента.

Заключение

В данной статье мы рассмотрели задачи, типичные для сферы Data Mining'а и методы их решения применительно к области оптимизации Интернет рекламы. Привели несколько примеров использования методов извлечения знаний в области Интернет-рекламы.

Разработанный авторами программный продукт «Pattern Seeker», позволяет эффективно и за преемлимое время проводить анализ различных предметных областей с целью выявления закономерностей и шаблонов, применимых в будущем. В результате данного исследования нам удалось выявить правила, которые:

- имеют практическое применение в реальной работе и позволяют лучше понять предметную область и специфику бизнес-процессов клиента;
- подтвердить выработанные гипотезы на конкретных рекламных сетях, что позволило осуществлять более эффективное управление рекламными кампаниями;
- исследовать новую функциональность нашей системы на наиболее квалифицированных и обучаемых специалистах, тем самым оперативно и без проблем внедрить систему у заказчика.

Разрабатываемые методы извлечения знаний и подход к анализу данных с целью выявления специфики предметной области и понимания бизнеса клиента востребован в самых разных сферах деятельности. В данной работе нам удалось успешно применить его в области оптимизации Интернет-рекламы, что снова доказало его практическую значимость и эффективность и позволяет рекомендовать его к применению в других областях научной и бизнес деятельности.

Список литературы

[1] Минаков И.А., Елкин Д.А., Вольман С.И. Обзор подходов оптимизации Интернет-рекламы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XI Междунар. конф., Самара, 22 июня – 24 июня 2009. - Самара: СамНЦ РАН, 2009. - С. 634-643.

[2] Daniel T.Larose. Discovering Knowledge in data. - Wiley Interscience; 2005.

[3] Plummer Joe, Rappaport Steve, Hall Taddy, Barocci Robert The Online advertising playbook. //Wiley 2007, John Wiley & Sons, Inc, 2007, p. 28-32

[4] E. Hotz, G. Nakhaeizadeh, B. Petzsche, H. Spiegelberger – WAPS, a Data Mining Support Environment for the Planning of Warranty and Goodwill Costs in the Automobile Industry // KDD-99 San Diego, USA

[5] Вольман С.И., Минаков И.А. Система нахождения бизнес правил типа «If-Then» в задачах транспортной логистики // Информационные Технологии, 2007, № 12. С.35-42.

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ КОМПОЗИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

В.Ф. Филаретов, А.В. Зуев, А.С. Губанков

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Радио, 5, Россия
zuev@iacp.dvo.ru
тел: +7 (423) 231-37-83

Дальневосточный федеральный университет
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, Россия
gubankov.as@dvfu.ru
тел: +7 (914) 961-77-35

Ключевые слова: *информационно-управляющая система, робототехнический комплекс, механическая обработка, композитные изделия*

Abstract
This paper presents structure development of intelligent information-control system for robots for machining of non-rigid composite parts of helicopters.

Введение

В настоящее время в современном авиационном производстве большое внимание уделяется повышению уровня автоматизации и, тем самым эффективности производства, за счет широкого применения современных робототехнических и мехатронных систем. Центральное место в процессе комплексной автоматизации авиационных предприятий занимает композитное производство. Это обусловлено, в первую очередь, его большой сложностью, а также высокой трудоемкостью создания и обработки широкой номенклатуры композитных элементов обшивки современных легких самолетов и особенно вертолетов, имеющих очень сложную пространственную конфигурацию.

Сейчас на композитных участках многих вертолето- и авиастроительных заводов (особенно в России) используется морально устаревшее неавтоматизированное оборудование и технологии, требующее непосредственного участия человека во всех технологических операциях [1-3]. На таком малопроизводительном производстве велик процент брака и низок уровень качества выполняемых работ, что существенно увеличивает себестоимость выпускаемой авиационной техники.

Специфика композитного производства современных авиационных предприятий, заключающаяся в малой серийности, но широкой номенклатуре выпускаемых изделий со сложной пространственной конфигурацией, накладывает существенные ограничения на процесс их автоматизации на основе роботизированных систем. В данных условиях от промышленных роботов требуется обеспечение гибкости производства и удобства их быстрой перестройки на обработку новых изделий. Кроме того, необходимо учитывать главную особенность композитного производства: переменность проблемной среды, недопустимую для традиционных промышленных роботов с числовым программным управлением [4-6]. Управляющая программа жестко программируемых роботов заранее формируется на основе CAD - моделей обрабатываемых изделий, заносится в память управляющей ЭВМ и затем отрабатывается нуж-

ное число раз, целиком определяя программное перемещение рабочего инструмента. Жесткая программа пригодна лишь для стационарных рабочих режимов. Любое изменение параметров робота и обрабатываемого изделия, например, при произвольной установке последнего или при изменении его геометрических размеров в процессе воздействия инструмента и рабочей среды требует перепрограммирования, новых процедур отладки и т.п.

В данной работе ставится и решается задача разработки архитектуры и набора подсистем информационно-управляющей системы (ИУС) обрабатывающего робототехнического комплекса (РК), позволяющих формировать и корректировать в реальном масштабе управляющую программу робота в процессе механической обработки пространственных композитных изделий в условиях слабоструктурированной и изменчивой проблемной среды.

1 Принцип построения интеллектуальной информационно-управляющей системы робототехнического комплекса для обработки композитных изделий

Качественно решить поставленную задачу можно на основе подхода к построению интеллектуальных информационно-управляющих систем роботов [7]. Данный подход предполагает автоматическую генерацию управляющих программ РК в реальном масштабе времени, построенных на основе априорных знаний о CAD - модели композитного изделия и сенсорной информации о его текущем состоянии и состоянии РК, а также предполагает возможность гибкой коррекции этой управляющей программы на основе знаний, накапливаемых в процессе работы. Обобщенная структура архитектуры интеллектуальной ИУС на основе этого подхода для роботизированного комплекса по обработке композитных деталей вертолетов, представлена на рисунке 1.

Рисунок 1 - Обобщенная структура архитектуры построения интеллектуальной ИКСУ промышленного робота

В качестве основного источника сенсорной информации в этой архитектуре предлагается использовать стереоскопические системы технического зрения [8, 9], которые в реальном масштабе времени должны поставлять информацию о текущем состоянии обрабатываемого композитного изделия, установленного на двухпозиционном позиционере-фиксаторе, с предварительно маркированным на нем обрабатываемым контуром (траектория реза). Данные со стереокамеры передаются на управляющую ЭВМ, где программно реализуется алгоритм, позволяющий по изображению восстановить параметры пространственной траекторию реза в абсолютной системе координат. Далее на основе полученных пространственных координат траектории реза с учетом номинальной CAD - модели изделия формируется управляющая программа движений рабочего инструмента для шестистепенного промышленного манипулятора.

2 Структура интеллектуальной информационно-управляющей системы робототехнического комплекса для обработки композитных изделий

Предлагаемая интеллектуальная ИУС имеет многоуровневую иерархическую структуру. Поступающая в нее информация от сенсорной системы, человека - оператора, CAD - модели, позиционера-фиксатора, бортового оборудования может попадать на разные уровни иерархии. При этом высший уровень управления РК, реализующий элементы искусственного интеллекта, отвечает за построение (на основе распознавания сенсорной системой обстановки) внутренних представлений робота о среде и за принятие решений об общем плане выполнения полученных заданий с учетом априорных и накопленных знаний. Принятые на высшем уровне решения передаются стратегическому уровню, который формирует целенаправленную активность РК: расчленяет общий план действий на конкретные элементарные операции, выбирая их последовательность и параметры в зависимости от имеющихся знаний и текущих условий.

Тактический уровень преобразует выбранные элементарные операции в желаемые перемещения режущего инструмента и других звеньев РК и в скорости (усилия), которые они должны развивать. Это позволяет формировать требуемые законы согласованного изменения степеней подвижности РК, которые определяют его программные движения, заранее учитывая известные или выявленные в ходе работы геометрические и динамические ограничения, а также измеренные отклонения от заданных траекторий [10-11]. Для отработки программных движений исполнительный уровень управления вырабатывает нужные воздействия на соответствующие приводы.

В общем случае разработанная архитектура интеллектуальной ИУС роботехническим комплексом обработки композитных изделий предполагает возможность немедленного использования информации о реальной траектории реза, полученной от системы стереоскопического зрения, для синтеза управляющих сигналов (без промежуточного явного формирования программной траектории движения с учетом данных о CAD - модели). Такой подход при определенных допущениях позволяет получить теоретическое решение проблем, связанных с пространственной механической обработкой сложных изделий в условиях неопределенности окружающей обстановки [7]. Однако практическая реализация этих ИУС для РК обычно сопряжена с большими трудностями. При выработке управляющего сигнала процессор управляющего устройства фактически входит в контур адаптивной следящей системы приводов исполнительного устройства, замыкая соответствующие обратные связи. В такой структуре коррекция управления требует цикла решения замыкающих уравнений по громоздким формулам.

Таким образом, с точки зрения практической реализации предпочтительным является подход, при котором в общем контуре управления специально выделен блок формирования программных траекторий (рисунок 2), которые соответствуют желаемым действиям РК и учитывают текущую информацию о состоянии внешней среды и самого РК.

При этом сформированные программные законы изменения обобщенных координат РК и другие характеристики его программного движения вместе с командами технологическому оборудованию составляют управляющую программу, для отработки которой в отдельном функциональном блоке синтезируются управляющие воздействия на приводы. Можно указать ряд преимуществ данного подхода по сравнению со структурами ИУС, предполагающими формирование управляющей программы только лишь на основе системы технического зрения.

Во-первых, разделение процесса управления на два подпроцесса - формирование программных траекторий для каждой степени подвижности и синтез управляющих воздействий для их отработки совокупностью «независимых» приводов позволяют распараллелить соответствующие расчеты между одним или несколькими микропроцессорами локальных контроллеров исполнительного устройства робота и ЭВМ более высоких уровней управляющей системы. Во-вторых, обеспечивается большая гибкость и универсальность, поскольку сигнал управления на каждый привод может быть скорректирован на локальном уровне с учетом

динамических особенностей именно данного привода, причем без изменений программного обеспечения ЭВМ верхнего уровня. В-третьих, придание адаптивных или интеллектуальных возможностей промышленному роботу без промежуточного явного формирования программной траектории движения его рабочего инструмента с учетом данных о CAD - модели потребовала бы существенной переделки всей его ИУС. В схеме, изображенной на рисунке 2, на вход имеющейся ИУС вместо хранящейся в памяти жесткой управляющей программы подаются «уставки», автоматически генерируемые по выходам блока формирования программных траекторий движения.

Рисунок 2 - Структура ИКСУ с автоматизированным формированием программных движений.

Таким образом, архитектура подсистем интеллектуальной ИУС роботизированного комплекса для высокоточной автоматической обрезки и шлифовки сложных корпусных композитных изделий современных легких самолётов и вертолетов, представлена на рисунке 3.

Важно отметить, что разработанная архитектура ИУС не требует каких-либо программных и аппаратных переделок встроенных стандартных управляющих ЭВМ, уже имеющихся в комплекте РК. Реализованные на ЭВМ функциональные блоки, образующие разрабатываемую ИУС, можно рассматривать как дополнительную приставку высшего уровня, подключение которой вместе с любым видеосенсором, работающим в телевизионном стандарте, и другими датчиками позволяет наделять адаптивными и интеллектуальными возможностями те промышленные роботы, управляющие устройства которых исходно были предназначены для контурного управления.

Рассмотрим более подробно каждую из подсистем, входящих в состав ИУС.

Подсистема обработки сенсорной информации определяет тип, положение и ориентацию каждого изделия, находящегося в рабочей области РК, и идентифицирует его, использую базу данных CAD-моделей. Стереокамера распознает изделия по их контурам. По полученной информации о контурах изделий на основе системы независимых признаков строятся неаприорные модели, определяющие тип каждого изделия. Классификация изделий производится во время работы путем сравнения эталонных CAD-моделей с текущим описаний изделий по методу ближайшего соседа в признаковом пространстве. Эта подсистема обеспечивает также выделение и распознавание заранее промаркированной на композитном изделии траектории реза.

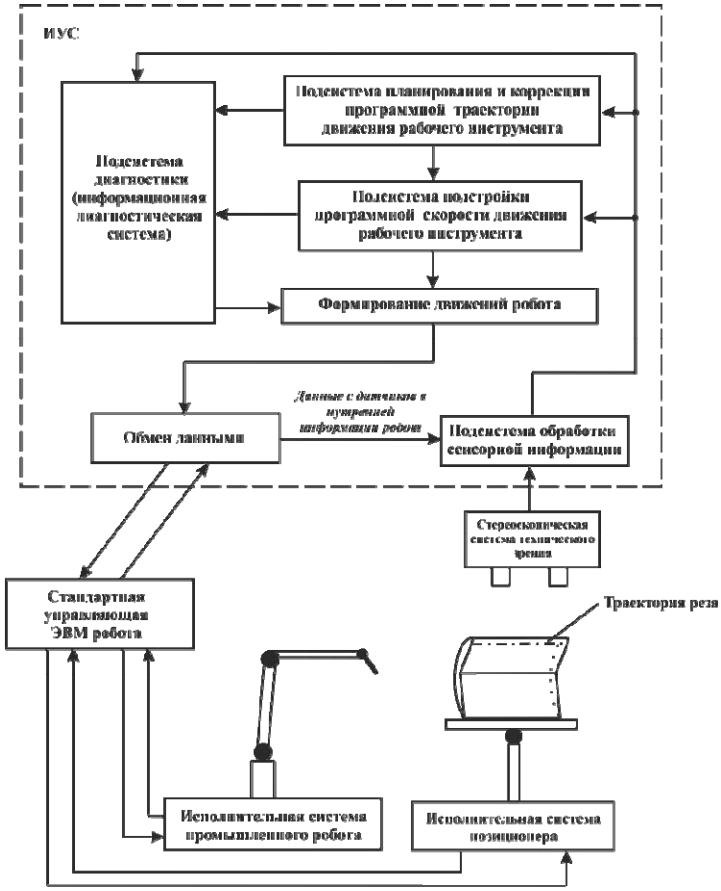


Рисунок 3 - Структурно—функциональная схема разрабатываемой роботизированной системой и интеллектуальной ИУС

Подсистема планирования и коррекции программной траектории движения осуществляет формирование геометрической модели пространственной траектории реза на основе данных от системы стереоскопического зрения, автоматическая генерация и, при необходимости, адаптивная коррекция программных траекторий движений рабочего инструмента ММ на основе сенсорной информации в сочетании с априорной CAD - моделью изделия. В качестве входных данных эта подсистема использует положение и ориентацию обнаруженного и распознанного изделия в СК картинной плоскости системы технического зрения.

В этой подсистеме также выполняются следующие функции: преобразование координат, описывающих позицию изделия, из системы, связанной с картинной плоскостью установки технического зрения, в СК, связанную с основанием РК; решение обратной задачи кинематики для нахождения требуемых значений обобщенных координат РК.

Подсистема подстройки программной скорости движения рабочего инструмента на основе сенсорной информации, непрерывно получаемой от внутренних датчиков роботизированного комплекса, автоматически обеспечивает формирование максимально возможной скорости движения рабочего инструмента по сформированной пространственной траектории реза с учетом ограничения мощности усилительных и исполнительных элементов РК с сохранением заданной точности обработки изделий.

Блок формирования движений манипулятора. На выходе этого блока генерируется массив посылок, передаваемых в управляющее устройство РК, которые задают режим его работы и передают ИУС всю информацию, необходимую для реализации нужных движений. В адаптивном режиме выдаются требуемые последовательности значений обобщенных координат РК, соответствующие началу подвода рабочего инструмента к детали, а затем выводу его на траекторию реза и далее движению по этой траектории.

Подсистема диагностики, используя информацию, получаемую от сенсорной подсистемы и модельные представления отдельных подсистем ИУС и роботизированного комплекса, осуществляет непрерывную проверку правильности работы советующих подсистем. При этом обмен данными между ИУС и управляющей ЭВМ РК происходит согласно стандартным протоколам так, что передача посылок осуществляется асинхронно по прерываниям, поступающим по мере отработки его сформированных движений. Это облегчает распараллеливание работы процессоров устройства управляющей ЭВМ и ИУС, которые большую часть времени независимо могут решать свои основные задачи.

Заключение

В работе предложен подход к построению архитектуры интеллектуальной ИУС роботизированном комплексом, позволяющей формировать и корректировать управляющую программу робота прямо в процессе механической обработки пространственных изделия за счет введения дополнительные контуров, формирующих траектории движения рабочего инструмента на основе сенсорной информации, получаемой от системы стереоскопического зрения, с учетом априорных знаний о CAD - модели обрабатываемого изделия.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России, ГК №02.G25.31.0025) и грантов РФФИ.

Список литературы

[1] Rothwell Br.-J. Обработка корпусных деталей // Maschinenmarkt. № 31-32, 2008. С. 72- 73.
[2] Schossig H. Обработка прецизионных деталей // Werkstatt und Betrieb. № 10, 2008. С. 56-61.
[3] Евченко К. Применение технологии OMV и адаптивной механообработки при производстве изделий из композитных материалов // САПР и графика. № 11, 2009.
[4] Siciliano B., Khatib O. Handbooks of robotics. – Springer, 2008.
[5] Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. – Мир,1989.
[6] Вукобратович М., Стокич Д. Управление манипуляционными роботами. Теория и приложения. – Наука, 1985.
[7] Петров А.А. Активное формирование моделей проблемной среды очувствленными роботами. – Институт проблем передачи информации РАН, 1997.
[8] Форсайт Д. А., Понс Ж. Компьютерное зрение: современный подход. – Вильямс, 2004.
[9] Техническое зрение роботов /Под ред. Пью А. Пер. с англ. – Машиностроение, 1987.
[10] Angeles J. Fundamentals of robotic mechanical systems: theory, methods, and algorithms. – Springer, 2007.
[11] Craig J.J. Introduction to robotics: mechanics and control. – Prentice Hall, 2003.

ПРАВИЛА ФОРМИРОВАНИЯ ОНТОЛОГИИ ОБЛАСТИ МАРШРУТИЗАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ПОТОКОВ ДАННЫХ МЕЖДОМЕННОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ

К.А. Стуликова, Д.Ю. Полукаров

Поволжский государственный университет телекоммуникация и информатики
443010, Самара, ул. Льва Толстого, 23, Россия
plkw@mail.ru

Ключевые слова: *инфокоммуникационные сети, маршрутизация, онтологическая модель, онтология, протоколы маршрутизации, пограничный маршрутизатор, междоменная маршрутизация, область маршрутизации*

Abstract

The routing area ontological model and the routing area ontology were represented. The ontology creation rules of the routing system were formulated. An example of application of these rules is given.

Введение

В связи с бурным развитием инфраструктуры, расширением сферы применения и повышением мобильности глобальных инфокоммуникационных сетей (ИКС) все более высокие требования предъявляются к качеству обслуживания сети, что, в свою очередь, усложняет процессы маршрутизации и принципы управления информационными потоками в ИКС [1, 2]. Повышение эффективности управления ИКС возможно в первую очередь посредством дальнейшего развития теоретических основ и реализации методов автоматизации, оптимизации и интеллектуализации систем сетевого управления информационными потоками на базе динамических моделей ИКС как сложных объектов управления [3].

Совершенствование процессов управления информационными потоками в глобальных компьютерных сетях связано в первую очередь с дальнейшим развитием теоретических основ и методов сетевого планирования, реализацией, автоматизацией и интеллектуализацией систем сетевого управления. Однако современные глобальные компьютерные сети являются сложным объектом, управлять которым достаточно трудно. Поэтому возникает необходимость в построении некоторой модели представления знаний, которая бы объединяла основные понятия предметной области, непосредственно связанные с процессами сетевого управления, современные технологии в области сетевого планирования и управления информационными потоками данных.

Потребность в получении высокоэффективных решений задач сетевого управления и планирования выдвигает на первый план необходимость формирования и представления знаний о предметной области и сопутствующих понятиях в виде концептуальной модели. В качестве подобной динамической модели в данной работе рассматривается онтологическая модель процессов междоменной маршрутизации, отражающая взаимосвязи между основными понятиями предметной области сетевой маршрутизации и учитывающая временные, пространственные и качественные характеристики участников маршрутизации – объектов реального мира. С помощью такой онтологической модели может быть получена онтология области маршрутизации – участка реальной сети, характеристики участников которого можно достоверно и оперативно получать в процессе маршрутизации.

1 Онтологическая модель области маршрутизации и онтология области маршрутизации

Основным понятием, связанным с управлением и планированием сети, является понятие «сетевой маршрутизации». Поэтому создание такой онтологической модели области маршрутизации является весьма актуальной задачей. На рисунке 1 показана общая онтологическая модель области маршрутизации.

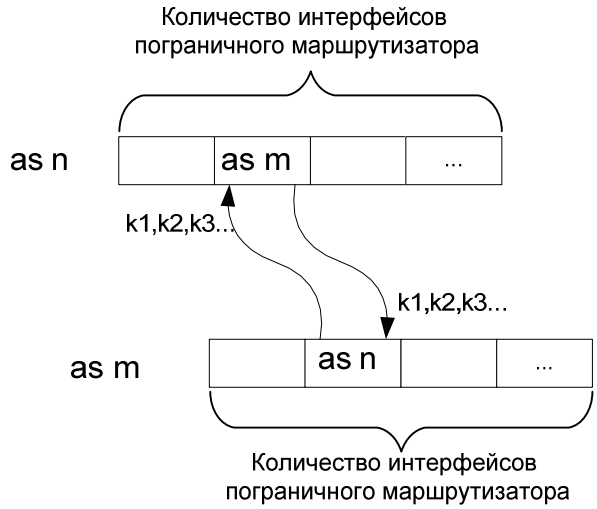


Рисунок 1 - Онтологическая модель области маршрутизации

Сетевые интерфейсы каждого пограничного маршрутизатора автономной системы объединены в кортежи, каждый кортеж именуется номером автономной системы, с которой связана текущая автономная система. Многоточие на данном рисунке указывает на то, что не все связи автономных систем показаны на рисунке, а для наглядности взяты только некоторые соединения. Каждой линии связи (связи между кортежами двух автономных систем) соответствуют два набора параметров – по одному на каждое направление передачи, при этом направление передачи данных показано стрелками. Такое разделение параметров обусловлено тем, что параметры линии связи, которые используются при расчете таблиц маршрутизации, могут различаться в зависимости от направления передачи данных.

Онтологические модели могут быть сформированы на основе информации из BGP-сообщений, IP-пакетов, введенной администратором информации. Также существуют специальные ресурсы, предоставляющие информацию о Сети собранную в единую информационную базу [4]. Систематизации подобной информации также посвящена работа [3]. Описанная в данной работе концептуальная модель может быть использована при разработке новых методов и технологий в области сетевого управления и планирования для облегчения понимания проектировщиками данной предметной области и устранения неясностей, возникающих вследствие сложности существующих механизмов. Данная модель позволяет выявить некоторые зависимости и неявные знания, присутствующие между различными сетевыми понятиями.

На рисунке 2 показана онтология области маршрутизации. В качестве области маршрутизации взят фрагмент реальной сети с номерами автономных станций и структурой линий связи между ними, параметры взяты для наглядности и не являются результатом расчетов.

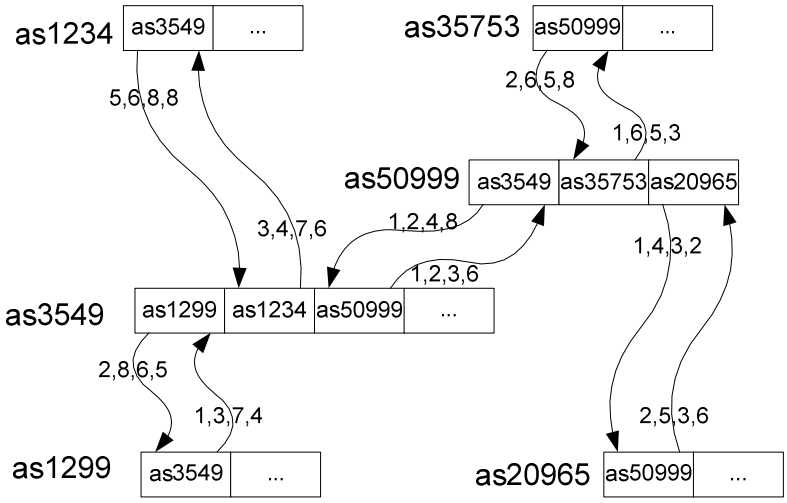


Рисунок 2 – Фрагмент онтологии области маршрутизации

2 Правила формирования онтологий области маршрутизации

Общие правила формирования онтологий области маршрутизации касаются параметров маршрутизации, как наиболее динамичных элементов онтологии области маршрутизации, от которых в наибольшей степени будут зависеть полученные с помощью онтологий результаты. Частные правила формирования онтологий области маршрутизации задает администратор.

В качестве параметров для расчета таблиц системы анализа потоков данных междоменной маршрутизации могут быть использованы следующие критерии:

- ширина полосы пропускания;
- количество промежуточных узлов на пути следования пакета;
- задержка;
- надежность;
- количество соседей;
- суммарная метрика или общий критерий;
- количество пакетов;
- приоритет узлов при выборе маршрута по умолчанию;
- стоимость подключения;
- критерии, задаваемые на основе личного опыта администратора.

Общие правила формирования параметров маршрутизации можно сформулировать следующим образом:

- параметры должны охватывать все возможные аспекты маршрутизации, которые могут быть использованы при расчете таблиц маршрутизации, при этом следует избегать ненужных, повторяющихся и таких, которые могут быть вычислены на основе уже имеющихся параметров;
- количество параметров должно быть одинаково для всех узлов онтологии области маршрутизации;
- параметры могут изменяться автоматически или выставляться вручную администратором сети;
- должны быть предусмотрены значения параметров по умолчанию, которые автоматически устанавливаются при добавлении в сеть новой автономной системы.

Заключение

На основе онтологии области маршрутизации может быть построена система анализа потоков данных, циркулирующих в ИКС, использование которой позволило бы получить оптимальное решение маршрутизации для данной области маршрутизации [5]. При этом изменения в онтологию области маршрутизации должны вноситься оперативно системой анализа потоков данных. Для того чтобы это было возможно, необходим набор правил, с помощью которого события на участке маршрутизации можно было представить в виде качественных и количественных характеристик объектов онтологии.

Применение такого набора правил к онтологической модели междоменной маршрутизации с учетом текущих характеристик участников маршрутизации позволит получить в реальном времени модель сети (онтологию области маршрутизации) и проектировать на ее основе различные информационные сетевые системы сбора и анализа данных.

Список литературы

[1] Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: 4-е изд. – СПб.: Питер, 2011.

[2] Стуликова К.А., Полукаров Д.Ю. Использование компонентно-кластерного разделения для оптимизации процессов маршрутизации и управления потоками данных в глобальных ИКС. Тезисы, XIX Российская научно-техническая конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ, Самара, 2012, с. 230-231.

[3] Стуликова К.А., Полукаров Д.Ю. Концептуальная модель представления знаний о маршрутизации в глобальных компьютерных сетях. Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIV Международной конференции, Самара, 2012, с. 268-277.

[4] CAIDA: The Cooperative Association for Internet Data Analysis (http://www.caida.org/)

[5] Таненбаум Э. Компьютерные сети 4-е изд. – СПб.: Питер, 2008.

СТОХАСТИЧЕСКАЯ ПАРАДИГМА УЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ ПРОЕКТА

А.Е. Колоденкова

Уфимский государственный авиационный технический университет
450000, Уфа, ул.К. Маркса, 12, Россия
anna82_42@mail.ru
тел: +7 (347) 272-74-65, факс: +7 (347) 272-29-18

***Ключевые слова*:** *стохастическая парадигма, учет неопределенности, НЕ-факторы, оценка жизнеспособности проекта, теория свидетельств*

Abstract

Problems of application of is probability-statistic methods the account of factors of uncertainty in the problem of the project viability estimation are being considered. It is offered to use nonprobability models to project viability estimation in the conditions of incompleteness and inaccurate expert information.

Введение

Современная теория управления проектами приблизилась к границе, за которой, по выражению Негойцэ (C. V. Negoita), «… существенную роль начинают играть способы учета неопределенностей», т.е. так называемых *НЕ*-факторов внешней и внутренней среды проекта, отражающих *не*полноту знаний, их *не*достоверность, а также *не*четкость и *не*точность, относящихся к их содержанию. Сюда можно отнести: неполноту исходных данных для проектирования; изменение требований, сроков и объема выделяемых ресурсов на проектирование; слабую структурированность теоретических и фактических знаний о проекте.

Очевидно, что учитывать *НЕ*-факторы при управлении проектами только лишь формальными методами невозможно. Необходимы различные конкурирующие гипотезы, опираясь на которые, удается преодолеть трудности, вызванные *НЕ*-факторами и придать проблеме оценки жизнеспособности проекта количественную определенность [1].

В настоящей работе акцентировано внимание на *невероятностных моделях неопределенности*, обусловленной неточностью и нечеткостью информации в задачах оценки жизнеспособности проекта.

1 Учет НЕ-факторов в задачах оценки жизнеспособности проекта

Разработка проектов крупномасштабных систем требует классификации и анализа *НЕ*-факторов. Как подчеркивал А.С. Нариньяни [2], «игнорируя *НЕ*-факторы, мы расплачиваемся за это потерей решений или их качества, а во многих случаях и уверенности в их адекватности».

На рисунке 1 представлена классификация *НЕ*-факторов и методы их учета применительно к задаче оценки жизнеспособности проекта [4]. Здесь выделены следующие *НЕ*-факторы, порождающие неопределенность при оценке жизнеспособности проекта: *неточность*; *нечеткость* (*размытость*) и *неоднозначность*. Серым цветом выделены те модели и методы, которым будут посвящены следующие разделы статьи.

В настоящей работе под *жизнеспособностью проекта* понимается наличие необходимых ресурсов для осуществления и условий для реализации проекта.

Рисунок 1 – Классификация *НЕ*-факторов и методы их учета применительно к оценке жизнеспособности проекта

Отметим, что термин *неопределенность* наиболее часто используется в публикациях, посвященных оценки жизнеспособности проектов, под которым подразумевается наличие одного или нескольких *НЕ*-факторов. По мнению П.Л. Виленского, В.Н. Лившица, С.А. Смоляка, «неопределенность нельзя трактовать, как отсутствие какой бы то ни было информации об условиях реализации проекта, речь может идти только о неполноте и неточности имеющейся информации» [3], т.е. упор необходимо делать не на отсутствие, а на наличие информации. При этом неопределенность далеко не исчерпывается классически статистическим видением мира (по словам Н. Винера (N. Wiener), «гиббсовским» подходом). Здесь можно согласиться с утверждением Касти (J. Casti): «… нет априорных математических оснований полагать, что механизм, порождающий неопределенность, по своей природе непременно стохастичен».

Таким образом, для преодоления трудностей, вызванных *НЕ*-факторами, порождающих неопределенность на ранней стадии жизненного цикла проекта, нужно использовать методы, которым удается «устранить» неопределенность и придать проблеме оценки жизнеспособности проекта количественную определенность.

2 Стохастическая парадигма неопределенности в задачах оценки жизнеспособности проекта

Среди различных способов формализации неопределенности широкое распространение получил стохастический (вероятностно-статистический) подход, именуемый часто в западной

литературе как индетерминистический, позволяющий в терминах случайности моделировать многие аспекты неопределенности. Однако заметим, что, с одной стороны, вероятностно-статистический подход широко применим, с другой, на пути обоснования его правомочности возникают серьезные трудности, научно-методического характера, и отчасти, парадоксы теории вероятностей (верные на первый взгляд рассуждения, приводящие к выводам, которые противоречат либо опыту, либо другим, столь же правдоподобным, рассуждениям). Данные трудности породили оживленные дискуссии, доходящие порой до отрицания правомерности применения некоторых традиционных вероятностно-статистических методов, которые дебатируются такими учеными как: Ю.И. Алимовым, Е.С. Вентцель, Э.Р. Григорьяном, П.В. Ижевским, Ю.А. Кравцовым, С.Ф. Левином, В.П. Леоновым, В.В. Налимовым, В.М. Резниковым, В.Н. Тутубалиным, Р.Э. Калманом (R.E. Kalman), Гилисой (D.A. Gillies) и др. В результате, как замечает В.Н. Тутубалин, «в теории вероятностей в настоящее время сложилось ненормальное положение, связанное с переоценкой практических возможностей этой науки».

В многочисленных работах отечественных и зарубежных авторов, связанных с оценкой жизнеспособности проекта, для устранения неопределенности, порождаемой *НЕ*-факторами используются стохастический либо детерминистический подходы. Однако применение в задачах оценки жизнеспособности проекта вероятностно-статистического подхода, в условиях неопределенности оказывается недостаточно корректным и обоснованным.

Разработка проектов, как правило, является настолько уникальной и неповторяющейся, что нельзя собрать ряд статистических наблюдений (исходных данных) и получить результаты статистически независимых экспериментов. Поэтому строить эмпирическую вероятностную модель сложной системы не корректно, поскольку требуется многочисленное количество исходных данных. При этом отметим, что область применения теории вероятностей и математической статистики ограничена непредсказуемыми явлениями, которым присуща массовость, повторяемость и статистическая однородность (статистическая устойчивость, статистический ансамбль).

Кроме того, в теории вероятностей часто предполагается, что случайные величины имеют определенное распределение (обычно нормальное распределение). Такое предположение не лишено оснований, например, при моделировании физических процессов (теорема о том, что среднее от независимых случайных величин, распределенных по произвольным законам, распределено по Гауссу), но совершенно не обосновано при оценке жизнеспособности проекта. К тому же часто исследователь не имеет достаточно данных для проверки гипотезы о типе распределения. Параметры распределения, особенно на начальной стадии исследования, например средние, дисперсии и др., представляют интерес сами по себе, а не как параметры распределения [4]. Огромная разница в информативности распределения и параметров порождает вопросы эпистемологического характера: каким образом априори стало известно распределение? рационально ли для оценивания неизвестного параметра вначале решать более сложную задачу установления типа распределения? Таким образом, в задачах оценки жизнеспособности проекта, знание априори распределения исследуемого процесса является нетипичной ситуацией. Здесь можно согласиться с высказыванием Р.Э. Калмана (R.E. Kalman), «для того чтобы моделировать неопределенность при помощи вероятностного механизма, необходимо иметь чересчур много информации, которая не может быть извлечена из доступных данных в большой массе практических задач».

Заметим, что в связи с ограниченным объемом исходных данных многие исследователи умышленно восстанавливают статистический ансамбль (генеральную выборку) по ограниченной экспериментальной выборке. Сначала предполагают, что статистические характеристики процесса измерены на интервале $[0, T]$, а затем применяют принцип «завтра как сегодня», т.е. предполагают неизменность статистических характеристик при $0 < t < T$ и при $t > T$. Ясно, что такое домысливание ансамбля к конкретному эксперименту открывает широкие возможности

для произвола, если не для злоупотреблений, и далеко не всегда ведет к положительным результатам [5]. Вообще, касаясь выборок, следует помнить известный и весьма поучительный *софизм* В.Н. Тутубалина: «Мы говорим, что выборку образуют результаты нескольких независимых измерений, проводимых в одинаковых условиях. Однако если мы контролируем все условия опыта, то у нас будет получаться одно и то же число (не будет никакой неопределенности), а если мы контролируем не все условия опыта, то откуда мы знаем, что они остаются одинаковыми».

Отметим, что статистическая однородность - феномен редкий и тонкий, причем, по мнению ведущих специалистов, «проверка статистической устойчивости трудна и всегда неполна», «наличие ее редко можно вполне гарантировать» и «часто она дает отрицательный вывод» [6, 7]. В связи с этим Н. Винер утверждает, что «Чрезвычайно сложно собрать обширную информацию, состоящую из многочисленных серий однородных данных. В этих обстоятельствах безнадежно добиваться слишком точных определений величин, вступающих в игру. Приписывать таким неопределенным по самой своей сути величинам какую-то особую точность бесполезно, и, каков бы ни был предлог, применение точных формул к этим слишком вольно определяемым величинам есть не что иное, как обман и пустая трата времени».

Перечисленные факты и причины неэффективности вероятностно-статистических методов были обнаружены при моделировании многих сложных объектов в технике, экономике, биологии и медицине [3, 8, 9]. Этим объясняется стремление некоторых ученых уйти от конструктивного решения проблемы построения вероятностных моделей к детерминированным моделям. По утверждению Ю.И. Алимова, «… математическую статистику нельзя считать наукой в строгом смысле этого слова, т.к. невозможно проверить на практике достоверность полученных с ее помощью результатов».

Все более убедительной становится рекомендация известных управленцев Б.Р. Андриевского и А.Л. Фрадкова: «Если возникает дилемма: выбрать математическую модель детерминированную или стохастическую, то предпочтение следует отдать детерминированной математической модели». Усиление роли детерминистической парадигмы неопределенности породило различного рода нестохастические модели неопределенности: субъективная вероятность Севеджа (L.J. Savage), верхняя и нижняя вероятности Демпстера (A.P. Dempster), правдоподобие и доверие Шеффера (G. Shafer), емкость Шоке (G. Choquet), возможности Заде (L.A. Zadeh), Шейкла (G. L. S. Shackle) и Ю.П. Пытьева и др. [2, 5]. Особое место здесь занимают т.н. *субъективные* (*аксиологические*) вероятности - неклассические вероятности, не имеющие частотный смысл, а выражающие познавательную активность исследователя случайных процессов или лица, вынужденного принимать решение в условиях дефицита информации [10]. Ее применяют тогда, когда невозможно воспользоваться объективной вероятностью по причине неполноты или отсутствия данных о наблюдениях в прошлом, а также из-за высокой стоимости получения объективной вероятности и др.

Субъективную вероятность по форме представления разделяют на количественную и качественную. *Количественная субъективная вероятность* является вероятностной мерой на множестве событий, удовлетворяющей той же системе аксиом, что и вероятность объективная, однако числовые значения количественной субъективной вероятности формируются на основе мнений эксперта. *Качественная субъективная вероятность* является нечисловой формализацией субъективной вероятности, основанной на использовании бинарных отношений превосходства $>$ и равенства $\approx$ событий по вероятности. Преимуществом метода субъективных вероятностей является возможность их применения для неповторяющихся событий и в условиях отсутствия достаточного количества статистических данных. Отметим, что широкое варьирование субъективных вероятностей объясняется широким спектром различной информации или различных возможностей оперирования с одной и той же информацией.

Таким образом, применение вероятностно-статистических методов в задачах оценки жизнеспособности проекта оказывается малоэффективным или просто не возможным. Однако,

следует отметить, что автор работы не отрицает классическую теорию вероятностей, а лишь пытается дополнить и расширить ее путем комбинирования различных формальных подходов.

3 Оценка жизнеспособности проекта с использованием теории Демпстера-Шеффера

В последние десятилетия метод многокритериального принятия решений - метод анализа иерархий (МАИ) разносторонне модифицируется и находит широкое применение в различных предметных сферах. Одна из модификаций - это метод ДШ/МАИ [11], объединяющий метод МАИ и теорию доверия Демпстера-Шеффера, позволяющий моделировать неточность или неуверенность суждений руководителя проекта. Идея предложенного метода заключается в следующем.

Пусть имеется множество допустимых альтернатив разработки проекта $\Theta = \{x_1, x_2,\ldots,x_i\}$, $i = \overline{1;m}$ и множество частных критериев $C = \{c_1, c_2,\ldots,c_j\}$, $j = \overline{1;n}$. Требуется оценить альтернативы и выбрать приемлемый альтернативный вариант разработки проекта.

Для решения данной задачи предлагается следующий ***семиэтапный алгоритм*** [12]:

На первом этапе выделяется в соответствии с заданным критерием $c_j \in C$ из множества частных критериев C группа альтернатив $A_p \subseteq \Theta$ из множества альтернатив Θ (подмножество альтернатив).

На втором этапе рассчитываются веса важности частных критериев w_j на основе метода парных сравнений Саати.

На третьем этапе выявляются степени предпочтения выделенных p-х групп альтернатив по j-м критериям $x_{p,j}$, $p = \overline{1;d}$, $j = \overline{1;n}$ (d_j - общее число выделенных групп альтернатив по j-му критерию).

На четвертом этапе вычисляются базовые вероятности выделенных групп альтернатив, по каждому из частных критериев:

$$m_j(A_{p,j}) = \frac{x_{p,j} \cdot w_j}{\sum_{q=1}^{d} x_{q,j} \cdot w_j + \sqrt{d_j}},\ m_j(\Theta) = \frac{\sqrt{d_j}}{\sum_{q=1}^{d} x_{q,j} \cdot w_j + \sqrt{d_j}},$$

где $m_j(A_{p,j})$ - базовая вероятность выделенной p-ой группы альтернатив по j-му критерию; $x_{p,j}$ - степень предпочтения выделенной p-ой группы альтернатив по j-му критерию; w_j - вес j-го частного критерия.

На пятом этапе осуществляется комбинирование базовых вероятностей выделенных групп альтернатив по всем частным критериям по правилу комбинирования Демпстера:

$$m_{1,\ldots,j}(A) = \frac{\sum_{A_{1,1},\ldots,A_{p,j}: A_{1,1} \cap \ldots \cap A_{p,j} = A} \prod_{j=1}^{n} m_j(A_{p,j})}{1 - \sum_{A_{1,1},\ldots,A_{p,j}: A_{1,1} \cap \ldots \cap A_{p,j} = \varnothing} \prod_{j=1}^{n} m_j(A_{p,j})},\ K = \sum_{A_{1,1},\ldots,A_{p,j}: A_{1,1} \cap \ldots \cap A_{p,j} = \varnothing} \prod_{j=1}^{n} m_j(A_{p,j}),$$

где K - степень конфликтности.

На шестом этапе вычисляются функции доверия $\mathrm{Bel}(\{A_p\})$ и правдоподобия $\mathrm{Pl}(\{A_p\})$ каждой группы альтернатив.

$$\mathrm{Bel}(A_p) = \sum_{A: A \subseteq A_p} m_{1,\ldots,j}(A),\ \mathrm{Pl}(A_p) = \sum_{A: A \cap A_p = \varnothing} m_{1,\ldots,j}(A),$$

где A_p - p-ая группа альтернатив, $p = \overline{1;s}$ (s - число выделенных подмножеств альтернатив).

На седьмом этапе осуществляется выбор оптимальной альтернативы путем сравнения интервалов [Bel($\{A_p\}$), Pl($\{A_p\}$)], образованных функциями доверия и правдоподобия.

Таким образом, модифицированный метод ДШ/МАИ позволяет повысить обоснованность принятия решения о возможности реализации проекта и за счет этого снизить риск его неудачного завершения в условиях многокритериальности и неопределенности.

Заключение

В работе рассмотрены *НЕ*-факторы, порождающие неопределенность при концептуальном проектировании, и в частности, в задаче оценки реалистичности проектов. Для учета и их преодоления предложена теория свидетельств, позволяющая моделировать неточность или неуверенность суждений руководителей проектов. В дальнейшем весьма перспективным направлением в области концептуального проектирования является решение задачи выбора реалистичного проекта с использованием метода прецедентов.

Список литературы

[1] Колоденкова А.Е. Актуальные проблемы современной программной инженерии: концептуальное проектирование и жизнеспособность программного проекта // Вестник УГАТУ. – 2011. – № 2. – С. 8-21.

[2] Колоденкова А.Е. Оценка жизнеспособности программных проектов в условиях нечеткости исходных данных // Программная инженерия. – 2011. – № 5. – С. 10-16.

[3] Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов: Теория и практика: Учебное пособие. – М.: Дело, 2002. – 888 с.

[4] Резников В.М. Стандартная и метрологическая концепции статистики: эпистемологический и логико-прагматический анализ адекватности приложений // Философия науки. – 2002. №3 – С. 57-68.

[5] Алимов Ю.И. Альтернатива методу математической статистики. – М.: Знание, 1980. – 63 с.

[6] Филимонов Н.Б. Мифологизация вероятностно-статистической методологии учета факторов неопределенности в задачах управления и наблюдения. // Современные проблемы прикладной математики информатики, автоматизации и управления: Материалы междунар. семинара. Севастополь: СевНТУ. – 2012. – С. 83-94.

[7] Тутубалин В.Н. Теория вероятностей. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. – 228 с.

[8] Леонов В.П., Ижевский П.В. Об использовании прикладной статистики при подготовке диссертационных работ по медицинским и биологическим специальностям // Бюл. Гос. высш. аттестацион. комитета Рос. Федерации. – 1997. – № 3. – С. 56-61.

[9] Калман Р.Е. Идентификация систем с шумами. Успехи математических наук. – 1985. Т. 40, Вып. 4(244). – С. 27-41.

[10] Наумов А. Е., Подиновский А. В., Подиновский Вик.В. Субъективная вероятность: способы представления и методы получения // Изв. АН СССР. Технич. кибернетика. – 1991. – № 5. – С. 94-109.

[11] Beynon M.J. DS/AHP method: A mathematical analysis, including an understanding of uncertainty // European Journal of Operational Research. 2002. – Vol. 140. – P. 148-164.

[12] Колоденкова А.Е. Оценка реалистичности разработки программного обеспечения мехатронных и робототехнических систем с использованием теории свидетельств. – 2013.

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ЖГУТОВ РЕБЕР ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПОНИМАЕМОСТИ ИНФОРМАЦИИ

З.В. Апанович

Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Лаврентьева, 6, Россия
apanovich@iis.nsk.su
тел: +7 (383) 3309344, факс: +7 (383) 3323494

Ключевые слова: *иерархические жгуты ребер, методы построения жгутов ребер на основе собственной геометрии и на основе алгоритмов трассировки, упорядоченные жгуты ребер*

Abstract
A generally accepted way to facilitate understanding of large and complex data sets is to use graph visualization methods. This paper presents a survey of clutter reduction methods for dense graphs by means of edge bundles generation. The hierarchical edge bundles method, geometry-based edge clustering method, method of edge rerouting, and ordered edge bundles method are considered

Введение

Методы визуализации информации предназначены для поддержки представлений абстрактных данных, часто очень больших, полу-структурированных или многомерных, не имеющих явной физической интерпретации с целью усиления когнитивных возможностей пользователя. Такого рода визуализации являются частью пользовательского интерфейса информационных систем различного назначения, в том числе для интеллектуальных систем управления и обработки информации, информационно-измерительных систем, мультиагентных систем и др.

Универсальным средством представления абстрактной информации являются графы. Различные способы построения изображений графов принято оценивать как с точки зрения сложности используемых алгоритмов, так и с точки зрения качества получаемого изображения. К сожалению, изображения графов реального мира часто выглядят не эстетично и беспорядочно из-за большого количества пересечений ребер, а также наложений ребер и вершин (в случае силовых алгоритмов). Одним из методов уменьшения хаоса и загруженности является техника связывания ребер в жгуты. В последнее время эти методы достаточно активно развиваются и привлекают внимание все большего количества исследователей. В данной работе представлен обзор современных алгоритмов визуализации графов с большим количеством ребер. Рассматривается метод построения иерархических жгутов ребер [1], метод кластеризации ребер на основе их собственной геометрии [2], метод создания жгутов на основе высококачественной перетрассировки [3] и метод создания упорядоченных жгутов ребер[4].

1 Метод иерархических жгутов ребер

Методы иерархических жгутов ребер предназначены для построения изображений наборов данных специального вида. С одной стороны, в этих наборах данных имеются иерархические отношения вида «отец-сын» между отдельными элементами, а с другой стороны, существуют и другие отношения, не являющиеся иерархическими. Примерами таких данных являются онтологии, состоящие из таксономии вида «класс-подкласс», а также включающие так называемые «ассоциативные» отношения. Другим примером являются социальные сети, в кото-

рых может существовать как иерархия индивидуумов, так и другие отношения, например, отношения знакомства. К этой же группе структур могут относиться сети цитирования и иерархически организованные программные системы.

Любая такая структура может быть представлена в виде графа $G(V, E)$, где V– это множество вершин, E – множество ребер графа G, и дерева $T(V, A)$, где V– это множество вершин, A – множество дуг дерева T. При этом множество V является одновременно множеством вершин дерева T и графа G. Для создания иерархических жгутов сначала строится изображение дерева T любым известным алгоритмом визуализации деревьев. Затем координаты вершин построенного дерева используются в качестве опорных точек, через которые проводится каждое ребро графа G. Таким образом, каждому ребру $e = (P_{start}, P_{end})$ сопоставляется последовательность вершин P, состоящая из вершин, расположенных вдоль пути по дереву T от вершины P_{start} через вершину $LCA(P_{start}, P_{end})$ к вершине P_{end} . Вершина LCA – это минимальный общий предок вершин P_{start} и P_{end};

Затем из списка P удаляется вершина LCA для того, чтобы связи между вершинами одного уровня не искривлялись через общего родителя этих вершин. Изображение ребра $e = (P_{start}, P_{end})$ строится в виде кубического B-сплайна по формуле:

$$P' = \beta \cdot P_i + (1-\beta)(P_0 + \frac{i}{N-i}(P_{N-1} - P_0)),$$

где N – количество контрольных точек, i – номер контрольной точки, $i \in \{0,\ldots, N-1\}$, P_i позиция i-ой контрольной точки, β – коэффициент искривления, $\beta \in [0, 1]$.

С помощью коэффициента искривления β можно управлять формой жгутов. На рисунке 1 показаны изображения графа, состоящего из 31 вершины. Дерево T представляет собой трехуровневую иерархию с коэффициентом ветвления 5. Оно изображено при помощи кругового алгоритма [5]. Корень дерева T находится в центре изображения, пять сыновей корня расположены на окружности, центром которой является корень дерева T, а внуки корневой вершины расположены на окружностях, центрами которых являются сыновья. Дуги дерева T изображены при помощи прямых линий. Жгуты ребер, полученные для различных значений коэффициента искривления β, показаны фиолетовым цветом.

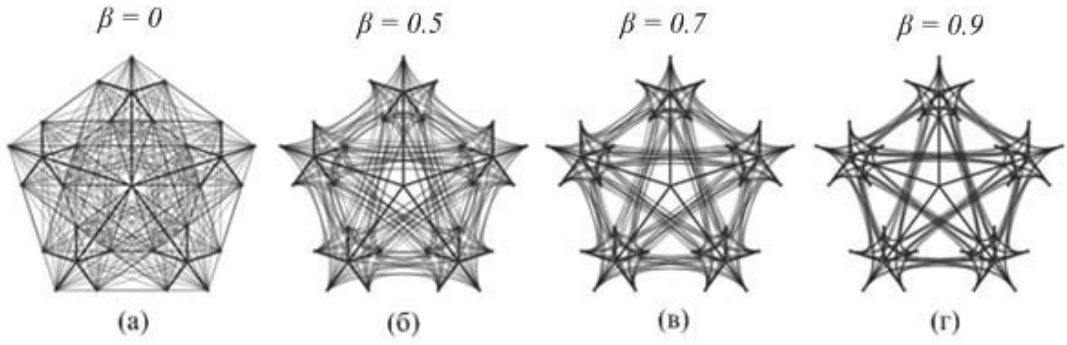


Рисунок 1 –Изображения графа, полученные методом иерархических жгутов ребер с различными значениями коэффициента искривления β.

К основным достоинствам метода иерархических жгутов ребер можно отнести то, что он:

- может быть использован в сочетании с любыми технологиями визуализации деревьев и легко интегрирован в существующие программные средства;
- уменьшает визуальную перегруженность изображения графа с большим количеством смежных ребер за счет того, что кривые объединяются в визуальные «жгуты»;

- позволяет регулировать степень кривизны кубического β-сплайна.

Основной проблемой с применением метода иерархических жгутов ребер является то, что в произвольных графах не всегда можно выделить подходящую иерархическую структуру, вокруг которой возможно построение иерархических жгутов. Поэтому дальнейшие исследования связаны с методами создания различных «опорных структур». В качестве опорной структуры может использоваться как собственная геометрия ребер [2], так и различные сетки, создаваемые на основе позиций вершин графа G: диаграммы Вороного[6], триангуляции Делоне[4], или же граф видимости [7].

2 Создание жгутов ребер на основе собственной геометрии ребер

Основная идея метода [2] состоит в том, жгуты ребер формируются на основе их собственной геометрии, а не привнесенной извне иерархии. Общая схема алгоритма выглядит следующим образом:

1) Сгенерировать прямоугольную сетку размера NxN и наложить ее на изображение графа, построенное любым способом.
2) Для каждой ячейки прямоугольной сетки вычислить основное направление ребер, пересекающих эту ячейку.
3) Объединить соседние ячейки с направлениями, отличающимися не более чем на пороговое значение a, в зоны.
4) Вычислить основное направление в каждой зоне, и перпендикуляр к основному направлению зоны.
5) Построить отрезки, проходящие перпендикулярно направлению зоны до пересечения с границей зоны.
6) Использовать полученные точки пересечения с границей каждой зоны для построения новой сетки при помощи триангуляции.
7) Для каждого ребра построенной триангуляции найти точки пересечений с ребрами исходного изображения графа. Вычислить центр среди этих точек.
8) Для каждого ребра графа G построить B-сплайн, проходящий через центральные точки ребер контрольной сетки, которые пересекает ребро графа G.

На рисунке 2 показаны изображения одного и того же графа, имеющего 3000 вершин, построенные методом иерархических жгутов ребер и методом создания жгутов на основе собственной геометрии. В данном случае очевидно преимущество метода построения жгутов на основе собственной геометрии. На рисунке 2(б) «жгуты» более четкие, а изображение менее перегружено.

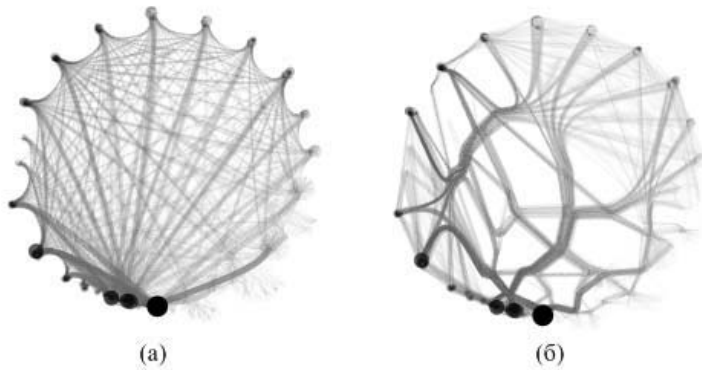


Рисунок 2 – Изображения одного и того же графа, построенные методом иерархических жгутов ребер (а) и методом создания жгутов на основе собственной геометрии (б).

Одним из существенных недостатков этого метода является то, что при уменьшении размера сетки возникает слишком много «зигзагов», требующих последующей обработки. Проблемой является и то, что при создании сетки генерируется слишком много новых вершин, увеличивая временную сложность и затраты по памяти алгоритма вычисления кратчайшего пути. Наконец, на тонкой сетке получается слишком много путей, что уменьшает плотность и количество жгутов для длинных ребер. Поэтому в работе [3] было предложено строить жгуты на основе трассировки в сеточном графе специального вида.

3 Создание жгутов на основе графа трассировки

Основная идея этого метода состоит в использовании повторной трассировки для создания жгутов. Сеточный граф G' создается разбиением плоскости на ячейки на основе позиций вершин графа G. В качестве сеточного графа G' используются диаграммы Вороного [6]. После того как сеточный граф G' построен, изображения ребер графа G строятся методом поиска кратчайшего пути на графе G'. В результате получается полилинейное изображение графа G. При этом количество и плотность жгутов невелики, поскольку нет гарантии, что ребра будут следовать по одним и тем же путям. Поэтому для увеличения количества жгутов используется метафора дорог и магистралей, при которой часто используемые пути получают меньший вес (по ним можно ехать с большей скоростью). На сеточном графе G' с откорректированными весами заново осуществляется трассировка ребер методом поиска кратчайшего пути.

Поскольку матрица расстояний способствует выбору для трассировки часто используемых ребер, количество и плотность жгутов возрастает. Таким образом, уровень хаотичности изображения уменьшается за счет того, что (1) ребра трассируются по ребрам сеточного графа, (2) они собираются в жгуты, (3) в процессе трассировки можно ввести запрет на отдельные пути. Например, для удаления пересечений между ребрами графа и вершинами можно запретить трассировку через вершины исходного графа. Можно также запретить отдельным ребрам проходить через плотные области и перенаправить их в более разреженные.

После повторной трассировки, каждому ребру графа G соответствует ломаная линия с большим количеством сгибов. (рисунок 3(а)). Эти сгибы дают визуальный эффект зигзагов. Для сглаживания зигзагов строятся сплайны, использующие сгибы в качестве опорных точек. Обычно используются кривые Безье или кубические B-сплайны. При этом ребра, проходящие через одну и ту же область и имеющие те же сгибы, создают впечатление потока между областями. (рисунок 3(б)).

(а) (б)

Рисунок 3 –Полилинейное изображение жгутов (а); изображение жгутов при помощи сплайнов (б)

Помимо информации о путях, которым соответствуют жгуты, желательно отобразить информацию о том, сколько ребер в одном жгуте. На рисунке 4 показана попытка отобразить эту информацию при помощи техники GraphSplatting [8]. Эта техника дает возможность визуализировать непрерывные изменения в плотности вершин в виде размытых пятен. Более продви-

нутая техника, позволяющая пользователю лучше понять структуру жгутов, поучила название «упорядоченные жгуты ребер» и описана в следующем разделе.

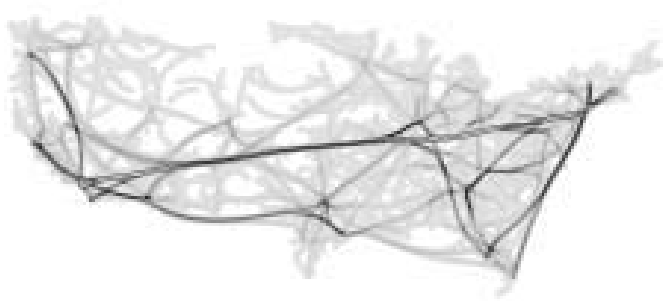
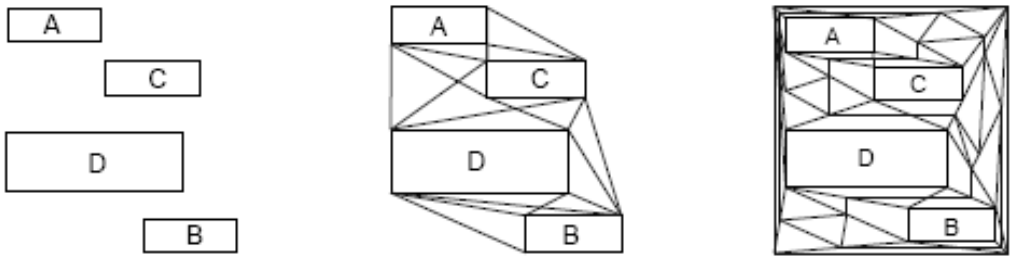


Рисунок 4 – Изображение жгутов ребер при помощи техники GraphSplatting

4 Трассировка с упорядоченными жгутами ребер

Алгоритм трассировки с упорядоченными жгутами ребер описан в работе [4], и, в основном, предназначен для визуализации графов среднего размера с большим количеством ребер. Внутри каждого жгута ребра располагаются на фиксированном расстоянии друг от друга и упорядочиваются таким образом, чтобы минимизировать пересечения ребер внутри жгутов. На вход подается граф с заданными позициями вершин, полученными либо одним из алгоритмов размещения, либо заранее зафиксированными, как в случае географических данных. Специфической особенностью данного метода является то, что вершины являются не точками, а многоугольниками. (рисунок 5(а)). Во время работы алгоритма позиции вершин не изменяются. Алгоритм состоит из трассировки на сеточном графе, раздвигания ребер и упорядочения ребер в жгутах.



(а) (б) (в)

Рисунок 5– Построение сеточного графа для вершин-многоугольников: а) исходные позиции вершин; б) разреженный граф видимости; в) уточненная триангуляция Делоне.

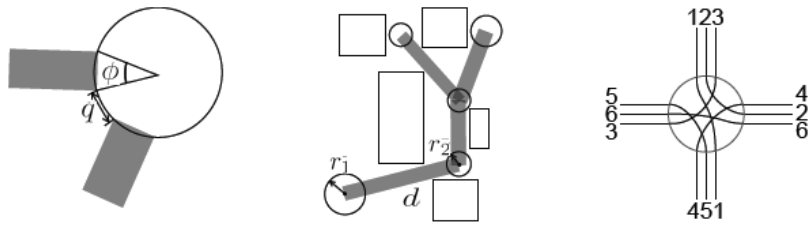
Трассировка ребер. На этом шаге создается сеточный граф G' с прямолинейными ребрами. Для построения графа трассировки используется две альтернативные стратегии. Строится либо разреженный граф видимости (Рис. 5(б)), либо уточнение триангуляции Делоне (Рис.5(в)), где для каждых двух сторон треугольника, которые не являются сторонами многоугольников, изображающих вершины, добавляется сегмент, соединяющий их центры. В результате возникают маршруты в середине каналов между вершинами. Оба метода имеют сложность $O(n \log n)$, и порождают граф трассировки G', имеющий $O(n)$ ребер, где n – это количество углов у многоугольников, изображающих вершины графа G. В обоих случаях ребра

сетки не пересекают внутренность вершин. Для каждой вершины $v \in V$ создаются ребра, соединяющие центр многоугольника p_v с его углами. Затем строится путь для каждого ребра, и пересекающиеся пути организуются в жгуты. При трассировке используется новая функция стоимости трассировки ребер, имеющая вид:

$$routing\ cost(u,v) = \alpha\, ink + \beta \sum_{(u,v)\in E} l_{uv},$$

где l_{uv} - это длина пути для ребра (u, v), ink - суммарная длина объединения всех путей, подсчитанная так, что при пересечении нескольких путей их общая часть учитывается только один раз. При этом вклад второго терма пропорционален количеству путей, использующих эту общую часть. Неотрицательные вещественные константы α и β определяют вклад компонент в эту функцию. По умолчанию $\alpha = 1$, $\beta = 500$. Минимизация этой функции заставляет пути объединяться в жгуты, но при этом пути оказываются сравнительно короткими.

Раздвигание ребер. На этом шаге пути, принадлежащие одному жгуту, отодвигаются друг от друга. Благодаря этому отдельные ребра становятся видимыми, а жгуты приобретают толщину (рисунок 6).



(а) (б) (в)

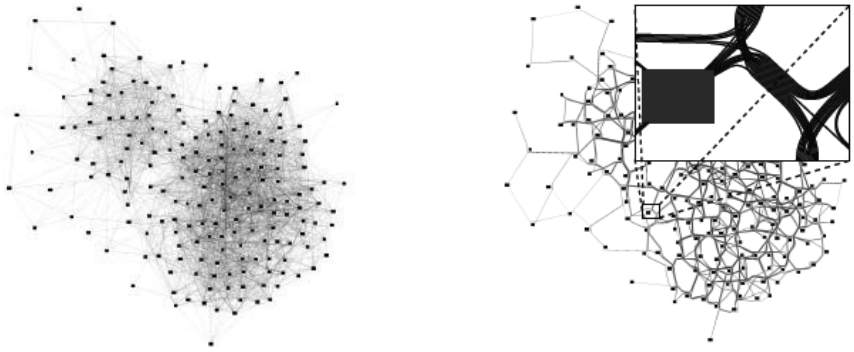
Рисунок 6 – Раздвигание ребер: а) желаемый радиус хаба; б) допустимый радиус хаба; в) пересечение путей при хабах.

Для размещения «толстых» жгутов необходимо создать некоторое свободное пространство вокруг ребер G. Для того чтобы создать это пространство, каждая вершина графа G' окружается окружностью, называемой хабом, с центром в позиции вершины графа G', а каждое ребро – прямоугольником, отличающимся от препятствий. (Рис. 6(б)). В окончательном изображении каждый путь изображен в виде последовательности линейных сегментов и кубических кривых Безье, где каждый линейный сегмент содержится в прямоугольнике, а каждая кривая Безье содержится в хабе (Рис. 6(в)). Такой путь не пересекает препятствий. Чтобы изобразить сегмент Безье внутри хаба, каждая опорная точка сегмента размещается внутри хаба. Поскольку окружность выпукла, а кривая Безье содержится в выпуклой оболочке своих опорных точек, сегменты окажутся внутри хаба.

Радиус хаба вычисляется как минимум двух радиусов: желаемого и допустимого. Вычисление желаемого радиуса показано на рисунке 6(а). Желательно, чтобы хаб был достаточно велик и мог вместить входящий жгут так, чтобы угол φ не превышал $\pi/4$. Желательно также разделить жгуты на входе в хаб расстоянием q. Разрешенный радиус показан на рисунке 6 (б).

Упорядочение ребер. Для трассировки отдельных ребер ищется порядок реберных сегментов внутри жгута (рисунок 7 (б)).

Такое упорядочение минимизирует количество пересечений ребер в одной связке. Проблема нахождения такого порядка связана с вариантом минимизации количества пересечений линий метро [9]. Существует эффективный алгоритм точного решения этой проблемы. Поскольку порядок вершин, получаемый при помощи алгоритма, описанного в статье, не единственен, возникает проблема поиска наилучшего упорядочения в зависимости от разных параметров.



(а) (б)

Рисунок 7– Исходный граф(а) и увеличенная деталь изображения с упорядоченными жгутами (б)

Заключение

В данной работе рассмотрено несколько алгоритмов построения жгутов ребер. Несмотря на то, что эта техника возникла совсем недавно, она доказала свою полезность во многих приложениях и значит, в ближайшем будущем появятся новые работы в этом направлении. Интересно было бы изучить инкрементальные и динамические методы построения жгутов, а также построение жгутов при многоуровневых методах размещения вершин.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-07-00388).

Список литературы

[1] Holten D., Hierarchical Edge Bundles: Visualization of Adjacency Relations in Hierarchical Data// IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics.— v.12, n.5.— 2006. — pp. 741-748.

[2] Cui W., Zhou H., Qu, H. Wong P. C., X. Li, "Geometry-Based Edge Clustering for Graph Visualization", //IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. — vol. 14, no. 6.— 2008.

[3] Lambert A., Bourqui R., Auber D., Winding Roads: Routing edges into bundles. Computer Graphics Forum, 29(3) . — pp. 853–862, . — 2010.

[4] Pupyrev S., Nachmanson L., Bereg S., Holroyd A.E., Edge Routing with Ordered Bundles. Graph Drawing 2011. — pp. 136-147. — 2011.

[5] Melancon G., Herman I., Circular drawings of rooted trees. Technical report, Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, 1998.

[6] Fortune S., A sweepline algorithm for Voronoi diagrams. // SCG ’86 : Proc. of the second annual symposium on Computational geometry. — pp. 313–322. — 1986.

[7] Dwyer T. , Nachmanson L., Fast edge-routing for large graphs. // Proc. 17th Int. Symp. on Graph Drawing. — pp. 147–158. — 2009.

[8] Van Liere R., De Leeuw W., GraphSplatting : Visualizing graphs as continuous fields //IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 9, (2) .— pp. 206–212. — 2003.

[9] Nollenburg M.. An improved algorithm for the metro-line crossing minimization problem.// Proc. 17th Int. Symp. on Graph Drawing . — pp. 381–392. — 2009.

ФАКТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЛНОТЕКСТОВЫХ БАЗ ДАННЫХ ПРИ МОНИТОРИНГЕ НАУЧНОЙ-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

А.В. Вохминцев, А.В. Мельников

Челябинский государственный университет
454001, Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129, Россия
vav@csu.ru, mav@csu.ru
тел: +7 (351) 799-72-88, факс: +7 (351) 799-71-04

Ключевые слова: *фактографический анализ, семантическая сеть, база знаний, онтология, text mining, прикладная лингвистика, извлечение фактов, дерево-синтактико-семантических зависимостей, информационно-аналитические системы*

Abstract

This article discusses the problem of searching and analyzing scientific and technical information gathered from open sources in the field of business intelligence. Subject area is represented through ontological model extended by fuzzy links between objects. Using this ontology-based approach, we have created «Sonet», information analysis system which is capable of extracting facts from natural-language texts in Russian and English, and representing them as object relationships. We use i2 Analyst's Notebook. as a visualization tool.

Введение

Современный уровень развития информационных технологий характеризуется стремительным ростом объемов информации разного рода (текстовые документы, реляционные базы данных, мультимедийная и биометрическая информация, и.т.д.). Самая большая доля информации приходится на текстовые документы на естественном языке (по данным аналитической компании Gartner более 96% от всей информации). Данный способ представления информации является наиболее естественным для человека, т.к. в процессе мышления человек использует конструкции естественного языка. Вместе с тем, данный тип информации требует создания сложных моделей и алгоритмов, позволяющих построить из текстового документа его формальное представление на основе лингвистического анализа.

На сегодняшний день успешно реализованы системы лингвистического анализа, основанные на проведении морфологического анализа текста (в том числе алгоритмах нечеткого поиска), тематического анализа текста, основанные на построении смыслового портрета текстового документа, а также интеллектуальные системы на основе онтологий для специализированных предметных областей. В результате морфологического и тематического анализа текста в большинстве случаев формируется подборка текстовых документов, состоящая из тысяч документов, отсортированных по релевантности. Такой объем документов очень сложно анализировать, поэтому в связи с развитием Internet (самого большого хранилища текстовых документов) стали появляться методы семантического анализа текстовых документов, основанные на использовании онтологий. Термин «онтология» был использован рядом исследовательских сообществ по изучению искусственного интеллекта, вначале в области инженерии знаний, в обработке естественных языков, а затем в представлении знаний (Jos de Bruijn, Fensel D., Staab S., Studer R.). Позже онтологии стали рассматриваться в качестве ключевого элемента в проекте Semantic Web. Основной недостаток данных методов заключается в том, что они могут быть реализованы на практике только для информационных систем, работающих в ограниченных предметных областях, например в промышленности в металлургии, машиностроении, энергетике, где можно точно описать технологические и бизнес-процессы компа-

нии. Все попытки перенести данные методы для решения задачи в общей постановке (для произвольной предметной области) заканчиваются получением неудовлетворительных результатов.

Для решения задачи в общей постановке необходимо использовать методы, основанные на глубинном синтактико-семантическом анализе текста, которые ведутся по трем основным направлениям:

- синтаксические методы: по линии исследования синтаксических характеристик и лексического состава текстов;
- статистические методы: установление семантических связей на основе выделения дистрибутивно-статистических связей;
- семантико-смысловые методы: посредством исследования глубинных семантических связей в предложении, в текстовом документе и за пределами текстового документа, например в базе знаний, тезаурусе, онтологии, толково-комбинаторном словаре, и.т.п. [1].

Работы по глубинному семантическому анализу текста ведутся достаточно давно, среди них стоит отметить труды Н. Хомского (трансформационная грамматика, универсальная грамматика), Мельчука И.А. (Модель «Смысл-Текст»), Скрэгга Г. («Семантическая сеть как модель памяти»), Шенка Р. («Обработка концептуальной информации»), Филлмора Ч. («Frame semantics and the nature of language»), Г.С. Осипова («Реляционно-ситуационный метод поиска и анализа текстов») [2]. Для проведения семантического анализа в данных методах используются базы знаний, в которых содержится информация об объектах предметной области.

В данной статье будут рассмотрены следующие вопросы:

- Описание модели знаний для хранения данных об объектах мониторинга научно-технической информации;
- Разработка метода фактографического анализа текстового документа для формирования содержания базы знаний;
- Применение метода фактографического анализа документов в информационно-аналитической системе «Кибер-Аналитик».

1 Онтологическая модель базы знаний

В современном мире значительная часть научно-технической информации является открытой, особенно в стадии формировании идеи, обсуждения и апробации, чем пользуются службы контразведки государств и коммерческих компаний при промышленном проектировании (например, образцов новой техники, классификации научно-технической документации), либо при продвижении наукоемкой продукции на рынке. Для решения поставленной задачи эксперт осуществляет интеграцию знаний, производя анализ гетерогенных информационных материалов, произведенных другими учеными и инженерами для получения знаний об изучаемом объекте или технологии. Источниками информации для него являются, прежде всего, электронные ресурсы: Интернет (научные статьи, тезисы докладов конференций, промышленные и бизнес новости, специализированные информационные ресурсы), проектно-конструкторская документация, оффлайн хранилища статей в научно-технических библиотеках, социальные сети (онлайн-конференции, форумы, блоги).

Полнотекстовая база данных – это множество документов, которые связаны друг с другом перекрестными ссылками, поэтому наиболее адекватно она представляется в форме семантической сети. Однако для хранения детализированной информации о предметной области ее необходимо дополнить множеством онтологий и метаописаний знаний, содержащихся в текстовых документах (Berners-Lee T., Hendler J., Lassila O.). Следовательно, мы можем ввести определение онтологии [3] для научно-технического мониторинга объектов:

$$O = \{O_i, A, O_{links}, O_{properties}, A_a, A_p\}$$

где O_i – идентификатор объекта;

- A – атрибуты объекта;
- O_{links} – связи семантической сети, приписываемые объекту, с другими объектами;
- $O_{properties}$ – признаки объекта;
- A_p –действия над объектом;
- A_a – действия объекта;
- C – контексты объекта;
- T – хронология объекта (изменение атрибутов объектов во времени).

Предлагаемая модель знаний имеет преимущества как перед традиционными онтологиями, так и перед семантическими сетями, т.к. объекты в ней рассматриваются с учетом контекста текстового документа (абзаца, предложения, и.т.п.) и с учетом хронологической шкалы времени. Такой подход позволяет разделить морфологически одинаковые лексемы друга от друга на основе семантической информации об атрибутах, контекстах и хронологии объекта. Такой подход позволяет разделить морфологически одинаковые лексемы друга от друга на основе семантической информации об атрибутах, контекстах и хронологии объекта. Например, персоны «Ангела Меркель политик» и «Ангела Меркель флорист» при семантическом поиске будут разделены друг от друга. При осуществлении научно-технического мониторинга в полнотекстовых коллекциях документов, аналитик пытается найти в текстах определенные закономерности, события, персоны (организации), названия продукции (технологии), а также отношения между ними. В современной прикладной лингвистике такие целевые конструкции принято называть фактами [4]. На рисунке 1 приведена графическая интерпретация факта: отношение между персоной и организацией в разрезе трудовых отношений.

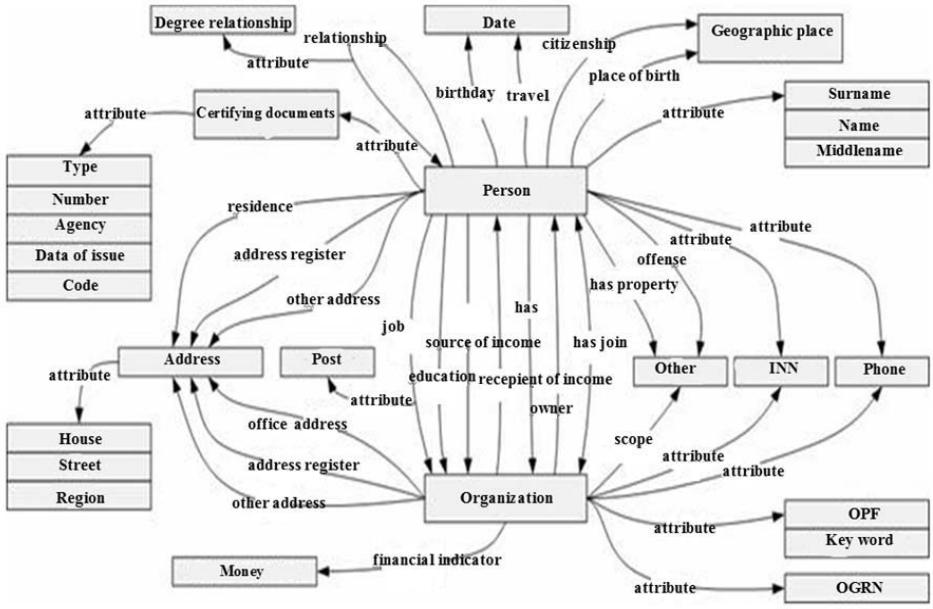


Рисунок 1 – Графическая интерпретация факта

2 Фактографический анализ текста

Базы знаний могут формироваться как экспертами в предметной области в автоматизированном режиме, так и при помощи алгоритмов класса Text Mining в автоматическом режиме, которые позволяют извлекать информацию об объектах, их атрибутах и связях друг с другом на основе формальных правил. На сегодняшний день среди всех систем, реализующих концепцию семантического анализа, можно отметить Convera RetrievalWare и Russian Context Optimizer (для русскоязычных документов) [4]. В данной работе будет рассмотрен методов фактографического анализа текста на естественном языке, который позволяет на основе заранее определенных семантических правил вывода извлекать информацию об объектах мониторинга. Введем основные определения.

Определение 1 Целевой объект – базовая единица текста, обозначаемая в тексте словом, словосочетанием или специализированной численно-символьной конструкцией. Назовем кортеж $O_{t\,\mathbf{arg}\,et} = \langle a_{\text{название}}, a_1, a_2, \ldots, a_n \rangle$ *целевым объектом*, где $a_{\text{название}}$ –название целевого объекта; $a_1, a_2, \ldots, a_n$, a_i, $i = \overline{1, n}$ –атрибуты понятия из предметной области, такие что $\bigcap_{i=1}^{n} a_i = \varnothing$.

Примеры целевых объектов: Искусственный интеллект, E.ON Ruhrgas, Юрген Мюллер, одну тысячу лет назад, DE0008469008, US78378X1072, +49 (0) 172 9587 163, $3000, 98%, ИНН 9378532. Целевые объекты (ЦО) можно поделить на два класса значимые ЦО и незначимые ЦО. К незначимым ЦО относятся все вспомогательные строевые элементы предложений, не имеющие сами по себе никакого значения, (служебные частей речи - союзы, предлоги и знаки препинания). Значимые целевые объекты в свою очередь можно разделить на три класса:

1) *Именованные целевые объекты* – к данному классу можно отнести следующие семантические типы объектов: персоны, организации, географические объекты, наименования продуктов и технологий человеческой деятельности, а также другие имена собственные.
2) *Неименованные целевые объекты* к данному классу можно отнести полнозначные слова следующих частей речи: нарицательные имена существительные, имена прилагательные, нестроевые глаголы, одушевленные и неодушевленные предметы, признаки объектов, события.
3) *Специальные целевые объекты* – сущности, обозначаемые в тексте конструкциями особого вида, состоящие из алфавитно-цифровых символов: даты и обстоятельства времени, денежные суммы, идентификационные данные персон и организаций и т.п.

Определение 2 Атрибуты целевого объекта

$$A_{t\,\mathbf{arg}\,et} = \{A_i, A_{class}, A_{\text{morph}}, A_{syntactic}, A_{semantic}, A_{structure}, A_{ref}, A_c\}$$

Каждый целевой объект имеет следующий набор атрибутов:

- A_i – идентификатор ЦО представляет текстовую строку в нормализованной форме или идентификатор известного заданного объекта (персоны, организации);
- A_{class} – категория, к которой относится целевой объект. Дополнительно существует возможность определения собственных категорий;
- A_{morph} , $A_{syntactic}$ – грамматические характеристики (часть речи, род, число, падеж, лицо и проч.);
- $A_{semantic}$ – семантические характеристики;
- $A_{structure}$ – структурные характеристики ЦО представляют набор отличительных свойств, например, для персоны - это фамилия, имя и отчество;

- A_{ref} – набор ссылок на все предложения текста, содержащие упоминания ЦО;
- A_c – коммуникативные характеристики – это набор признаков, характеризующих коммуникативную позицию ЦО в предложении: член предложения и тип синтаксической конструкции (клаузы).

Определение 3 Семантическая сеть. Вершинами семантической сети являются все ЦО, упоминавшиеся в тексте, связями семантической являются различные типы синтактико-семантических отношений между объектами. Элементарная семантическая сеть представляет результат синтаксического анализа и дополнительных семантических трансформаций дерева синтаксических зависимостей между словами в отдельном предложении. Назовем кортеж $\tilde{H} = \left\langle O_{t\,\mathbf{arg}\,et}, \tilde{E} \right\rangle$ семантической сетью документа, где

$$e = \{\mu_{R(\tilde{H})^{\Sigma-\Delta}}(x_\alpha, x_\beta)/(x_\alpha, x_\beta), e_{type}, e_{role}, e_{case}, e_{key}, e_{force}, e_R\}$$

Связи семантической сети имеют набор следующих атрибутов:

- $\mu_{R(\tilde{H})^{\Sigma-\Delta}}(x_\alpha, x_\beta)/(x_\alpha, x_\beta)$ – степень смежности вершин семантической сети (степень принадлежности);
- e_{type} – тип синтактико-семантической связи между вершинами: аблатив, агенс, адресат, аргумент, дереватив, дестинатив, каузатив, признак, принадлежность, и.т.п.
- e_{role} – семантическая роль, определенная для связей предиката с аргументом, получаемая обычно из словаря моделей управления, например субъект, объект, инструмент.
- e_{case} – семантический падеж и коннектор (предлог, союз), при помощи которых устанавливается связь между узлами дерева синтактико-семантических зависимостей.
- e_{key} – идентификатор связи;
- e_{force} – силы связи между вершинами;
- e_R – ссылки на предложения в текстовом документе.

Семантическая сеть предложения является примером простейшего факта, более сложные факты могут быть определены через анафорические и ссылочные связи в параграфе, блоке текста, текстовом документе или коллекции текстовых документов.

Метод фактографического анализа состоит из следующих основных этапов:

1) Предсинтаксический анализ:
   - морфологический анализ текста;
   - обработка словоформ, которых нет в морфологическом словаре;
   - идентификация стоп-слов;
   - предварительный анализ типовых конструкций текстового документа.

   В результате 1 этапа формируется множество предложений, каждое из которых содержит упорядоченный список слов с вариантами омонимичных лексем.
2) Синтаксический анализ:
   - извлечение типовых конструкций предложения на основе информации об морфологии, сборка словосочетаний;
   - идентификация синтаксическо-семантических конструкций в тексте;
   - построение дерева синтакико-семантических зависимостей.

   В результате 2 этапа формируется множество деревьев синтактико-семантических зависимостей, из которых на основе эвристических алгоритмов выбирается наиболее вероятный вариант разбора.
3) Постсинтаксический анализ:

- Анализ словоформ, не вошедших в дерево синтакико-семантических зависимостей.

4) Семантический анализ:
   - выделение целевых объектов в тексте;
   - построение логической схемы ситуации;
   - классификация семантических сетей;
   - контекстный анализ;
   - хронологический анализ, устранение коллизий.

В результате 4 этапа формируется множество целевых объектов с семантическими связями. Для извлеченных целевых объектов строится логическая схема ситуации. Поученное множество логических схем классифицируется. Метод фактографического анализа позволяют найти в тексте описания ситуаций в соответствии с определенными шаблонами, например, *изобретение адресной шины* или *покупка акций*. Поиск фактов производится по семантической сети текстового документа. Логическая схема ситуации идентифицирует класс описываемых ситуаций и содержит множество слотов, которые однозначно отделяют ее от других ситуаций. Модуль семантического анализа заполняет слоты их значением, при этом часть слотов может остаться не заполненной. Далее семантический модуль относит множество семантических сетей предложений текстового документа к соответствующему шаблону, задающему факт на основе модифицированного алгоритма деревьев решений C4.5. в соответствии шаблонами ситуаций в базе знаний. В методе фактографического анализ также используются статистические методы, которые позволяют определить частоту/вес целевого объекта или связи между ними в документе. Статистические методы основаны на исчислении показателей TF*IDF.

3 Информационно-аналитическая система «Кибер-Аналитик»

Лаборатория прикладного программирования ЧелГУ занимается разработкой информационно-аналитических систем для класса Text Mining, начиная с 1998 г. Система «Кибер-аналитик» проиндексировала более, чем 2400 русскоязычных и англоязычных источников документов, среди которых можно выделить такие крупные средства массовой информации как Вести, Нью-Йорк Таймс, BBC, Интерфакс, и.т.д. [5]. Для поиска фактов в информационно-аналитической системе «Кибер-Аналитик» используется ROLAP подход, т.к. он традиционно хорошо показывает себя в программных решениях для финансового планирования, хранилищах данных, продуктах класса Business Intelligence. OLAP-куб создаётся из соединения таблиц с применением схемы звезды, в центре которой находится таблица фактов. Множественные таблицы с измерениями присоединены к таблице фактов. В системе создано большое количество предварительно настроенных аналитических запросов в соответствии онтологией предметной области. Для поставленной аналитической задачи – мониторинг научно-технической информации созданы следующие таблицы измерений: организации (детализированные данные), персоны (детализированные данные), источники информации (детализированные данные), перечень приоритетных видов продукции, ключевые события, события (детализированные данные), виды продукции (детализированные данные), перечень приоритетных технологий, научно-технические журналы, количественные оценки (частотность, вес, импаст-фактор, индекс цитируемости, и.т.п., тематический индекс документа), контексты документа.

В системе «Кибер-Аналитик» реализованы следующие типы аналитических запросов:

1) ***Объектный запрос:*** позволяет получить детализированную информацию по объекту поиска (организации, персоне, продукции и технологии) и связях данного объекта с другими объектами.

   Пример: Получить информацию о Йохане Тейссене и его связях с российскими энергетическими компаниями с 2010 г. по 2012 г.

2) ***Транзитивный запрос:*** позволяет получить информацию обо всех существующих цепочках объектов между двумя определенными целевыми объектами.
Пример: Определить все возможные цепочки связей между компанией ОГК-4 и E. ON с 1999 г. по 2011 г. Максимальная глубина цепочки больше или равно 2, в цепочки связей включать объекты, которые имеют категорию персона, либо являются производными от данной категории. При поиске информации искать следующие факты: покупка акций, выработка электроэнергии, инвестиции, продажа электроэнергии.
3) ***Событийный запрос:*** позволяет получить информацию о событиях, в которых участвует объект. Данный запрос позволяет построить событийную или хронологическую диаграмму поведения объекта.
Пример: получить информацию обо всех событиях, связанных с Вульфом Бернотатом за 2006 г в контексте руководства E.ON Energie A.
4) ***Запрос триггер***: позволяет поставить на мониторинг объект или группу объектов. При появлении новой информации об объекте, его атрибутах и связях выполняется оповещение пользователей, которые находятся в списке оповещения триггера.
Пример: Сообщать о поступлении новой информации о связях Йохана Тейссена с целевыми объектами, которые имеют тип банк или страховая компания в период с 15.03.2013 г. до 20.06.2013 г.

Аналитические запросы в системе «Кибер-Аналитик» формируются в конструкторе запросов, при этом важно, что аналитик может описывать контекстные зависимости на естественном языке. Результаты выполнения аналитических запросов представляются аналитику в виде аналитических схем. Для визуализации аналитических схем в информационно-аналитической системе «Кибер-Аналитик» используется программное обеспечение i2 Analyst's Notebook. Существует три типа диаграмм:

- ***Link Analysis charts*** (Анализ связей) - показывает взаимосвязи между персонами, банковскими счетами, организациями, номерами телефонов, имуществом и другими вещами (рисунок 2).

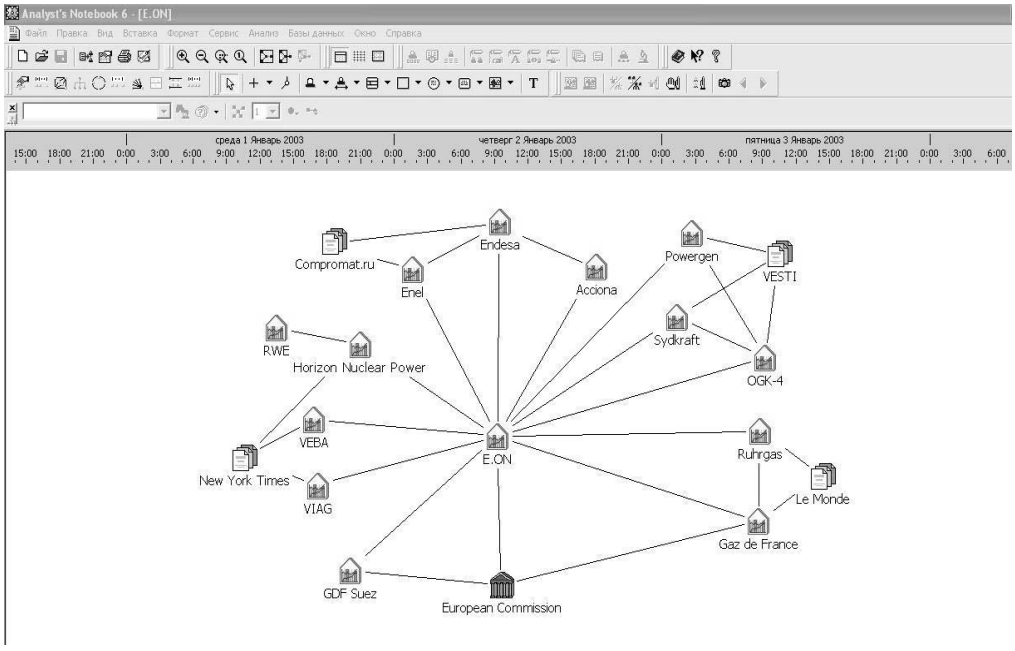


Рисунок 2 – Анализ связей

- ***Sequence of Events charts*** (Анализ последовательностей событий) – на диаграмме данного типа отображена последовательность и взаимосвязь событий, связанных с целевыми объектами, в хронологическом порядке, в течение определённого промежутка времени.
- ***Transaction Pattern Analysis charts*** (Анализ повторяющихся шаблонов в транзакциях) – диаграммы данного типа позволяют обнаружить и проанализировать устойчивые, повторяющиеся во времени последовательности событий, например электронные письма, sms-сообщения, телефонные разговоры или банковские транзакции (рисунок 3).

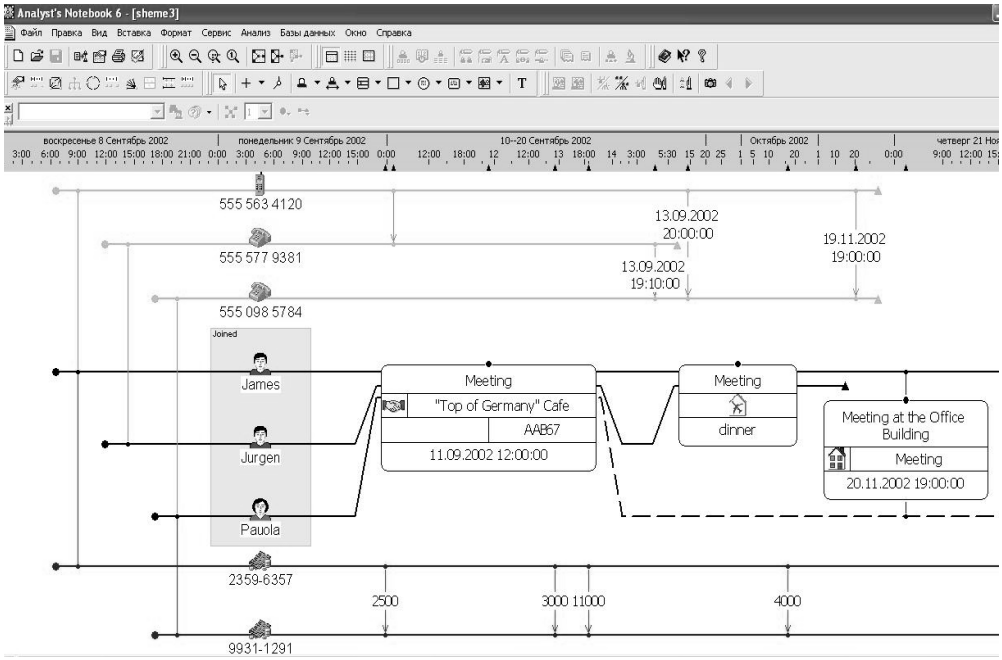


Рисунок 3 –Анализ последовательностей событий

Заключение

В данной работе рассмотрено применение онтологических моделей знаний для задачи научно-технического мониторинга объектов в бизнес-разведке. Предложен метод фактографического анализа полнотекстовых баз данных, который позволяет в автоматическом режиме извлекать описания ситуаций в соответствии с определенными шаблонами. Полученные описания ситуаций эксперты используют для формирования баз знаний предметной области. Онтологическая модель знаний и метод фактографического анализа внедрены в информационно-аналитическую систему «Кибер-Аналитик».

Список литературы

[1] Voxmintsev A.V. Integration of proffessional knowledge bases with the help of factual analysis and ontological models // Proc. of the 13th International Workshop on Computer science and information technologies (CSIT'2011). – Vol. 1. – Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2011. – P. 61-66

[2] Осипов Г.С., Тихомиров И.А., Смирнов И.В. Exactus –система интеллектуального метапоиска в сети Интернет. // Труды десятой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2006. М: Физматлит, 2006. т. 3. – С. 859-866.

[3] Вохминцев А.В., Мельников А.В. Применение онтологических моделей и фактографического анализа естественного текста в задачах конкурентной разведки // Системный анализ и информационные технологии: труды четвертой международной. конференции – Челябинск: Изд-во ЧелГУ, 2011. – Т. 1. – С. 81-88.
[4] Ермаков А.Е. Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: труды Международной конференции Диалог'2007. – Москва, Наука, 2007
[5] Вохминцев А.В., Мельников А.В. Технологии фактографического анализа неструктурированной информации в задачах промышленной разведки // Информационные и математические технологии в науке и управлении: труды XVII Байкальской Всероссийской конференции с международным участием – Т.1. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2012 – С. 36-43.

ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕГИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ АРХИВИРОВАНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ (PACS) НА ПРИМЕРЕ РЕШЕНИЯ, СОЗДАВАЕМОГО В САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

П. Басин[1], В.Б. Ломакин[2], М.О. Переверзев[3]

[1]ИБМ Восточная Европа/ Азия
123317, Россия, Москва, Пресненская наб., 10
Тел.: +7 (495) 775 8800

[2] ООО «ПАРУС»
443010, Россия, Самара, Некрасовская ул., 56, литера Б
Тел.: +7 (846) 332 4022

[3]ЗАО «ФУДЖИФИЛЬМ-РО»
123290, Россия, Москва
1й Магистральный тупик, 5А, Бизнес-центр «Магистраль Плаза», 4й этаж
Тел.: +7 (495) 797 3512

Ключевые слова: *PACS, лучевая диагностика, радиология, информатизация, архив, РАМИ, региональный архив медицинских изображений*

Abstract

At present, the Russian medicine is an active informatization of Health, including on the basis of decisions of the federal and regional levels. One of the most important components of the system are archiving, processing and transmission of medical diagnostic images (PACS), bringing together a network of medical institutions under a single regional medical image archive (RISA). This in'-the main characteristics of these PACS-systems, the problems of their introduction into clinical medicine and possible solutions on the example of the project in the Samara region.

Введение

Диагностический процесс в современной многопрофильной клинике характеризуется высокой степенью сопряженности – диагноз ставится на основе данных, полученных при помощи разнообразных видов медицинского оборудования, и с вовлечением специалистов разного профиля. Системы архивирования, обработки и передачи медицинских диагностических изображений (PACS – Picture Archiving and Communication System) играют в этом важнейшую роль, обеспечивая доступ широкому кругу врачей к полной диагностической истории пациента.

В соответствии с требованиями Концепции создания единой государственной информационной системы в сфере здравоохранения (ЕГИСЗ) [1], и Методическими рекомендациями Минздравсоцразвития РФ от 14.11.2011 г. [2], в Самарской области началось создание регионального архива медицинских изображений и оснащение ЛПУ области системами архивного хранения и предоставления доступа к медицинским изображениям (PACS, picture archiving and communication system).

На первом этапе реализуется пилотный проект, объединяющий четыре лечебных учреждения на базе программно-аппаратного комплекса (ПАК) регионального архива медицинских изображений (РАМИ): ГБУЗ «Самарская областная клиническая больница им. М. И. Калинина»; ММБУ «Городская клиническая больница №1 имени Н.И.Пирогова» городского округа

Самара; ММБУ «Детская городская клиническая больница №1 имени Н.Н. Ивановой» городского округа Самара; МБУЗ «Городская клиническая больница №1» городского округа Тольятти.

Целью поставки ПАК РАМИ является обеспечение оперативного и долговременного хранения медицинских диагностических изображений с возможностью организации эффективной работы с ними специалистов ЛПУ в процессе лечения пациентов.

Использование ПАК РАМИ позволит сформировать единую базу диагностических данных пациентов региона с возможностью организации удаленной диагностики, повысить качество диагностики за счет большей информативности цифровых снимков.

Входящее в состав ПАК РАМИ программное обеспечение предназначено для обеспечения возможности интеграции используемого в ЛПУ разнородного цифрового диагностического оборудования и медицинских информационных систем разных производителей, организации эффективной технологии хранения, обработки и передачи диагностических изображений.

Пилотный проект позволяет отработать все этапы реализации крупного регионального проекта PACS с целью последующего расширения проекта на другие ЛПУ Самарской области.

1 Основные требования к PACS-системам

PACS-системы представляют собой сложные комплексы программного обеспечения, компьютерного оборудования, а также услуг по их внедрению и технической поддержке. Они должны предлагать одновременно мощные инструменты диагностики для врачей и средства хранения и передачи изображений высокого разрешения в условиях обеспечения бесперебойности работы систем и защиты данных.

Для обеспечения эффективного использования PACS-систем на уровне региона должен быть соблюден ряд требований.

Во-первых, поддержка больших объемов данных (сотни терабайт и более) и множества одновременных запросов пользователей (десятки тысяч).

Во-вторых, однозначная идентификация пациентов/исследований в рамках сети ЛПУ с учетом индивидуальных схем идентификации в каждом учреждении (амбулаторные или стационарные, бюджетные или коммерческие пациенты и т.п.).

В-третьих, индексация, хранение и обмен разнородными данными между ЛПУ (электронная медицинская карта, результаты лабораторных и диагностических исследований, статистика и т.д.) и интеграция различных систем МИС (медицинская информационная система) / РИС (радиологическая информационная система) / PACS и т.д., что требует поддержки множества протоколов, среди которых DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine, международный стандарт управления, хранения, печати, обмена и просмотра данных медицинских диагностических изображений независимо от их источника), HL7 (Health Level 7, международная организация, а также стандарты обмена, интеграции и получения медицинской информации в электронном виде) и профили IHE [3-6].

В-четвертых, обеспечение отказоустойчивости и бесперебойной работы системы, web-доступ к изображениям из любой точки (любое ЛПУ, домашний компьютер), безопасный доступ к данным, разграничение прав пользователей и масштабируемость решения (наращивание функционала, включение в сеть новых рабочих мест или целых ЛПУ).

Перечисленные требования оказались особенно актуальны в ходе планирования регионального проекта в Самарской области, насчитывающей около ста лечебных учреждений, среди которых присутствует одно из крупнейших в России – Самарская областная клиническая больница им. М. И. Калинина, в которой насчитывается более пятидесяти диагностических аппаратов, из которых половина цифровых. По предварительным оценкам общий объем цифровых диагностических изображений, производимых во всех ЛПУ Самарской области, с уче-

том требований законодательства по продолжительности их хранения (не менее пяти лет), может превышать 1500ТБ.

2 Применение PACS-систем в многопрофильной клинике и сетях ЛПУ

Для эффективной работы с диагностическими изображениями необходимо наличие не только собственно цифровых снимков, но и первичной информации о пациенте и обследовании. Таким образом, полный цикл диагностики включает регистрацию пациента, направление на обследование, получение цифрового изображения и его анализ, а также написание заключения. Это подразумевает интеграцию PACS-системы и медицинской (или радиологической) информационной системы. Комплексное внедрение PACS позволяет существенно повысить производительность службы лучевой диагностики за счет:

- снижения затрат времени на подготовку протоколов исследований (в среднем на 25%)
- повышения количества консультаций на 1 врача-рентгенолога (в среднем на 20%) [7]
- сокращения затрат на весь рабочий процесс на 21-80% [8]
- экономии от 31 до 58% времени при проведении обследования (для разных типов обследований)
- снижения на 56% количества ошибок при передаче данных от диагностического аппарата в архив [9]
- увеличения производительности цифрового оборудования на 23 % для аппаратов CR и на 102% для компьютерных томографов [10, 11].

В рамках пилотного проекта реализуется интеграция PACS-системы и установленных в ЛПУ медицинских информационных систем с помощью интерфейса HL7, на необходимость поддержки которого указывают Методические рекомендации Минздравсоцразвития РФ [2]. Интеграция обеспечивает возможность вызова диагностических изображений по URL-ссылке непосредственно из заключения, хранящегося в медицинской информационной системе. Дополнительно копия заключения передается в архив PACS по протоколу HL7 и прикрепляется к диагностической карте пациента (рисунок 1).

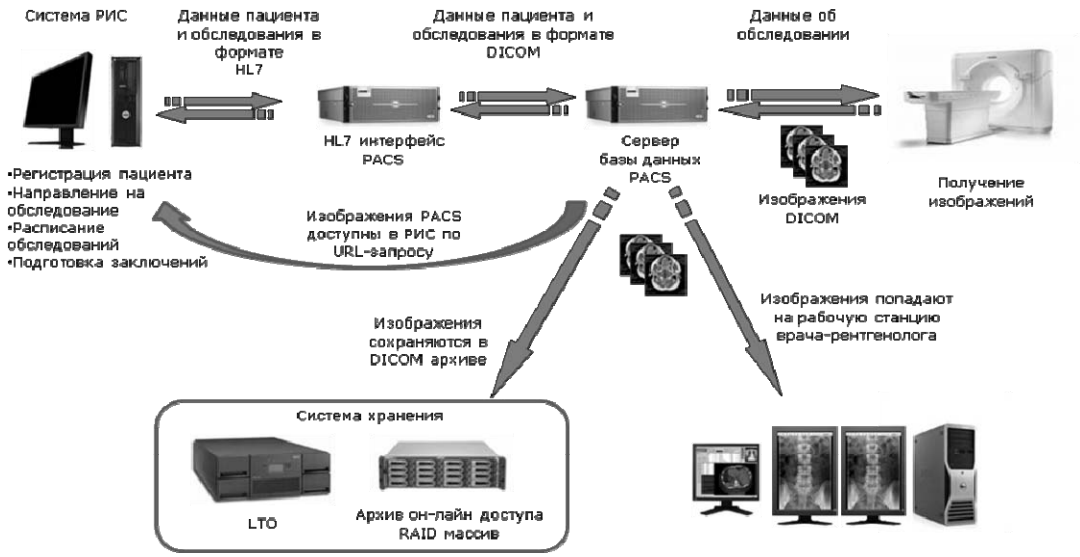


Рисунок 1– Общая схема интеграции систем PACS и РИС

Полученные в диагностическом центре снимки востребованы как в амбулаторном ЛПУ, направившем на обследование, так и в стационаре, где пациент будет проходить лечение. С учетом специализации различных ЛПУ, страховых программ, стоимостных критериев, пациент проходит обследования в разных учреждениях даже по одной и той же патологии. Таким образом, существует необходимость объединения всей информации о пациенте в целях эффективной диагностики. Для этого в рамках сети ЛПУ требуется согласовать правила регистрации и идентификации пациентов, медицинских документов, права доступа к данным, порядок аутентификации пользователей. Принимается во внимание соблюдение всех аспектов конфиденциальности информации о пациенте.

3 Специализированные программные средства для доступа и обработки цифровых диагностических изображений

На сегодняшний день технологии телемедицины и телерадиологии имеют в своей основе протокол WADO (Web Access to DICOM Persistent Objects - стандарт, определяющий вебсервис доступа и отображения DICOM-объектов, т.е. диагностическим изображениям и медицинским заключениям), позволяющий обмениваться DICOM-объектами через протокол HTTP/HTTPS и просматривать их в любом интернет-браузере. В частности, пилотный проект в Самарской области включает функционал, обеспечивающий защищенный доступ к диагностическим изображениям с мобильных устройств на базе операционных систем Apple iOS и Android, а также браузеров MS Internet Explorer, Google Chrome, Mozilla Firefox, Apple Safari, предоставляя инструменты для 2D и 3D-диагностики, а также для совместной работы врачей с одним изображением в рамках телемедицинской консультации. В целях предотвращения неправомерного доступа к информации о пациенте, помимо других специализированных инструментов ограничения доступа к персональной информации, предусмотрен доступ только к анонимизированным данным.

На каждой рабочей станции врача-диагноста применяются специализированные настраиваемые алгоритмы для усиления резкости изображений и снижения уровня шума.

Реализуемая в Самарской области PACS-система также включает функционал трехмерной реконструкции экспертного класса, предоставляющий инструменты комплексной диагностики с возможностью сравнения данных, получаемых на разных аппаратах. Результаты 3D-диагностики могут использоваться хирургами в ходе подготовки и планирования операций, а также онкологами и неврологами для уточнения диагноза. Необходимо отметить, что использование экспертной системы 3D-реконструкции способно существенно сократить время планирования хирургической операции.

Система имеет архитектуру «клиент-сервер» с возможностью подключения всех диагностических аппаратов посредством интеграции с единым PACS-архивом ЛПУ. Все расчеты производятся на сервере, сводя к минимуму требования к отдельным рабочим станциям и позволяя многим специалистам одновременно работать с системой (диагностические рабочие станции серверного типа).

Система трехмерной реконструкции дает возможность не только строить трехмерные модели на основе данных КТ, МРТ, ПЭТ, ОФЭКТ, но и проводить экспертную обработку с определением количественных параметров. В частности, анализ сосудистых структур (например, измерение степени стеноза и расчет кальциевого индекса), количества и распределения жировой ткани, слияния и наложения изображений от разных модальностей, выделения отдельных органов и тканей, использования виртуального скальпеля.

4 Проблемы внедрения PACS

Серьезным препятствием на пути внедрения PACS-систем, объединяющих множество лечебных учреждений, является неразвитость сетевой инфраструктуры. Цифровые диагности-

ческие изображения имеют значительный объем: серия изображений, полученных при одном исследовании на многосрезовом компьютерном томографе, занимает от 40 до 5000 МБ, одно маммографическое исследование, включающее в среднем до 4-8 снимков, занимает около 40-480 МБ [12-16]. Поэтому для их быстрой передачи необходимо обеспечить наличие компьютерной сети с высокой скоростью передачи данных. При внедрении PACS-систем общим требованием к скорости передачи данных в рамках внутрибольничной радиологической сети является 100 Мбит/сек, а для обмена данными между ЛПУ – 10 Мбит/сек и более (минимум – 2 Мбит/сек).

В Самарской области функционирует защищенная телемедицинская сеть (ТМС) с пропускной способностью в 100Мбит/сек, к которой подключена большая часть лечебных учреждений области. Это позволяет обеспечить эффективный обмен данными между отдельными лечебными учреждениями и РАМИ. С целью обеспечения максимально быстрого доступа врачей ЛПУ к диагностическим данным, а также длительной автономной работы локальных систем даже при временных сбоях ТМС и отсутствии связи с РАМИ, каждое ЛПУ в рамках пилотного проекта оснащено полностью независимыми системами с локальным архивом и базой данных. Обеспечивается синхронизация локальных систем и РАМИ.

Однако наиболее существенной проблемой при внедрении проектов PACS является отсутствие лицензий DICOM у диагностических аппаратов. В частности, даже при наличии цифрового оборудования, поддерживающего DICOM, требуется убедиться в том, что в комплект поставки входили как минимум лицензии DICOM Store SCU и Modality Worklist SCU, необходимые для обмена данными между PACS и РИС (например, для передачи данных о пациенте непосредственно на консоль томографа из МИС/РИС). При отсутствии лицензии Dicom Store SCU невозможна отправка изображений, полученных на диагностическом оборудовании, в систему PACS. Кроме того, необходимо проведение специальных настроек перечисленных лицензий DICOM и соответствующих IP-адресов, AEtitle и портов на диагностических аппаратах и их консолях. Все это часто является причиной задержек в ходе внедрения PACS-систем, так как требует вовлечения сторонних организаций и специалистов. В ходе реализации пилотного проекта также пришлось столкнуться с данным препятствием.

5 Организация центра обработки данных

В рамках проекта по объединению лечебных учреждений в единое информационное пространство для обмена диагностическими изображениями пациентов, планируется все изображения, поступающие из лечебных учреждений, сохранять в РАМИ (рисунок 2). Для этого в качестве центрального архива выбрано современное масштабируемая сетевое хранилище с емкостью 810 ТБ и возможностью существенного расширения. Решение обеспечивает управление и поддержку системы хранения данных по мере ее масштабирования до миллионов и миллиардов активных файлов, эффективность эксплуатации и снижение административных затрат, сочетая высокую масштабируемость и автоматическое управление файлами для быстрой доставки информации в региональном масштабе, что является критичным в условиях текущего проекта.

В целях обеспечения отказоустойчивости и бесперебойной работы РАМИ используется блейд-центр, а также создана виртуальная архитектура, что позволяет обеспечить минимальное время простоя системы при выходе из строя отдельных серверов, а также непрерывный мониторинг состояния виртуальной среды. Также обеспечивается эффективное управление серверами и возможности гибкого масштабирования системы PACS путем добавления модулей (в частности, виртуальных серверов СУБД, DICOM, HL7, web).

Используемое сетевое хранилище предоставляет поддержку Network Data Management Protocol (NDMP) в масштабе, чтобы обеспечить полное и инкрементальное резервное копирование файлов, а также восстановление этих файлов и связанных данных файловой системы в случае необходимости. Механизм политик хранилища повышает эффективность резервного

копирования файлов, сканируя их метаданные в считанные минуты. Таким образом гарантируется максимальная защита от потери информации в случае сбоев и аварий.

Следует подчеркнуть, что предлагаемая к реализации система является «открытой» и позволяет постепенно подключать все новые ЛПУ, что позволит сделать доступными в крупных диагностических центрах первичные исследования поликлинической сети и районных больниц, решив проблему дефицита квалифицированных врачей-радиологов на местах. Таким образом, оказывается возможным создание экспертных центров удаленной диагностики.

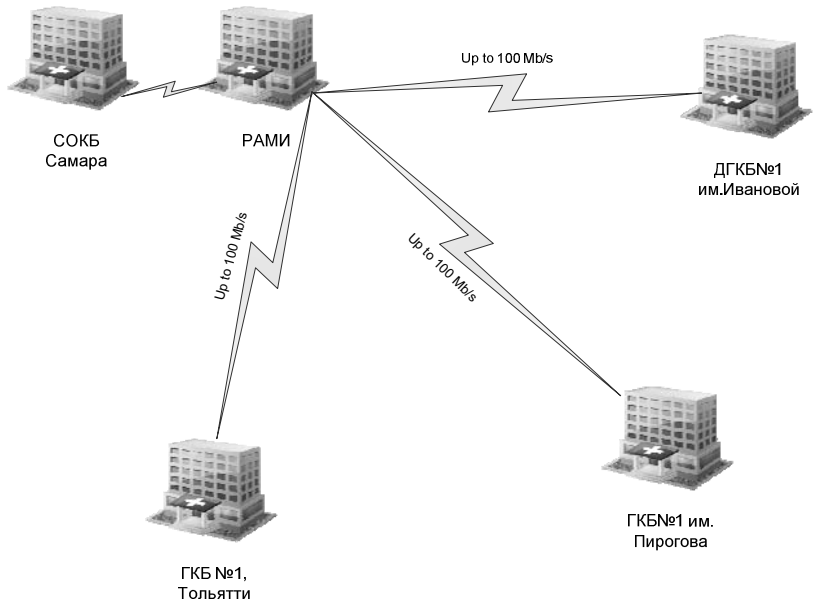


Рисунок 2 – Общая схема пилотного проекта создания РАМИ в Самарской области

Заключение

Системы архивирования и передачи медицинских диагностических изображений широко используются как непосредственно для диагностики, так и в полном цикле лечения пациентов. Они позволяют эффективно формировать единую диагностическую историю пациента вне зависимости от того, в какой период времени, в каком ЛПУ и на каком диагностическом аппарате получены данные.

В результате реализации текущего проекта в Самарской области как врачи-диагносты, так и врачи-клиницисты получают возможность анализа максимально полной цифровой диагностической информации о пациенте, полученной в разных ЛПУ области, с помощью самых современных средств обработки изображений. Создаются предпосылки для удаленной диагностики, снижения расходов на пленку, оптимизации рабочего процесса и управления всеми этапами комплексной диагностики в сети лечебных учреждений.

Список литературы

[1] Минздравсоцразвития РФ. Концепция создания единой государственной информационной системы в сфере здравоохранения. Приложение к приказу Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 28 апреля 2011 № 364. http://www.rosminzdrav.ru/docs/mzsr/informatics/27

[2] Минздравсоцразвития РФ. Методические рекомендации по составу создаваемых в 2011-2012 годах в рамках реализации региональных программ модернизации здравоохранения прикладных компонентов регионального уровня единой государственной информационной системы в сфере здравоохранения, а также функциональные требования к ним.
http://www.rosminzdrav.ru/docs/mzsr/informatics/40
[3] IHE IT infrastructure white paper. Health Information Exchange: enabling document sharing using IHEprofiles. January 2012
[4] IHE.Net. http://www.ihe.net/
[5] Wiki.IHE.Net. http://wiki.ihe.net/index.php?title=Main_Page
[6] HL7.org. http://www.hl7.org/
[7] Mackinnon AD et al. Picture archiving and communication systems lead to sustained improvements in reporting times and productivity: results of a 5-year audit. ClinRadiol. 2008 Jul;63(7):796-804.
[8] Imhof H et al. Change in process management by implementing RIS, PACS and flat-panel detectors. Radiologe. 2002 May;42(5):344-50. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12132121
[9] Reiner BI, Siegel1 EL. Technologists' Productivity When Using PACS: Comparison of Film-Based Versus Filmless Radiography. AJR 2002 July;179(1):33-37
[10] Broumandi DD, Haberman BD, Trambert MA. Increase in radiologist productivity with utilization of PACS: a five-year filmless experience. http://www.dominator.com/assets/005/5411.pdf
[11] The Royal College of Radiologists. Guidelines and standards for implementation of new PACS/RIS solution in the UK. http://www.rcr.ac.uk/docs/radiology/pdf/BFCR(11)4_PACS.pdf
[12] Hoffman J. Chart Smart: mammography. http://imaging-radiationoncology.advanceweb.com/shared-resources/advanceforioa/
[13] resources/DownloadableResources/AR90106_p68ChartSmart2.pdf
[14] Siebert E et al. The British Journal of Radiology, 82 (2009), 561–570
[15] Strickland NH. British Journal of Radiology (2004) 77, S14-S19
[16] The radiology guide to technology & informatics in Europe
[17] Hashimoto BE. Practical digital mammography. Thieme, 2008

ERGATIC SYSTEMS

ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНТЕРАКТИВНОГО УЧЕБНОГО КОМПЛЕКСА МИГ-29 ДЛЯ САМОЛЕТОВ 5-ГО ПОКОЛЕНИЯ

А.В. Пономаренко

ОАО Российская самолетостроительная корпорация «МиГ»
125171, Москва, Ленинградское шоссе, д. 6 Россия
PON299@INBOX.RU
тел: +7(499)231-25-39, факс: +7(499)231-23-59

Ключевые слова: *интеллектуальный интерактивный учебно-тренировочный комплекс, мультимедийные автоматизированные учебные курсы, процедурный тренажер, специализированный тренажер, комплексный тренажер*

Abstract
Issues of consideration: topical technology of training facilities making for flight and engi neering personnel of multifunctional flying vehicles, composition of training facilities and conceptual framework of its construction, methodology of professional training of aircraft personnel and ergonomic support of research for improvement of instruction methods and aircraft systems.

Введение

Усложнение военной авиационной техники (модернизированного 4-го поколения и проектируемого 5-го поколения ЛА) в связи с разработкой интегрированных бортовых комплексов, а также автоматизацией и механизацией процессов обслуживания и эксплуатации ЛА, существенным образом изменяют характер труда лётчиков и инженерно-технического персонала по освоению эксплуатации самолётов. С эргономических, инженерно-психологических позиций, обеспечение эффективности и надёжности эксплуатации летательных аппаратов самолетов пятого поколения требует необходимость обоснования новых требований к учебным технологиям, видам и формам их реализации.

Разработка методологических и методических основ построения и использования автоматизированных систем обучения летного и инженерно-технического состава самолетов-истребителей 5-го поколения (АСО-С5П) проводится в РСК «МиГ» и ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. В РСК «МиГ» для самолетов серии «4+» разработана интерактивная автоматизированная система обучения ИАСО-29, прошедшая межведомственные испытания. Эта система обучения демонстрировалась на авиакосмических салонах: Ле Бурже (Франция), МАКС (Россия), где вызывала большой интерес и внимание. В настоящее время стоит актуальная задача: с учетом особенностей построения и применения самолетов 5-го поколения и на основе современных достижений в области электронного автоматизированного обучения сформировать принципы построения и использования автоматизированных систем обучения.

В РСК «МиГ» разработана инновационная Концепция построения интеллектуального интерактивного учебно-тренировочного комплекса [4] для обучения, тренажа, формирования профессионального мастерства авиаперсонала фронтовой авиации, в соответствии с которой ведутся работы по созданию интерактивного учебно-тренировочного комплекса летного и инженерно-технического состава самолетов-истребителей 5-го поколения [1-3].

1 Основы построения системы обучения ИАСО-29 летного и ИТ-состава самолетов серии МиГ-29

В настоящее время в развитии образования большое значение имеют информационные технологии. При использовании этих технологий для профессионального авиационного образования весьма перспективны интерактивные автоматизированные системы обучения (ИАСО) с процедурными тренажерами. Основой таких систем для изучения авиационной техники являются мультимедийные автоматизированные учебные курсы (ММ АУК), процедурный тренажер и справочно-информационные система (СИС). ММ АУК воздействуют на обучаемых комплексом дидактических элементов: текст, анимации, фото и видео сюжеты, аудио сюжеты, табличные и графические элементы. Интерактивный ММ АУК обеспечивает индивидуальное и коллективное обучение с учетом уровня подготовки и способностей каждого обучаемого. Процедурный тренажер ИАСО расширяет возможности информационных технологий в профессиональном образовании и позволяет, например, осваивать инженерно-техническому и летному составу информационно-управляющее поле реальной кабины самолета, приобретать навыки действий с органами управления в кабине самолета и проводить практическое обучение выполнению подготовок самолета к полету.

В состав рассматриваемой ИАСО-29 с процедурным тренажером входят: системы группового и индивидуального обучения, работающие при использовании авторских программ оболочки «Космос» с комплексом ММ АУК; электронная справочно-информационная система; процедурный тренажер и вычислительная система управления учебным процессом. ИАСО-29 обеспечивает подготовку инженерно-технического состава по эксплуатации самолета и техническую подготовку летчиков. Процедурный тренажер существенно проще и соответственно дешевле полнофункционального комплексного авиационного тренажера. Он представляет собой макет кабины самолета, воспроизводящий рабочее место летчика в соответствии со штатным размещением и логикой функционирования органов управления и оборудования кабины самолета. Приборная доска кабины строится на основе использования ЖК мониторов, на которых формируются изображения индикаторов приборной доски, и воспроизводится их работа. Вычислительная система управления учебным процессом обеспечивает автоматизированный контроль и оценку действий обучаемых с выдачей данных на рабочее место преподавателя; выдачу справочной информации в процессе обучения; сбор и обработку данных о результатах обучения с формированием интегральной оценки по каждому обучаемому. Кроме этого она выполняет моделирование работы систем самолета в реальном масштабе времени при взаимодействии обучаемого с органами управления кабины процедурного тренажера. На рисунке 1 приведен пример учебного кадра ИАСО-29.

Использование ИАСО преследует следующие цели:

- сокращение трудоемкости и продолжительности обучения за счет использования интенсивной учебной технологии;
- увеличение степени индивидуализации изучения учебного материала, возможность ускорения его освоения и повторения в индивидуальном темпе для каждого из обучаемых;
- повышение динамики учебных занятий, возможность для преподавателя акцентировать внимание обучающихся на менее усвоенных разделах учебного материала на базе знания текущих оценок.

В РСК «МиГ» разработана технология создания интерактивных автоматизированных систем обучения с процедурными тренажерами и созданы ИАСО-29 для самолетов серии МиГ-29. Комплекс АУК для этого самолета включает в себя ММ АУК всех видов оборудования для технического состава: самолет (17 тем), двигатель (18 тем), авиационное вооружение (18 тем), авиационное оборудование (14 тем), радиоэлектронное оборудование (13 тем) и ММ АУК для летного состава (7 тем). Размещение разработанной ИАСО возможно в обычном помещении площадью порядка 100 кв.м (16 учебных мест, рабочее место преподавателя, проце-

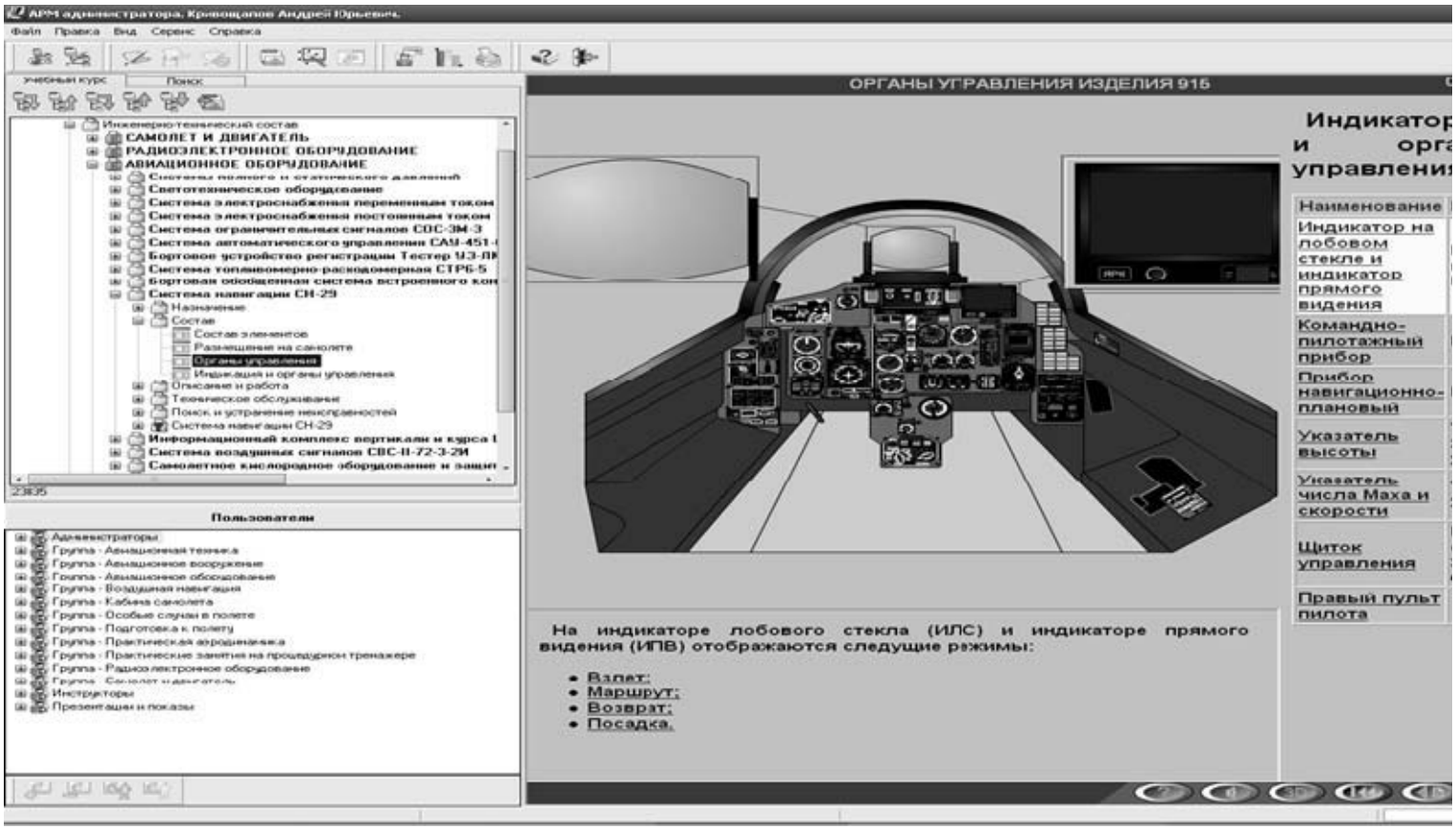


Рисунок 1– Пример учебного кадра ИАСО-29

дурный тренажер). Отметим, что дополнительным достоинством и важным фактором при использовании информационных форм обучения является возможность оперативного размножения и передачи мультимедийных обучающих продуктов по компьютерным сетям, т.е. имеется возможность тем самым существенно повысить оперативность и качество дистанционного обучения.

При эксплуатации сложных наукоемких изделий, а также продаже лицензий на их производство возникает требование соблюдения положений логистики относительно средств и систем, поставляемых с изделием: автоматизированных систем обучения, технической документации в электронной форме, средств поддержки процессов технического обслуживания и материально-технического обеспечения. Таким образом, создание АСО, тренажерных систем, технической документации в форме электронных технических руководств (для ИАСО-29 это СИС - справочно-информационная система) - является актуальной задачей применения на практике современных технологий. Следует отметить, что поставка авиационных комплексов с большим объемом традиционной бумажной документации существенно снижает удобство их использования, поскольку делает невозможным взаимодействие с автоматизированными системами обучения, усложняет материально-техническое снабжение и не полностью обеспечивает поддержку профилактических и ремонтных работ.

СИС ИАСО-29 лишена этих недостатков. Она обеспечивает представление в мультимедийном анимированном виде обслуживающему персоналу информационно-справочную и процедурно-технологическую информацию, подготовленную на основе технических описаний и инструкций по эксплуатации. Кроме визуализации процедур эксплуатации и регламентов технического обслуживания авиационных комплексов интерактивные СИС должны обеспечивать информационную поддержку обслуживающего персонала по обнаружению типовых неисправностей авиационных комплексов и способам их оперативного устранения.

Базовые принципы профессиональной подготовки инженерно-технического состава предполагают единство методик и средств обучения на всех этапах, начиная от профессионального отбора, теоретического обучения и заканчивая различными формами практической подготовки. Планируемое развитие ИАСО-29 основывается на интеграции ИАСО с бортовым оборудованием, на идеях распределенной базы данных (БД) и единой системы дистанционного авиационного обучения, которые предусматривают создание глобальной базы учебных материалов по различным самолетам и их системам и компоновку из них необходимых АУК. Основу этой системы обучения должна составлять глобальная пространственно-распределенная БД, представляющих собой совокупность текстовых, графических, анимационных, фото, видео и аудио учебных элементов.

2 Концептуальные требования к автоматизированным средствам обучения летного и ИТ-состава самолетов-истребителей 5-го поколения

Обобщая свойства существующих и перспективных авиационных АСО [9], можно сформулировать общие, концептуальные требования к АСО-С5П летного и ИТ состава самолетов-истребителей 5-го поколения:

- АСО должна быть интерактивной и быть частью единой системы дистанционного авиационного обучения.
- В состав АСО должны входить интегрированные в сети полнофункциональные и процедурные тренажеры для летного и ИТ состава, СИС и УКК.
- АСО должна быть связана с системой контроля бортового оборудования самолета.

При эксплуатации самолетов-истребителей 5-го поколения автоматизированные системы обучения летного и ИТ состава будут иметь очень большое значение, так как цена ошибки летного и ИТ состава при использовании этих самолетов очень высокая.

Одна из особенностей современного периода подготовки лётного состава ВВС России связана с существенным ограничением возможности отработки профессиональных навыков и умений непосредственно в реальных полётах. Не вдаваясь в обсуждение причин этого явления, необходимо отметить, что в условиях начавшейся модернизации авиационной техники и создания перспективных самолетов 5-го поколения, данное обстоятельство диктует необходимость пересмотра существующей системы подготовки лётного состава, которая, в основном, базировалась на формировании знаний и навыков за счёт запоминания сведений и учебной литературы с последующей отработкой действий на тренажёрах и в реальных полётах и укладывалась в триаду традиционных средств обучения: учебник-тренажёр-самолёт. Между тем широкое внедрение в практику ПЭВМ позволило использовать в учебном процессе различные компьютерные технологии, реализуемые в автоматизированных обучающих системах, автоматизированных обучающих курсах и т.п. Отличительные особенности компьютерных систем связаны с принципиально новыми возможностями по обработке информации вне мозга человека и за счёт этого создания оптимальных условий для сознательной отработки действий в полёте при решении лётчиком профессиональных задач в простых и усложнённых условиях. Было установлено, что для этого обучающие программы должны максимально учитывать психофизиологические закономерности формирования и функционирования механизмов психической регуляции. В этом случае процесс обучения выступает не только во внешне наблюдаемых формах (результатах), но главным образом в изменении внутреннего содержания – формировании механизмов психического (образного) отражения и регуляции осваиваемых действий.

Возможность оптимизации профессиональной подготовки лётного состава за счёт целенаправленного формирования образа полёта с использованием различных технических средств обучения (ТСО) была доказана в серии исследований [5-7].

3 Принципы построения и функциональная архитектура интеллектуального интерактивного учебно-тренировочного комплекса летного и ИТ-состава

Одной из перспективных форм профессиональной подготовки ЛС и ИТС на учебно-тренировочных средствах нового поколения является ее проведение в центрах тренажной подготовки.

В зависимости от состава и количества привлекаемых к обучению и тренажу экипажей проводятся следующие виды тренажной подготовки:

1) индивидуальная, проводимая для одного из членов экипажа;
2) тренажерная подготовка в составе экипажа;
3) групповая (тактическая) тренажерная подготовка, проводимая в составе групп тактического назначения;
4) оперативно-тактическая для отработки совместных задач в рамках ведения боевых действий с различными видами и родами войск.

В данной работе рассматривается создание учебно-тренировочного комплекса для авиационных частей в интересах обеспечения первых трех из указанных видов тренажной подготовки.

В РСК «МиГ» разработана инновационная ***Концепция построения интеллектуального интерактивного учебно-тренировочного комплекса*** [4] для обучения, тренажа, формирования профессионального мастерства авиаперсонала фронтовой авиации и обеспечения эргономического сопровождения жизненного цикла авиационных комплексов**,** суть которой состоит в интеграции интерактивной автоматизированной системы первоначального обучения, тренажеров унифицированного ряда (унифицированного специализированного тренажёра пилотажно-огневой подготовки летного состава, специализированного тренажёра боевого применения, комплексного авиационного тренажёра с неподвижной кабиной, комплексного авиационного

тренажёра с подвижной кабиной), автоматизированного рабочего места инструктора-администратора с модулем эталонного управления маневрированием, системы оценки качества деятельности операторов, резервов внимания и нервно-эмоционального напряжения, автоматизированной системы управления групповым взаимодействием, автоматизированной системы управления тренировкой и рабочего места оператора-эргономиста, что позволило создать единую информационно–технологическую среду, объединенную единым дидактическим замыслом в интересах повышения эффективности профессиональной подготовки авиационных специалистов и снижения финансово-экономических затрат на создание комплексов и подготовку специалистов фронтовой авиации. Построение комплекса основывается на принципах обеспечения, унификации, модульности, реконфигурации, высокой мотивации обучения и организации рационального взаимодействия основных систем комплекса.

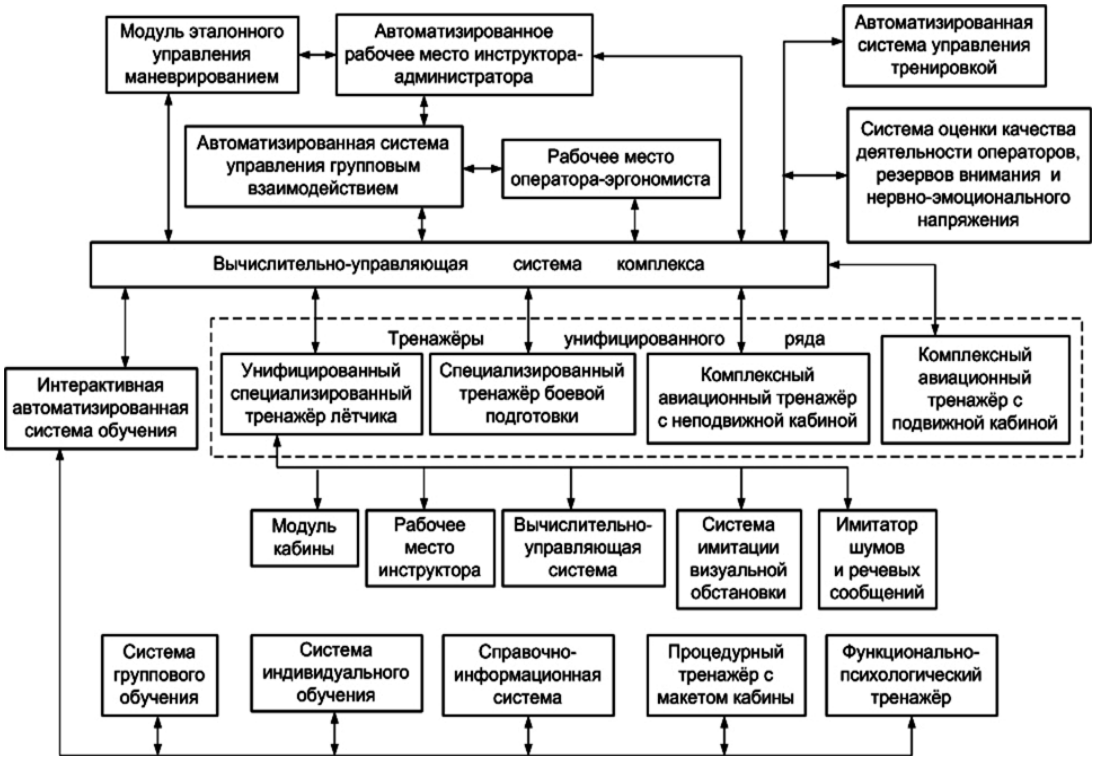


Рисунок 2 − Структура интеллектуального интерактивного учебно-тренировочного комплекса перспективного самолета-истребителя

При комплексировании аппаратно-программных средств ставилась задача обеспечения эффективного системно-комплексного применения ИИ УТК для обучения, тренировки, формирования профессионального мастерства и эргономического сопровождения жизненного цикла перспективного маневренного самолета на основе:

- обеспечения многоуровневого взаимодействия компонентов комплекса;
- реализации принципа разделения труда между специалистами при решении частных, специальных задач;
- обеспечения комплексной задачи функционирования партнеров как единого оператора, а также функционирования при гибком перераспределении лидерства и вспомогательных функций между партнерами в зависимости от конкретной задачи и хода ее решения;

- обеспечения совместного анализа и синтеза информации с адаптацией к индивидуальным особенностям партнера, принимающего решение, а также формирования адекватной модели ситуации, используемой при принятии решения;
- обработки и представления оператору и инструктору информации об отклонениях результатов деятельности от «эталонных» значений деятельности с учетом психологических факторов сложности;
- автоматизации планирования сложности тренировочных упражнений в зависимости от уровня усвоения навыков.

Предлагаемым ИИ УТК обеспечивается:

- первоначальное обучение летного и инженерно-технического состава решению комплекса задач, связанных с пилотированием и применением ЛА;
- освоение принципов взаимодействия с наземными системами управления;
- отработка навыков группового полета;
- одновременная комплексная тренировка экипажа и инженерно-технического состава.

Заключение

Многоуровневая система обучения, тренажа и эргономического сопровождения жизненного цикла перспективных авиационных комплексов на базе ***интеллектуального интерактивного учебно-тренировочного комплекса*** обеспечивает следующие пять уровней ее применения.

На первом уровне создается средство формирования наиболее важных для лётной деятельности индивидуальных свойств личности и психических функций, определяющих профессионально важное качество (индивидуальные средства обучения на базе персональных ЭВМ).

На втором уровне используются специализированные трёнажеры, формирующие надёжность действий при решении пилотажно-навигационных, тактических задач и обучающие выполнять профессиональные действия на фоне воздействия отрицательных факторов полёта и измененного психофизиологического состояния.

На третьем уровне: комплексный тренажёр для отработки профессионализма и автоматизированной оценки уровня готовности к конкретному полётному заданию.

На четвертом уровне: интерактивный учебно-тренировочный комплекс применяется для решения многофункциональных задач подготовки лётного и инженерно-технического состава на этапах обучения, тренировки и формирования профессионального мастерства.

На пятом уровне интерактивный учебно-тренировочный комплекс используется для освоения и тренажа по летной эксплуатации модернизируемых систем интегрированного бортового комплекса и для эргономического сопровождения жизненного авиационного комплекса и проведения исследований по совершенствованию методов обучения и обоснованию принципов дальнейшего развития авиационных комплексов ФА.

Список литературы

[1] Федосов Е., Федунов Б., Баханов Л. Тенденции развития боевой авиационной техники // Армейский сборник. – 2002. - №6.

[2] Aviation Week, 19/VIII 2002, p. 53-56.

[3] http://www.boeing.com/defense-space/military/f22/f22train.html.

[4] Пономаренко А.В., Василец В.М., Михайлов В.В. и др. Интеллектуальные интерактивные учебно-тренировочные комплексы. - М: Воениздат, 2006. - 255с.

[5] Леонов Е.А., Молчанов А.А., Пономаренко А.В., Халтобин В.М. Основы построения СУ БД и перспективы совершенствования ИАСО-29. - М: ИТО-2005.

[6] Хортон У. и др. Электронное образование: инструменты и технологии. - М: Кудиц-Образ. 2005.

[7] Материалы НМК академии: «Состояние и перспективы совершенствования методической работы в академии». ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 2006 г.

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАЛОСЛОВАРНОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧЕВЫХ КОМАНД ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ В ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

О.Н. Корсун, И.М. Финаев

Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем
125319, Москва, ул. Викторенко, 7, Россия
marmotto@rambler.ru
тел: +7 (495) 637-62-56, факс: +7 (499) 157-75-22

Ключевые слова: *автоматическое распознавание речи, помехоустойчивые алгоритмы распознавания речи, интерфейс кабины пилотов, речевое управление бортовым оборудованием*

Abstract

The paper deals with the problem of noise resistant small dictionary speech recognition for the purposes of developing the speech interface of modern aircrafts pilot cockpit. The use of an additional microphone is discussed; the results of experimental tests are presented.

Введение

Одним из перспективных направлений развития интерфейса кабины пилотов современных самолетов является речевое управление бортовым оборудованием, основанное на автоматическом распознавании речевых команд. Необходимым условием практического применения таких систем является высокая вероятность правильного распознавания, в том числе при воздействии акустических шумов, уровень которых на самолетах гражданской авиации может достигать 80 дБ [1].

Проведенные авторами экспериментальные исследования [2] показали, что при использовании алгоритмов распознавания, основанных на широко распространенном в настоящее время методе скрытой марковской модели [3], уровень ошибок в условиях акустических шумов может достигать 9...18 %. Для улучшения помехозащищенности автоматического распознавания речевых команд в работе предлагается алгоритм подавления акустических помех, основанный на линейной регрессии и применении дополнительного микрофона, который позволяет свести ошибки распознавания до уровня порядка 1%.

1 Постановка задачи

В основу предлагаемого помехоустойчивого алгоритма были положены следующие три основных подхода.

В методе скрытой марковской модели основной единицей является слог, и только на последующих этапах распознавания привлекается информация о словах и о составе фраз.

Поэтому в качестве первого способа подавления влияния помех было принято решение о непосредственном распознавании слов путем сравнения с эталоном. Выбор слова в качестве базовой единицы обусловлен тем общим соображением, что слово является структурой более помехоустойчивой, чем звук или слог, поскольку слово включает также взаимные связи между слогами. Другими словами, если слог - это элемент, то слово представляет собой целостную систему, и должно обладать лучшей распознаваемостью.

Второй путь повышения помехоустойчивости - это использование дополнительного микрофона, удаленного от диктора и записывающего акустическую помеху. Известно [4], что рас-

пространенные в настоящее время при обработке речевых сигналов методы стохастической фильтрации, например, алгоритм фильтра Винера [4], ориентированы на подавление помех, представляющих собой стационарные случайные процессы, некоррелированные с полезным сигналом. Между тем в полете могут действовать нестационарные акустические помехи, например, звуковая сигнализация или речевая помеха (переговоры с диспетчером и другими членами экипажа). Помеха типа «другая речь» влияет на автоматическое распознавание наиболее сильно, поскольку обычно имеет место высокая корреляция между такой помехой и полезным сигналом. Применение дополнительного микрофона, регистрирующего помеху в реальном масштабе времени, является радикальным средством учета нестационарности.

Третий подход заключается в том, что для учета сигнала дополнительного микрофона предложен новый способ сравнения с эталоном, основанный на линейной регрессии. При этом в соответствии с методом наименьших квадратов оцениваются коэффициенты регрессии распознаваемого слова на базис, составленный из эталонов слов. Запись шума включается в базис как дополнительный эталон.

2 Аналитическое исследование преобразования спектральных плотностей смеси сигнала и шума

Пусть имеется основной микрофон, который регистрирует полезный сигнал $c(t)$ и помеху $v(t)$:

$$z(t) = c(t) + v(t),$$

где $z(t)$ - выходной сигнал основного микрофона.

При автоматическом распознавании сигнала используется спектральная плотность выходного сигнала микрофона:

$$S_z(f) = S_{c+v}(t).$$

Эта спектральная плотность сравнивается при распознавании с эталонной спектральной плотностью, которая выбирается из соображений близости к полезному сигналу

$$S_э(f) \approx S_c(f).$$

При отсутствии помехи, то есть при $v(t) = 0$, выходной сигнал основного микрофона содержит только полезный сигнал

$$z(t) = c(t),$$

Тогда спектральная плотность выхода микрофона равна спектральной плотности полезного сигнала

$$S_z(t) = S_c(t).$$

Найдем спектральную плотность $S_z(f)$ при наличии помехи $v(t)$.

$$\begin{aligned} S_z(f) = S_{c+v}(f) = F_{c+v}(f) F^*_{c+v}(f) = F[c+v]F^*[c+v] = \\ F[c]F^*[c] + F[v]F^*[v] + \\ + F[c]F^*[v] + F[v]F^*[c] = \\ S_c(f) + S_v(f) + 2R_e[S_{cv}(f)] \end{aligned}$$

где обозначено

- $F[c+v], F[c], F[v]$ - оператор преобразования Фурье от сигналов соответственно $c(t)+v(t), c(t), v(t)$ для частоты f;
- $\mathrm{Re}[S_{cv}(f)]$ - действительная часть взаимной спектральной плотности $S_{cv}(f)$.

Удвоенная действительная часть в формуле получается вследствие того, что два последних слагаемых есть комплексно сопряженные числа

$\left(F[c]F^*[v]\right)^* = F[v]F^*[c]$.

Таким образом, при наличии ненулевой помехи $v(t)$ спектральная плотность выходного сигнала основного микрофона, помимо спектральной плотности $S_c(f)$ полезного сигнала содержит еще два слагаемых: спектральную плотность помехи $S_v(f)$ и удвоенную действительную часть $2\,\mathrm{Re}[S_{cv}(f)]$ взаимной спектральной плотности сигнала и помехи.

Для снижения влияния помехи, регистрируемой дополнительным микрофоном, применяется рассматриваемый ниже метод регрессии.

3 Разработка метода подавления акустических помех, основанного на множественной линейно регрессии

При распознавании слова или команды речевой сигнал обрабатывается по алгоритму параметризации, что позволяет поставить в соответствие слову некоторый вектор, или параметрический портрет слова. В основе параметризации лежит вычисление спектральных плотностей , однако выполняется также квантование по времени и некоторые другие преобразования. В предлагаемом алгоритме используются известные методы параметризации [4], их сравнительный анализ представлен в [5].

Для фильтрации аддитивной нестационарной помехи при использовании сигнала дополнительного микрофона предлагается применение метода множественной линейной регрессии портрета слова на эталоны и портрет сигнала шума. Данный подход требует наличия дополнительного микрофона, отстоящего от диктора на расстоянии 30..70 см и измеряющего сигнал акустической помехи. Сигнал шума преобразуется в последовательность параметров (параметрический портрет) по тому же алгоритму, что и записанный речевой сигнал. Затем из эталонов слов и портрета сигнала помехи строится матрица регрессоров:

$$\mathbf{Z} = \left\| \tilde{\mathbf{e}}_1, \tilde{\mathbf{e}}_2, \tilde{\mathbf{e}}_3, ..., \tilde{\mathbf{e}}_n, \tilde{\mathbf{n}} \right\| ,$$

где $\tilde{\mathbf{e}}_i = \dfrac{\mathbf{e}_i}{\|\mathbf{e}_i\|}$, $\tilde{\mathbf{n}} = \dfrac{\mathbf{n}}{\|\mathbf{n}\|}$ – нормированные векторы параметрических портретов эталонов и шума.

Далее, в соответствии с моделью линейной множественной регрессии и методом наименьших квадратов, вычисляются коэффициенты разложения портрета речевой команды по вектор-столбцам матрицы **Z**:

$$\mathbf{x} = \mathbf{Z}^T\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} ,$$
$$\boldsymbol{\beta} = \left(\mathbf{Z}\cdot\mathbf{Z}^{\mathbf{T}}\right)^{-1}\mathbf{Z}\cdot\mathbf{x},$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}$ - вектор погрешностей, $\boldsymbol{\beta}$ - вектор коэффициентов регрессии.

При распознавании смеси речевой команды и аддитивной помехи, представленной в виде «портрета» $\mathbf{x}$, выбирается эталон, который соответствует наибольшему коэффициенту регрессии. При этом ожидается, что составляющая вектора x, содержащая аддитивную помеху, при разложении будет проецироваться на вектор нормированного портрета шума. Предполагается также, что слагаемое $2\,\mathrm{Re}[S_{cv}(f)]$, соответствующее взаимной спектральной плотности сигнала и помехи, будет проецироваться на вектор помехи и на эталон «своего» слова, поэтому на коэффициенты при других эталонах помеха повлияет незначительно.

Правомерность этих допущений проверялась экспериментально.

Для обеспечения хорошей степени обусловленности матрицы регрессоров число используемых эталонов не должно превышать 5...6. Если количество распознаваемых слов превыша-

ет это значение, эталоны разбиваются на группы по 5...6 слов, и вычисляются коэффициенты регрессии распознаваемого слова последовательно для каждой из групп. Критерий при этом не изменяется - выбирается эталон, для которого коэффициент регрессии наибольший.

4 Экспериментальное оценивание характеристик алгоритма распознавания

Для экспериментов привлекался речевой материал 12 дикторов. Для распознавания были выбраны три слова: «пилотаж», «навигация», «масштаб». Каждый диктор произносил по 150 слов (по 50 реализаций каждого слова), таким образом общее число испытаний по 12 дикторам составило 1800 слов. Эталон формировался только по одному диктору, поэтому полученные результаты характеризуют также дикторонезависимость алгоритма.

Результаты представлены в таблице 1. Рассматривались три известных варианта параметризации речевого сигнала [4, 5] – спектральный, мел-спектральный и кепстральный (в таблице обозначены «спектр», «мел» и «кепстр»). Во втором столбце таблице представлены уровни соотношений сигнал/шум, при этом уровню 5 дБ соответствовал абсолютный уровень 80 дБ, а уровню сигнал/шум 0 дБ - абсолютный уровень 85 дБ, превышающий предельно допустимый.

При проведении экспериментов запись помехи добавлялась к сигналу диктора аддитивно, тогда как запись слов диктора проводилась в спокойной обстановке. Этим обеспечивалось строгое выполнение требования об аддитивности помехи и исключалась возможность изменения характеристик речи диктора вследствие воздействия высоких уровней акустического шума.

При задании помехи типа «Кабина» использовался акустический шум, записанный во время полета в кабине пилотов самолета «Боинг-737», а для помехи типа «Речь» - запись беседы нескольких человек, говорящих почти непрерывно.

Таблица 1 – Суммарный уровень ошибок распознавания в процентах от общего числа опытов для заданного типа и уровня помехи

Тип помехи	Номинальное отношение сигнал/шум, дБ	Уровень ошибок, %, без использования информации о шуме			Уровень ошибок, %, при использовании информации о шуме		
		спектр	мел	кепстр	спектр	мел	кепстр
Кабина	5	***0,28***	*1,05*	40,5	***0,39***	*0,61*	19,7
Кабина	0	***0,67***	*2,1*	57,6	***0,83***	*0,83*	28,7
Речь	5	***1,0***	*3,83*	18,1	***0,44***	*1,1*	10,2
Речь	0	***1,9***	*7,17*	27,6	***0,61***	*1,33*	12,8

Анализ показывает, что наилучшие результаты обеспечивает наиболее простой спектральный вариант параметризации. Без использования информации дополнительного микрофона ошибки распознавания составляют 0,28…1,9%, при учете информации о помехи доля ошибок снижается до 0,39…0,61%. Для мел-спектральной параметризации соответствующие значения составляют 1,05...7,17% и 0,61…1,33%. Для кепстрального преобразования уровень ошибок возрастает на 1…2 порядка, поэтому его применение нецелесообразно.

Анализ также показывает, что применение дополнительного микрофона снижает уровень ошибок в 2…5 раз для всех вариантов параметризации.

Интересно отметить, что для шума типа «Кабина», близкого к стационарному, уровень ошибок менее одного процента достигается только за счет использования слова как базовой единицы распознавания и регрессионного метода сравнения, без использования информации дополнительного микрофона. Для нестационарной помехи типа «Речь» дополнительный микрофон является необходимым.

Заключение

Таким образом, в работе получены математические соотношения для преобразования спектральных плотностей смеси сигнала и шума, а также предложен метод сравнения портретов распознаваемых слов с эталонами, основанный на линейной регрессии и учитывающий сигнал дополнительного микрофона.

Результаты экспериментального оценивания характеристик предложенного алгоритма показывают, что он обеспечивает уровень ошибок распознавания менее 1% для абсолютных значений аддитивной помехи до 85 дБ, что несколько превышает предельно допустимый уровень [1].

Применение сигнала дополнительного микрофона обеспечивает наибольший эффект при воздействии помехи типа «Речь», коррелированной с полезным сигналом.

В целом применение дополнительного микрофона уменьшает уровень ошибок распознавания в 2...5 раз.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 12-08-00670.

Список литературы

[1] Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.5.1.051-96. Условия труда и отдыха для летного состава гражданской авиации // Утверждены Постановлением Госкомсанэпиднадзора России от 19 марта 1996 г. N 7. - М.: Госкомсанэпиднадзор России. 18 с.

[2] Корсун О.Н., Яцко А.А., Финаев И.М., Чучупал В.Я. Экспериментальное исследование влияния акустических помех разных видов на результаты автоматического распознавания речевых команд.- Наука и образование. №1. 2013 (электронное издание http://technomag.edu.ru/doc/508614.html).

[3] Рабинер Л.Р. Скрытые марковские модели и их применение в избранных приложениях при распознавании речи: Обзор // ТИИЭР (Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике) : пер. с англ. 1989. Т. 77, № 2. С. 86-120. [Rabiner L.R. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. Proceedings of theIEEE. Feb. 1989. Vol. 77, no. 2. P. 257-286. DOI: 10.1109/5.18626].

[4] Peinado A.M., Segura J.C. Speech Recognition over Digital Channels.-John Wiley&Sons. 2006. 274 p.

[5] Корсун О.Н., Финаев И.М. Анализ алгоритмов параметризации и сравнения с эталоном при распознавании команд в системах речевого интерфейса авиационного оборудования. Сборник материалов докладов 5 Российской мультиконференции по проблемам управления. - Санкт-Петербург, ЦНИИ Электроприбор. 2012 г.

СИМБИОТИЧЕСКИЕ ОТНОШЕНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ СРЕДАХ

С.Ф. Сергеев, Ю.Ю. Заплаткин

ОАО «Корпорация «Аэрокосмическое оборудование»
197101, Санкт-Петербург, ул. Б. Монетная, 16, Россия
corporation@aequipment.com; ssfpost@mail.ru
тел: +7 (812) 313-82-33, факс: +7 (812) 313-82-94

Ключевые слова: *интеллект, искусственный интеллект, гибридный интеллект, диффузный интеллект, сложность, иммерсивные среды, коммуникация*

Abstract
The article deals with the various forms of Association of natural and artificial intellects in technogenics environments.

Введение

Информационные технологии предоставляют разработчикам эргатических систем широкий спектр средств, повышающих их интеллектуальность, формируя отношения человека-оператора с технической системой подобные отношениям, возникающим в условиях естественной социальной коммуникации [1]. Вместе с тем взаимодействие человека с искусственными информационными средами, наделенными искусственным интеллектом отличается от его взаимодействия с естественными средами в силу структурно-функциональной дополнительности искусственных сред с когнитивными структурами человека [2]. Возникает проблема симбиоза между системами разной природы – биологическими, наделенными механизмами психического отражения и активного целеполагания, и техническими, реализующими технологии искусственного интеллекта.

Наиболее часто эффективность функционирования сложных систем связывают с понятием «системный гибридный интеллект» [3], которое получает новые смыслы при включении человека в сложноорганизованные среды. Техногенные среды ведут к новым формам интеграции человека с машиной, формируя гибридные и симбиотические формы естественного интеллекта, отличающиеся от классического интеллекта, возникшего в процессе жизнедеятельности человека в изолированных культурных средах и естественной среде жизнедеятельности. Это ведет к постановке задачи повышения его эффективности в процессе взаимодействия с компонентами искусственного интеллекта эргатической системы. Цель настоящей работы – рассмотрение некоторых возможных вариантов симбиотического объединения интеллекта человека-оператора с интеллектом технических систем и сред.

1 Интеллект и интеллектные симбионты в системно-психологических представлениях

Поиски способов усиления возможностей естественного интеллекта, а в более широком плане – человеческого ума, возможностей создания их искусственных аналогов, приобретают особое значение в связи с интенсивным развитием техники и технологий и пониманием ограниченности индивидуального человеческого разума [4, 5]. Развитие информационных технологий питает наблюдаемый в последнее десятилетие бум в области искусственного интеллекта. Вместе с тем по настоящее время не ясно, что представляет собой интеллект естественный.

Существование различий между людьми по умению решать задачи одного класса неоспоримо. Это позволило выдвинуть предположение о существовании в человеке особых ментальных структур, умственных способностей, отраженных в понятии «интеллект». Именно на этом предположении был основан самый известный классический тест для оценки коэффициента интеллекта (IQ, intelligence quotient) – шкала Д. Векслера, которая по настоящее время служит эталоном для оценки человеческого ума в его рациональных и культурно-лингвистических формах [6].

В современной интерпретации, предложенной в работах М.А. Холодной, интеллект – это форма организации когнитивного опыта человека, представленного в виде «накопленных» в ходе онтогенеза понятийных психических структур, степень сформированности которых определяет структурные характеристики субъективного пространства интеллектуального отражения. Основное назначение интеллекта по М.А. Холодной – построение особого рода репрезентаций происходящего, связанных с воспроизводством объективного знания о мире [7]. Отметим, что эта задача решается посредством создания и использования когнитивных инструментов [8, 9], которые должны быть достаточно удобны и эффективны для пользователя [10].

В классических, главным образом, факторных моделях интеллекта рассматривается его адаптивная функция по отношению к окружающей и внутренней средам. Определение интеллекта как некоторой способности, обуславливающей успешность адаптации индивида к новым условиям, является наиболее общим местом в моделях, использующих методологию классической научной рациональности [11].

В.Н. Дружининым сформулирован принцип, согласно которому трудность задачи определяет уровень интеллекта, необходимый для ее правильного решения [12, с. 14–25]. Фактор, обеспечивающий переработку сложной информации и детерминирующий индивидуальную продуктивность, В.Н. Дружинин называет «индивидуальным когнитивным ресурсом». Следствием этих положений является принцип: чем труднее задача, тем более высокий уровень развития интеллекта требуется для ее правильного решения.

В классическом подходе среда рассматривается главным образом как отдельный фактор, влияющий на формирование и проявления интеллекта, а не как его неотъемлемая часть. Эта отделенность интеллекта от среды создает иллюзии его независимости и локализации в субстрате организма человека.

При изучении интеллекта никто не обращает внимания на его активный, организующий характер при формулировании задач, их оптимизацию под когнитивные средства и возможности, имеющиеся у конкретного обладателя интеллекта. Естественный интеллект активен и избирателен по своей природе. Он упрощает среду деятельности до уровня, позволяющего ее операционализировать и тем самым активно преобразовывать в нужном направлении.

В модели интеллекта Д. Гилфорда показаны возможности человека по универсальному структурированию среды. Выделено 120 интеллектуальных способностей (позднее их число было увеличено до 150), каждая из которых связана с определенным классом задач, представленных в координатах: содержание, операция, продукт [13].

Р. Мейли выдвинул гипотезу о том, что структуру интеллекта составляют четыре фактора: доступной сложности, пластичности, целостности, беглости [14]. На основе проведенных исследований предложена «компонентная модель» интеллекта, в которой факторы трактовались как условия (компоненты) индивидуальных различий в выполнении разных интеллектуальных актов. Они могут относиться как к индивиду, так и к окружающей среде. Следовательно, структура интеллекта, включающая эти факторы, включает в себя структуру взаимодействия индивида со средой.

В теории множественного интеллекта Говарда Гарднера выделено девять типов интеллекта: лингвистический, логико-математический, визуально-пространственный, телесно-кинестетический, музыкальный, натуралистический, межличностный, внутриличностный и экзистенциальный [15]. Все виды интеллектов по Гарднеру равноценны, каждый представляет

собой особый способ взаимодействия человека с окружающей действительностью. Очевидно, что каждый интеллект в данной модели эффективен только по отношению к специализированной среде, отражающей соответствующие формы культуры.

К интеллектным симбионтам относятся различные виды интеграции интеллектуальной и когнитивной системы человека с различного рода физическими сущностями, позволяющими повысить эффективность возникающей системы при решении интеллектуальных задач. Такими объединениями могут быть системы гибридного и диффузного интеллектов, применение которых позволяет обеспечить эффективность выполнения сложных видов деятельности [16].

Гибридные модели связаны с разработкой практических принципов взаимной адаптации человека с техникой и условиями труда, созданием теории и методов синтеза систем адаптивного взаимодействия людей между собой и с интеллектуальной системой.

Термин «гибридный интеллект» (ГИ) был впервые введён В.Ф. Вендой в 1975 г. на конференции по семантическим вопросам искусственного интеллекта, а основы теории систем гибридного интеллекта изложены в изданном в 1977 г. сборнике по инженерной психологии [17].

Теория систем гибридного интеллекта построена на основе общих для всех видов систем законов. В качестве таковых В.Ф. Вендой предложены законы взаимной адаптации и трансформации систем. Взаимная адаптация акцентирует внимание на изменениях, которые претерпевают объекты, становясь компонентами системы, на закономерностях этих изменений в ходе становления, развития, существования, трансформации структур системы. Взаимная адаптация человека и компьютерной системы направлена на максимальное раскрытие индивидуальных способностей, компенсацию психофизиологических недостатков, учёт интересов лица принимающего решения. Этот процесс также ведёт к наиболее полному использованию возможностей вычислительной техники [3].

Принципиальное отличие методологии систем гибридного интеллекта от традиционной методологии инженерной психологии состоит в том, что вместо анализа вариантов и попытки выбрать из них оптимальный проводится синтез разных вариантов решений интеллектного объединения скрытых и непосредственных участников решения. Системы гибридного интеллекта рассматриваются как комбинированные системы, интегрально включающие в себя искусственный и естественный интеллекты.

2 Интеллект и организованность среды

Интеллект связан с миром задач, различающихся между собой сложностью решения, и может интерпретироваться с позиций концепций сложности. Выделяют «онтологическую» и «семиотическую» простоту/сложность. Под первой понимают сложность материального, физического мира, а под второй – оценку знаковых систем. Понятие интеллекта в большей мере связано с семиотической сложностью, хотя мир задач обусловлен и онтологической сложностью. Отношения между этими видами сложности и определяют средово-системный континуум, в котором порождается понятие «интеллект».

Таким образом, традиционное понимание интеллекта – как суммы локально принадлежащих когнитивному аппарату человека способностей (инструментальных возможностей искусственной системы в случае искусственного интеллекта) – должно быть заменено на интегральные свойства, обусловленные средой и действующей (живущей) в ней системой. Интеллект определяется в значительной мере степенью освоенности конкретной среды системой, действующей в ней, степенью воплощенности в нее.

Большинство исследователей сложного считают, что представления о сложном могут быть сформулированы в концептах множественности, динамического разнообразия, нелинейности, неравномерности, сложности самоорганизующихся систем. Эти же категории применимы и к понятию «интеллект».

Множественность рассматривается как многокомпонентность. Она относится к описанию сложных систем непрерывно эволюционирующих и изменяющихся. Сложная система в этой парадигме предстает как процесс бесчисленного усложнения ее сущностей, возникновения новых элементов как элементов для новых творений. Интеллект может быть представлен как свойство, воплощенное в сложную динамическую систему, позволяющее достигать результат, определяемый условиями задачи.

Множественность в концепциях динамического разнообразия дополняется качественной характеристикой – разнообразием. Разнообразие связано с асинхронным существованием в среде динамически существующих и сосуществующих систем и их распадающихся элементов, которые могут образовывать, в свою очередь, новые системные сущности.

Концепт неравномерности отражает принципиальную неравномерность распределения в пространстве одновременно существующих различных форм материи (энергии, вещества), ведущую к локальной самоорганизации и возникновению новых систем. Постулируется холистический характер мира, который разделяется на элементы только в процессе работы механизмов человеческого интеллекта и сознания.

Концепция сложности самоорганизующихся сред и систем отражает непрерывную динамику мира во всех его проявлениях, а интеллект в ней является эмерджентным свойством сложной системы, позволяющим последней эффективно решать задачи активного (формирование искусственной среды, созидающая деятельность) и пассивного (адаптация, приспособление к среде) существования в мире [18].

Организованность среды определяет возможности по ее освоению интеллектными системами. В случае низкого уровня организованности можно говорить о среде деятельности, а в высокоорганизованных средах – о содействующих системах. Интеллектуальные системы призваны снизить степень сложности среды, организовать ее в доступной для оператора системы форме.

3 Виды интеллектных симбионтов

Сложные (наделенные интеллектом) системы являются системами операционально закрытыми. Система одновременно является открытой и замкнутой по отношению к окружающей среде. Операциональная замкнутость означает селективность системы, наличие границы, упорядочивающей отношения системы со средой и окружающими системами. Система и среда проявляют взаимную активность. Среда меняет систему, но и система активно видоизменяет окружающую среду, вступая в коэволюцию с нею.

Сложность является возникающим и исчезающим феноменом, циклически порождаемым в циклах самоорганизации. Многие ее аспекты перекликаются с понятием интеллекта. Можно предположить, что интеллектуальные функции отражают некоторые общие принципы самоорганизации аутопоэтических систем, в частности, их способность активно изменять сложность среды [17]. Отсюда следует, что все аутопоэтические системы, в том числе и образуемые социальными коммуникациями, обладают воплощенными в них интеллектуальными способностями.

В таблице 1 приведены основные свойства интеллектных образований, возникающих в техногенных средах и эргатических системах использующих технологии искусственного интеллекта [16]. Акценты сделаны на отношениях элементов системы между собой, месте центра активности объединенной системы и отношениях объединяющихся систем между собой. Подчеркивается определенная независимость объединяющихся систем.

Дальнейшее развитие процессов интеграции искусственного и естественного интеллектов ведет к появлению новой формы интеграции – диффузного интеллекта, который является формой усиления когнитивной системы человека за счет программно-технических элементов сложноорганизованной информационно-коммуникативной среды.

Таблица 1 – Свойства интеллектных симбионтов

Интеллектное образование	Отношения между компонентами	Центр активности и управления, механизм	Отношения со средой деятельности, границы
Естественный интеллект	самоорганизация, аутопоэтическая система	субъективная реальность, сознание, эго-система человека	активное преобразование мира, границы динамично изменяются
Искусственный интеллект	фиксированная или переменная программно-аппаратная структура	программа, алгоритм в структурированной или структурируемой среде	реализация алгоритма, ситуативное управление, границы фиксированные
Гибридный интеллект	симбиоз, адаптация организованного и аутопоэтического компонентов к среде, объединения на макроуровне с приоритетом сознания	человек в структурированной среде	взаимная адаптация естественного и искусственного интеллектов, границы переменные
Диффузный интеллект	селективные связи на всех уровнях аутопоэтически организованной и организуемой среды и человека	возникает в организованной среде действительности, физической реальности и программной среды	синергетическое объединение субъективной реальности, границы формируются под задачу

4 Интеллект эргатических систем с искусственным интеллектом

Любая интеллектуальная эргатическая система представляет собой, в известной мере, автономную систему, осуществляющую с помощью оператора деятельность по достижению заданной цели в конкретной среде. Чем больше функций во взаимодействиях со средой без присутствия оператора может выполнять система, тем более сложной и интеллектуальной она кажется наблюдателю. Интеллект искусственной технической системы возникает и проявляется в условиях организованной сложности в отличие от живых систем, активно организующих среду. Система искусственного интеллекта эргатической системы является системой организованной сложности, в которой взаимодействие элементов и функциональных областей строятся на неслучайных отношениях, заданных проектировщиком в некоторых контекстах, которые непрерывно меняются, следуя логике эволюции задачи, вызываемой оператором.

Функциональная сложность эргатической системы может быть оценена по аналогии с когнитивной сложностью человека по количеству и типам решаемых задач. Ее сложность (и интеллектуальность) может определяться в привязке к конкретным решаемым задачам, к сложности программных средств, используемых в управляющем компьютере системы, с объемом и степенью дифференцированности контактов системы со средой и оператором. В качестве критерия сложности (интеллектуальности) может использоваться длина выполняемого алгоритма и количество циклов, позволяющих его реализовать.

Перспективным методом определения интеллектуальности эргатической системы является метод, учитывающий свойства культурного поля проектного коллектива, участвующего при создании системы. Чем шире спектр специалистов и более высокая междисциплинарная нагрузка, тем система сложнее и интеллектуальнее.

Появление эргатических систем и сред с искусственным интеллектом требует рассматривать вопросы взаимодействия естественного интеллекта оператора системы с искусственным интеллектом, воплощенным в эргатической системе/среде.

Можно дать ряд общих определений интеллекта и интеллектных симбионтов, действующих в эргатической системе и возникающих в процессе объединения искусственного и естественного интеллектов и среды деятельности.

1) Интеллект есть форма активной самоорганизации сложной системы, вовлекающая погруженного в среду пользователя в созидающие изменения.
2) Интеллект связан со средой как механизм ее организации, обеспечивающий процессы самоорганизации системы им наделенной.
3) Интеллект распределен в континууме «система-среда» и воплощен в циклах самоорганизации системы, действующей в среде.
4) Естественный интеллект представляет собой организующую сложность в организуемой среде, а искусственный интеллект – организованную сложность в организованной среде.
5) Гибридный и диффузный интеллекты представляет собой симбионты, включающие организующую и организованную сложность систем в их синергетическом и симбиотическом взаимодействиях как инструмент достижения цели актором в организованной и организуемой средах.
6) Интеллект отражает результаты селекции и применения самоорганизующейся системой эффективных способов достижения цели в организованной среде.

Заключение

Интеллектные симбионты являются проявлением различных форм межсистемных объединений различной материальной природы, в которых проявляется активная форма преобразования и структурирования среды.

Гибридные формы интеллектных симбионтов представляют собой объединения, не нарушающие системную целостность составляющих их симбионтов. При этом совместное функционирование симбионтов порождает новые, полезные для гибридной системы, интеллектуальные свойства.

При проектировании сложных эргатических систем важно правильно выбрать методы и технологии их интеллектуализации, которые в основном зависят от среды деятельности. Попытка полной автономизации и автоматизации системы связана со степенью организованности среды. При работе в условиях организованных сред целесообразно использование методов распределенного искусственного интеллекта, а в слабоструктурированных средах – включение и усиление возможностей естественного интеллекта.

При создании сложных эргатических систем необходимо учитывать эмерджентные свойства, возникающие вследствие сложной организации среды. Это эффекты интеллектуализации, кооперативных и гибридных форм интеллектов и их симбионтов. Включение в сложные техногенные среды человека также связано с эффектами модификации его личности и когнитивных систем, что ведет к возникновению техно-психических симбиозов. Например, память человека заменяется памятью технической системы, функции внимания и поиска информации – работой поисковых систем и т. д.

Материалы настоящего исследования могут быть использованы при создании систем интерфейсов сложных эргатических систем, включающих симбиотические объединения аутопоэтического типа, возникающие в распределенных эргатических системах с социальными формами управления и взаимодействия с операторами.

Благодарности

Выражаем признательность сотрудникам Института проблем управления сложными системами РАН, высказавшим замечания и давшим рекомендации по усовершенствованию данной статьи.

Работа над статьей частично поддержана грантом РГНФ по заявке № 13-08-00161.

Список литературы

[1] Сергеев С.Ф. Методология проектирования тренажеров с иммерсивными обучающими средами // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. - 2011. - № 1 (71). - С. 109-114.

[2] Сергеев С.Ф. Методология создания мехатронных систем с искусственным интеллектом // Известия ТулГУ. Технические науки: В 3 частях. - Ч. 1. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. - Вып. 5. - С. 245-249.

[3] Венда В.Ф. Системы гибридного интеллекта: Эволюция, психология, информатика. - М.: Машиностроение, 1990. - 448 с.

[4] Сергеев С.Ф. Психологические основания проблемы искусственного интеллекта // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2011. - № 7. - С. 2-6.

[5] Сергеев С.Ф. На пути от биоорганизации к киберорганизации: человек в тени искусственного интеллекта // Естественный и искусственный интеллект: методологические и социальные проблемы / Под ред. Д.И. Дубровского и В.А. Лекторского. - М.: Канон+, РООИ Реабилитация, 2011. - С. 48-59.

[6] Wechsler D. Wechsler Adult Intelligence Scale. - New York: The Psychological Corporation, 1955.

[7] Холодная М.А. Когнитивные стили. О природе индивидуального ума: Учебное пособие. - М.: ПЕР СЭ, 2002. - 304 с.

[8] Сергеев С.Ф. Инструменты обучающей среды: интеллект и когнитивные стили // Школьные технологии. - 2010. - № 4. - С. 43-51.

[9] Сергеев С.Ф. Инструменты обучающей среды: стили обучения // Школьные технологии. - 2010. - № 5. - С. 19-27.

[10] Сергеев С.Ф. Когнитивная педагогика: пользовательские свойства инструментов познания // Школьные технологии. - 2011. - № 2. - С. 35-41.

[11] Степин В.С. Классика, неклассика, посттнеклассика: критерии различения // Постнеклассика: философия, наука, культура. - СПб: Издательский дом Міръ, 2009. - С. 249-295.

[12] Дружинин В.Н. Психология общих способностей - СПб: Питер, 1999. - 368 с.

[13] Гилфорд Д. Три стороны интеллекта // Психология мышления. - М.: Прогресс, 1965. - С. 434-437.

[14] Meili R. Analytischer Intelligenztest (AIT) / Verlag H. Huber. - Bern, Stuttgart, Toronto, 1971. - 119 pp.

[15] Гарднер Г. Структура разума. Теория множественного интеллекта. - М.: Вильямс, 2007. - 512 с.

[16] Сергеев С.Ф. Интеллектные симбионты в эргатических системах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2013. - № 2 (84). - С. 149-154.

[17] Инженерная психология: Теория, методология, практическое применение. Отв. ред. Б.Ф. Ломов, В.Ф. Рубахин, В.Ф. Венда. - М., 1977. - 304 с.

[18] Сергеев С.Ф. Проблема сложности в эргатических системах // Материалы конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» (УТЭОСС-2012). - СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. - С. 802-805.

[19] Князева Е.Н. Темпоральная архитектура сложности // Синергетическая парадигма. Синергетика инновационной сложности. – М.: Прогресс-Традиция, 2011. - С. 66-86.

[20] Сергеев С.Ф., Заплаткин Ю.Ю., Захаревич М.А. Механизмы редукции в самоорганизующихся мирах циклических коммуникаций // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIV Международной конференции (19–22 июня 2012 г., Самара, Россия). - Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. - С. 131-137.

СОВРЕМЕННАЯ АРХИТЕКТУРА БОРТОВЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ВЫСОКОМОБИЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

А.З. Асанов[1], Д.Х. Валеев[2], А.С. Савинков[2]

[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет
423812, Набережные Челны, проспект Сююмбике, 10А, Россия
askhat.asanov@yandex.ru
тел: +7 (8552) 38-34-05, факс: +7 (8552) 58-88-94
[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 transport complexes. Discusses the use of mechatronic modules, hierarchies of control functions in the complex ergonomical systems, especially the levels of government. Proposes mechanisms for creation of distributed decentralized on-Board information and control systems.

Введение

Тенденции развития транспортных комплексов (типичными, но неединственным представителями, которых являются современные грузовые автомобили), опыт разработки новой техники зарубежными фирмами показывают, что одну из ведущих ролей в обеспечении конкурентных преимуществ играют автоматизация и интеллектуализация основных функций управления как процессами в агрегатах и узлах, так и процессом движения транспортного комплекса (ТК) в целом. Применение новых информационно-управляющих и оптимизационных процедур приводит к тому, что объемы информации, перерабатываемой на борту высокомобильных ТК, постоянно растут, алгоритмы функционирования бортовых систем значительно усложняются. Возникает потребность в системной интеграции бортовых информационных, контролирующих, диагностирующих и управляющих локальных комплексов и подсистем ТК, возникает потребность в организации полноценной бортовой информационно-управляющей системы[1] (БИУС) [1]. Основными целями функционирования БИУС являются обеспечение максимальной безопасности движения, обеспечение наиболее эффективных режимов эксплуатации агрегатов и систем ТК (далее автомобиля) и транспортного комплекса в целом, помощь в принятии решений и создание комфортных условий работы для водителя ТК.

Условия и особенности эксплуатации БИУС ТК своеобразны и сложны:

- работа большого числа локальных автоматических/полуавтоматических исполнительных подсистем в реальном масштабе времени;
- функционирование ЧМС в условиях недостаточности априорной информации о высокодинамичной внешней среде;

[1] Бортовая информационно-управляющая система (БИУС) − компьютерная (цифровая) система контроля и управления агрегатами и системами ТК и транспортным комплексом в целом, обеспечивающая принятие решений в реальном времени на борту ТК.

- влияние большого числа трудно учитываемых нестационарных факторов и факторов субъективного характера на поведение водителя, автомобиль и его системы;
- изменчивость целей и критериев качества управления автомобилем, обусловленные дорожными условиями, техническим состоянием автомобиля, психофизиологическим состоянием водителя и многое другое;
- непрерывный режим функционирования;
- высокие требования по надежности и безопасности функционирования;
- необходимость эффективного взаимодействия водителя и БИУС для быстрого и корректного разрешения нештатных ситуаций;
- эксплуатационные и инструментальные особенности.

Используемые сегодня архитектуры бортовых систем управления и передачи данных не удовлетворяют в полной мере всем этим требованиям. В статье предлагается новая концепция архитектуры[2] БИУС современных высокомобильных транспортных комплексов, которая призвана обеспечить высокую функциональность и надежность таких систем.

1 Элементы системы

Бортовая информационно-управляющая система (БИУС) ТК представляет собой комплекс средств для автоматической оценки состояния ТК, его основных агрегатов, для оценки параметров движения, для информирования водителя об этих состояниях и выработки управляющих воздействий на исполнительные механизмы автомобиля в процессе выполнения функциональных задач. Принцип работы БИУС в простейшем варианте заключается в следующем. Сигналы с датчиков, установленных на транспортном комплексе, поступают в вычислитель/анализатор, который формирует заключение и выдает его в виде информации о состоянии контролируемого объекта водителю и локальным автоматическим исполнительным системам.

По своей структуре БИУС должна состоять из следующих элементов:

1) комплекта датчиков, вырабатывающих информацию об объектах наблюдения;
2) преобразователей, принимающих сигналы от датчиков и преобразующих их в вид, удобный для дальнейшей обработки;
3) микропроцессоров/контроллеров/анализаторов, проводящих оценку полученных данных контроля по заданной программе и выдающих конечные результаты в виде электронных сигналов;
4) устройств выдачи/отображения информации, фиксирующих и передающих результаты анализа в кабину водителя и локальные исполнительные системы автомобиля.

Для оценки состояния и поведения транспортного комплекса используется информация, получаемая с датчиков, как правило, аналогового и импульсного типов, имеющих различные диапазоны измерения. Многие из этих датчики имеют нелинейную характеристику. Используются также дискретные датчики, чаще всего релейного типа.

Для подключения датчиков к микропроцессорам/контроллерам, выполняющим сбор и обработку информации с датчиков, а также формирующие информационные сообщения и управляющие воздействия на исполнительные механизмы, необходимо выполнить обработку сигналов. К обработке сигналов относятся нормирование сигнала, т.е. приведение его к определенному значению, фильтрация, линеаризация, аналого-цифровое преобразование и другие виды обработки.

---

[2] Архитектура бортовой информационно-управляющей системы − концепция, определяющая модель, структуру, выполняемые функции и взаимосвязь компонентов информационно-управляющей системы

Из анализа возможных схем построения систем датчиков, преобразователей, вычислителей БИУС можно сделать вывод о целесообразности построения и использования мехатронных модулей (ММ). Каждый ММ выполняется в виде законченного модуля, содержащего непосредственно первичный преобразователь (датчик), устройство преобразования сигнала и вычислитель [2]. Для управления исполнительными устройствами также создается модуль, в состав которого входит вычислитель, усилитель-преобразователь и исполнительный механизм. Структурные схемы модулей показаны на рисунке 1. Каждый модуль выполняется в виде специализированного контроллера, содержащего вычислительное устройство и преобразователь.

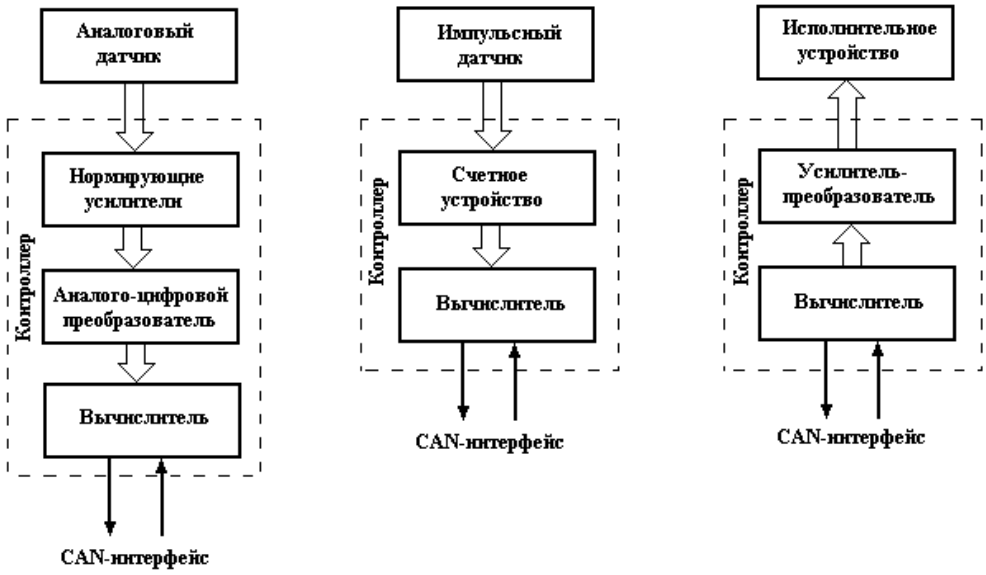


Рисунок 1 – Мехатронные модули

При использовании дискретных датчиков не требуется сложных преобразований и, поэтому, рационально их подключить к ММ, который физически расположен ближе к дискретному датчику. Это потребует использования контроллера с несколькими входами. В общем случае все ММ автомобиля по функциональному назначению могут быть отнесены к следующим основным группам:

- системы управления двигателем;
- систем управления трансмиссией и агрегатами;
- систем управления ходовой частью, в т.ч. и тормозными системами;
- систем управления оборудованием кабины;
- систем диагностики/самодиагностики узлов и агрегатов автомобиля.

Использование концепции мехатронных модулей позволяет в значительной степени абстрагироваться в процессе проектирования сложного объекта (БИУС) от исполнительной и информационных частей (считая, что они компонуются из готовых «кубиков» - мехатронных модулей), а сосредоточить основное внимание на разработке компьютерного управления [3].

2 Структура и логическая организация БИУС

Современные грузовые автомобили 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 [1]. Обобщенная структурная схема информационно-управляющей системы, реализующей многоуровневое управление, приведена на рисунке 2. Распределение функций управлений по уровням (сценарный, ситуационный, локальный) возможно осуществить программно.

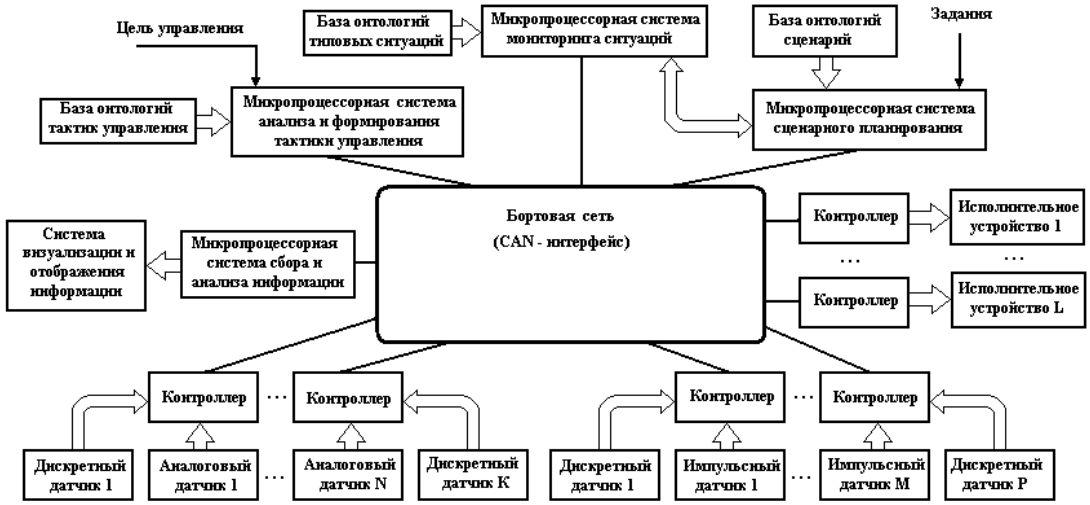


Рисунок 2 – Обобщенная структурная схема БИУС

С учетом большого объема данных, передаваемых через CAN-интерфейс автомобиля в реальном времени, требований высокой надежности и безопасности функционирования очевидно необходимо использование совокупности шин данных (рисунок 3). На рисунке применены обозначения: ЦБУ – центральный блок управления, БАФ – блок(библиотека) автомобильных функций; БДи - 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; ММа n (n=1…N), ММа f (f=1…F) – мехатронные модули агрегатов автомобиля; ММп/с p (p=1..P) мехатронные модули подсистем автомобиля; ММт l (l=1…L) – мехатронные модули тормозной системы; ММ торм сист – головой мехатронный модуль тормозной системы; ММ АКПП – мехатронный модуль автоматической коробки переключения передач.

Использование БИУС грузовых автомобилей позволяет решить множество дополнительных задач оптимизации режимов работы агрегатов автомобиля и автомобиля в целом, обеспечить большую безопасность движения, решать задачи контроля и текущего диагностирования состояния агрегатов и систем автомобиля. Так, интеллектуальное управление скоростью грузового автомобиля [4] является перспективным с точки зрения экономии топлива за счет выбора наилучшего скоростного режима: как показывают анализ и моделирование отдельных режимов − экономия топлива может достигать 5−7 %. Одновременно с этим решается задача существенного уменьшения психофизического утомления водителя автомобиля.

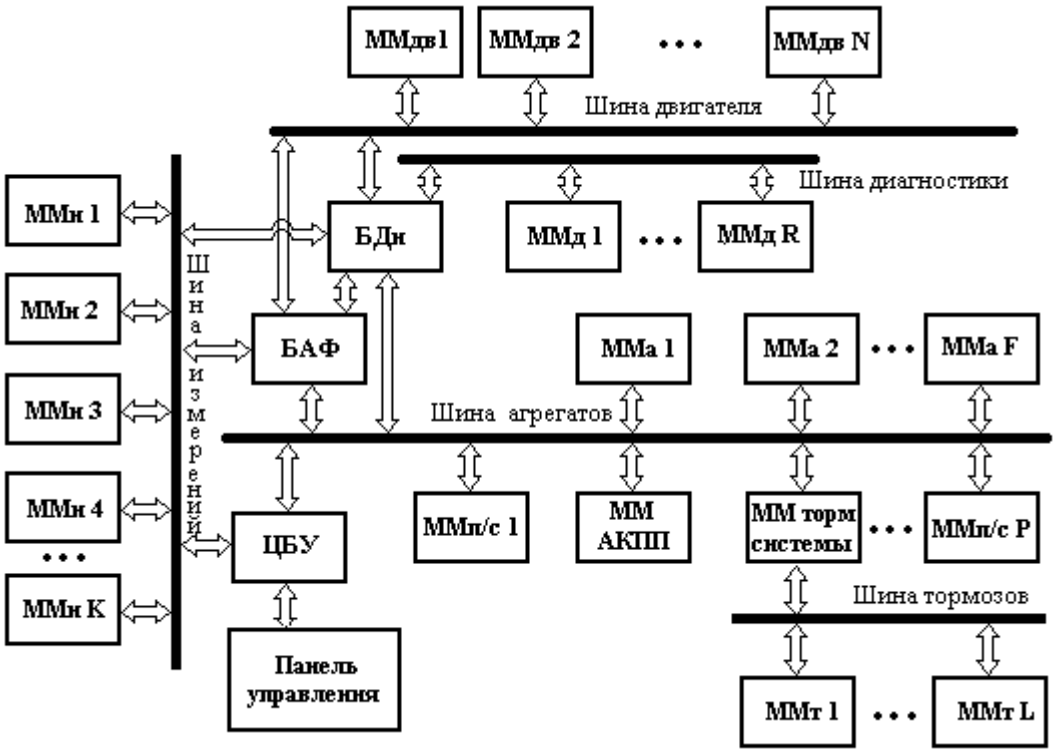


Рисунок 3 – Архитектура сетевого интерфейса БИУС

Логическая организация БИУС автомобиля, в принципе, может быть различной. Но очевидно, что структура с центральной (однопроцессорной) организацией вряд ли возможна из-за большой сложности системы, многофункциональности, повышенных требований по надежности функционирования и т.д.

Использование в БИУС иерархической организации, когда в систему входит один центральный процессор и ряд подчиненных ему процессоров нижнего уровня, дает целый ряд преимуществ: распараллеливание решения задач управления позволяет существенно повысить быстродействие; обеспечивает возможность управления сложными объектами (агрегатами автомобиля) в режиме реального времени; обеспечивает более высокую надежность системы. Но наряду с этим, усложняется процедура решения задач управления: возникают сложности разбиения общей задачи управления на ряд отдельных подзадач, сложности увязки этих подзадач между собой; сложности создания алгоритмического и программного обеспечения такой иерархической системы компьютерного управления.

Развитие компьютерных технологий и, прежде всего, сетевых технологий позволяет в настоящее время перейти к созданию децентрализованных распределенных систем компьютерного управления [3], представляющие собой множество полностью равноправных процессоров, объединенных в единую систему управления с помощью сетевого канала связи. Такая организация БИУС имеет целый ряд преимуществ: отсутствует центральный процессор, выход которого из строя приводит к отказу всей БИУС; отказ любого процессора не приводит к катастрофическим последствиям − задачи, решаемые отказавшим процессором, могут быть перераспределены/размещены на работоспособных процессорах. Таким образом, помимо параллельности решения задач управления, такая БИУС будет обладать высокой надежностью и отказоустойчивостью. Информационный обмен между отдельными подсистемами БИУС, дат-

чиками, исполнительными системами может осуществляться по стандартным сетевым протоколам обмена.

Заключение

Постоянное усложнение современных транспортных комплексов, повышение требований безопасности, экологичности и эффективности требуют использования развитых бортовых информационно-управляющих систем (БИУС). Потенциально, архитектура БИУС может быть различной. Но требования повышенного быстродействия, надежности и многофункциональности выдвигают на первый план необходимость создания распределенных децентрализованных бортовых информационно-управляющих систем.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-08-00311).

Список литературы

[1] Асанов, А.З. Интеграция и интеллектуализация бортовых систем управления большегрузными автомобилями [Текст] / А.З. Асанов, Д.Х. Валеев, А.С. Савинков // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. XIV Междунар. конф. Самара : СамНЦ РАН, 2012. − С. 524–531.

[2] Мишулин Ю.Е. Аппаратная реализация бортовой информационно-управляющей системы транспортного средства [Текст] / Ю.Е. Мишулин, Е.Ю. Мишулин, В.А. Шахнин // Фундаментальные исследования. 2012. № 3. С. 113 − 119.

[3] Каляев И.А., Мельник Э.В. Децентрализованные системы компьютерного управления. [Текст] − Ростов н/Д: Изд. ЮНЦ РАН, 2011. − 196 с.

[4] Асанов А.З. Структурный синтез системы интеллектуального управления скоростью магистрального автомобиля. [Текст] − В монографии «Интеллектуальные системы управления» под ред. акад. С.Н. Васильева. − М.: Машиностроение, 2010. −544 с. С. 197 − 203.

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ДИАГНОСТИКЕ ЗАБОЛЕВАНИЙ ПО СУММАРНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГОЛОВНОГО МОЗГА ЧЕЛОВЕКА

В.И. Короченцев[1], А.Н. Розенбаум[2], И.В. Гарасев[1]

[1]Дальневосточный Федеральный Университет
Владивосток, ул. Суханова, 8, Россия
ga_i_uzt@mail.ru
тел. (423) 245-09-82

[2]Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
Владивосток, ул. Радио, 5, Россия
rozen@iacp.dvo.ru
тел. (423) 299-42-20

Ключевые слова: *диагностика, коррекция здоровья, ряд Фурье, интегральные уравнения*

Abstract
The paper presents a mathematical model of functional topical diagnosis of the human body based on the analysis of rhythmic activity in the brain. The methods for the regularization of summing Fourier series and solving the Fredholm integral equation of the 1st kind.

Введение

«Метод изучения системы человека тот же, как и всякой другой системы – разложение на части, изучение значения каждой части, изучение связи части, изучение соотношения с окружающей средой и, в конце концов, понимание, на основе всего этого, ее общей работы и управления ею» (академик И. П. Павлов).

Большинство современных методов функциональной диагностики находится на уровне разложения на части (подсистемы) и изучения значения каждой части. Однако, центральная нервная система (ЦНС) несет в себе возможности представительства и регулировки не столько органов, сколько функций, осуществляемых, как правило, этими самыми органами.

В монографии [1] проанализированы недостатки, существующие в современной функциональной диагностике организма. Предложен метод функционально-топической диагностики дисфункций внутренних органов человеческого организма на основе анализа ритмической активности головного мозга. На основе многолетних экспериментальных исследований предложена модель неспецифической активирующей системы мозга на основе осциллирующих элементов как ряд многочастотных осцилляторов с детерминированным набором частот. Построена частотная матрица представительства «схем тела», совмещенная с соматическими координатами, которую авторы называют сегментарной матрицей (СМ).

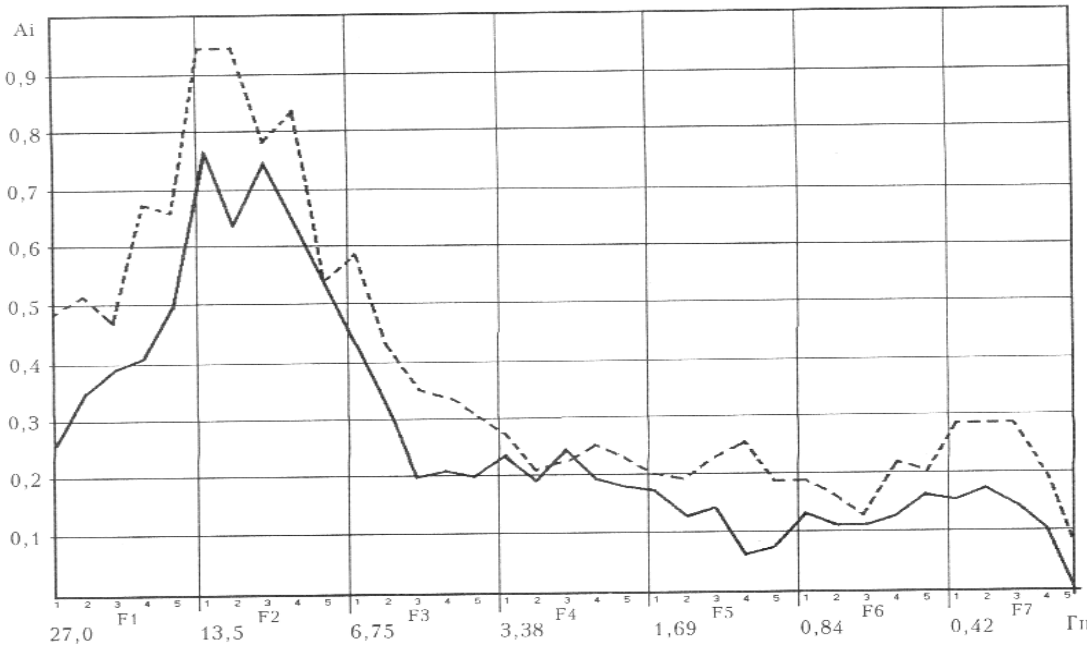
На основе предложенного подхода получена топография интерорецепторов различных внутренних органов в системе пространственно-частотных координат СМ.

Важнейшим признаком активности мозга является наличие достаточно устойчивых периодических процессов, формирующих пространственную организацию биопотенциалов. Последнее позволяет рассматривать теорию колебаний и волн как механизм колебательно-волновой природы в управляющей функции центральной нервной системы.

Предлагаемый подход и основные результаты исследования

На рисунке 1 приведен типичный график экспериментального спектра, взятого из монографии [1].

Очевидно, для оперативной работы с многочисленными графиками, снятыми с пациентов [2] необходима математическая модель, достаточно точно описывающая экспериментальные графики.



Время интегрирования Т=160 с; по оси ординат – амплитуда спектральной оценки в отн.ед.; по оси абсцисс – центральные частоты полосовых фильтров от 27 до 0,2 Гц; пунктирная линия – левое полушарие, сплошная линия – правое полушарие.

Рисунок 1 – График огибающей функции спектральных оценок магнитоэнцефалограммы A*i* у испытуемого А-ва в спокойном состоянии с закрытыми глазами

Один из возможных подходов к созданию математического аппарата приведен в настоящей работе.

Предположим что функция $f(\omega)$ может быть разложена по асимптотической последовательности $\{\varphi_n(\omega)\}$:

$$f(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \varphi_n(\omega),$$

где ω – текущая частота.

Частную сумму этого ряда обозначим через $S_N(\omega)$, а точность аппроксимации будем характеризовать минимаксным $\Delta_N(\omega)$ в метрике L, либо среднеквадратичным критериям $\delta_N(\Omega)$ в метрике L_2:

$$\Delta_N(\omega) = \left| f(\omega) = S_N(\omega) \right| \pi ;$$

$$\delta_N(\omega) = \int_0^{\Omega} \left| f(\omega) - S_N(\omega) \right|^2 d\omega .$$

Из общей теории асимптотики очевидно, что простота ряда характеризуется числом членов N, а локальность величиной интервала оценки Ω. Рассмотрим взаимосвязь величин, $\Delta_N(\omega)$, $\delta_n(\omega)$, основываясь на известных свойствах асимптотических разложений. При заданном малом значении Ω, разложение в конечный ряд $S_N(\omega)$ вначале сходится при росте числа членов

N. Если зафиксировать *N*, то точность и величина области **Ω** могут ухудшаться. Рассмотрим примеры суммирования радов в метриках *L* и L_2. Для определенности выберем функцию $\varphi_n = \mathbf{cos}(n\omega t)$, где ω – круговая частота, *t* – время.

Численное суммирование рядов Фурье, когда коэффициенты a_n известны приближенно в метрике L_2. Если вместо a_n будем брать коэффициенты $C_n=a_n+E/n$ для n≥1 и $C_0=a_0$, получим ряд:

(1) $$f_2(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos n\omega t .$$

Коэффициенты этих рядов в метрике L_2 отличается на величину:

$$\delta = \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} (C_n - a_n)^2 \right\}^{1/2} = \varepsilon \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \right\}^{1/2} = \varepsilon \sqrt{\frac{\pi^2}{6}} .$$

Ошибку δ путем выбора ε можем сделать сколь угодно малой. Однако, разность Δ(ω): $\Delta(\omega) = f_2(\omega) - f_1(\omega) = \varepsilon \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos n\omega$ может быть сколь угодно большой при ω →0, так как последний ряд расходится. То есть, если уклонение суммы ряда брать в метрике *L*, суммирование ряда Фурье не устойчиво и относится к классу некорректно поставленных задач математической физики. Если уклонение функций $f(\omega)$оценивать в метрике L_2, то задача суммирования рядов Фурье с приближенно заданными коэффициентами будет корректно поставленной.

Действительно, по теореме Парсеваля:

$$\left\{ \int_0^{\pi} [f_1(\omega) - f_2(\omega)]^2 \right\}^{1/2} = \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi}{2} (c_n - a_n \right\}^{1/2} = \varepsilon_1 \sqrt{\frac{\pi}{2}} .$$

Поэтому подбирая ε_1, можно сделать уклонение функций сколь угодно малым. То есть задача имеет единственное и устойчивое решение (корректная задача).

Для воздействия на мозг человека корректирующим излучением магнитного поля индукции $B(t)$ во времени *t*, можно предложить следующее интегральное уравнение Фредгольма первого рода с ядром $K(\omega, t)$. Предполагается, что функция $K(\omega, t)$ по переменной t(времени) является непрерывной с непрерывной частной производной $\frac{\partial K(\omega, t)}{\partial t}$.

Если экспериментально наблюдаемое излучение $f(\omega)$ магнитного или электрического поля коры головного мозга неоднородно, и аппроксимируется в пространстве L_2 функцией $f_2(\omega)$, то пропуская это поле через электронную аппаратуру, мы получаем временную функцию $U(t)$. Если преобразователь электронной системы линеен, то функциональная связь между $U(t)$ и $f(\omega)$ дается формулой:

(2) $$U(t) = \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} K(\omega, t) f(\omega) d\omega .$$

$K(\omega,t)$ так называемая аппаратная функция, известная из физической структуры прибора. Она представляет экспериментальный спектр от частоты ω, если на вход прибора подаем мотохраматическое излучение $f(\omega)$ единичной интенсивности. Математически это дельта-функция Дирака в границах спектра Ω_1, Ω_2. Если известна функция $U(t)$, определение спектральной функции $f(\omega)$ сводится к интегральному уравнению. Интегральное уравнение Фредгольма первого рода относится к некорректным задачам математической физики. Его решение проводим одним из методов регуляризации.

Заключение

Используя формулу (1) можно создать математическую модель диагностики заболеваний человека.

Формула (2) может быть использована для вычисления функции $U(t)$, т.е. коррекции здоровья человека магнитным $B(t)$ или электрическим $E(t)$ полем.

Использование предложенных математических моделей позволит повысить надежность и достоверность диагностики организма.

Список литературы

[1] *Шабанов, Г.А.* Функционально-топическая диагностика организма человека на основе анализа ритмической активности головного мозга / Г.А. Шабанов, А.Л. Максимов, А.А. Рыбченко. - Владивосток: Дальнаука. 2011. - 206 с.

[2] *Короченцев, В.И.* Проблемы исследования эффектов воздействия ультразвукового излучения на организм человека / В.И. Короченцев, В.Т. Коваль, Г.А. Шабанов, А.А. Рыбченко, А.И. Волков, И.В. Гарасев // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. №9. - С. 82-84.

CONTROL AND MEASURING IN COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

УПРАВЛЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

УПРАВЛЕНИЕ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

ПОЛИЭДРАЛЬНАЯ ПАРАДИГМА ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ

Н.Б. Филимонов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, Россия
nbfilimonov@mail.ru
тел: +7 (499) 289-55-10

Ключевые слова: *оптимизация процессов управления, задачи АКОР, полиэдральные функции, критерий Чебышева, полиэдральная оптимизация, полиэдральное программирование.*

Abstract
Evolution criterion bases of problems of optimum control is discussed. The singularities of methodology of square-law optimization are analyzed. Retrospective and logic of formation of polyhedral optimizing paradigm in control tasks are shown.

Введение

В современной теории автоматических систем доминирует оптимизационная парадигма качества процессов управления, суть которой выражает программный манифест Я.З. Цыпкина: «*Оптимизировать все, что оптимизируется, а что не оптимизируется, сделать оптимизируемым*». Начиная с 60-х гг. прошлого столетия, широкое распространение получили *интегральные квадратичные критерии качества процессов управления*. На их основе в работах Калмана (R.E. Kalman) и А.М. Летова был заложен фундамент *теории аналитического конструирования оптимальных регуляторов* (АКОР), которая до настоящего времени пользуется огромной популярностью.

Вместе с тем, известно также критическое отношение к АКОР видных ученых [1]: В.В. Солодовникова, Н.Н. Моисеева, Я.З. Цыпкина, С.В. Емельянова, С.К. Коровина, А.А. Первозванского, А.А. Колесникова, Беллмана (R.E. Bellman), Уонэма (W.M. Wonham), а также самих основоположников данной теории - Калмана (R.E. Kalman) и А.М. Летова. Критике подвергалась критериальная база АКОР - отсутствие у интегральных квадратичных критериев ясного физического смысла, невозможность оценки локальных свойств динамических процессов, а также учета прямых ограничений на управляющие и фазовые переменные.

Кроме того, инженерную ценность методологии АКОР ставят под сомнение результаты решения так называемой *обратной задачи АКОР*, согласно которой любая асимптотически устойчивая замкнутая автоматическая система (даже со сколь угодно неудовлетворительным качеством переходных процессов) является оптимальной в смысле некоторого интегрального квадратичного критерия качества. Данные обстоятельства существенно ограничивают возможности инженерных приложений методологии АКОР.

В докладе обсуждается альтернатива теории АКОР – теория полиэдральной оптимизации дискретных процессов управления.

1. Полиэдральные критерии качества процессов управления

Рассмотрим класс динамических объектов управления, описываемых векторным разностным уравнением состояния:

(1) $\boldsymbol{x}(t+1) = \boldsymbol{f}(t, \boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t))$,

где $t \in \mathfrak{I}$ - дискретное время; $\mathfrak{I} = [0 : T-1] \subset \mathbf{Z}_+$ - интервал управления; $T \geq 1$ - конечный (терминальный) момент времени; $\boldsymbol{x} = \mathrm{col}\,(x_1, x_2, \ldots, x_n) \in \mathbf{X} = \mathbf{R}^n$ - вектор переменных состояния; $\boldsymbol{u} = \mathrm{col}\,(u_1, u_2, \ldots, u_r) \in \mathbf{U} = \mathbf{R}^r$ - вектор управляющих переменных; $\boldsymbol{f}: \mathfrak{I} \times \mathbf{R}^n \times \mathbf{R}^r \to \mathbf{R}^n$; $\mathbf{X}$ - пространство состояний; $\mathbf{Z}_+$ - множество неотрицательных целых чисел.

В основу теории полиэдральной оптимизации процессов управления положены полиэдральные конструкции выпуклого анализа - полиэдральные функции и полиэдральные нормы.

Полиэдральная функция $f: \mathbf{X} = \mathbf{R}^n \to \mathbf{R}$ - это функция, надграфик которой является выпуклым полиэдром. Важнейшим конструктивным свойством любой полиэдральной функции $f(\boldsymbol{x})$ является возможность ее представления в виде функции поточечного максимума:

$$f(\boldsymbol{x}) = \bigvee_{i=1}^{N} \varphi_i(\boldsymbol{x}) = \max\ \{\varphi_1(\boldsymbol{x}), \varphi_2(\boldsymbol{x}), \ldots, \varphi_N(\boldsymbol{x})\},$$

где $\varphi_i(\boldsymbol{x})$ - линейные базисные функции:

$$\varphi_i(\boldsymbol{x}) = a_{i0} + \langle \boldsymbol{a}_i, \boldsymbol{x} \rangle, \quad a_{i0} \in \mathbf{R}, \ \boldsymbol{a}_i \in \mathbf{X}, \ i = \overline{1, N}\ .$$

Полиэдральная норма - это норма, являющаяся полиэдральной функцией координат. К классу полиэдральных норм относится, например, т.н. кубическая (чебышевская) норма:

$$\|\boldsymbol{x}\|_\infty = \max_{1 \le i \le n} |\, x_i \,|.$$

Конструкции критериев качества процессов управления должны комплексно отражать характер движения объекта к целевому состоянию $\boldsymbol{x}^*$ с точки зрения динамического качества управляемых движений и ресурсных затрат.

Введем в рассмотрение величины:

$$\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{x}^*, \quad \Delta\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{x}(t+1) - \boldsymbol{x}(t), \quad \Delta\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{u}(t+1) - \boldsymbol{u}(t),$$

и выберем некоторые полиэдральные нормы:

$$H_\varepsilon : \mathbf{X} \to \mathbf{R}; \quad H_{\Delta x} : \mathbf{X} \to \mathbf{R}; \quad H_u : \mathbf{U} \to \mathbf{R}; \quad H_{\Delta u} : \mathbf{U} \to \mathbf{R}.$$

Тогда свойство процесса управления в текущий момент времени можно характеризовать показателями точности управления $H_\varepsilon(\boldsymbol{\varepsilon}(t))$, $H_{\Delta x}(\Delta\boldsymbol{x}(t))$ и затрат на управление $H_u(\boldsymbol{u}(t))$, $H_{\Delta u}(\Delta\boldsymbol{u}(t))$, имеющими *полиэдральную структуру*.

В качестве примера приведем следующие варианты данных показателей:

- *полиэдральные показатели точности управления*:

$$P(t) = \max\ \{\lambda_\varepsilon(t) H_\varepsilon(\boldsymbol{\varepsilon}(t)), \lambda_{\Delta x}(t) H_{\Delta x}(\Delta\boldsymbol{x}(t))\},$$

- *полиэдральные показатели затрат на управление*:

$$E(t) = \max\ \{\lambda_u(t) H_u(\boldsymbol{u}(t)), \lambda_{\Delta u}(t) H_{\Delta u}(\Delta\boldsymbol{u}(t))\}.$$

Здесь $\lambda_\varepsilon(t) \ge 0$, $\lambda_{\Delta x}(t) \ge 0$, $\lambda_u(t) \ge 0$, $\lambda_{\Delta u}(t) \ge 0$ - весовые коэффициенты, которые, в частности, могут иметь вид степенных функций: $C_\nu t^\nu$, $\nu \in \mathbf{Z}_+$, $C_\nu = \text{const}$.

Следует подчеркнуть, что полиэдральные показатели $P(t)$ и $E(t)$ привязаны к моменту времени t, т.е. являются *точечными показателями*.

Из введенных точностных и ресурсных показателей можно формировать различные *полиэдральные критерии качества процесса управления*, например, следующего вида:

- полиэдральный терминальный критерий (*майеровского* типа):

$$F_M = P(T);$$

- полиэдральные интегральные критерии (*лагранжевого* типа):

$$F_L = \max_t\ \{P(t), t \in \mathfrak{I}^+\} + \max_t\ \{E(t), t \in \mathfrak{I}\}, \ \mathfrak{I}^+ = [1 : T];$$

$$F_L = \max_t\ (\{P(t), t \in \mathfrak{I}^+\} \quad \{E(t), t \in \mathfrak{I}\}).$$

- полиэдральные смешанные критерии (*больцевского* типа):

$$F_B = F_M + F_L.$$

Приведем общий вид полиэдральных критериев качества, ориентированных на задачи стабилизации, впервые введенные в работе [2]:

(2) $F = \sum_{t=0}^{T-1} Q(\boldsymbol{x}(t), \Delta\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t), \Delta\boldsymbol{u}(t)$;

(3) $F = \max\limits_{0 \le t \le T-1} Q(\boldsymbol{x}(t), \Delta\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t), \Delta\boldsymbol{u}(t))$.

Здесь $Q(\boldsymbol{x}, \Delta\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}, \Delta\boldsymbol{u})$ - полиэдральный показатель потерь вида

$Q(\boldsymbol{x}, \Delta\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}, \Delta\boldsymbol{u}) = \lambda_1(t)q_1(\boldsymbol{x}(t)) + \lambda_2(t)q_2(\Delta\boldsymbol{x}(t)) + \lambda_3(t)q_3(\boldsymbol{u}(t)) + \lambda_4(t)q_4(\Delta\boldsymbol{u}(t))$,

где q_1: $\mathbf{R}^n \to \mathbf{R}$, q_2: $\mathbf{R}^n \to \mathbf{R}$, q_3: $\mathbf{R}^r \to \mathbf{R}$ и q_4: $\mathbf{R}^r \to \mathbf{R}$ - некоторые положительно однородные полиэдральные функции, а $\lambda_i(t) \ge 0$ - весовые коэффициенты, причем

$\lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \lambda_3(t) + \lambda_4(t) > 0, \ t = \overline{0, T-1}$.

2. Полиэдральный критерий Чебышева

Пусть стабилизируется нулевое состояние объекта $\boldsymbol{x}^* = 0$. За меру текущего возмущения равновесного состояния объекта примем полиэдральный показатель

$P(t) = H_x(\boldsymbol{x}(t)) = \| \boldsymbol{x}(t) \|_\infty = \max\limits_{i \in [1:n]} | x_i(t) |$.

Тогда интегральным критерием качества процесса стабилизации может служить величина

(4) $F = \max\limits_{t} \{P(t)\} = \max\limits_{0 \le t \le T-1} \| \boldsymbol{x}(t) \|_\infty = \max\limits_{0 \le t \le T-1} \max\limits_{i \in [1:n]} | x_i(t) |$.

Критерий качества (4) имеет смысл *максимальной динамической ошибки* системы стабилизации и именуется в литературе ***критерием равномерного приближения, максимального уклонения*** или ***критерия Чебышева***. В 1953 г. на Втором Всесоюзном совещании по теории автоматического регулирования критерий (4) был заявлен как универсальный показатель качества (динамической точности) систем стабилизации независимо В.В. Солодовниковым и А.А. Фельдбаумом.

Заметим, что критерий (4) является частным случаем полиэдрального критерия (3):

$Q(\boldsymbol{x}(t), \Delta\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t), \Delta\boldsymbol{u}(t)) = \max\limits_{i \in [1:n]} | x_i(t) |$,

так что

$q_1(\boldsymbol{x}) = \max\limits_{i \in [1:n]} | x_i(t) |, \quad q_2(\Delta\boldsymbol{x}) = q_3(\boldsymbol{u}) = q_4(\Delta\boldsymbol{u}) \equiv 0, \quad \lambda_1(t) \equiv 1$.

Впервые чебышевский критерий (4) был применен к задачам оптимального управления в 1956 г. в работе Беллмана, Гликсберга и Гросса (R.E. Bellman, I. Glicksburg, O. Gross). Впоследствии важность его для прикладных задач управления неоднократно подчеркивалась многими исследователями.

Преимущества полиэдральных критериев качества процессов управления очевидны: ясный физический смысл, возможность точных инженерных интерпретаций, конструктивная гибкость. К сожалению, несмотря на практическую значимость и давнюю историю становления, чебышевский критерий (4) так и не получил широкого применения в автоматике из-за отсутствия конструктивных методов решения порождаемых им оптимизационных задач.

3. Задачи полиэдральной оптимизации процессов управления

В общем случае цель управления заключается в переводе состояния объекта (1) за время T в некоторое целевое множество состояний $\mathbf{X}^* \subset \mathbf{X}$ с учетом заданных фазовых и ресурсных ограничений:

$\boldsymbol{x}(t) \in \boldsymbol{\Omega}_x, \quad \boldsymbol{u}(t) \in \boldsymbol{\Omega}_u, \ t \in \Im$,

где $\boldsymbol{\Omega}_x \subset \mathbf{R}^n$ и $\boldsymbol{\Omega}_u \subset \mathbf{R}^r$ - *допустимые* множества значений вектора состояния и вектора управления соответственно, причем обычно, $\mathbf{X}^* = \{\boldsymbol{x}^*\}$.

Процесс управления представляет собой совокупность реализаций управляющего воздействия - программы управления $U = \{\boldsymbol{u}(t),\ t \in \Im\}$ и порожденной им фазовой траектории движения объекта $X = \{\boldsymbol{x}(t), t \in \Im^{+}\}$.

Общая постановка задач оптимального управления включает следующие компоненты:

♦ *терминальное условие*

$\boldsymbol{x}(T) \in \mathbf{X}^{*}$,

где $\mathbf{X}^{*} = \{\boldsymbol{x} : H(\boldsymbol{x}) \le p^{*}\}$ - терминальное целевое множество, $H : \mathbf{X} \to \mathbf{R}$, $p^{*} = \text{const}$;

♦ *текущие фазовые и ресурсные ограничения*

$P(\boldsymbol{x}(t)) \le p(t)$, $E(\boldsymbol{u}(t)) \le q(t)$, $t \in \Im$,

где $P : \mathbf{X} \to \mathbf{R}$, $E : \mathbf{U} \to \mathbf{R}$;

♦ *условие оптимальности*

$F(X, U) \to \text{extr}$,

где $F : \mathbf{X} \times \mathbf{U} \to \mathbf{R}$.

Специфика задач полиэдральной оптимизации процессов управления состоит в том, что все их три указанные компоненты имеют полиэдральную структуру, т.е. функции $H(\boldsymbol{x})$, $P(\boldsymbol{x})$, $E(\boldsymbol{u})$ и $F(X, U)$ являются полиэдральными функциями.

Данный тип задач применительно к классу линейных объектов управления относится к т.н. *задачам полиэдрального программирования* [3], алгоритмизация которых основана на мощном аппарате и вычислительных методах линейного программирования.

На основе полиэдральной методологии удалось решить ряд ключевых задач оптимизации процессов управления с учетом фазовых и ресурсных ограничений, включая задачи оптимизации процессов управления и наблюдения в условиях неопределенности в штатных, конфликтных и критических ситуациях [4].

Список литературы

[1] Филимонов Н.Б. Проблема качества процессов управления: смена оптимизационной парадигмы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 12. - С. 2-11.

[2] Филимонов Н.Б. Оптимизация дискретных процессов управления по полиэдральным критериям качества // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. 2000. № 1. - С. 20-38.

[3] Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Полиэдральное программирование: элементы теории и приложения // Информационные технологии. 1999. № 11. - С. 2-12.

[4] Филимонов Н.Б. Методы полиэдрального программирования в дискретных задачах управления и наблюдения / Методы классической и современной теории автоматического управления. Учебник в 5-и тт. Т. 5. Методы современной теории автоматического управления. Гл. 7. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - С. 647-720.

СИНТЕЗ КООРДИНИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АППАРАТА ЛИНЕЙНО-КВАДРАТИЧНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

А.Б. Филимонов[1], Н.Б. Филимонов[2]

[1]Московский государственный университет приборостроения и информатики
107996, Москва, ул. Стромынка, д. 20, Россия
filimon_ab@mail.ru
тел: +7 (903) 292-91-25

[2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, Россия
nbfilimonov@mail.ru
тел: +7 (499) 269-55-10

Ключевые слова: *координирующее управление, функциональная управляемость, координационная коррекция, эталонная модель, линейно-квадратичная оптимизация.*

Abstract
The problem of coordinating control by dynamic objects is considered. The input problem is decomposed into two subproblems: coordinative correction of object and aggregate control by corrected object. The method of coordinative correction based on formalism of linear-square optimization of control processes is suggested.

Введение

Системы координирующего управления (СКУ) образуют специальный класс автоматических систем, в которых реализуется заданная функциональная связь между управляемыми переменными. В статьях авторов [1, 2] обсуждались проблемные аспекты синтеза СКУ. В докладе обсуждается решение задачи координирующего управления на основе аппроксимационной концепции динамической коррекции многоканальных объектов и математическом аппарате линейно-квадратичной (ЛК) оптимизации процессов управления [3, 4].

1 Задача координирующего управления

Пусть объект управления описывается уравнениями

(1) $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0\mathbf{x} + \mathbf{B}_0\mathbf{u}$,

(2) $\mathbf{y} = \mathbf{C}_0\mathbf{x}$,

где $t \geq 0$; $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^r$ - вход, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ - состояние, $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^m$ - выход; $\mathbf{A}_0 \in \mathbf{R}^{n\times n}$, $\mathbf{B}_0 \in \mathbf{R}^{n\times r}$, $\mathbf{C}_0 \in \mathbf{R}^{m\times n}$.

Координация направлена на соблюдение *координационных соотношений* (КС):

(3) $\Phi_i(\mathbf{x}) = 0,\ i = \overline{1,l},\ l < n$,

где $\Phi_i(\mathbf{x})$ - функции, имеющие смысл *инвариантов* идеального процесса координации.

КС (3) можно переписать в векторной форме:
$\mathbf{\Phi}(\mathbf{x}) = 0$,

где $\mathbf{\Phi} = [\Phi_1, \Phi_2, ..., \Phi_l]^{\mathrm{T}}$ - вектор-функция, T - символ транспонирования матриц.

Введем *вектор невязок* $\xi \in \mathbf{R}^q$ для КС:

(4) $\boldsymbol{\xi}=\boldsymbol{\Phi}(\mathbf{x})$.

В задаче координирующем управлении можно выделить две цели:

1) ♦ *главная* цель - отработка произвольных командных сигналов $\mathbf{y}^*(t)$:

(5) $\mathbf{y}(t)\approx\mathbf{y}^*(t)$;

2) ♦ *подчиненная* цель - координационное регулирование состояния:

(6) $\boldsymbol{\xi}\approx\boldsymbol{\xi}^*=0$.

Полагаем вектор-функцию $\boldsymbol{\Phi}(\mathbf{x})$ линейной:

$\boldsymbol{\Phi}(\mathbf{x})=\mathbf{L}_0\mathbf{x}$,

где $\mathbf{L}_0\in\mathbf{R}^{l\times n}$, причем $\operatorname{rank}\mathbf{L}_0=l$. Тогда равенство (4) можно записать в виде

$\boldsymbol{\xi}=\mathbf{L}_0\mathbf{x}$.

Анализ разрешимости задачи координации целесообразно основывать на понятии *функциональной* управляемости динамических систем, означающем возможность точно воспроизводить на ее выходе произвольные достаточно гладкие сигналы [5].

Введем *расширенный* выход объекта:

(7) $\hat{\mathbf{y}}=\begin{bmatrix}\mathbf{y}\\ \boldsymbol{\xi}\end{bmatrix}$.

Ему отвечает расширенная передаточная матрица объекта:

(8) $\hat{\mathbf{W}}(s)=\hat{\mathbf{C}}_0(\mathbf{E}_n s-\mathbf{A}_0)^{-1}\mathbf{B}_0$.

где матрица $\hat{\mathbf{C}}\in\mathbf{R}^{(m+l)\times n}$ имеет следующую блочную структуру:

$\hat{\mathbf{C}}_0=\left[\begin{array}{c}\mathbf{C}_0\\ \hdashline \mathbf{L}_0\end{array}\right]$.

Предложение. Для разрешимости поставленной задачи координирующего управления необходимо и достаточно, чтобы объект был функционально управляемым по расширенному выходу (7), т.е. в точках регулярности передаточной матрицы (8) выполнялось условие

$\operatorname{rank}\hat{\mathbf{W}}(s)=m+l$.

2 Структура системы координирующего управления

Предлагаемая функциональная схема СКУ представлена на рисунке 1 и аналогична схеме СКУ, описанной авторами в [1, 2]. В ней разделены функции *агрегатного управления* (АУ) и *координационной коррекции* (КК) объекта, которые возлагаются соответственно на блоки БАУ и БКК: первый обеспечивает достижение главной цели (5), а второй - подчиненной цели (6).

СКУ включает два многомерных контура: внешний контур агрегатного управления (АУ-контур) и внутренний контур координационного регулирования (КР-контур). При этом реализуется *принцип разделения движений*: координация осуществляется в режиме «быстрых движений», а отработка целевого значения выхода осуществляется в режиме «медленных движений», т.е. КР-контур должен быть более быстродействующим по сравнению с АУ-контуром.

Изложим метод синтеза БКК на основе метода коррекции управляемых систем [3, 4].

Посредством БКК решаются две задачи:

1) формирование нового управляющего входа $\mathbf{v}\in\mathbf{R}^m$;

2) координационное регулирование переменной $\boldsymbol{\xi}$.

Качество решения данных задач будем оценивать по реакции скорректированного объекта на тестовый сигнал

(9) $\mathbf{v}(t)=\mathbf{v}(0)\neq 0 \ \ (t>0)$,

который генерируется *задатчиком*, описываемым дифференциальным уравнением

$\dot{\mathbf{v}}=0$.

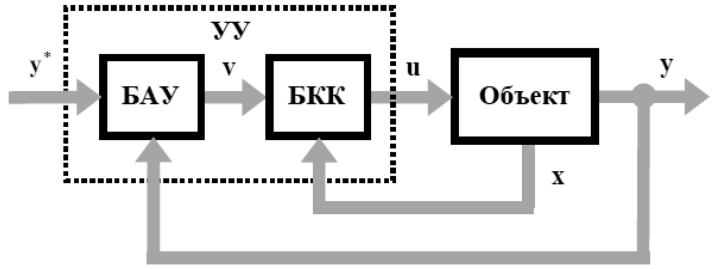


Рисунок 1 – Функциональная схема СКУ

Желаемую динамику скорректированного объекта зададим *эталонной моделью* (ЭМ):

(10) $\dot{\mathbf{x}}_{\mathrm{M}}=\mathbf{A}_{\mathrm{M}}\mathbf{x}_{\mathrm{M}}+\mathbf{B}_{\mathrm{M}}\mathbf{v}$,

(11) $\mathbf{y}_{\mathrm{M}}=\mathbf{C}_{\mathrm{M}}\mathbf{x}_{\mathrm{M}}+\mathbf{D}_{\mathrm{M}}\mathbf{v}$,

где $\mathbf{x}_{\mathrm{M}}\in\mathbf{R}^{n_{\mathrm{M}}}$ и $\mathbf{y}_{\mathrm{M}}\in\mathbf{R}^{m}$ - состояние и выход модели; n_{M} - порядок модели; $\mathbf{A}_{\mathrm{M}}$, $\mathbf{B}_{\mathrm{M}}$, $\mathbf{C}_{\mathrm{M}}$, $\mathbf{D}_{\mathrm{M}}$ - числовые матрицы соответствующих размеров.

Полагаем, что ЭМ устойчива, так что реакция выхода на постоянное входное воздействие (9) устанавливается на постоянном уровне, т.е.

$\lim\limits_{t\to\infty}\dot{\mathbf{y}}_{\mathrm{M}}(t)=0$.

Разность между выходом скорректированного объекта и выходом ЭМ выражает *невязка*

$\delta\mathbf{y}(t)=\mathbf{y}(t)-\mathbf{y}_{\mathrm{M}}(t)$.

Динамическая коррекция объекта должна обеспечивать требования

(12) $\delta\mathbf{y}(t)\approx 0$, $\quad\boldsymbol{\xi}(t)\approx 0$.

Введем малый положительный параметр γ:

(13) $0<\gamma<<1$.

Точность приближений (12) будем оценивать интегральными квадратичными критериями:

(14) $J_{y}^{\gamma}=\int\limits_{0}^{\infty}\mathrm{e}^{-2\gamma t}\,\|\delta\mathbf{y}(t)\|^{2}\,dt$, $\quad J_{\xi}^{\gamma}=\int\limits_{0}^{\infty}\mathrm{e}^{-2\gamma t}\,\|\boldsymbol{\xi}(t)\|^{2}\,dt$.

Введем также критерий интенсивности управляющих воздействий:

(15) $J_{u}^{\gamma}=\int\limits_{0}^{\infty}\mathrm{e}^{-2\gamma t}\,\|\mathbf{u}(t)\|^{2}\,dt$.

Весовой множитель $\mathrm{e}^{-2\gamma t}$ в функционалах (14) и (15) обеспечивает их сходимость для класса ограниченных функций и тем самым позволяет рассматривать установившиеся режимы в СКУ с *ненулевой* асимптотикой процессов $\delta\mathbf{y}(t)$, $\boldsymbol{\xi}(t)$, $\mathbf{u}(t)$.

Задачу синтеза БКК можно формализовать посредством ограничения или минимизации критериев (14), (15). В итоге решаемая задача сводится к базовой задаче оптимизации с обобщенным критерием оптимальности, образованным сверткой данных частных критериев:

$$(16) \qquad J^{\gamma} = = q_y J_y^{\gamma} + q_{\xi} J_{\xi}^{\gamma} + \rho J_u^{\gamma} = \int_0^{\infty} \mathrm{e}^{-2\gamma t} \left(q_y \, \| \delta \mathbf{y}(t) \|^2 + q_{\xi} \, \| \boldsymbol{\xi}(t) \|^2 + \rho \, \| \mathbf{u}(t) \|^2 \right) dt \to \min \ ,$$

где $q_y, q_{\xi}, \rho > 0$ - некоторые весовые коэффициенты.

Предлагаемую конструкцию БКК отражает функциональная схема на рисунке 2. Она описывается уравнениями

$$(17) \qquad \dot{\mathbf{x}}_{\mathrm{M}} = \mathbf{A}_{\mathrm{M}} \mathbf{x}_{\mathrm{M}} + \mathbf{B}_{\mathrm{M}} \mathbf{v} \ ,$$

$$(18) \qquad \mathbf{u} = -(\mathbf{K}_1 \mathbf{x} + \mathbf{K}_2 \mathbf{x}_{\mathrm{M}} + \mathbf{K}_3 \mathbf{v}) \ ,$$

где $\mathbf{K}_1 \in \mathbf{R}^{r \times n}$, $\mathbf{K}_2 \in \mathbf{R}^{r \times n_{\mathrm{M}}}$, $\mathbf{K}_3 \in \mathbf{R}^{r \times m}$ - матричные настроечные параметры. На схеме парой $(\mathbf{A}_{\mathrm{M}}, \mathbf{B}_{\mathrm{M}})$ обозначено динамическое звено (17).

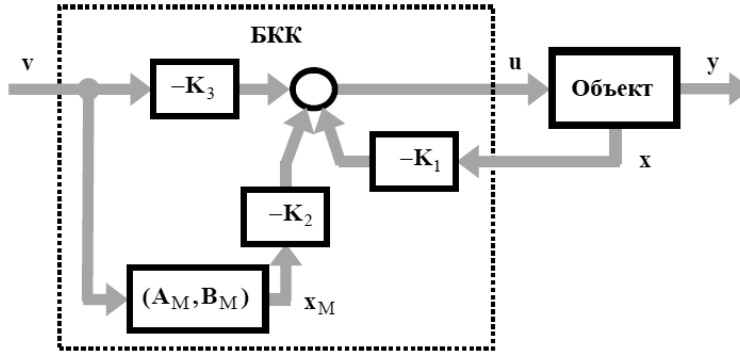


Рисунок 2 – Структура БКК

Задача синтеза БКК сводится к оптимизации закона управления (18) по критерию (16).

3 Эквивалентная стационарная задача ЛК-оптимизации

Рассмотрим систему

$$(19) \qquad \mathbf{S}: \quad \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0 \mathbf{x} + \mathbf{B}_0 \mathbf{u} \ ,$$

$$(20) \qquad \dot{\mathbf{x}}_{\mathrm{M}} = \mathbf{A}_{\mathrm{M}} \mathbf{x}_{\mathrm{M}} + \mathbf{B}_{\mathrm{M}} \mathbf{v} \ ,$$

$$(21) \qquad \dot{\mathbf{v}} = 0 \ ,$$

$$(22) \qquad \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}_0 \mathbf{x} - \mathbf{C}_{\mathrm{M}} \mathbf{x}_{\mathrm{M}} - \mathbf{D}_{\mathrm{M}} \mathbf{v} \ ,$$

$$(23) \qquad \boldsymbol{\xi} = \mathbf{L}_0 \mathbf{x} \ .$$

Данная система имеет порядок $N = n + n_{\mathrm{M}} + m$ и описывает динамику состояний объекта, задатчика тестового сигнала и ЭМ, а также формирование сигналов $\delta \mathbf{y}(t)$ и $\boldsymbol{\xi}(t)$.

Сформируем вектор состояния системы (19)-(23):

$$\mathbf{z}=\begin{bmatrix}\mathbf{x}\\ \mathbf{x}_{\mathrm{M}}\\ \mathbf{v}\end{bmatrix}.$$

Тогда ее уравнения можно записать в виде:

$\mathbf{S}$: $\dot{\mathbf{z}}=\mathbf{A}\mathbf{z}+\mathbf{B}\mathbf{u}$,

(24) $\delta\mathbf{y}=\mathbf{C}\mathbf{z}$,

(25) $\boldsymbol{\xi}=\mathbf{L}\mathbf{z}$,

где матрицы $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ и $\mathbf{L}$ имеют следующую блочную структуру:

$$\mathbf{A}=\left[\begin{array}{c|c|c}\mathbf{A}_0 & & \\ \hline & \mathbf{A}_{\mathrm{M}} & \mathbf{B}_{\mathrm{M}}\\ \hline & & \end{array}\right],\quad \mathbf{B}=\left[\begin{array}{c}\mathbf{B}_0\\ \hline \\ \hline \end{array}\right],\quad \mathbf{C}=\left[\begin{array}{c|c|c}\mathbf{C}_0 & -\mathbf{C}_{\mathrm{M}} & -\mathbf{D}_{\mathrm{M}}\end{array}\right],\quad \mathbf{L}=\left[\begin{array}{c|c|c}\mathbf{L}_0 & & \end{array}\right].$$

Закон управления (18) можно представить в виде

(26) $\mathbf{u}=-\mathbf{K}\mathbf{z}$,

где $\mathbf{K}$ - блочная матрица вида:

(27) $\mathbf{K}=[\ \mathbf{K}_1 \mid \mathbf{K}_2 \mid \mathbf{K}_3\ ]$.

Из (24), (25) следует равенство

(28) $q_y\,\|\delta\mathbf{y}\|^2+q_\xi\,\|\boldsymbol{\xi}\|^2=\mathbf{z}^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}\mathbf{z}$,

где $\mathbf{Q}$ - симметрическая неотрицательно определенная матрица: $\mathbf{Q}=q_y\,\mathbf{C}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}+q_\xi\mathbf{L}^{\mathrm{T}}\mathbf{L}$.

Используя (28), преобразуем критерий (16) к виду

(29) $J^\gamma=\int_0^\infty \mathrm{e}^{-2\gamma t}\,(\mathbf{z}^{\mathrm{T}}(t)\mathbf{Q}\mathbf{z}(t)+\rho\,\|\mathbf{u}(t)\|^2)dt\to\min$.

Рассмотрим вспомогательную систему

(30) $\widehat{\mathbf{S}}$: $\dot{\hat{\mathbf{x}}}=(\mathbf{A}_0-\gamma\mathbf{E}_n)\hat{\mathbf{x}}+\mathbf{B}_0\hat{\mathbf{u}}$,

(31) $\dot{\hat{\mathbf{x}}}_{\mathrm{M}}=(\mathbf{A}_{\mathrm{M}}-\gamma\mathbf{E}_{n_{\mathrm{M}}})\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{M}}+\mathbf{B}_{\mathrm{M}}\hat{\mathbf{v}}$,

(32) $\dot{\hat{\mathbf{v}}}=-\gamma\hat{\mathbf{v}}$,

где $\hat{\mathbf{x}}\in\mathbf{R}^n$, $\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{M}}\in\mathbf{R}^{n_{\mathrm{M}}}$, $\hat{\mathbf{v}}\in\mathbf{R}^m$, $\hat{\mathbf{u}}\in\mathbf{R}^r$ - управляющий вход.

Введем состояние вспомогательной системы:

$$\hat{\mathbf{z}}=\begin{bmatrix}\hat{\mathbf{x}}\\ \hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{M}}\\ \hat{\mathbf{v}}\end{bmatrix}.$$

Тогда уравнения (30)-(32) можно привести к виду

(33) $\widehat{\mathbf{S}}$: $\dot{\hat{\mathbf{z}}}=\hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{z}}+\mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}$,

где $\hat{\mathbf{A}}=\mathbf{A}-\gamma\mathbf{E}_N$.

Между управляемыми движениями систем **S** и $\widehat{\mathbf{S}}$ имеет место однозначное соответствие, которое устанавливается следующими соотношениями:

(34) $\mathbf{z}(t)=\mathrm{e}^{\gamma t}\hat{\mathbf{z}}(t)$, $\mathbf{u}(t)=\mathrm{e}^{\gamma t}\hat{\mathbf{u}}(t)$.

При этом закон управления (26) для системы **S** с помощью соотношений (34) преобразуется в следующий закон управления для системы $\widehat{\mathbf{S}}$:

(35) $\hat{\mathbf{u}}=-\mathbf{K}\hat{\mathbf{z}}$.

Предложение. Исходная задача ЛК-оптимизации системы **S** по критерию (29) эквивалентна стационарной задаче ЛК-оптимизации системы $\widehat{\mathbf{S}}$ по критерию вида

(36) $J^0=\int_0^\infty(\hat{\mathbf{z}}^{\mathrm{T}}(t)\mathbf{Q}\hat{\mathbf{z}}(t)+\rho\|\hat{\mathbf{u}}(t)\|^2)dt\to\min$.

Пусть время установления переходных процессов в скорректированном объекте не превышает величины T, причем $\gamma T<<1$. Тогда в силу (13) управляемые динамические процессы в системах **S** и $\widehat{\mathbf{S}}$ практически не будут отличаться на временном интервале $0<t\le T$.

4 Расчет параметров блока координатной коррекции

Решение ЛК-задачи (33), (36) дает линейный закон управления (35), в котором

$\mathbf{K}=\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}$,

а матрица $\mathbf{P}\in\mathbf{R}^{N\times N}$ является решением алгебраического матричного уравнения Риккати:

$\rho^{-1}\mathbf{PBB}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}-\mathbf{P}\widehat{\mathbf{A}}-\widehat{\mathbf{A}}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}-\mathbf{Q}=0$.

Разбивая полученную матрицу $\mathbf{K}$ согласно (27) на блоки размеров $r\times n$, $r\times n_{\mathrm{M}}$ и $r\times m$, находим искомые матричные параметры $\mathbf{K}_1$, $\mathbf{K}_2$ и $\mathbf{K}_3$ БКК (17), (18).

Настройка БКК осуществляется посредством подходящего выбора весовых коэффициента q_y и q_ξ в структуре оптимизируемого функционала (16). Если объект (1), (2) вполне управляем, функционально управляем по расширенному выходу (7), а ЭМ (10), (11) устойчива, то посредством выбора больших значений весовых коэффициентов q_y и q_ξ: $q_y,q_\xi>>\rho$, отклики $\delta\mathbf{y}(t)$ и $\boldsymbol{\xi}(t)$ *возможно сделать сколь угодно малыми* в смысле $L_2[0,\infty)$-метрики.

Список литературы

[1] Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. О проблематике синтеза координирующих систем автоматического управления // Известия ЮФУ. Технич. науки. Темат. выпуск «Перспективные системы и задачи управления». - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. 2012. № 3 (128). - С. 172-180.

[2] Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Аналитический синтез систем координирующего управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 7. - С. 2-8.

[3] Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Динамическая коррекция процессов регулирования методом линейно-квадратичной оптимизации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 5. - С. 9-14.

[4] Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Метод динамической коррекции и автономизации каналов управления в многосвязных системах на основе формализма линейно-квадратичной оптимизации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 12. - С. 2-6.

[5] Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Синтез систем управления линейными динамическими объектами с эталонной динамикой выхода // Вестник РУДН. Сер. Кибернетика. 1998. № 1. - С. 64-80.

УПРАВЛЕНИЕ КВАДРОКОПТЕРОМ AR.DRONE ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ

С.А. Белоконь, Ю.Н. Золотухин, К.Ю. Котов, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.А. Соболев, М.Н. Филиппов, А.П. Ян

Институт автоматики и электрометрии СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Коптюга 1, Россия
kotov@idisys.iae.nsk.su
тел: +7 (383) 333-26-25

Ключевые слова: *квадрокоптер AR.Drone, управление движением, расширенный фильтр Калмана*

Abstract

In this paper we discuss a trajectory tracking problem of quadrocopter where the trajectory is defined as implicit function of coordinates. For the estimation of state vector the control system proposed in our previous work is augmented by the equations based on extended Kalman filter. Simulation and experimental results with the AR.Drone quadrocopter show the effectiveness of the proposed control system in a noise environment.

Введение

В последнее десятилетие в связи с успехами в области микромеханики и микроэлектроники возрос интерес к управлению компактными беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), линейные размеры и масса которых составляют 0.1 – 0.5 метра и 0.1 – 0.5 кг соответственно [1]. Значительная часть работ посвящена созданию платформ [2-4], разработке алгоритмов управления [5-8] планирования пути и локализации [9, 10] для мультироторных конфигураций БПЛА, что объясняется простотой и гибкостью конструкции, надежностью и управляемостью таких аппаратов.

Данная работа посвящена траекторному управлению квадророторным БПЛА (далее квадрокоптером). Известные подходы к решению задачи траекторного управления можно разбить на несколько основных групп: методы, основанные на линеаризации исходной модели [6], аппроксимации траектории движения [9], использовании динамической обратной связи [7], бэкстэппинга и скользящих режимов [8].

В данной работе мы используем разработанный нами и успешно применённый в ряде приложений [11, 12] метод организации вынужденного движения по желаемой траектории в пространстве состояний объекта к управлению квадрокоптером. Результаты [12] дополнены использованием соотношений на основе расширенного фильтра Калмана для оценки вектора состояния объекта. Эксперименты по управлению полетом квадрокоптера в помещении и численное моделирование подтверждают работоспособность системы управления в присутствии шумов измерений и внешних возмущений.

1 Постановка задачи и описание объекта управления

В качестве объекта управления используется квадрокоптер AR.Drone, разработанный компанией Parrot (США) [3], построенный по классической четырехвинтовой схеме, рисунок 1. Основная компьютерная система аппарата — процессор ARM9 с тактовой частотой 468 MHz, оперативная память DDR 128 MB на шине 200 MHz и операционная система Linux OS, позволяет вести обработку информации, получаемой от различных датчиков квадрокоптера и

выдавать управляющие команды для поддержания необходимого режима полета (взлет, зависание, задание «пилота», посадка). Система навигации AR.Drone состоит из PIC-микроконтроллера с тактовой частотой 40 MHz, выполняющего функции сбора и предобработки навигационных данных, а так же набора датчиков: ультразвукового высотомера, трехосевого модуля акселерометров, двухосевого гироскопа и одноосевого высокоточного курсового гироскопа. Система технического зрения AR.Drone имеет две видеокамеры: фронтальную с разрешением видеопотока 640 x 480 пикселей и частотой 15 кадров/с и вертикальную, расположенную в нижней части корпуса, с меньшим разрешением видеопотока, но большей частотой – 60 кадров/с. При габаритах 52,5 см x 51,5 см и массе аппарата около 420 г время полета составляет около 15 минут. Максимальная скорость 5 м/с.

Рисунок 1 – Квадрокоптер AR.Drone

Положение квадрокоптера в пространстве характеризуется координатами x, y, z центра масс аппарата в неподвижной декартовой системе координат и тремя углами поворота вокруг осей x_b, y_b, z_b системы координат, жестко связанной с аппаратом, причём начало координат совпадает с центром масс аппарата. Общепринятыми являются следующие обозначения: ψ – угол рыскания – угол поворота вокруг оси z_b $\left(-\infty < \psi < \infty\right)$; φ – угол крена – угол поворота вокруг оси x_b $\left(-\pi/2 < \varphi < \pi/2\right)$; θ – угол тангажа – угол поворота вокруг оси y_b $\left(-\pi/2 < \theta < \pi/2\right)$. Упрощенные уравнения динамики, описывающие движение квадрокоптера в указанных координатах, и ориентация осей x_b, y_b, z_b приведены в [13]:

$$(1)\quad \begin{cases} m\ddot{x} = \left(\sin\psi \cdot \sin\varphi + \cos\psi \cdot \cos\varphi \cdot \sin\theta\right) \cdot u_1; \\ m\ddot{y} = \left(-\cos\psi \cdot \sin\varphi + \sin\psi \cdot \cos\varphi \cdot \sin\theta\right) \cdot u_1; \\ m\ddot{z} = \cos\varphi \cdot \cos\theta \cdot u_1 - mg; \end{cases}$$

$$(2)\quad \begin{cases} I_{xx} \cdot \ddot{\varphi} = u_2 - \left(I_{zz} - I_{yy}\right) \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\psi}; \\ I_{yy} \cdot \theta = u_3 - \left(I_{xx} - I_{zz}\right) \cdot \dot{\varphi} \cdot \dot{\psi}; \\ I_{zz} \cdot \ddot{\psi} = u_4. \end{cases}$$

Здесь: m – масса квадрокоптера, g – ускорение силы тяжести, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} – моменты инерции относительно соответствующих осей квадрокоптера. Точками над знаками переменных обозначаются производные по времени.

Ставится задача определения управляющих параметров, обеспечивающих устойчивое движение квадрокоптера по выбранной траектории с заданной скоростью.

2 Алгоритм управления

Воспользуемся предложенной в работе [12] методикой определения управляющих параметров, гарантирующих движение квадрокоптера по траектории, определяемой уравнениями

(3) $l(x,y)=0, \quad z=z_{ref}(x,y),$

со скоростью

(4) $v=\sqrt{\dot{x}^2+\dot{y}^2}=v_{ref}(x,y).$

Определим близость центра масс к траектории (3), (4) величинами $l(x(t),y(t))$. и $z(t)-z_{ref}(x(t),y(t))$. Введём функции

(5) $$\begin{cases} S_l=\dfrac{dl}{dt}+k_l\cdot l; \\ S_z=\dfrac{d}{dt}(z-z_{ref})+k_z\cdot(z-z_{ref}); \\ S_v=v-v_{ref}. \end{cases}$$

Выполнение условий

(6) $S_l=0; \quad S_z=0; \quad S_v=0,$

обеспечивает экспоненциальный выход квадрокоптера на траекторию (3), (4) с постоянными времени $1/k_l$, $1/k_z$.

Для удержания квадрокоптера на заданной траектории условия (6) должны выполняться во всех точках траектории, т. е. необходимо

(7) $\dfrac{d}{dt}S_l^2\le 0; \quad \dfrac{d}{dt}S_z^2\le 0; \quad \dfrac{d}{dt}S_v^2\le 0.$

При этом знаки равенства в (7) допустимы лишь при тождественном равенстве нулю величин S_l, S_z, S_v. Усилим условия (7), положив

(8) $\dfrac{d}{dt}S_l^2=-2\alpha_l\cdot S_l^2; \quad \dfrac{d}{dt}S_z^2=-2\alpha_z\cdot S_z^2; \quad \dfrac{d}{dt}S_v^2=-2\alpha_v\cdot S_v^2,$

или

(9) $\dot{S}_l=-\alpha_l\cdot S_l; \quad \dot{S}_z=-\alpha_z\cdot S_z; \quad \dot{S}_v=-\alpha_v\cdot S_v.$

Здесь $\alpha_l>0; \quad \alpha_z>0; \quad \alpha_v>0$ определяют постоянные времени, с которыми S_l, S_z, S_v экспоненциально стремятся к нулю.

Дифференцируя (5) и подставляя результаты в (9), получим уравнения для вычисления вторых производных $\ddot{x}, \quad \ddot{y}, \quad \ddot{z}$

(10) $$\begin{cases} l_x\cdot\ddot{x}+l_y\cdot\ddot{y}=A(x,y,\dot{x},\dot{y}); \\ \dfrac{\dot{x}\cdot\ddot{x}+\dot{y}\cdot\ddot{y}}{v}=B(x,y,\dot{x},\dot{y},v_{ref}); \\ \ddot{z}=C(z,\dot{z},z_{ref}), \end{cases}$$

где

$$(11)\ \begin{cases} A(x,y,\dot{x},\dot{y}) = -\alpha_l \cdot S_l - k_l \cdot (l_x \cdot \dot{x} + l_y \cdot \dot{y}) - 2l_{xy} \cdot \dot{x} \cdot \dot{y} - l_{xx} \cdot \dot{x}^2 - l_{yy} \cdot \dot{y}^2; \\ B(x,y,\dot{x},\dot{y},v_{ref}) = -\alpha_v \cdot S_v; \\ C(z,\dot{z},z_{ref}) = -\alpha_z \cdot S_z - k_z \cdot \dot{z}. \end{cases}$$

Здесь и далее нижние индексы при символах функции *l* означают соответствующие частные производные.

Введём обозначения

$$(12)\ \begin{cases} \Delta = l_x \cdot \dot{y} - l_y \cdot \dot{x}; \\ \Delta_1 = A \cdot \dot{y} - B \cdot v \cdot l_y; \\ \Delta_2 = B \cdot v \cdot l_x - A \cdot \dot{x}. \end{cases}$$

Выражая требуемые значения вторых производных по времени координат центра масс квадрокоптера $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ из (10) с учетом (12) и приравнивая к значениям вторых производных в уравнениях (1), получим систему уравнений

$$(13)\ \begin{cases} (\sin\psi \cdot \sin\varphi + \cos\psi \cdot \cos\varphi \cdot \sin\theta) \cdot \dfrac{u_1}{m} = \dfrac{\Delta_1}{\Delta}; \\ (-\cos\psi \cdot \sin\varphi + \sin\psi \cdot \cos\varphi \cdot \sin\theta) \cdot \dfrac{u_1}{m} = \dfrac{\Delta_2}{\Delta}; \\ \cos\varphi \cdot \cos\theta \cdot \dfrac{u_1}{m} = g + C. \end{cases}$$

Возведём в квадрат левые и правые части уравнений (13) и, сложив их почленно, получим u_1 — необходимую суммарную силу тяги двигателей

$$(14)\ u_1 = m \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta_1}{\Delta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_2}{\Delta}\right)^2 + (g+C)^2}.$$

Подставляя (14) в систему уравнений (13) и переходя к безразмерным величинам

$$(15)\ \gamma_1 = \frac{\frac{\Delta_1}{\Delta}}{N};\quad \gamma_2 = \frac{\frac{\Delta_2}{\Delta}}{N};\quad \gamma_3 = \frac{g+C}{N};\quad N = \sqrt{\left(\frac{\Delta_1}{\Delta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_2}{\Delta}\right)^2 + (g+C)^2};$$

получим систему уравнений относительно углов ψ, φ, θ определяющих необходимую ориентацию квадрокоптера относительно системы координат x_b, y_b, z_b

$$(16)\ \begin{cases} (\sin\psi \cdot \sin\varphi + \cos\psi \cdot \cos\varphi \cdot \sin\theta) = \gamma_1; \\ (-\cos\psi \cdot \sin\varphi + \sin\psi \cdot \cos\varphi \cdot \sin\theta) = \gamma_2; \\ \cos\varphi \cdot \cos\theta = \gamma_3. \end{cases}$$

После выбора угла рыскания квадрокоптера из соображений ориентации продольной оси квадрокоптера x_b параллельно касательной к траектории (3)

$$(17)\ \cos\psi_{ref} = \frac{l_y}{\sqrt{l_x^2 + l_y^2}};\quad \sin\psi_{ref} = -\frac{l_x}{\sqrt{l_x^2 + l_y^2}},$$

значения углов $\theta_{ref}, \varphi_{ref}$ определяются из уравнений (16) соотношениями

$$(18)\ \begin{cases} \sin\varphi_{ref} = \gamma_1 \cdot \sin\psi_{ref} - \gamma_2 \cdot \cos\psi_{ref}; \\ \cos\varphi_{ref} = \sqrt{1 - \left(\gamma_1 \cdot \sin\psi_{ref} - \gamma_2 \cdot \cos\psi_{ref}\right)^2}; \\ \sin\theta_{ref} = \dfrac{\gamma_2 \cdot \sin\psi_{ref} + \gamma_1 \cdot \cos\psi_{ref}}{\sqrt{\gamma_3^2 + \left(\gamma_2 \cdot \sin\psi_{ref} + \gamma_1 \cdot \cos\psi_{ref}\right)^2}}; \\ \cos\theta_{ref} = \dfrac{\gamma_3}{\sqrt{\gamma_3^2 + \left(\gamma_2 \cdot \sin\psi_{ref} + \gamma_1 \cdot \cos\psi_{ref}\right)^2}}. \end{cases}$$

Аппарат AR.Drone обладает собственной многоконтурной системой управления, обеспечивающей движение аппарата в заданной "пилотом" ориентацией ψ_{ref}, θ_{ref}, φ_{ref} [3]. Управление силами тяги винтов квадрокоптера производится также собственной системой управления аппарата и недоступно для пользователя. По этой причине мы не можем использовать уравнения (2) для описания изменения ориентации аппарата в пространстве и полученные в работе [12] соотношения для управляющих параметров u_1- u_4. Будем считать, что процессы изменения углов ориентации представимы в виде независимых уравнений второго порядка:

$$(19)\ \begin{cases} T_\psi^2 \cdot \ddot{\psi} + 2 \cdot d_\psi \cdot T_\psi \cdot \dot{\psi} + \psi = \psi_{ref}; \\ T_\phi^2 \cdot \ddot{\phi} + 2 \cdot d_\phi \cdot T_\phi \cdot \dot{\phi} + \phi = \phi_{ref}; \\ T_\theta^2 \cdot \ddot{\theta} + 2 \cdot d_\theta \cdot T_\theta \cdot \dot{\theta} + \theta = \theta_{ref}. \end{cases}$$

Величины коэффициентов T и d были оценены экспериментально. Отметим, что уравнения (19) не связаны с физической моделью аппарата (2) и отражают лишь связь управляющего воздействия ψ_{ref}, φ_{ref}, θ_{ref} с текущей ориентацией аппарата, т. е. описывают встроенную систему управления. В предположении, что время движения квадрокоптера по траектории намного больше времени установления нужных значений угловых переменных, мы можем использовать (19) пренебрегая (2).

Анализ устойчивости движения центра масс квадрокоптера приведен в работе [12].

3 Фильтр Калмана

Входными данными для алгоритма управления являются зашумленные реализации координат центра масс квадрокоптера и его углов ориентации в пространстве. Дополнительно требуется наличие оценок первых производных данных переменных.

Соотношения (1) и (19) с управляющими параметрами ψ_{ref}, φ_{ref}, θ_{ref} могут быть использованы для оценки переменных состояния объекта управления с помощью рекурсивного фильтра Калмана [15]. Исходную модель объекта управления (1), (19) представим в виде

$$(20)\ \begin{cases} X^{k+1} = f(X^k, U^k) + W^k; \\ Z^k = h(X^k) + V^k, \end{cases}$$

где W^k — нормальный случайный процесс с нулевым средним и ковариационной матрицей Q^k, описывающий погрешности моделирования; V^k — белый гауссовский шум измерений с нулевым средним и ковариационной матрицей R^k, описывающий шум датчиков; Z^k — выход датчиков измерения компонент вектора состояния X^k объекта; k — шаг дискретизации по времени. С учетом соотношений (1), (19) вектор состояния имеет вид

$$(21)\ \ X^k = [x^k, y^k, z^k, \dot{x}^k, \dot{y}^k, \dot{z}^k, \psi^k, \phi^k, \theta^k, \dot{\psi}^k, \dot{\phi}^k, \dot{\theta}^k]^T.$$

Уравнения (20) являются нелинейными, поэтому применим расширенный фильтр Калмана (РФК), где модель линеаризуется в некоторой окрестности рабочей точки ($\hat{X}^k, U^k$) с помощью разложения в ряд Тейлора [16]

$$(22)\ \begin{cases} X^{k+1} \approx f(\hat{X}^k, U^k) + F^k[X^k - \hat{X}^k] + W(k); \\ Z^k \approx h(\hat{X}^k) + H^k[X^k - \hat{X}^k] + V(k), \end{cases}$$

где

$$(23)\ F_k = \frac{\partial f}{\partial X}|_{X=\hat{X}_k}, H_k = \frac{\partial h}{\partial X}|_{X=\hat{X}_k}.$$

Соответствующие выражения экстраполяции и коррекции РФК имеют вид

$$(24)\ \hat{X}_k = f(\hat{X}^{k-1}, U^{k-1}).$$

$$(25)\ P_k = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k.$$

$$(26)\ K_k = \frac{P_k H_k^T}{H_k P_k H_k^T + R_k}.$$

$$(27)\ \hat{X}_k = \hat{X}_k + K_k(Z_k - h_k(\hat{X}_k)).$$

$$(28)\ P_k = (I - K_k H_k) P_k.$$

4 Экспериментальные результаты

Для исследования вопросов устойчивости и качества управления в предложенной системе управления проведен ряд экспериментов по управлению полетом квадрокоптера в помещении по траекториям различного вида. Выполнено сравнение полученных данных с результатами численного моделирования объекта и системы управления.

4.1 Доступные данные измерений

В качестве измеряемых компонент вектора X^k использовались координаты *x, y* центра масс, компоненты линейной скорости $\dot{x}$, $\dot{y}$, вычисленные с помощью конечных приращений и углы ориентации ψ, φ, θ аппарата

$$(29)\ Z^k = [x^k, y^k, z_{ref}, \dot{x}^k, \dot{y}^k, 0., \psi^k, \phi^k, \theta^k]^T.$$

Полет выполнялся на заданной высоте z_{ref}, поэтому в уравнениях (1) суммарная тяга двигателей u_1 принималась постоянной, соответствующей высоте z_{ref} и массе аппарата *m*.

Абсолютные значения положения центра масс аппарата и угла рыскания ψ определялись с помощью внешней видеосистемы [17].

Относительное изменение угла ψ определялось бортовой навигационной системой аппарата, посредством интегрирования выходного сигнала прецизионного курсового гироскопа. Такой способ определения угла приводит к постоянному накоплению систематической ошибки. Результаты эксперимента, в котором аппарат располагался на горизонтальной поверхности без выполнения полета, показали, что накопление ошибки в определении курсового угла составило от 0.1 рад до 0.7 рад за время около 600 с.

Также проведен эксперимент, в котором квадрокоптер выполнял команду взлета и зависания на заданной высоте без подачи внешних управляющих команд на изменение углов ориентации. В данном случае встроенная система управления AR.Drone обеспечивает

стабилизацию угла рыскания ψ по сигналу от гироскопа. Реальный угол рыскания аппарата оценивался с помощью внешней видеосистемы. Темп накопления ошибки в этом случае составил 0.5 рад за время около 120 *с* и в 3.5 раза превысил скорость нарастания ошибки в стационарном режиме.

Особенность управления по курсовому углу ψ квадрокоптера AR.Drone состоит в том, что управление осуществляется изменением угловой скорости $\dot{\psi}$. Для установления требуемого курса ψ_{ref} применялся регулятор следующего вида:

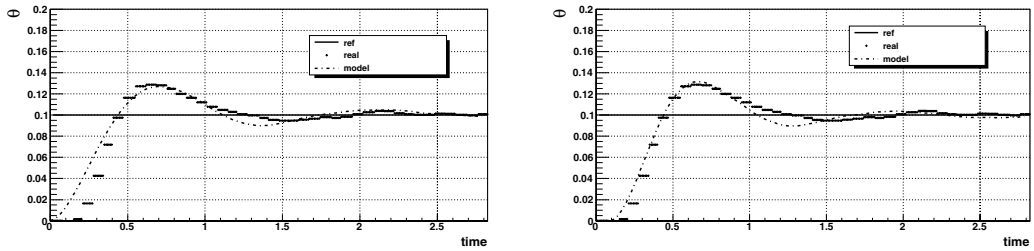
(30) $\dot{\psi}_{ref} = k_1 \cdot (\psi - \psi_{ref}) + k_2 \cdot \int(\psi - \psi_{ref})$.

Здесь величина коэффициентов k_1, k_2 устанавливается исходя из того, что время установления требуемого курса должно быть соизмеримо с темпом процессов изменения углов φ и θ.

Стабилизация по высоте выполнялась также посредством изменения вертикальной скорости $\dot{z}_{ref}$, значение которой определялось в регуляторе вида (30).

4.2 Идентификация параметров модели

Углы ориентации φ и θ аппарата вычисляются бортовой навигационной системой как результат комплексирования данных акселерометров и гироскопов [3]. Для оценки времени реакции квадрокоптера на управляющие воздействия φ_{ref} и θ_{ref} проведена серия запусков, где аппарату необходимо было отработать постоянное задание на угол ориентации, при этом фиксировалось текущее изменение измеряемых компонент вектора X^k. Из графиков видно, что процессы изменения углов ориентации завершаются за время около 1 *с*. Задание коэффициентов T и d в уравнениях (19), исходя из такого времени переходного процесса, обеспечивает удовлетворительное согласование модели (1), (19) с движением квадрокоптера, рисунок 2. Следует отметить наличие существенного запаздывания при отработке задания на угол, причем величина данного запаздывания непостоянна и по экспериментальной оценке меняется от 0.05 до 0.15 *с*. На рисунке 2б для оценки этого запаздывания расчет модели выполнен начиная с момента времени *t=0.1 с*.



а б

Рисунок 2 – Изменение угла тангажа θ при подаче задания θ_{ref}=*0.1:'ref'* – задание θ_{ref} ,*'real'* – показания инерциальной системы, *'model'* – результаты моделирования. Полученные параметры модели (19): $T_\theta = 0.22$ с, $d_\theta = 0.35$, $t_0 = 0$ с (а); $T_\theta = 0.17$ с, $d_\theta = 0.35$, $t_0 = 0.1$ с (б).

4.3 Траекторное управление

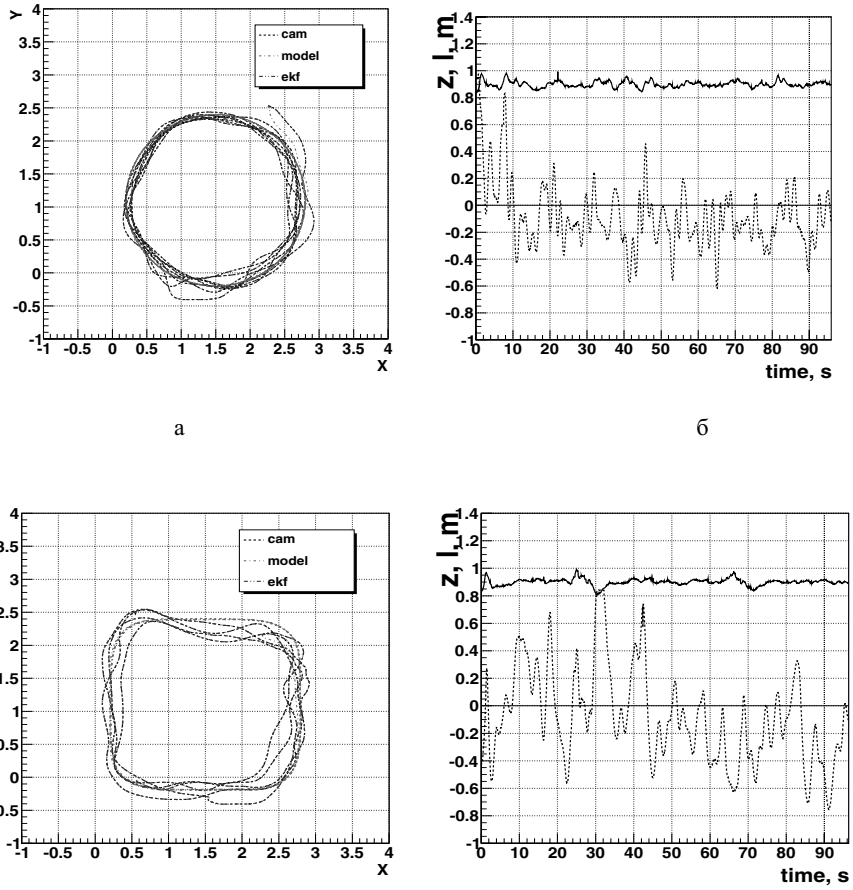
После определения параметров модели (19) были проведены эксперименты по траекторному управлению квадрокоптером AR.Drone. Движение выполнялось на постоянной высоте и скорости по траектории вида

(31) $f(x,y) = (x - x_0)^{2n} + (y - y_0)^{2n} - r^{2n} = 0,$

с различными параметрами x_0, y_0, n, r.

Для сравнения на рисунке 3 также приведены и результаты численного моделирования замкнутой системы управления объектом (1), (19) при соответствующих параметрах T и d. Подача управляющих команд и расчет модели выполнялся с шагом дискретизации 0.01 с. Данные об ориентации аппарата, вычисленные навигационной системой аппарата, а также координаты центра масс аппарата поступали с интервалами около 0.1 с.

Точность движения квадрокоптера вдоль заданной траектории составила около 0.2 м.



а б

в г

Рисунок 3 – Движение квадрокоптера вдоль траектории (31) при $x_0 = 1.5$ *м*, $y_0 = 1.1$ *м*, $n = 1$, $r = 1.3$ *м* (а, б) и $x_0 = 1.5$ *м*, $y_0 = 1.1$ *м*, $n = 2$, $r = 1.3$ *м* (в, г). Координаты x, y центра масс (а, в): *'cam'* – данные внешней видеосистемы, *'model'* – результаты моделирования, *'ekf'* – оценка координат в фильтре Калмана. Текущая высота z (сплошная линия) над поверхностью и отклонение $l(x,y)$ (пунктирная линия) от заданной траектории (б, г).

Заключение

В работе представлены результаты экспериментов и численного моделирования с предложенной ранее системой управления квадрокоптером, предназначенной для реализации движения по желаемой траектории. Для оценки переменных состояния объекта использованы

соотношения на основе расширенного фильтра Калмана. Показана работоспособность предложенной системы управления при существенной кривизне желаемой траектории, наличии шумов измерений, а также временных запаздываний в канале управления, достигающих 0.15 с. Достигнутая точность позиционирования квадрокоптера относительно желаемой траектории при полетах в помещении равна приблизительно 0.2 м.

Список литературы

[1] Pines D. J., Bohorquez F. Challenges facing future micro-air-vehicle development // Journal of Aircraft. — 2006. — Vol. 43, no. 2. — Pp. 290–305.

[2] Bouabdallah Samir. Design and control of an indoor micro quadrotor // In Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation. — 2004.

[3] P.-J. Bristeau, F. Callou, D. Vissiere, N. Petit The navigation and control technology inside the ar.drone micro uav // 18th IFAC World Congress. — Milano, Italy: 2011. — Pp. 1477–1484.

[4] M. Cutler, N. Kemal Ure, B. Michi-ni, J. P. How. Comparison of fixed and variable pitch actuators for agile quadrotors. // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (GNC). — Portland, OR: 2011. — August. — (AIAA-2011-6406).

[5] Gabriel M. Hoffmann, Hao-miao Huang, Steven L. Wasl, Er Claire J. Tomlin. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment // In Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. — 2007.

[6] Beji Lotfi, Abichou Azgal. Trajectory generation and tracking of a mini-rotorcraft // Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2005, April 18-22, 2005, Barcelona, Spain. — IEEE, 2005. — Pp. 2618–2623.

[7] Белинская Ю. С. Четвериков В. Н. Управление четырехвинтовым вертолетом // Наука и образование. — 2012. — No 5. — С. 157–171.

[8] Bouabdallah Samir. Backstepping and sliding-mode techniques applied to an indoor micro quadrotor // In Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. — 2005. — Pp. 2247–2252.

[9] Mellinger D., Kumar V. Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — 2011. — May.

[10] Engel J., Sturm J., Cremers D. Accurate figure flying with a quadrocopter using onboard visual and inertial sensing // Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robot Systems (IROS). — 2012. — Oct.13

[11] Золотухин Ю.Н., Нестеров А.А. Управление перевёрнутым маятником с учётом диссипации энергии // Автометрия. — 2010. — No 5. — С. 3–11.

[12] Управление параметрами полета квадрокоптера при движении по заданной траектории / С.А. Белоконь, Ю.Н. Золотухин, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.Н. Филиппов, А.П. Ян // Автометрия. — 2012. — No 5. — С. 32–41.

[13] J. Kim, M.-S. Kang, S. Park. Accurate modeling and robust hovering control for a quad—rotor vtol aircraft // J. Intell. Robotics Syst. — 2010. — Vol. 57, no. 1-4. — Pp. 9–26.

[14] Bouabdallah S. Design and control of quadrotors with application to autonomous flying: Ph.D. thesis / Ecole Polytechnique F´ derale Lausanne. — 2007.

[15] Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. — 1960. — Vol. 82. — Pp.35–45.

[16] Oliveira V. M., Lages W. F. Mobile robot control over the internet with delay compensation // 11th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing. — Salvador, Bahia: 2004.

[17] Управление траекторным движением группы мобильных роботов: моделирование и эксперимент / Ю.Н. Золотухин, К.Ю. Котов, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.Н. Филиппов // В кн. Материалы X Международной конференции ”Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2010)”. — Новосибирск, Россия: 2010. — С. 101–106.

О РАСЧЕТЕ УГЛОВ ОРИЕНТАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ВЗЛЕТА И ПОСАДКИ

С.Г. Деришев[2], Ю.Н. Золотухин[1], К.Ю. Котов[1], А.А. Нестеров[1], М.А. Соболев[1], Н.П. Сохи[2], М.Н. Филиппов[1]

[1]Институт автоматики и электрометрии СО РАН

630090, Новосибирск, пр. Коптюга 1, Россия

zol@idisys.iae.nsk.su

тел: +7 (383) 333-26-25

[2]ОАО «НовосибНИАТ»

630051, Новосибирск, ул. Ползунова 15, Россия

тел: +7 (383) 279-19-39

Ключевые слова: *летательный аппарат, система навигации, углы Эйлера, вертикальный взлёт и посадка*

Abstract

This paper is dedicated to the calculating the orientation angles of aerial vehicle, that provide stabilization of vertical take-off and landing modes. The desired angles are calculated under conditions that the aerodynamic forces and moments are created by the air flow from tractor propeller. The simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Введение

Летательные аппараты самолетного типа с возможностью вертикального взлета и посадки имеют широкий спектр гражданского и военного практического применения. Сочетание возможностей поддержания длительного горизонтального полета и использования компактных взлетно-посадочных площадок обуславливает применение таких аппаратов в задачах мониторинга, наблюдения, коммуникации, разведки и патрулирования [1, 2].

При маневрировании летательных аппаратов большое значение имеет управление ориентацией аппарата, т. е. управление углами между осями подвижной системы координат и осями неподвижной системы координат, в которой описываются маневры аппарата.

В данной работе рассматривается задача определения углов ориентации летательного аппарата, обеспечивающих стабилизацию режимов вертикального взлета и посадки.

В качестве параметров, описывающих ориентацию подвижного объекта, часто используются углы Эйлера [3], значения которых являются входными величинами для системы управления ориентацией аппарата [4]. Дело в том, что углы Эйлера определяют проекции сил, действующих на подвижный объект, на оси неподвижной системы координат, определяя тем самым маневры аппарата. Для реализации желаемого маневра необходимо знать значения углов Эйлера, при которых осуществим данный маневр [5].

1 Постановка задачи и описание объекта управления

Рассмотрим задачу вычисления необходимых значений углов ориентации при управлении вертикальным взлетом и посадкой аппарата самолетного типа с одним тянущим винтом. Положение аппарата относительно связанной системы координат $x_в$, $y_в$, $z_в$ и неподвижной системы координат x, y, z, углы Эйлера θ, φ, ψ и направления сил T, Q, P, действующих на аппарат, показаны на рисунке 1.

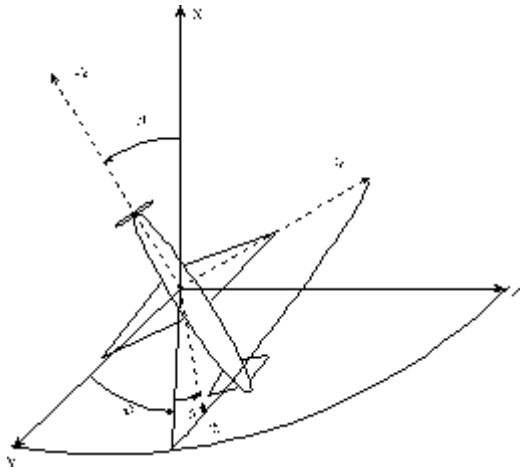


Рисунок 1 – Положение аппарата относительно связанной и неподвижной систем координат

Уравнения движения центра масс аппарата в общем случае можно представить в матрично-векторной форме:

$$(1) \qquad \begin{bmatrix} m\cdot(\ddot{x}+g) \\ m\cdot\ddot{y} \\ m\cdot\ddot{z} \end{bmatrix} = A(\theta,\varphi,\psi)\cdot\begin{bmatrix} T \\ Q \\ P \end{bmatrix} \quad ,$$

где m — масса аппарата; g — ускорение силы тяжести; φ — угол, характеризующий направление движения объекта относительно оси ординат, $\ddot{x},\ddot{y},\ddot{z}$ — компоненты вектора ускорения центра масс аппарата; T, Q, P — силы, создаваемые тянущим винтом и потоком обтекающего аппарат воздуха; A(θ, φ, ψ) — матрица, зависящая от углов Эйлера и определяющая проекции сил T, Q, P на оси x, y, z.

Левые части уравнения (1) определяют маневры, которые должен совершать аппарат при вертикальном взлете или посадке. Основными требованиями к траектории являются устойчивая ориентация и близость точки посадки к центру площадки при наличии ветра или других мешающих факторов. В общем случае левые части уравнения (1) могут быть представлены вектором $F=(F_x, F_y, F_z)^*$, компоненты которого являются функциями координат *x, y, z* и производных $\dot{x},\dot{y},\dot{z}$ (* – знак транспонирования). Матрица *A(θ, φ, ψ)* хорошо известна [5]. Запишем уравнения (1) в явной форме:

$$(2) \qquad \begin{aligned} F_x = {} & \cos\psi\cdot\cos\theta\cdot T + (-\sin\psi\cdot\cos\varphi + \cos\psi\cdot\sin\theta\cdot\sin\varphi)\cdot Q + \\ & + (\sin\psi\cdot\sin\varphi + \cos\psi\cdot\cos\varphi\cdot\sin\theta)\cdot P \,; \end{aligned}$$

$$(3) \qquad F_y = \sin\theta\cdot T + \cos\theta\cdot\sin\varphi\cdot Q + \cos\theta\cdot\cos\varphi\cdot P \,;$$

$$(4) \qquad \begin{aligned} F_z = {} & \sin\psi\cdot\cos\theta\cdot T + (\cos\psi\cdot\cos\varphi + \sin\psi\cdot\sin\theta\cdot\sin\varphi)\cdot Q + \\ & + (-\cos\psi\cdot\sin\varphi + \sin\theta\cdot\sin\psi\cdot\cos\varphi)\cdot P \,. \end{aligned}$$

Очевидно, уравнения (2-4) при известных силах *T, Q, P* и параметрах F_x, F_y, F_z, описывающих желаемую траекторию движения центра масс аппарата, определяют углы θ, φ, ψ, т.е ориентацию аппарата, необходимую для реализации желаемой траектории. Следовательно, решение уравнений (2-4) относительно углов θ, φ, ψ дает исходные данные для системы управления ориентацией.

Однако, уравнения (2-4) не являются независимыми. Действительно, матричный оператор *A(θ, φ, ψ)* является ортогональным преобразованием и справедливо соотношение $A^* = A^{-1}$. В этом случае из уравнений (2-4) следует:

$$(F, F) = (A \cdot (T,Q,P)^*, A \cdot (T,Q,P)^*) = (A * A^{-1} \cdot (T,Q,P)^*, (T,Q,P)^*) =$$
$$= ((T,Q,P)^*, (T,Q,P)^*)$$

и, следовательно:

$$F_x^2 + F_y^2 + F_z^2 = T^2 + Q^2 + P^2. \quad (5)$$

Соотношение (5) является необходимым условием реализации траектории, заданной вектором F. Выполнение условия (5) достигается управлением двигателями, т. к. в первом приближении силы *T, Q, P* пропорциональны квадрату скорости V_C потока воздуха, создаваемого тянущим винтом и обтекающего аппарат, т.е. мы можем положить:

$$T = a_T \cdot V_C^2; \quad Q = a_Q \cdot V_C^2; \quad P = a_P \cdot V_C^2.$$

Следовательно, для выполнения условия (5) необходимо установить:

$$V_C^2 = \sqrt{\frac{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}{a_T^2 + a_Q^2 + a_P^2}}, \quad (6)$$

что реализует система управления двигателем.

Условие (5) означает зависимость уравнений (2-4), следовательно, один из углов θ, φ, ψ необходимо определять из каких-либо других соображений. Мы рассмотрим три варианта процедуры вычисления углов Эйлера с последовательной фиксацией углов θ, φ, ψ.

2 Процедуры вычисления углов Эйлера

2.1 Вариант 1: φ=0=const.

Система управления ориентацией может зафиксировать любое значение угла φ, однако процедура вычисления углов θ и ψ менее громоздка при *φ=0=const*.

В этом случае уравнения (2-4) приобретают вид:

$$\left.\begin{aligned} F_x &= \cos\psi \cdot \cos\theta \cdot T - \sin\psi \cdot Q + \cos\psi \cdot \sin\theta \cdot P; \\ F_y &= -\sin\theta \cdot T + \cos\theta \cdot P; \\ F_z &= \sin\psi \cdot \cos\theta \cdot T + \cos\psi \cdot Q + \sin\psi \cdot \sin\theta \cdot P. \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

Положим $\frac{T}{\sqrt{T^2 + P^2}} = \cos\gamma, \quad \frac{P}{\sqrt{T^2 + P^2}} = \sin\gamma.$

В этом случае второе уравнение системы (7) принимает вид:

$$F_y = \sqrt{T^2 + P^2} \cdot \sin(\gamma - \theta),$$

откуда следует:

$$F_y^2 \le T^2 + P^2$$

и

$$T^2 + P^2 - F_y^2 \ge 0. \quad (8)$$

Условие (8) является необходимым условием использования варианта 1.

Далее имеем $\theta = \gamma - \mathbf{arcsin}\dfrac{F_y}{\sqrt{T^2+P^2}}$.

Отсюда:

$$\mathbf{sin}\,\theta = \mathbf{sin}\,\gamma \cdot \mathbf{cos}\,\mathbf{arcsin}\frac{F_y}{\sqrt{T^2+P^2}} - \mathbf{cos}\,\gamma \cdot \frac{F_y}{\sqrt{T^2+P^2}};$$

$$\mathbf{cos}\,\theta = \mathbf{cos}\,\gamma \cdot \mathbf{cos}\,\mathbf{arcsin}\frac{F_y}{\sqrt{T^2+P^2}} + \mathbf{sin}\,\gamma \cdot \frac{F_y}{\sqrt{T^2+P^2}}.$$

Здесь и в дальнейшем нам понадобятся соотношения:

$\mathbf{cos}\,\mathbf{arcsin}\,x = \sqrt{1-x^2}$ при $x \geq 0$

и

$\mathbf{cos}\,\mathbf{arcsin}\,x = \mathbf{cos}\,\mathbf{arcsin}(-|x|) = \mathbf{cos}(-\mathbf{arcsin}\,|x|) = \mathbf{cos}\,\mathbf{arcsin}\,|x| = \sqrt{1-x^2}$ при $x < 0$.

Окончательно получаем:

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{sin}\,\theta &= \frac{1}{T^2+P^2}\cdot\left[P\cdot\sqrt{T^2+P^2-F_y^2} - T\cdot F_y\right], \\ \mathbf{cos}\,\theta &= \frac{1}{T^2+P^2}\cdot\left[T\cdot\sqrt{T^2+P^2-F_y^2} + P\cdot F_y\right], \\ tg\,\theta &= \frac{P\cdot\sqrt{T^2+P^2-F_y^2} - T\cdot F_y}{T\cdot\sqrt{T^2+P^2-F_y^2} + P\cdot F_y}. \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

Далее с учетом (9) вычислим $T\cdot\mathbf{cos}\,\theta + P\cdot\mathbf{sin}\,\theta = \sqrt{T^2+P^2-F_y^2}$ и подставим этот результат в первое и третье уравнение системы (7). Получим систему двух линейных уравнений относительно ***sin***ψ и ***cos***ψ:

$$\sqrt{T^2+P^2-F_y^2}\cdot\mathbf{cos}\,\psi - Q\cdot\mathbf{sin}\,\psi = F_x,$$

$$Q\cdot\mathbf{cos}\,\psi + \sqrt{T^2+P^2-F_y^2}\cdot\mathbf{sin}\,\psi = F_y.$$

Откуда

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{sin}\,\psi &= \frac{F_z\cdot\sqrt{T^2+P^2-F_y^2} - F_x\cdot Q}{F_x^2+F_z^2}, \\ \mathbf{cos}\,\psi &= \frac{F_x\cdot\sqrt{T^2+P^2-F_y^2} + F_z\cdot Q}{F_x^2+F_z^2}, \\ tg\,\psi &= \frac{F_z\cdot\sqrt{T^2+P^2-F_y^2} - F_x\cdot Q}{F_x\cdot\sqrt{T^2+P^2-F_y^2} + F_z\cdot Q}. \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

Прямая подстановка выражений (9) и (10) показывает, что полученные соотношения определяют значения ***sin*** и ***cos*** некоторых углов и удовлетворяют системе (7).

2.2 Вариант 2: ψ=0=constant

Рассмотрим вариант $\psi=0=const$.

Система уравнение (2-4) преобразуется к виду:

$$\left.\begin{aligned} F_x &= T\cdot\cos\theta + Q\cdot\sin\theta\cdot\sin\varphi + P\cdot\sin\theta\cdot\cos\varphi; \\ F_y &= -T\cdot\sin\theta + Q\cdot\cos\theta\cdot\sin\varphi + P\cdot\cos\theta\cdot\cos\varphi; \\ F_z &= Q\cdot\cos\varphi - P\cdot\sin\varphi. \end{aligned}\right\} \quad (11)$$

Вычисление по схеме варианта 1 позволяют получить необходимое условие применимости варианта 2:

$$P^2 + Q^2 - F_z^2 \geq 0 \quad (12)$$

и соотношения для определения требуемых значений углов φ и θ:

$$\left.\begin{aligned} \sin\varphi &= \frac{1}{P^2+Q^2}\cdot\left[Q\cdot\sqrt{P^2+Q^2-F_z^2} - P\cdot F_z\right], \\ \cos\varphi &= \frac{1}{P^2+Q^2}\cdot\left[P\cdot\sqrt{P^2+Q^2-F_z^2} + Q\cdot F_z\right], \\ tg\varphi &= \frac{Q\cdot\sqrt{P^2+Q^2-F_z^2} - P\cdot F_z}{T\cdot\sqrt{P^2+Q^2-F_z^2} + Q\cdot F_z}, \end{aligned}\right\} \quad (13)$$

$$\left.\begin{aligned} \sin\theta &= \frac{1}{F_x^2+F_y^2}\cdot\left[F_x\cdot\sqrt{P^2+Q^2-F_z^2} - T\cdot F_y\right], \\ \cos\theta &= \frac{1}{F_x^2+F_y^2}\cdot\left[F_y\cdot\sqrt{P^2+Q^2-F_z^2} + T\cdot F_x\right], \\ tg\theta &= \frac{F_x\cdot\sqrt{P^2+Q^2-F_z^2} - T\cdot F_y}{F_y\cdot\sqrt{P^2+Q^2-F_z^2} + T\cdot F_x}. \end{aligned}\right\} \quad (14)$$

2.3 Вариант 3: θ=0=constant

Вычисления по схеме вариантов 1 и 2 дают необходимое условие применения варианта 3 в виде:

$$Q^2 + P^2 - F_y^2 \geq 0 \quad (15)$$

и соотношения для вычисления углов φ и ψ:

$$
\left.
\begin{aligned}
&\sin\varphi = \frac{1}{Q^2+P^2}\cdot\left[Q\cdot F_y - P\cdot\sqrt{Q^2+P^2-F_y^2}\right],\\
&\cos\varphi = \frac{1}{Q^2+P^2}\cdot\left[P\cdot F_y + Q\cdot\sqrt{Q^2+P^2-F_y^2}\right],\\
&tg\varphi = \frac{Q\cdot F_y - P\cdot\sqrt{Q^2+P^2-F_y^2}}{P\cdot F_y + Q\cdot\sqrt{Q^2+P^2-F_y^2}},
\end{aligned}
\right\} \tag{16}
$$

$$
\left.
\begin{aligned}
&\sin\psi = \frac{1}{F_x^2+F_z^2}\cdot\left[T\cdot F_z - F_x\cdot\sqrt{Q^2+P^2-F_y^2}\right],\\
&\cos\psi = \frac{1}{F_x^2+F_z^2}\cdot\left[T\cdot F_x + F_z\cdot\sqrt{Q^2+P^2-F_y^2}\right],\\
&tg\psi = \frac{T\cdot F_z - F_x\cdot\sqrt{Q^2+P^2-F_y^2}}{T\cdot F_x + F_z\cdot\sqrt{Q^2+P^2-F_y^2}}.
\end{aligned}
\right\} \tag{17}
$$

3 Результаты моделирования

Для иллюстрации применения разработанных вычислительных процедур проведено моделирование взлета и посадки аппарата в соответствии с вариантом 1.

Желаемая траектория описывается уравнениями [6]:

$$
\left.
\begin{aligned}
&\ddot{x} + 2\cdot K_x\cdot\dot{x} + K_x^2\cdot(x - x_r) = 0,\\
&\ddot{y} + 2\cdot K_y\cdot\dot{y} + K_y^2\cdot y = 0,\\
&\ddot{z} + 2\cdot K_z\cdot\dot{z} + K_z^2 = 0,
\end{aligned}
\right\} \tag{18}
$$

и, следовательно:

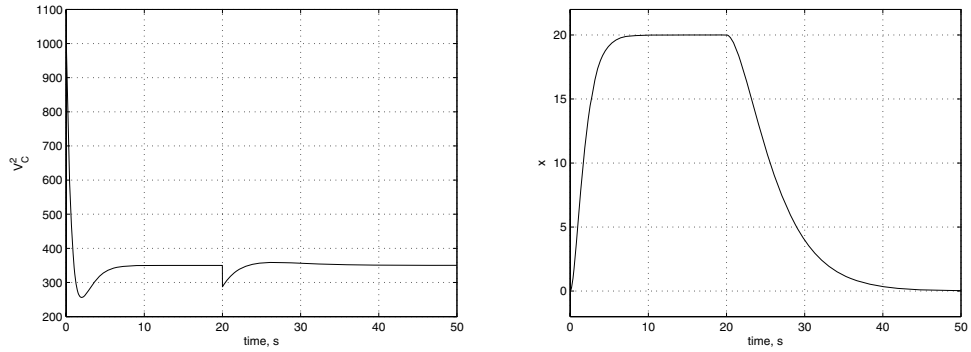
$$
\left.
\begin{aligned}
&F_x = -m\cdot[2\cdot K_x\cdot\dot{x} + K_x^2\cdot(x - x_r) - g],\\
&F_y = -m\cdot[2\cdot K_y\cdot\dot{y} + K_y^2\cdot y],\\
&F_z = -m\cdot[2\cdot K_z\cdot\dot{z} + K_z^2\cdot z].
\end{aligned}
\right\} \tag{19}
$$

При моделировании принято:

$$
x_r(t) = \begin{cases} 20\ м \quad при \quad 0 < t < 20\,c; \\ 0\ м \quad при \quad t \geq 20\,c. \end{cases}
$$

$x_r(0) = 0\ м.$

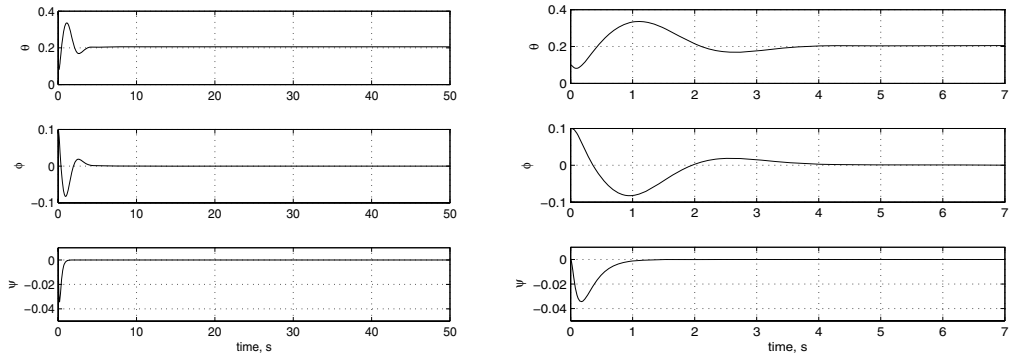
На рисунке 2 приведены изменения квадрата скорости потока воздуха *Vc*, создаваемого тянущим винтом, и координата *x* аппарата, во временной области.



а б

Рисунок 2 – Изменения квадрата скорости потока воздуха *Vc* (а) и координаты *x* (б)

Изменение углов ориентации аппарата *θ, φ, ψ* во временной области, в том числе в увеличенном временном масштабе показано на рисунках 3а, 3б, соответственно.



а б

Рисунок 3 – Изменение углов ориентации *θ, φ, ψ* аппарата

Заключение

В работе рассмотрена задача определения углов ориентации летательного аппарата, обеспечивающих стабилизацию режимов вертикального взлета и посадки. Необходимые углы ориентации рассчитаны в предположении, что аэродинамические силы и моменты определяются потоком воздуха, создаваемым тянущим винтом. Приведены результаты моделирования для демонстрации эффективности предложенного метода.

Список литературы

[1] Blitch, J. “World Trade Center Search-and-Rescue Robots”, Plenary Session IEEE Int Conf Robotics and Automation, Washington D.C., May 2002.

[2] Murphy, R., et al “Mobility and sensing demands in USAR”, IEEE Industrial Electronics Conference (IECON), V1, pp. 138-142, 2000.

[3] Ф. Р. Гантмахер. Лекции по аналитической механике: Учебное пособие для вузов. / Под ред. Е.С. Пятницкого. – 3-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 264 с.
[4] William E. Green and Paul Y. Oh Autonomous hovering of a fixed-wing micro air vehicle Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2006, pp. 2164 – 2169.
[5] A. Frank, J. S. McGrew, M. Valenti, D. Levine, J. P. How. Hover, Transition, and Level Flight Control Design for a Single-Propeller Indoor Airplane, In AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (GNC), 2007 (AIAA 2007-6318).
[6] С. А. Белоконь, Ю. Н. Золотухин, А. С. Мальцев, А. А. Нестеров, М. Н. Филиппов, А.П. Ян. Управление параметрами полёта квадрокоптера при движении по заданной траектории. // Автометрия, 2012, 5, С. 32-42.

ОДНА ЗАДАЧА МАРШРУТИЗАЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ В ВИДЕ УСЛОВИЙ ПРЕДШЕСТВОВАНИЯ

А.Г. Ченцов, М.С. Кошелева

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения РАН
620990, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 16, Россия
chentsov@imm.uran.ru, kosheleva.ms@gmail.com
тел: +7 (343) 374-83-32, факс: +7 (343) 374-25-81

Ключевые слова: *динамическое программирование, маршрут, условия предшествования.*

Abstract
A routing problem under constraints and with complex cost function is considered. The statement of the problem is connecting with the engineering problem of dismanting radiation sources.

Введение

Рассматривается задача курьера [1] с усложнённой матрицей затрат: по постановке допускается зависимость стоимости перемещений от списка заданий, не выполненных на момент соответствующего перемещения. Такая постановка отвечает простейшей модели актуальной инженерной задачи о демонтаже энергоблока АЭС, выведенного из эксплуатации. В данной задаче радиационное воздействие на работника, выполняющего операции по демонтированию фрагментов оборудования энергоблока, определяется совокупностью излучающих элементов, которые ещё не демонтированы. При этом текущее воздействие каждого такого источника на работника обратно пропорционально квадрату расстояния между ними; данное воздействие следует интегрировать вдоль траектории движения работника. В результате получается «не метрический» вариант задачи курьера (задача коммивояжера с условиями предшествования). Рассматривается оптимальная процедура на основе динамического программирования и эвристический алгоритм, реализованные на ПЭВМ.

Сводка обозначений общего характера. Через $\{x\}$ обозначаем одноэлементное множество, содержащее объект x; $\emptyset$ - пустое множество. Если z – упорядоченная пара (УП) объектов x и y, т. е. $z = (x, y)$, то через $pr_1(z)$ и $pr_2(z)$ условимся обозначать компоненты z, т. е. $pr_1(z) = x$ и $pr_2(z) = y$. Через $\mathbb{N} \triangleq \{1;2;\ldots\}$ обозначаем множество всех натуральных чисел, $\mathbb{N}_0 \triangleq \{0\} \cup \mathbb{N} = \{0;1;2\ldots\}$; $\overline{k,l} \triangleq \{i \in \mathbb{N}_0 | (k \leq i) \& (i \leq l)\}\ \forall k \in \mathbb{N}_0\ \forall l \in \mathbb{N}_0$. Если K – непустое конечное множество, то $|K|$ есть его мощность; (полагаем также $|\emptyset|=0$).

Наряду с УП рассматриваем триплеты: если a, b и c — объекты, то $(a,b,c) \triangleq ((a,b),c)$; если A, B и C — множества, то $A \times B \times C \triangleq (A \times B) \times C$. Мы следуем здесь стандартным определениям [2, с.17].

Специальные обозначения. Всюду в дальнейшем фиксируем число N, $N \geq 2$, точку 0 рассматриваем в качестве базы процесса посещения «городов» с индексами из $\overline{1,N}$. Последующие определения извлекаются из [3, ч.2] для случая, когда рассматриваются одноэлементные мегаполисы.

Через $\mathbb{P}$ рассматриваем множество всех перестановок в $\overline{1,N}$, называемых (полными) маршрутами посещения «городов», определяемых соответствующими индексами из $\overline{1,N}$. Таким образом, рассматриваем процессы

(1) $\quad 0 \to \alpha(1) \to \cdots \to \alpha(N) \to 0,$

где $\alpha \in \mathbb{P}$; на выбор α могут накладываться ограничения. С этой целью фиксируем множество $\mathbf{K}$, $\mathbf{K} \subset \overline{1,N} \times \overline{1,N}$ (случай $\mathbf{K} = \emptyset$ не исключается и отвечает отсутствию ограничений в виде условий предшествования). Элементы $\mathbf{K}$, являющиеся УП, называем адресными парами, для каждой из которых первый элемент имеет смысл отправителя, а второй — получателя (сообщения, груза и т.п.). Мы постулируем, что для каждого непустого множества $\mathbf{K}_0$, $\mathbf{K}_0 \subset \mathbf{K}$, непременно существует УП $z_0 \in \mathbf{K}_0$, для которой $pr_1(z_0) \neq pr_2(z_0)\ \forall\, z_0 \in \mathbf{K}_0$. Требуется, чтобы выбранный маршрут $\alpha \in \mathbb{P}$ обеспечивал более ранее (в сравнении с получателем) посещение отправителя для каждой адресной пары. Определяем в этой связи при $\alpha \in \mathbb{P}$ обратную (к α) перестановку $\alpha^{-1} \in \mathbb{P}$ (итак, $\alpha^{-1}\big(\alpha(k)\big) = \alpha\big(\alpha^{-1}(k)\big) = k\ \ \forall\, k \in \overline{1,N}$). Тогда [3, ч.2]

(2) $\quad \mathbb{A} \triangleq \big\{\alpha \in \mathbb{P} \big| \alpha^{-1}\big(pr_1(h)\big) < \alpha^{-1}\big(pr_2(h)\big)\ \ \forall h \in \mathbf{K}\big\} \neq \emptyset$

есть множество всех допустимых по предшествованию маршрутов, которые только и могут использоваться в (1).

1 Постановка задачи

Функции стоимости. Введем способы оценивания перемещения и терминального состояния. Фиксируем отображение

(3) $\quad c\colon \overline{0,N} \times \overline{0,N} \times \mathfrak{N} \to [0,\infty[,$

где $\mathfrak{N}$ – семейство всех непустых подмножеств $\overline{1,N}$; используем (3) для оценивания перемещений между «городами». Кроме того, пусть $\boldsymbol{f}\colon \overline{0,N} \to [0,\infty[$ (содержательный смысл имеют значения $\boldsymbol{f}(t)$ при $t \in \overline{1,N}$; расширенное определение $\boldsymbol{f}$ выбрано из соображений согласования с [4]). На основе $\boldsymbol{c}$ и $\boldsymbol{f}$ формируем аддитивный критерий, полагая при $\alpha \in \mathbb{P}$, что

(4) $\quad \mathfrak{C}_\alpha \triangleq \boldsymbol{c}(0,\alpha(1),\overline{1,N}) + \sum_{t=1}^{N-1} \boldsymbol{c}(\alpha(t),\alpha(t+1),\{\alpha(j)\colon j \in \overline{t+1,N}\}) + \boldsymbol{f}\big(\alpha(N)\big).$

Основная задача маршрутизации (ОЗМ) имеет следующий вид

(5) $\quad \mathfrak{C}_\alpha \to min,\ \ \alpha \in \mathbb{A}.$

Через V обозначаем значение (экстремум) задачи (5), т.е. наименьшее из чисел $\mathfrak{C}_\alpha$, $\alpha \in \mathbb{A}$. Маршрут $\alpha_0 \in \mathbb{A}$ называем оптимальным, если $\mathfrak{C}_{\alpha_0} = V$. Наша цель состоит в определении V и построении какого-либо оптимального маршрута.

2 Динамическое программирование

Наряду с ОЗМ (5) рассматриваем частичные или укороченные задачи. Речь идет о случае посещения «городов» из множеств $K \in \mathfrak{N}$ при условии, что начальный пункт есть $s \in \overline{0,N}$ (разумеется, вариант $s = 0$ и $K = \overline{1,N}$ также допускается). Для формирования упомянутых задач мы, следуя [3], заменяем допустимость по предшествованию допустимостью «по вычеркиванию», используя при этом оператор $\mathbf{I}$ [3, (2.2.27), (2.2.28)].

В связи с построением расширения ОЗМ введем в рассмотрение при $K \in \mathfrak{N}$ множество $(\mathrm{bi})[K]$ всех биекций «отрезка» $\overline{1,|K|}$ на K (итак, элементы $(\mathrm{bi})[K]$ – суть взаимно однозначные отображения $\overline{1,|K|}$ на K и только они), а также множество $(\mathbf{I} - \mathrm{bi})[K]$ всех биекций $\alpha \in (\mathrm{bi})[K]$ со свойством

$\alpha(k) \in \mathbf{I}\,(\{\alpha(l)\colon l \in \overline{k,|K|}\})\ \forall k \in \overline{1,|K|}$.

Такие биекции будем называть частичными маршрутами, допустимыми по вычеркиванию. Напомним, что [3, ч. 2] $(\mathbf{I} - \mathrm{bi})[K] \neq \emptyset\ \forall K \in \mathfrak{N}$. Кроме того, $\mathbb{A} = (\mathbf{I} - \mathrm{bi})[\overline{1,N}]$ [3, (2.2.32), теорема 2.2.1].

Условимся о соглашении: под расширением ОЗМ понимаем определенную ниже систему (укороченных или частичных) задач. Если $s \in \overline{0,N}$, $K \in \mathfrak{N}$ и $|K| \geq 2$, то рассматриваем задачу

(6) $\boldsymbol{c}(s,\alpha(1),K)+\sum_{t=1}^{|K|-1}\boldsymbol{c}\big(\alpha(t),\alpha(t+1),\{\alpha(j)\colon j\in\overline{t+1,|K|}\}\big)+\boldsymbol{f}\big(\alpha(|K|)\big)\to\min,$
$\alpha\in(\mathbf{I}-\mathrm{bi})[K],$

которой сопоставляем экстремум (значение) $\mathrm{v}(s,K)\in[0,\infty[$, определяемый обычным образом.

Если же (при $s\in\overline{0,N}$ и $K\in\mathfrak{N}$) $|K|=1$, то определяем $\mathrm{v}(s,K)\triangleq\boldsymbol{c}(s,r,\{r\})+\boldsymbol{f}(r)$, где $r\in\overline{1,N}$ есть такой единственный индекс, для которого $K=\{r\}$. В этом случае мы рассматриваем $\mathrm{v}(s,K)$ как значение тривиальной задачи о переходе из «города» с номером s в «город» с номером *r*.

Замечание 1. В ситуации $K=\{r\}$, где $r\in\overline{1,N}$, имеем (в силу вышеупомянутого условия), что $\mathbf{I}(K)=\mathbf{I}(\{r\})=\{r\}=K$ (см. [3, предложение 2.2.1]). Тогда $(\mathbf{I}-\mathrm{bi})[K]=(\mathrm{bi})[K]=\{a_r\}$, где $a_r\colon\{1\}\to K$ определяется правилом $a_r(1)\triangleq r$. Данное свойство позволяет толковать $\mathrm{v}(s,K)=\mathrm{v}(s,\{r\})$ в виде экстремума в оптимизационной задаче с единственным допустимым элементом a.

Полагаем, наконец, что $\mathrm{v}(s,\emptyset)\triangleq\boldsymbol{f}(s)\ \forall s\in\overline{0,N}$. Определяя $\mathbf{N}\triangleq\mathfrak{N}\cup\{\emptyset\}$, мы получаем функцию Беллмана

$\mathrm{v}\colon\overline{0,\mathrm{N}}\times\mathbf{N}\to[0,\infty[,$
определённую вышеупомянутыми условиями. Из теоремы [3, с.71] вытекает следующее

Предложение 1. Если $s\in\overline{0,N}$ и $K\in\mathfrak{N}$, то

$$\mathrm{v}(s,K)=\min_{j\in\mathbf{I}(K)}[\boldsymbol{c}(s,j,K)+\mathrm{v}(j,K\backslash\{j\})].$$

Напомним, что при $\alpha\in\mathbb{A}$ реализуется включение $\alpha\in(\mathbf{I}-\mathrm{bi})[\overline{1,N}]$, а тогда согласно (4) $\mathfrak{C}_\alpha$ есть критерий задачи (6) в условиях $s=0,\ K=\overline{1,N}$. Поэтому
$\mathrm{v}(0,\overline{1,N})=V.$
Теперь уже вполне очевидным является

Следствие 1. Справедливо следующее равенство:

$$V=\min_{j\in\mathbf{I}(\overline{1,N})}[\boldsymbol{c}(0,j,\overline{1,N})+\mathrm{v}(j,\overline{1,N}\backslash\{j\})].$$

3 Усеченный массив значений функции Беллмана и его слои

В дальнейшем используем конструкцию [3, §4.9], важную роль в которой играют существенные (по предшествованию) списки заданий;

(7) $\mathbf{G}\triangleq\{K\in\mathfrak{N}|\ \forall\mathrm{z}\in\mathbf{K}\ \ (pr_1(z)\in\mathrm{K})\Rightarrow(pr_2(z)\in\mathrm{K})\}$

есть множество всех существенных списков. Элементы (7) ранжируем по мощности, полагая

(8) $\mathbf{G}_s\triangleq\{K\in\mathbf{G}|\ \mathrm{s}=|\mathrm{K}|\}\ \forall\mathrm{s}\in\overline{1,\mathrm{N}}.$

Из (7), (8) следует, что $\mathbf{G}_N=\{\overline{1,\mathrm{N}}\}$ (одноэлементное семейство); кроме того,

(9) $\mathbf{G}_{s-1}=\{K\backslash\{t\}\colon K\in\mathbf{G}_s,\ t\in\mathbf{I}(K)\}\ \forall\mathrm{s}\in\overline{2,\mathrm{N}}.$

Тем самым реализуется рекуррентная процедура построения всех слоёв $\mathbf{G}_1,\ldots,\mathbf{G}_N$ (подробнее см. в [5]). В связи с (9) отметим представление $\mathbf{G}_1$, полагая $\mathbb{K}_1\triangleq\{pr_1(z)\colon z\in\mathbf{K}\}$:
$\mathbf{G}_1=\Big\{\{\mathrm{t}\}\colon\mathrm{t}\in\overline{1,N}\backslash\mathbb{K}_1\Big\};$
полагаем также, что $\mathbf{M}=\overline{1,N}\backslash\mathbb{K}_1$. С каждым семейством $\mathbf{G}_1,\ldots,\mathbf{G}_N$ связываем слой пространства позиций.

Определяем $D_0\triangleq\{(s,\emptyset)\colon s\in\mathbf{M}\}$, что согласуется с [3, с.174]. Кроме того, $D_N\triangleq\{(0,\overline{1,N})\}$ (одноэлементное множество). Для построения промежуточных слоёв $D_1,\ldots,D_{N-1}$ напомним конструкцию [3, §4.9]: если $s\in\overline{1,N-1}$, то полагаем

$\mathcal{T}_s(K) \triangleq \{i \in \overline{1,N}\backslash K | \{i\} \cup K \in \mathbf{G}_{s+1}\}\ \forall K \in \mathbf{G}_s$;
с учётом данного определения полагаем

$$D_s \triangleq \bigcup_{K \in \mathbf{G}_s} \{(j,K): j \in \mathcal{T}_s(K)\}.$$

Таким образом, все слои $D_0, D_1, \dots, D_N$ построены. При этом [3, предложение 4.9.3] слои являются непустыми множествами:

(10) $D_s \neq \emptyset \quad \forall s \in \overline{0,N}$.

Напомним следующее важное свойство [3, предложение 4.9.4]

(11) $(l, K\backslash\{l\}) \in D_{s-1}\ \forall s \in \overline{1,N}\ \ \forall (i,K) \in D_s\ \forall l \in \mathbf{I}(K)$.

С учётом (10) определяем теперь слои самой функции Беллмана: если $s \in \overline{0,N}$, то

(12) $\mathrm{v}_s\colon\ D_s \to [0,\infty[$

определяется правилом:

(13) $\mathrm{v}_s(i,K) \triangleq \mathrm{v}(i,K) \quad \forall (i,K) \in D_s$.

С учётом (11) и (13) мы получаем, что при всяком выборе $s \in \overline{1,N},\ (i,K) \in D_s$ и $l \in \mathbf{I}(K)$ определено значение $\mathrm{v}_{s-1}(l, K\backslash\{l\}) \in [0,\infty[$.

Предложение 2. Если $s \in \overline{1,N}$ и $(i,K) \in D_s$, то
$\mathrm{v}_s(i,K) = \min\limits_{l \in \mathbf{I}(K)} [\boldsymbol{c}(i,l,K) + \mathrm{v}_{s-1}(l, K\backslash\{l\})]$.

Доказательство легко извлекается из [4, (3.13), (3.15)]. Отметим, что функция v_0 определяется непосредственно:

(14) $\mathrm{v}_0(t,\emptyset) = \boldsymbol{f}(t)\ \forall t \in \mathbf{M}$.

Далее, согласно предложению 2 при $m \in \overline{0,N-1}$ преобразование

(15) $\mathrm{v}_m \to \mathrm{v}_{m+1}$

определяется условиями: если $(i,K) \in D_{m+1}$, то

(16) $\mathrm{v}_{m+1}(i,K) = \min_{l \in \mathbf{I}(K)} [\boldsymbol{c}(i,l,K) + \mathrm{v}_m(l, K\backslash\{l\})]$.

После исполнения N шагов типа (15), (16) будет, в частности, определено значение $\mathrm{v}_N(0, \overline{1,N}) \in [0,\infty[$ (см. представление D_N), где согласно (13)

(17) $\mathrm{v}_N(0, \overline{1,N}) = \mathrm{v}(0, \overline{1,N}) = V$.

Таким образом, мы определяем глобальный экстремум *V*.

4 Построение оптимального решения

Сейчас рассмотрим процедуру построения оптимального маршрута, используя только уже построенные слои функции Беллмана (см. (16), (17)). Значения функции Беллмана для позиций, не принадлежащих слоям (10), использоваться не будут и известными не предполагаются. Заметим, что согласно (16), (17)

(18) $V = \min_{k \in \mathbf{I}(\overline{1,N})} [\mathbf{c}(0,k,\overline{1,N}) + \mathrm{v}_{N-1}(k, \overline{1,N}\backslash\{k\})]$.

С учётом (18) построение начинаем с индекса, доставляющего минимум в правой части (18): выбираем индекс

(19) $\mathbb{i}_1 \in \mathbf{I}(\overline{1,N})$

таким, что справедливо равенство

(20) $V = \mathbf{c}(0, \mathbb{i}_1, \overline{1,N}) + \mathrm{v}_{N-1}(\mathbb{i}_1, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_1\})$.

Осуществляем перемещение $0 \to \mathbb{i}_1$. С учётом (11) получаем следующее свойство

(21) $(\mathbb{i}_1,\ \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_1\}) \in D_{N-1}$.

В этом случае определено значение $\mathrm{v}_{N-1}(\mathbb{i}_1, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_1\}) \in [0,\infty[$ (см. (12), (13)), для которого согласно (16)

(22) $\mathrm{v}_{N-1}(\mathbb{i}_1, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_1\}) = \min_{k\in\mathbf{I}(\overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_1\})}[\mathbf{c}(\mathbb{i}_1, k, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_1\}) + \mathrm{v}_{N-2}(k, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_1; k\})]$.

С учётом (22) выбираем очередной индекс

(23) $\mathbb{i}_2 \in \mathbf{I}(\overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_1\})$

так, что при этом достигается равенство

(24) $\mathrm{v}_{N-1}(\mathbb{i}_1, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_1\}) = \mathbf{c}(\mathbb{i}_1, \mathbb{i}_2, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_1\}) + \mathrm{v}_{N-2}(\mathbb{i}_2, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_1; \mathbb{i}_2\})$.

Этапу (23), (24) отвечает перемещение $\mathbb{i}_1 \to \mathbb{i}_2$. Получили начальный «отрезок» $(\mathbb{i}_1, \mathbb{i}_2)$ маршрута. При этом согласно (11), (23)

(25) $(\mathbb{i}_2, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_1; \mathbb{i}_2\}) \in D_{N-2}$

и (см. (12), (13), (25)) определено значение $\mathrm{v}_{N-2}(\mathbb{i}_2, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_1; \mathbb{i}_2\}) \in [0,\infty[$. При этом, комбинируя (20) и (24), получаем, что

(26) $V = \mathbf{c}(0, \mathbb{i}_1, \overline{1,N}) + \mathbf{c}(\mathbb{i}_1, \mathbb{i}_2, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_1\}) + \mathrm{v}_{N-2}(\mathbb{i}_2, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_1; \mathbb{i}_2\})$.

В (26) первые два слагаемых отвечают текущим затратам, а последнее затратам, оптимальным «в перспективе».

Далее следует продолжать процедуру выбора индексов, подобную (19) и (23) (в этой связи заметим, что (19) можно рассматривать как вариант формулы
$\mathbb{i}_t \in \mathbf{I}(\overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_l : l \in \overline{1,t-1}\})$,
отвечающий случаю $t = 1$, поскольку тогда $\overline{1,t-1} = \emptyset$). В результате осуществления N шагов (этапов) упомянутого типа будет построен кортеж

(27) $(\mathbb{i}_j)_{j\in\overline{1,N}} : \overline{1,N} \to \overline{1,N}$,

для которого справедливы следующие условия

$1^0)$ $\mathbb{i}_k \neq \mathbb{i}_l\ \forall k \in \overline{1,N}\ \ \forall l \in \overline{1,N}\backslash\{k\}$;

$2^0)$ $(\mathbb{i}_j, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_s : s \in \overline{1,j}\}) \in D_{N-j}\ \ \forall j \in \overline{1,N}$;

$3^0)$ $\mathbb{i}_t \in \mathbf{I}(\overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_k : k \in \overline{1,t-1}\})\ \ \ \forall t \in \overline{1,N}$;

$4^0)$ $V = \mathbf{c}(0, \mathbb{i}_1, \overline{1,N}) + \sum_{k=1}^{N-1} \boldsymbol{c}(\mathbb{i}_k, \mathbb{i}_{k+1}, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_s : s \in \overline{1,k}\}) + \mathrm{v}_0(\mathbb{i}_N, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_j : j \in \overline{1,N}\})$.

Замечание 2. Полезно сравнить (26) и $4^0)$, а также рассмотреть в этой связи простейший частный случай $N = 2$.

Из 10) вытекает, что кортеж (27) является инъективным отображением и, следовательно [6, с.73], перестановкой $\overline{1,N}$:

(28) $(\mathbb{i}_j)_{j\in\overline{1,N}} \in \mathbb{P}$.

Из (27) вытекает, в частности, что справедливо равенство

$\overline{1,N} = \{\mathbb{i}_j : j \in \overline{1,N}\}$,
и потому, согласно $2^0)$

(29) $(\mathbb{i}_N, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_j : j \in \overline{1,N}\}) = (\mathbb{i}_N, \emptyset) \in D_0$,

что означает по определению D_0, что $\mathbb{i}_N \in \mathbf{M}$ и, кроме того, согласно (14), (29)

(30) $\mathrm{v}_0(\mathbb{i}_N, \overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_j : j \in \overline{1,N}\}) = \boldsymbol{f}(\mathbb{i}_N)$.

С другой стороны, из (28) следует, что

(31) $\overline{1,N}\backslash\{\mathbb{i}_s : s \in \overline{1,k}\} = \{\mathbb{i}_s : s \in \overline{k+1,N}\}\ \ \forall k \in \overline{0,N-1}$.

Из 4^0) вытекает (см. (4), (30), (31)) очевидное равенство

(32) $V = \mathbf{c}(0, \mathbb{i}_1, \overline{1,N}) + \sum_{k=1}^{N-1} \boldsymbol{c}(\mathbb{i}_k, \mathbb{i}_{k+1}, \{\mathbb{i}_s : s \in \overline{k+1,N}\}) + \boldsymbol{f}(\mathbb{i}_N) = \mathfrak{C}_{(\mathbb{i}_j)_{j\in\overline{1,N}}}$.

Теперь обратимся к 3^0), учитывая (31): имеем из 3^0), что

(33) $\mathbb{i}_t \in \mathbf{I}(\{\mathbb{i}_s : s \in \overline{t,N}\}) \quad \forall s \in \overline{1,N}$.

Из (28) и (33) получаем (см. раздел 2), что кортеж (27) есть элемент $(\mathbf{I} - \mathrm{bi})[\overline{1,N}]$, а потому

(34) $(\mathbb{i}_j)_{j\in\overline{1,N}} \in \mathbb{A}$.

Из (32), (34) получаем, что (27) есть оптимальное решение ОЗМ.

6 Эвристический алгоритм

Для решения задачи большой размерности был разработан также эвристический алгоритм, учитывающий специфику задачи и не требующий больших затрат на вычисление.

Сейчас зафиксируем $\beta \in [0,1]$. Ограничимся описанием одного шага (этапа) работы эвристического алгоритма, в котором β является заданным параметром.

Пусть $K \in \mathfrak{N}$ и $i \in \overline{0,N}\backslash K$. Здесь i характеризует текущее положение, а K – список невыполненных на момент перемещения заданий. Следует указать $j \in \mathbf{I}(K)$ в качестве конечного пункта для перемещения из «города» i. Предлагается этот выбор осуществлять из условия

(35) $\boldsymbol{c}(i,j,K) + \beta \min_{s\in\mathbf{I}(K\backslash\{j\})} \boldsymbol{c}(j,s,K\backslash\{j\}) + (1-\beta)\max_{s\in\mathbf{I}(K\backslash\{j\})} \boldsymbol{c}(j,s,K\backslash\{j\})$

$= \min\limits_{l\in\mathbf{I}(K)} (\boldsymbol{c}(i,l,K) + \beta \min\limits_{s\in\mathbf{I}(K\backslash\{l\})} \boldsymbol{c}(l,s,K\backslash\{l\}) + (1-\beta) \max\limits_{s\in\mathbf{I}(K\backslash\{l\})} \boldsymbol{c}(l,s,K\backslash\{l\}))$.

Здесь β играет роль параметра управления и выбирается из отрезка [0,1]. Тогда при каждом конкретном $\beta \in [0,1]$, выбираемым с заданным шагом дискретизации (например, 0.01) мы получаем маршрут и соответствующий данному маршруту критерий. Выбираем ту величину параметра β и соответствующий этой величине маршрут, при которой это значение является наименьшим. Отметим, что на концах отрезка (а именно, $\beta = 0$ и $\beta = 1$), решение задачи сводится к приближенным алгоритмам, предложенным в работах [8, 9].

Если такой индекс j определяется неединственным образом, предлагается выбирать наименьший среди всех, удовлетворяющих условию (35).

Функции стоимости. В данном конкретном случае предполагалось, что значение $\boldsymbol{c}(i,j,K)$, где $K \in \mathfrak{N}$, получается суммированием

(36) $\boldsymbol{c}(i,j,K) = \sum_{k\in K} \boldsymbol{c}(i,j,\{k\})$,

где в соответствии с (4) $i \in \overline{0,N},\ j \in \overline{1,N},\ i \neq j,\ K \in \mathfrak{N},\ i \notin K, j \in K$. Для прочих вариантов триплета (i,j,K) значение $\boldsymbol{c}(i,j,K)$ может быть выбрано произвольным (в частности нулевым). Что же касается величин $\boldsymbol{c}(i,j,\{k\}),\ i \in \overline{0,N},\ j \in \overline{1,N},\ k \in \overline{1,N}, i \neq k$, то они получаются интегрированием зависимости, обратно пропорциональной квадрату расстояния от точки на прямой, соединяющей «города» i и j, до города k. При этом построении имеются некоторые особенности (в части интегрирования), касающиеся пребывания в ближних зонах, отвечающих «городам» j и k.

7 Вычислительный эксперимент. Модельный пример

Рассмотрим в качестве примера модель конкретного помещения с размещенной в нем радиоактивной системой, включающей в себя оборудование, связанное между собой трубопроводами: 12 участков трубопроводов, три фильтра, две единицы запорной арматуры (задвижки). При моделировании системы принимаем, что она состоит из простых геометрических тел (например, нижние части задвижек представляют собой полусферы, верхние – цилиндры) – рисунок 1.

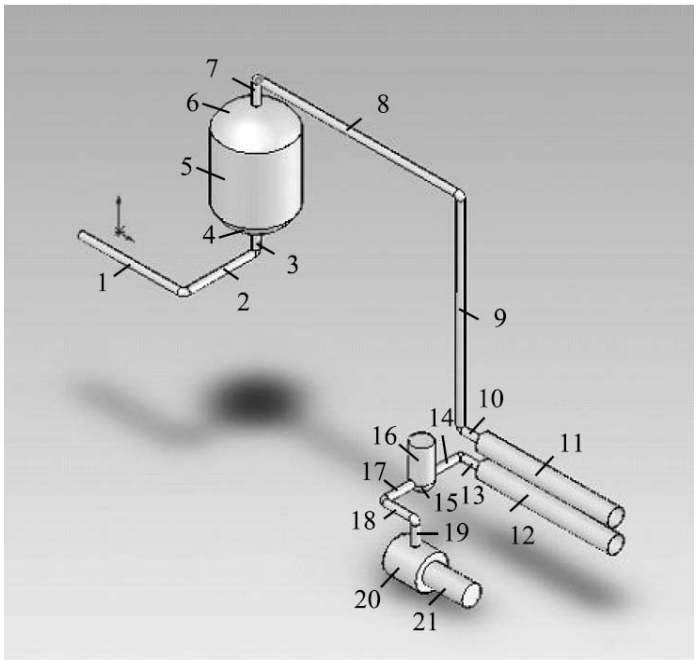


Рисунок 1 – Схема оборудования в помещении: 1, 2, 3, 7, 8, 9,10, 13, 14, 17, 18, 19 – участки трубопроводов; 4, 6, 15 – сферические днища; 5, 11, 12, 16, 20 – цилиндр; 4-6 – фильтр; 11, 12 – теплообменник; 15,16 – арматура (задвижка, клапан); 20 – насос; 21 – электродвигатель (привод насоса)

Геометрические характеристики помещения и оборудования в этом помещении нам известны. Демонтаж (механическая или огневая резка, разборка резьбового соединения и т.д.) каждого фрагмента (элемента) радиоактивной системы осуществляем в одной или нескольких точках. Каждая «точка» (место, в котором производим демонтаж конкретного фрагмента системы) задается координатами (x, y, z). На последовательность выполнения работ по демонтажу могут накладываться условия предшествования.

Если фрагмент оборудования, который необходимо демонтировать, находится на высоте 1,3 метра и более, то операции считаются «работами на высоте». В этом случае работы необходимо выполнять с лесов или подмостей, обеспечивающих безопасное производство демонтажных операций. Леса оборудуются лестницами или трапами и должны иметь соответствующие ограждения [7].

Решаем задачу о выполнении работ по демонтажу 21 элемента с различным количеством точек демонтажа (N=21, N=25, N=30; возможна ситуация: фрагменту оборудования отвечает несколько точек демонтажа). Исполнитель начинает свою работу из заданного начального пункта – вход в помещение.

Вычислительный эксперимент. Приведенные выше алгоритмы (МДП и эвристический) для решения маршрутной задачи с особенностями, обусловленными необходимостью последовательного выведения компонентов системы из рабочего режима были реализованы в виде программных комплексов, разработанных на платформе .Net с использованием языка C#.

Вычислительный эксперимент проводился на компьютере Notebook Lenovo с процессором Core i5-2410M с частотой 2.3GHz, объемом оперативной памяти 3.0 ГБ с установленной 32-разрядной операционной системой Windows 7 Professional.

Результаты расчета.

Таблица 1 – Результаты расчета для 5 различных наборов заданий (N=21) без условий предшествования

№ набора	Эвристика		МДП			Качество эвристики, %
	Значение	Параметр β	Значение	Время счета,ч	Память, Кб	
1	257299,5	0.63	250957,8	00:11:00	440524	2,5
2	248974,9	0	240839,7	00:10:54	440536	3,38
3	255691,7	1	247434,8	00:10:54	440456	3,34
4	321146,5	0.01	312954,1	00:10:54	440564	2,62
5	248565,3	0	246691,6	00:10:56	440546	0,75

Таблица 2 – Результаты расчета для 5 различных наборов заданий (N=21) с условиями предшествования (20 адресных пар)

№ набора	Эвристика		МДП			Качество эвристики, %
	Значение	Параметр β	Значение	Время счета,ч	Память, Кб	
1	280505	1	273704,7	00:00:07	15436	2,48
2	276105,9	0.6	240839,8	00:00:07	15548	14,64
3	282962,2	0.9	247434,9	00:00:07	15544	14,35
4	320419,2	0.85	317732,9	00:00:07	15536	0,85
5	278910,3	0.87	270490	00:00:07	15540	3,11

Таблица 3 - Результаты расчета для набора заданий (N=25) с условиями предшествования (23 адресные пары)

N	Эвристика		МДП			Качество эвристики, %
	Значение	Параметр β	Значение	Время счета,ч	Память, Кб	
25	462663,8	1	382140,8	00:01:08	58744	21,07

Таблица 4 – Результаты расчета для 5 различных наборов заданий (N=21) с условиями предшествования (10 адресных пар)

№ набора	Эвристика		МДП			Качество эвристики, %
	Значение	Параметр β	Значение	Время счета,ч	Память, Кб	
1	292080,8	1	250957,9	00:00:22	35644	16,39
2	246045,6	0.33	240839,8	00:00:22	35412	2,16
3	255691	1	247434,9	00:00:22	35588	3,34
4	720898	0.01	707753,8	00:00:22	35548	1,86
5	252918,5	0.52	246691,6	00:00:22	35692	2,52

Таблица 5 - Результаты расчета для набора заданий (N=30) с условиями предшествования (27 адресных пар)

N	Эвристика		МДП			Качество эвристики, %
	Значение	Параметр β	Значение	Время счета,ч	Память, Кб	
30	513245,4	1	434807,1	00:41:16	1527110	18,04

Заданные условия предшествования (27 адресных пар):
(21, 1); (21, 2); (20, 3); (19, 4); (19, 5); (18, 6); (18, 7);(18, 8); (17, 10); (16, 11); (15, 12); (14, 13); (8, 5); (21, 14); (20, 15); (18, 16); (16, 9); (19, 17); (20, 18); (21, 19); (10, 20); (8, 22); (13, 23); (13, 24); (13, 25); (10, 26); (10, 27).
Оптимальный путь:
0→29→28→21→19→17→10→30→20→18→16→11→8→3→2→1→9→14→15→13→22→23→25→26→27→7→12→6→4→5→24
Путь, найденный с использованием эвристики:
0→29→28→21→14→13→23→25→30→24→2→1→19→4→17→10→27→26→20→18→15→6→3→7→8→5→16→22→9→11→12.

Отметим, что время счета для экспериментов, проведенных с использованием эвристического алгоритма, меньше секунды.

Заключение

В работе излагаются некоторые методы и алгоритмы решения экстремальных задач маршрутизации, ориентированных на проблему демонтажа радиоактивной системы. Рассматривается оптимальный алгоритм решения усложненной задачи курьера в «точечной» постановке (в отличие от [4, 10, 11], где исследовались задачи о последовательном обходе мегаполисов) и эффективный эвристический алгоритм с параметром управления. В последнем случае параметр использовался в качестве дополнительного инструмента оптимизации. Для точного и эвристического алгоритмов проведено сравнение на основе обширного вычислительного эксперимента; полученные результаты показали, что соответствующий проигрыш в качестве не является существенным.

Список литературы

[1] Меламед И.И., Сергеев С.И., Сигал И.Х. Задача коммивояжера. I. Вопросы теории; II. Точные алгоритмы. III. Приближенные алгоритмы // Автоматика и телемеханика. 1989. №9 С. 3- 34; №10. С. 3-29; №11. С. 3-26.

[2] Дьедонне Ж. Основы современного анализа / Ж. Дьедонне. М.: Мир, 1964. 430 с.

[3] Ченцов А.Г. Экстремальные задачи маршрутизации и распределения заданий: вопросы теории / А.Г. Ченцов. М.; Ижевск.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. 240 с.

[4] Сесекин А.Н., Ченцов А.А., Ченцов А.Г. Обобщенная задача курьера с функцией затрат, зависящей от списка заданий // Изв. РАН. ТиСУ, №2. 2010. С. 68-77.

[5] Ченцов А.Г. Одна параллельная процедура построения функции Беллмана в обобщенной задаче курьера с внутренними работами // Вестник ЮУрГУ. Сер. Мат. моделирование и программирование. 2012. № 18, вып. 12. С.53-76.

[6] Ченцов А.Г. Множества, события, вероятность (основные структуры) / А.Г. Ченцов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. 199 с.

[7] Правила охраны труда при эксплуатации тепломеханического оборудования и тепловых сетей атомных станций ФГУП Концерн «Росэнергоатом» СТО 1.1.1.02.001.0673-2006. М.: Концерн «Росэнергоатом», 2007. –198 с.

[8] Морина М.С., Ченцов А.Г. Об одном алгоритме решения задачи маршрутизации процесса выведения элементов системы из рабочего режима // Алгоритмы и программные средства параллельных вычислений: сб. науч. тр. Екатеринбург, 2010. Вып. 10. С. 25-35.

[9] Коротаева Л.Н., Сбоев С.А., Хасанова И.С., Ченцов А.Г. Об одном алгоритме маршрутизации задачи обхода конечной системы множеств // Алгоритмы и программные средства параллельных вычислений: сб. науч. тр. Екатеринбург, 1999. Вып. 3. С. 95-106.

[10] Сесекин А.Н., Ченцов А.А., Ченцов А.Г. Задачи маршрутизации: учебное пособие / А.А., Ченцов, А.Г. Ченцов, А.Н. Сесекин. СПб.: Изд-во «Лань», 2011.-240 с.

[11] Коробкин В.В., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Ченцов А.Г. Методы маршрутизации и их приложения в задачах повышения безопасности и эффективности эксплуатации атомных станций / А.Г. Ченцов, А.Н. Сесекин, В.В. Коробкин, О.Л. Ташлыков. М.: Новые технологии, 2012.-233 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ТРАЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЕМ

В.И. Меркулов, Д.А. Миляков В.С. Чернов
ОАО «Концерн «Вега»
121170, Москва, Кутузовский проспект, 34, Россия
from_fn@mail.ru
тел: +7 (499) 249-94-76

Ключевые слова: *траекторное управление наблюдением; информативность; системные показатели БРЛС; тактические показатели РЛС; статистическая теория оптимального управления; первичная, вторичная обработка сигналов.*

Abstract
A design of bistatic angle finder of spatially distributed airborne radio electronic control system is studied. The variant is intended for solution of a range of practical tasks which require continuous estimation of characteristics of radio sources.
A variant of control of the receiving post of informational support with minimisation of localisation error of radio source is proposed. An algorithm is demonstrated based on statistical theory of optimal control of dynamic processes and its study is conducted.
The gradient method of non-linear programming is used for obtaining optimal control of the receiving post of informational support.
Results of a simulation are presented.

Существует ряд задач народнохозяйственного назначения, охраны государственной границы, проведения антитеррористических мероприятий, обеспечения действий в чрезвычайных ситуациях, требующих для своего решения непрерывного ведения мониторинга работы источников радиоизлучений, в процессе которого выполняются такие операции как поиск, обнаружение, распознавание, отождествление и определение местоположения источников радиоизлучений (ИРИ). Для решения указанных задач могут применяться распределенные угломерные радиоэлектронные системы управления воздушного базирования (РЭСУ ВБ), состоящие из пункта сбора, обработки информации и управления (ПОИУ) на базе воздушного командного пункта и подвижных приемных позиций (ПП), на которых осуществляется прием сигналов от ИРИ. Извлекаемая на каждой ПП из принимаемых сигналов информация транслируется по радиолиниям связи в ПОИУ и на другие ПП. На начальном этапе в ПОИУ производится коллективное распределение целей (задач) между ПП, необходимое для достижения общей групповой цели, и при необходимости разбиение всей совокупности ПП на отдельные группы.

Результаты решения задачи коллективного распределения целей передаются с ПОИУ через многоканальную командную радиолинию управления (КРУ) на ПП, базирующиеся на пилотируемых и беспилотных летательных аппаратах (ЛА). Далее начинается этап самостоятельного функционирования ПП, на котором осуществляется коллективная или стайная стратегия управления ими [1]. Коллективное управление ПП применяется при необходимости точного определения местоположения всех ИРИ в заданном географическом районе. Стратегия стайного управления используется в тех случаях, когда требуется обеспечить встречу назначенных ПП или объектов, запускаемых с ПП, с выбранными ИРИ.

Для формирования сигналов траекторного управления на ПП предварительно вырабатываются оценки относительных и абсолютных координат и параметров движения ИРИ. Особенность процедуры оценивания в рассматриваемых системах состоит в том, что точность оценивания фазовых координат ИРИ в существенной степени зависит от взаимного положения

ПП и ИРИ, т.е. от геометрии решения задачи местоопределения цели. Установлено [2], что точность оценивания наиболее высока, если угол пересечения линий положения (пеленгов) ИРИ, измеряемых из двух точек, достаточно близок к прямому, и заметно снижается, если линии положения пересекаются под острым углом. Поэтому для достижения высокой эффективности функционирования распределенных угломерных (РУ) РЭСУ ВБ предпринимают определенные организационные мероприятия, направленные на построение требуемого взаимного положения ПП и ИРИ. Проведение этих мероприятий существенно упрощается при объединении ПП в отдельные пары. При этом на ПП, входящие в состав пары, может быть возложено решение разных задач. В частности, одна из ПП (ведущая) непосредственно решает задачу сближения и встречи с ИРИ, другая ПП — задачу информационной поддержки. В этом случае ведущая ПП управляется системой наведения по известным алгоритмам [3], которые выбираются в соответствие с поставленными целями сближения. Полет ПП информационной поддержки (ИП) организуется таким образом, чтобы обеспечить требуемое взаимное пространственное положение ИРИ и ПП. В результате образуется угломерная двухпозиционная радиоэлектронная система управления (УДП РЭСУ), которая, по терминологии, принятой в [1], представляет собой гетерогенный кластер. Кластеризация ПП на пары особенно целесообразна при реализации стратегии стайного управления в РУ РЭСУ.

Рассмотрим принцип функционирования РУ РЭСУ, используя для этого упрощенную структурную схему, представленную на рисунке 1. Для простоты на этом рисунке показана одна УДП РЭСУ, в общем случае таких систем может быть множество.

Рисунок 1 — Структурная схема распределенной угломерной радиоэлектронной системы управления с двумя приемными позициями

В состав УДП РЭСУ входят первая и вторая подвижные ПП. Каждая ПП содержит одинаковый состав оборудования: угломерное устройство, навигационную систему, аппаратуру передачи данных, приемную часть КРУ, вычислительную систему и систему автоматического управления (САУ).

Источник излучения, являющийся для наводимых ПП УДП РЭСУ радиоизлучающей целью, формирует радиосигналы, принимаемые в первой и второй ПП. Источниками радиоизлучения могут быть различные радиоэлектронные средства: бортовые и наземные РЛС, радиосвязные системы и др. Угломерные устройства измеряют бортовые пеленги ИРИ в каждой ПП.

Навигационные системы счисляют местоположение ПП в прямоугольной системе координат и оценивают угловые положения ЛА в пространстве. Предпочтительным вариантом для определения координат ЛА является использование спутниковой радионавигационной системы как наиболее точной. Указанные координаты и параметры движения образуют минимально необходимый набор измеряемых величин. Оцененные значения пеленгов ИРИ, прямоугольных координат ПП, а также курсов и углов тангажа с помощью аппаратуры передачи данных передаются с ПП в ПОИУ и на другие ПП. Вместо пеленгов ИРИ, курсов и углов тангажа ПП могут передаваться функционально связанные с ними азимуты и углы места ИРИ. Кроме того, передаются радиотехнические параметры ИРИ, что необходимо для распознавания типов ИРИ и отождествления пеленгов. Результаты оценивания пеленгов ИРИ в двух позициях, прямоугольных координат и угловых положений ПП поступают в вычислительную систему ПОИУ, в которой на начальном этапе происходит отождествление пеленгов и формирование оценок координат ИРИ и параметров их движения. В ПОИУ определяется также тип ИРИ. При отождествление пеленгов и определении типов ИРИ может использоваться информация, поступающая от других ПП.

На основе поступившей информации в ПОИУ производится общая оценка радиоэлектронной обстановки, кластеризация ПП, распределение различных ИРИ по отдельным парам ПП (кластерам). На основе заложенных в вычислительную систему ПОИУ критериев назначения выбираются ведущая ПП и ПП ИП, обеспечивающая наилучшие условия наблюдения ИРИ. Кроме того, выбираются режимы функционирования пеленгаторов.

Следует отметить, что указанная проблема коллективного распределения целей относится к широко известной задаче о назначениях, которая может решаться с использованием как точных, так и приближенных алгоритмов [1]. Данные коллективного целераспределения, относящие к каждой ПП, передаются через многоканальную КРУ. КРУ состоит из передающей части, установленной в ПОИУ, и приемных частей, размещенных на ПП. В последующем ПОИУ осуществляет общий контроль качества и эффективности функционирования РУ РЭСУ ВБ в целом.

На этапе самостоятельной работы УДП РЭСУ приемные позиции обмениваются результатами измерений пеленгов ИРИ и собственных прямоугольных координат, характеризующих местоположение ПП. На их основе в вычислительных системах ПП формируются координаты и параметры движения назначенного с ПОИУ источника радиоизлучения и вырабатываются параметры управления согласно поставленным задачам (ведущая позиция или позиция информационной поддержки) и выбранному способу наведения. Параметры управления, воздействуя на системы автоматического управления, изменяют траектории движения носителей ПП таким образом, чтобы обеспечивалось решение целевой задачи кластера.

Как указывалось выше, высокая точность определения фазовых координат ИРИ может быть достигнута за счет оптимизации траекторного управления ПП ИП, в результате целенаправленного движения которой обеспечивается минимизация ошибок местоопределения ИРИ. Выполним синтез алгоритмов траекторного управления ПП ИП для горизонтальной плоскости наведения. При этом для простоты полагаем, что движение ПП УДП РЭСУ в вертикальной плоскости выполняется на одинаковой для обеих ПП постоянной высоте. Кроме того, рассматривается случай, когда значения углов визирования ИРИ в вертикальной плоскости малы.

Как известно [2, 3], принцип определения координат ИРИ в УДП РЭСУ в горизонтальной плоскости при указанных условиях состоит в следующем (рис. 2). При пеленгации ИРИ, расположенного в точке Ц, из двух точек C_1 и C_2, отстоящих друг от друга на расстоянии d, координаты ИРИ в УДП РЭСУ определяются путем решения треугольника $C_1ЦC_2$ по двум углам α_1, α_2 и основанию d с помощью следующих соотношений [2]:

$$(1) \quad R_1 = \frac{d \sin \alpha_2}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}, \; R_2 = \frac{d \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)},$$

где углы α_1 и α_2 отсчитываются в точках C_1 и C_2 относительно направления базы пеленгации.

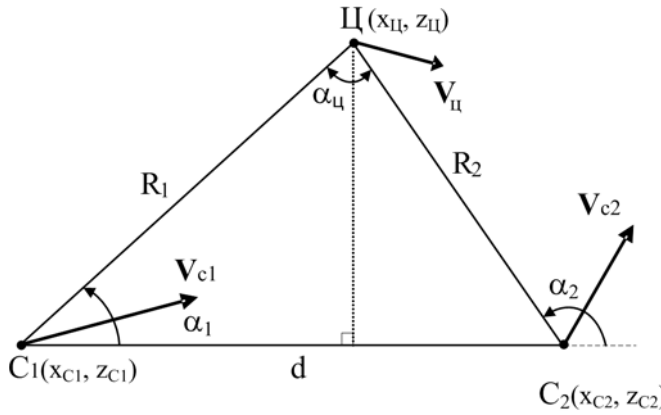


Рисунок 2 — Геометрия взаимного расположения приемных позиций и источника радиоизлучения

На рисунке введены следующие обозначения: R_1 и R_2 — расстояния от ИРИ (точка Ц) до ПП C_1 и C_2, оборудованных пеленгаторами; $\alpha_ц$ — бистатический угол (угол пересечения линий визирования); d — база пеленгации (линия, соединяющая ПП); V_{c1}, V_{c2}, $V_ц$ — векторы скоростей ПП и ИРИ; x_{c1}, z_{c1}, x_{c2}, z_{c2} и $x_ц$, $z_ц$ — текущие координаты первой (ведущей) и второй (информационной поддержки) ПП и ИРИ.

Наряду с оцениванием расстояний R_1 и R_2 в УДП РЭСУ может выполняться оценивание прямоугольных координат $x_ц$, $z_ц$ ИРИ [4, 5].

В УДП РЭСУ ошибки измерителей азимутов ИРИ α_1 и α_2 относительно двух ПП и ошибки измерения собственных прямоугольных координат ПП приводят к погрешностям формирования (расчета) оценок расстояний R_1 и R_2 и прямоугольных координат $x_ц$ и $z_ц$ ИРИ. Анализ точности определения местоположения ИРИ при функционировании УДП РЭСУ, проведенный в [2], показал, что ошибки определения местоположения ИРИ зависят от «геометрии» системы местоопределения, т.е. от размеров базы и положения ИРИ относительно базы, от погрешностей измерения пеленгов, прямоугольных координат и курсов ПП.

Точность определения местоположения радиоизлучающих целей на плоскости характеризуется линейной ошибкой. При случайных ошибках пеленгации в случае одинаковых ошибок пеленгаторов $\sigma_{\alpha 1} = \sigma_{\alpha 2} = \sigma_\alpha$ для СКО местоопределения σ_r имеет место соотношение [2]:

$$\sigma_r = \frac{0{,}0175\sigma_\alpha}{\sin \alpha_ц}\sqrt{R_1^2 + R_2^2}\ . \qquad (2)$$

Из (2) следует, что ошибка σ_r определяется значениями $\alpha_ц$, R_1 и R_2 и ошибками пеленгации σ_α.

На основе анализа выражения (2) могут быть выработаны рекомендации по требуемым параметрам геометрической конфигурации ПП на плоскости, для достижения которых разработаны различные способы траекторного управления ПП [6-13]. Так как ведущая ПП решает

задачу сближения с ИРИ, то полет ПП ИП организуется таким образом, чтобы обеспечить требуемое для высокоточного функционирования УДП РЭСУ взаимное геометрическое положение ИРИ и ПП.

Как видно из формулы (2), одним из способов снижения ошибок оценивания местоположения ИРИ является поддержание угла $\alpha_{\text{ц}}$, близким к 90°. Для реализации этого условия разработано несколько способов наведения ЛА в УДП РЭСУ [8-13].

Общим недостатком данных способов наведения является тот факт, что до выхода ПП ИП в точку, лежащую на перпендикуляре к линии «ИРИ – ведущая ПП», или в заданную точку этого перпендикуляра не предъявляется никаких требований к текущим значениям ошибок определения местоположения ИРИ. В то же время процесс наведения ведущей ПП может закончиться еще до момента выхода ПП ИП на указанный перпендикуляр, когда ошибки определения местоположения ИРИ становятся минимальными.

Так как процедура обеспечения одновременного выхода ведущей ПП в точку окончания наведения, а ПП ИП на заданную линию (точку) представляет собой довольно сложную задачу, то управление ПП ИП можно организовать таким образом, чтобы ошибка определения местоположения ИРИ в любой момент времени была минимально возможной. Для выполнения данного условия ПП ИП должна двигаться по специальной траектории, параметры которой определяются алгоритмом, полученным на основе теории оптимального управления (ТОУ) динамическими процессами. В качестве целевой функции при этом может быть выбрана зависимость ошибки (2) определения местоположения ИРИ от погрешностей пеленгаторов и «геометрии» решения задачи местоопределения.

Для вычисления оптимальных траекторий могут использоваться две группы методов:

– косвенные методы, использующие необходимые условия оптимальности;

– прямые методы, определяющие оптимальное управление непосредственным решением оптимизируемого функционала без использования необходимых условий.

Из косвенных методов наибольшее распространение получили принцип максимума Л.С. Понтрягина и динамическое программирование Беллмана. При этом следует отметить, что разработанная до настоящего времени техника оптимизации, позволяющая получить аналитически оптимальное управление из необходимых условий, применима к ограниченному типу задач.

Рассмотрим возможности применения ТОУ на базе принципа динамического программирования для разработки алгоритмов траекторного управления ПП ИП в УДП РЭСУ. Предварительно приведем необходимые математические соотношения [14].

Пусть управляемый процесс описывается детерминированным уравнением общего вида $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x},\mathbf{u},t)$. Здесь $\dot{\mathbf{x}}$ — полная производная вектора состояния $\mathbf{x}$ по времени t, $\mathbf{f}(\mathbf{x},\mathbf{u},t)$ — векторная функция векторных аргументов $\mathbf{x},\mathbf{u}$ и скалярного аргумента t, $\mathbf{u}$ — вектор управления.

Как известно, для вычисления оптимального управления с использованием принципа динамического программирования решается уравнение Беллмана. Решение этого уравнения упрощается в определенных случаях, в частности, для процесса с линейно входящим управлением

(3) $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x},t) + \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x},t)\mathbf{u}$

и интегрального квадратичного функционала качества [14]

(4) $I = V_з[\mathbf{x}(t_2)] + \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{Q}_з[\mathbf{x}(t),t]dt + \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{u}^T(t)\mathbf{K}^{-1}\mathbf{u}(t)dt$,

где $V_з\left[\mathbf{x}(t_2)\right]$ — заданная скалярная функция конечного состояния процесса $\mathbf{x}(t_2)$; $\mathbf{Q}_з$ — заданная квадратичная функция, определяющая текущую точность управления; $\mathbf{K}$ — диагональ-

ная невырожденная матрица заданных коэффициентов штрафов за экономичность сигналов управления; $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x},t)$ — матричная функция размера $n\times r$ аргументов $\mathbf{x}$, t.

Интегрирование в (4) осуществляется от текущего момента времени $t_1 = t$ до конечного $t_2 = t_к$. Первая часть функционала, называемая терминальной, отражает конечную ошибку, вторая — требования к точностным характеристикам системы и третья — ограничения на сигналы управления.

Уравнение Беллмана и оптимальное управление имеют вид [14]:

$$\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{f}(\mathbf{x},t)-\frac{1}{2}\frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}}\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x},t)\mathbf{K}\boldsymbol{\varphi}^T(\mathbf{x},t)\left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}}\right)^T=-\mathbf{Q}_з(\mathbf{x},t),$$

(5) $$V_{t=t_2}=V_з(\mathbf{x}),$$

$$\mathbf{u}=-\mathbf{K}\boldsymbol{\varphi}^T(\mathbf{x},t)\left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}}\right)^T.$$

Здесь «T» — символ транспонирования.

Уравнение Беллмана представляет собой нелинейное уравнение в частных производных. Решение этого уравнения при граничном условии $V_з\left[\mathbf{x}(t_2)\right]$ должно определять оптимальное управление. Аналитическое построение точных решений существуют лишь для линейно-квадратичных задач. Для нелинейных систем возможны различные способы приближенного решения уравнений Беллмана, которые могут оказаться полезными при решении задач синтеза для динамических процессов невысокой размерности. При этом используют численную форму динамического программирования, построение разностных схем, метод рядов и метод характеристик [14].

В общем случае, управляемый процесс является стохастическим. Следует заметить, что для нелинейных систем задача управления стохастическими процессами путем минимизации функционалов намного сложнее, чем для детерминированных процессов. В то же время для нелинейных задач применительно к функционалу (4) приближенно справедлива теорема разделения [14], согласно которой можно раздельно синтезировать систему оценивания и идентификации и систему собственно управления. Ниже предполагается, что процедура оценивания фазовых координат и идентификации параметров в УДП РЭСУ произведена.

Конкретизируем постановку задачи нахождения оптимального управления применительно к приемной позиции ИП УДП РЭСУ. В качестве целевой функции выберем ошибку (2) определения местоположения ИРИ $\sigma_r=\dfrac{0{,}0175\sigma_\alpha}{\sin\alpha_ц}\sqrt{R_1^2+R_2^2}$, где

(6) $$R_1=\sqrt{(x_ц-x_{c1})^2+(z_ц-z_{c1})^2},\ R_2=\sqrt{(x_ц-x_{c2})^2+(z_ц-z_{c2})^2},$$

(7) $$\sin\alpha_ц=\frac{2S}{R_1R_2},$$

$S=\sqrt{p(p-d)(p-R_1)(p-R_2)}$ — площадь треугольника $С_1ЦС_2$ (рис. 2), $p=\dfrac{d+R_1+R_2}{2}$ — полупериметр этого треугольника, $d=\sqrt{(x_{c1}-x_{c2})^2+(z_{c1}-z_{c2})^2}$ — расстояние между ПП (база пеленгации), x_{c1}, z_{c1} — текущие прямоугольные координаты ведущей ПП.

Введем обозначения переменных вектора состояния $\mathbf{x}$, полагая в качестве управления u угол $\delta_э$ отклонения элеронов и учитывая связи угла $\delta_э$ с углами отклонения элеронов и курса

ЛА [3]: $x_1 = x_{c1}$ — прямоугольные координаты ведущей ПП по оси X_0 неподвижной в пространстве горизонтальной системы координат OX_0Z_0; $\dot{x}_1 = V_2 \cos\psi_2$ — производная по времени прямоугольной координаты ведущей ПП по оси X_0; $x_2 = z_{c2}$ — прямоугольные координаты ПП ИП по оси Z_0; $\dot{x}_2 = \dot{z}_{c2} = -V_2 \sin\psi_2$ — производная по времени прямоугольной координаты ПП ИП по оси Z_0; $x_3 = \psi_2$ — курс ПП ИП C_2; $\dot{x}_3 = \dot{\psi}_2 = -\frac{g}{V_2}\gamma$ — скорость изменения курса ПП ИП C_2; $x_4 = \gamma$ — крен ПП ИП C_2; $\dot{x}_4 = \dot{\gamma} = a_\gamma \delta_э$ — скорость изменения угла крена; a_γ и $\delta_э$ — коэффициент эффективности и угол отклонения элеронов.

Отсюда следует, что уравнения состояния можно записать следующим образом:

$$(8)\quad \begin{aligned} \dot{x}_1 &= V_2 \cos x_3; \\ \dot{x}_2 &= -V_2 \sin x_3; \\ \dot{x}_3 &= -\frac{g}{V_2} x_4; \\ \dot{x}_4 &= a_\gamma \delta_э. \end{aligned} \quad ;$$

Применительно к рассматриваемому случаю минимизируемый функционал (4) имеет вид:

$$(9)\quad I = q_1 \sigma_r(t_2) + \int_{t_1}^{t_2} l_1 \sigma_r(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} \frac{\delta_э^2}{k_1} dt,$$

где q_1, l_1, k_1 — коэффициенты штрафов.

В минимизируемом функционале (9) член с квадратичным управлением $u = \delta_э$ служит для ограничения управляющего воздействия.

Если рассматривать в качестве управления u боковое ускорение $j_б$, то уравнения состояния могут быть упрощены. Действительно, скорость изменения курса ПП C_2 [3] $\dot{x}_3 = \dot{\psi}_2 = \frac{j_б}{V_2}$. Для этого случая уравнения состояния приобретают вид:

$$(10)\quad \begin{aligned} \dot{x}_1 &= V_2 \cos x_3, \\ \dot{x}_2 &= -V_2 \sin x_3, \\ \dot{x}_3 &= \frac{j_б}{V_2}. \end{aligned}$$

Из (10) видно, что размерность вектора состояния **x** меньше, чем в динамической системе (8). Минимизируемый функционал имеет тот же вид (9), но при условии подстановки $j_б$ вместо $\delta_э$.

Поскольку в минизируемом функционале СКО местоопределения σ_r нелинейно зависит от прямоугольных координат, то аналитическое определение оптимального управления не представляется возможным. Для отыскания оптимального управления ПП ИП необходимо воспользоваться указанными выше приближенными способами решения задачи.

Рассмотрим возможности прямых методов оптимизации для нахождения алгоритма траекторного управления ПП ИП.

В классе прямых методов наиболее популярны градиентные методы. Из классических градиентных методов наиболее известны метод наискорейшего спуска и метод Ньютона-Рафсона. Ко второму поколению градиентных методов относятся метод сопряженного гради-

ента и метод с переменной метрикой, которые характеризуются простотой и хорошей сходимостью. Оптимальное управление при использовании прямых методов является итерационной процедурой, основанной на информации о градиенте функционала качества.

При разработке алгоритмов траекторного управления по курсу для ПП ИП на основе прямых методов параметры траектории приемной позиции ИП могут рассчитываться по формулам, полученным на основе теории принятия решений в одношаговых задачах оптимального управления с использованием градиентных методов нелинейного программирования [15]. В качестве целевой функции целесообразно выбрать ошибку (2). В этом случае движение по требуемой траектории ПП ИП приводит к максимально быстрому уменьшению ошибок местоопределения ИРИ на каждом шаге управления.

Стратегия градиентного способа представляет собой последовательность шагов, каждый из которых содержит две операции:

1) определение направления наибольшей крутизны спуска в текущей точке;

2) перемещение в выбранном направлении на заданное расстояние.

Следует отметить, что при определении направления наибольшей крутизны спуска используется СКО σ_r (2). В то же время управляемыми переменными состояния (компонентами вектора состояния) являются прямоугольные координаты x_{c2}, z_{c2} ПП ИП C_2. Выражение (2) в явном виде не зависит от этих координат, поэтому его преобразуют к виду, удобному для нахождения градиента целевой функции, используя соответствующие уравнения связи (6) и (7).

При подстановке (6) и (7) в (2) получают зависимость целевой функции от прямоугольных координат ИРИ и ПП. Далее вычисляют градиент целевой функции, для чего находят частные производные $\partial\sigma_r / \partial x_{c2}$ и $\partial\sigma_r / \partial z_{c2}$ целевой функции σ_r по прямоугольным координатам x_{c2}, z_{c2} ПП ИП C_2. После вычисления частных производных требуемый курс ПП ИП и параметр управления ею рассчитывают в ПП ИП соответственно по формулам

$$(11)\quad \psi_{T2} = -arctg\frac{\partial\sigma_r / \partial z_{c2}}{\partial\sigma_r / \partial x_{c2}},\ \Delta_\psi = \psi_{T2} - \psi_2,$$

где ψ_2 — фактический (текущий) курс ПП ИП.

Управление ПП ИП осуществляется таким образом, чтобы значение параметра управления Δ_ψ стремилось к нулю.

Алгоритм (11) траекторного управления ПП ИП обеспечивает получение наибольшей скорости убывания СКО местоопределения ИРИ. Достоинство данного алгоритма состоит в том, что убывание СКО местоопределения ИРИ обеспечивается не только за счет изменения угла $\alpha_{\text{ц}}$, но и в результате уменьшения расстояний R_1 и R_2.

Для оценки эффективности разработанного способа и алгоритма траекторного управления ПП ИП было проведено математическое моделирование процесса наведения ПП, входящих в состав УДП РЭСУ. В качестве показателя эффективности рассматривалась ошибка σ_r (2). При моделировании полагалось, что ИРИ движется равномерно и прямолинейно. Ведущая ПП наводится на цель по методу перехвата [3]. Приемная позиция ИП управляется согласно градиентному способу.

Некоторые результаты моделирования приведены на рисунках 3, 4. На рисунке 3 показаны траектории движения ведущей ПП C_1, ПП ИП C_2, ПОИУ и ИРИ в горизонтальной плоскости для одного из гипотетических вариантов применения, а на рисунке 4 — график поведения во времени СКО σ_r определения местоположения ИРИ.

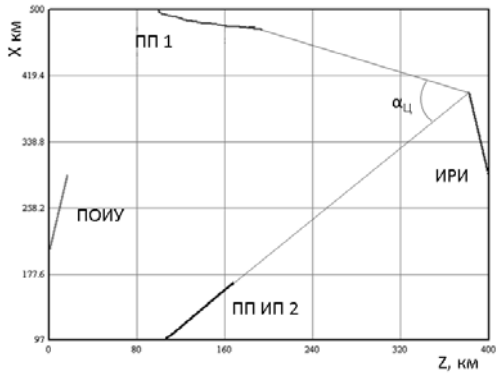


Рисунок 3 — Геометрия задачи траекторного управления наблюдением

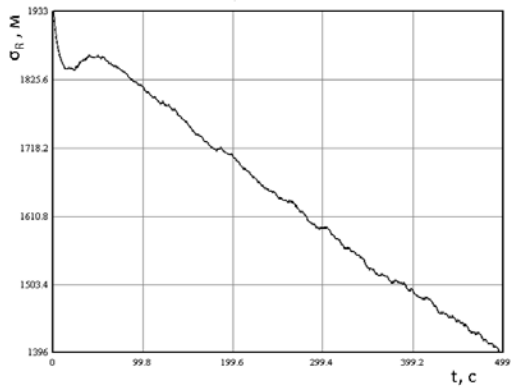


Рисунок 4 — Зависимость СКО определения местоположения ИРИ от времени

В процессе моделирования проверялось влияние ошибок измерения азимутов ИРИ на качество наведения и ошибки определения местоположения ИРИ. При реальных ошибках измерения это влияние оказалось незначительным и приводит лишь к небольшим флуктуациям траекторий полета наводимых ПП (рис. 4).

Анализ результатов моделирования показывает, что применение предлагаемого способа траекторного управления позволяет успешно решать стоящие перед УДП РЭСУ задачи.

Следует отметить, что градиентный метод может быть применен для построения требуемой геометрии взаимного положения ПП, когда положение наводимых ПП по отношению к ИРИ задается бистатическим углом $\alpha_{ц}$ (рис. 2). В этом случае минимизируемый функционал (4) может быть задан в виде $I = \left(\alpha_{цз} - \alpha_{ц}\right)^2$, где $\alpha_{цз}$ и $\alpha_{ц}$ — заданное и текущее значения бистатического угла.

На практике возможны ситуации, когда требуется обеспечить сближение ПП с ИРИ под заданным углом подхода. Для решения данной задачи могут быть использованы разработанные ранее методы и алгоритмы, приведенные в [7-13]. При этом для вычисления угла $\alpha_{ц}$ вместо координат ведущей ПП следует подставить координаты некоторой виртуальной точки, которая совместно с ИРИ определяет положение линии отсчета указанного угла в пространстве. Тем самым, появляется возможность обеспечения выхода нескольких ПП с разных направлений на ИРИ, что иногда требуется при выполнении групповых действий.

Выводы

1. Разработанные оптимальные алгоритмы траекторного управления на основе принципа динамического программирования и градиентного метода наискорейшего спуска обеспечивают полет приемной позиции информационной поддержки по траектории, позволяющей получить минимально возможные ошибки определения местоположения ИРИ в любой момент времени. Эти же алгоритмы могут применяться при наведении приемных позиций в случае, когда необходимо поддерживать требуемые значения бистатических углов визирования приемных позиций с ИРИ.
2. Для обеспечения в процессе сближения требуемого угла подхода приемной позиции к ИРИ возможно использование разработанных ранее применительно к угломерным двухпозиционным системам радиоуправления методов и алгоритмов наведения летательных аппаратов за счет их достаточно простой модификации. В ре-

зультате может быть осуществлено групповое сближение нескольких приемных позиций с ИРИ с разных угловых направлений.

Список литературы

[1] Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.

[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] Авиационные системы радиоуправления: учебник для военных и гражданских ВУЗов и научно-исследовательских организаций. / В.И. Меркулов, В.С. Чернов, В.А. Гандурин, В.В. Дрогалин, А.Н. Савельев. / Под ред. В.И. Меркулова. — М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008.

[4] Меркулов В.И., Чернов В.С., Юрчик И.А. Авиационные многопозиционные системы радиоуправления. // Успехи современной радиоэлектроники, 2006, № 12.

[5] Абатуров В.А., Меркулов В.И., Чернов В.С. Авиационные системы радио-управления. Многопозиционные системы радиоуправления. Учебное пособие. — М.: ВВИА им. проф. Н.Е Жуковского, 2008.

[6] Меркулов В.И., Куимов А.М., Чернов В.С. Траекторное управление пассив-ными двухпозиционными системами. // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2008, № 12, Т.6.

[7] Меркулов В.И., Харьков В.П., Чернов В.С. и др. Алгоритмы траекторного управления самолетами в угломерной двухпозиционной радиолокационной системе. Юбилейная научно-техническая конференция «Авиационные системы 21 века», ФГУП ГосНИИАС, 2006.

[8] Меркулов В.И., Харьков В.П., Чернов В.С. Алгоритмы управления позициями в пассивной двухпозиционной радиолокационной системе. // Радиотехника, 2004, № 10.

[9] Меркулов В.И. Управления пассивными двухпозиционными РЛС в режиме наведения на радиоизлучающую цель. // Радиотехника, 2005, № 6.

[10] Бирина Н.О., Меркулов В.И., Чернов В.С. и др. Способ управления самолетами в угломерной двухпозиционной радиолокационной системе. // Радиотехника, 2005, № 6.

[11] Способ наведения летательных аппаратов в двухпозиционной радиолокационной системе. Патент РФ на изобретение № 2262649 от 20.10.2005.

[12] Способ управления летательными аппаратами по курсу в угломерной двухпозиционной радиолокационной системе. Патент РФ на изобретение № 2256870 от 20.07.2005.

[13] Способ управления летательными аппаратами по курсу в угломерной двухпозиционной радиолокационной системе. Патент РФ на изобретение № 2308093 от 10.10.2007.

[14] Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.

[15] Коршунов Ю.М. Математические основы кибернетики: Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Энергия, 1980.

СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ОПОРНОЙ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

Д.Н. Сузанский[1], В.Ю. Попов[2,3]

[1]ОАО «Концерн радиостроения «ВЕГА»
121170, Москва, Кутузовский проспект, 34, Россия
suzansky@mail.ru
тел: +7 (903) 625-79-40

[2] МГУ им. М.В.Ломоносова, Физический Факультет
119991, ГСП-2, Москва, Ленинские горы, Дом 1, строение 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 synthesis of reference trajectory of an aircraft during terrain avoidance in horizontal plane is studied. Analytical expressions and an algorithms of synthesis of such trajectory based on a digital map are given.

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 МПВ 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 последующей передачей ее на непосредственно борт БЛА [2].

1 Постановка задачи и метод решения

Полет на малой высоте принято разделять на два вида: первый – обход препятствий в горизонтальной плоскости, второй – обход препятствий в вертикальной плоскости с сохранением заданного курса. При этом на осуществляемый МПВ довольно часто накладываются дополнительные требования согласования траектории со складками местности и обеспечения заданной высоты полета. Как правило, именно перечисленные выше ограничения определяют, в глобальном, форму опорной (требуемой) траектории полета БЛА, которая может меняться, в локальном, в зависимости от конструктивных особенностей конкретного вида применяемого летательного аппарата.

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 и 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 – о не существовании единого подхода для ее решения.

Целью работы является рассмотрение одного из возможных способов построения опорной траектории движения летательного аппарата в горизонтальной плоскости при совершении маловысотного полета над пересеченной местностью.

В работе рассматривается способ получения таких траекторий, в основе которого лежат положения теории функции комплексного переменного и метода конформных отображений потенциальных потоков идеальной жидкости [7]. В качестве примера рассматривается задача построения опорной траектории движения беспилотного летательного аппарата при выполнении им маловысотного полета в режиме огибания рельефа местности в горизонтальной плоскости. Исходными данными для ее решения является цифровая карта рельефа местности.

Формирование опорной траектории на основе ЦКРМ предполагается осуществлять в три этапа: 1 этап – получение горизонтального сечения рельефа местности, соответствующего требуемой высоте полета, 2 этап – аппроксимация замкнутых кривых в полученном сечении кругами и эллипсами, 3 этап – получение системы дифференциальных уравнений (ДУ), фазовый портрет которой позволит построить множество желаемых траекторий полета БЛА. Важно отметить, что первые два этапа носят технический (подготовительный) характер и, как правило, не вызывают особых трудностей. Трудность же третьего этапа заключается в получении указанной системы ДУ.

В общем виде, требуемая система дифференциальных уравнений 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.

В [6] применен подход, основанный на использовании функции потенциала скорости и линии тока для случая обтекания эллиптического цилиндра плоским потоком идеальной жидкости. Дифференцирование указанных функций позволило получить правые части для системы (1) [8, 9]. Указанный способ хорошо зарекомендовал себя для построения опорных траекторий при облете одиночных препятствий, аппроксимированных эллипсами. Тем не менее, он оказался совершенно не пригоден для случая, когда требуется получить систему ДУ (1) для произвольного числа эллипсов. Причиной этому является не гармоничность полученных как функции потенциала скорости, так и функции линии тока.

В качестве альтернативы в данной работе рассматривается способ нахождения правых частей системы ДУ (1) с использованием комплексного потенциала безциркуляционного обтекания эллиптических цилиндров, который может быть получен на основе метода конформных отображений плоского потенциального потоков течения идеальной несжимаемой жидкости [7]. Для общего случая, когда имеется N эллиптических цилиндров, комплексного потенциала имеет вид:

$$(2)\quad \mathrm{W}(z) = \overline{V}_\infty z + \frac{1}{2}\overline{V}_\infty \sum_{i=1}^{N}\left(\sqrt{\left(z-z_{0i}\right)^2 - \left(a_i^{\,2} - b_i^{\,2}\right)} - z\right) + 2V_\infty \sum_{i=1}^{N} \frac{R_i^2}{\left(z-z_{0i}\right) + \sqrt{\left(z-z_{0i}\right)^2 - \left(a_i^{\,2} - b_i^{\,2}\right)}},$$

где $z=x+iy$ – комплексное число, V_∞ – скорость до и после облета рельефа, $\overline{V}_\infty$ – сопряженная скорость, z_{0i} – координаты центра i-го эллипса на комплексной плоскости, a_i, b_i – полуоси i-го эллипса, $R_i = \frac{1}{2}\left(a_i + b_i\right)$.

Тогда комплексная скорость имеет вид

$$(3)\quad \frac{dW}{dz} = \overline{V}_\infty + \frac{1}{2}\overline{V}_\infty \sum_{i=1}^{N}\left(\frac{z-z_{0i}}{\sqrt{\left(z-z_{0i}\right)^2 - \left(a_i^{\,2} - b_i^{\,2}\right)}} - 1\right) - 2V_\infty \sum_{i=1}^{N} \frac{R_i^2\left(1 + \dfrac{z-z_{0i}}{\sqrt{\left(z-z_{0i}\right)^2 - \left(a_i^{\,2} - b_i^{\,2}\right)}}\right)}{\left[\left(z-z_{0i}\right) + \sqrt{\left(z-z_{0i}\right)^2 - \left(a_i^{\,2} - b_i^{\,2}\right)}\right]^2}$$

Используя свойство комплексной скорости, система (1) примет вид:

$$(4)\quad \begin{cases} \dot{x} = \mathbf{Re}\left(\dfrac{dW}{dz}\right) \\ \dot{y} = -\mathbf{Im}\left(\dfrac{dW}{dz}\right) \end{cases}.$$

Для примера на рисунке 1 показаны траектории движения системы (4) для случая пяти эллипсов с заданными центрами и значениями полуосей. Рассматриваются траектории в системе координат XOY, которые на бесконечностях параллельны оси OX.

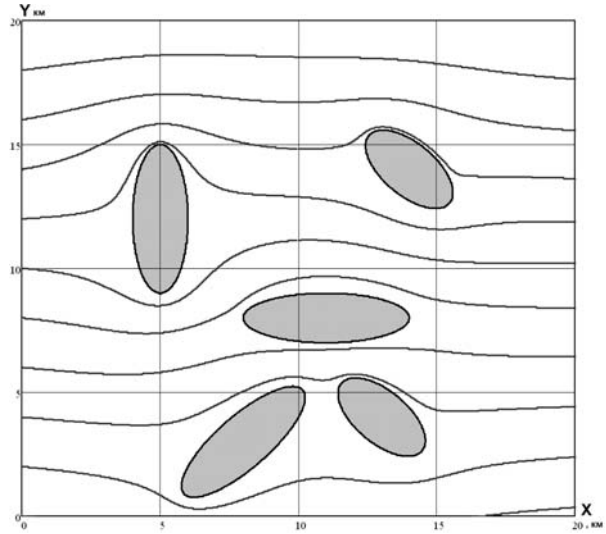


Рисунок 1 – Сеть линий тока при обтекании пяти эллипсов плоским потенциальным горизонтальным потоком

Для общего случая указанный алгоритм целесообразно применять следующим образом. После того, как построено горизонтальное сечение рельефа местности, соответствующего требуемой высоте полета, выбирается система координат XOY. Далее в построенной системе координат определяется место БЛА и направление его полета, а также проводится аппроксимация эллипсами замкнутых кривых в полученном сечении рельефа местности, центры полученных эллипсов и их параметры (значения полуосей) заносятся в память ЭВМ. Затем используя выражения (3) и (4), строится желаемая траектория для начальных условий $x(0) = 0$ и $y(0) = 17$. Пример искомой траектории для трех эллипсов показан на рисунке 2.

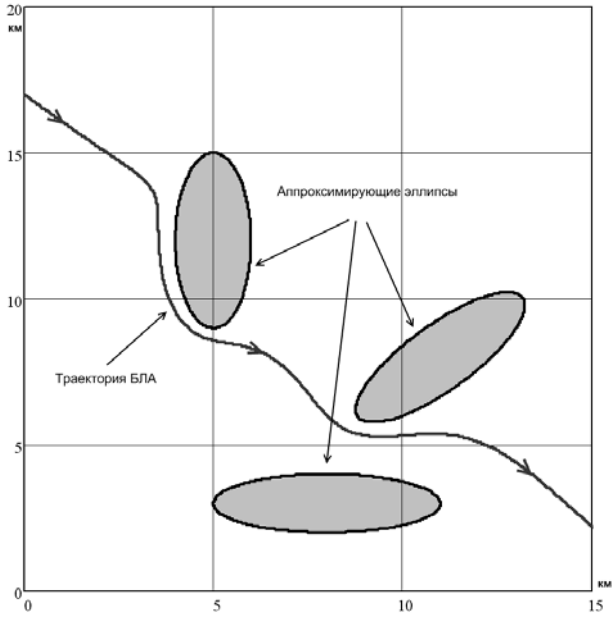


Рисунок 2 – Вариант траектории полета БЛА

Таким образом, выражения (3) и (4) задают алгоритм получения множества опорных траекторий полета БЛА для совершения маловысотного полета над пересеченной местностью с возможностью выполнения маневров только в горизонтальной плоскости, а начальные условия (координаты положения БЛА в горизонтальной 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 при учете ограничения, налагаемые использованием конкретного вида БЛА. Это могут быть ограничения связанные с перегрузками, допустимыми углами крена, конструкцией органов управления. Кроме этого может существенное влияние может оказать устройство системы автоматического управления БЛА.

Заключение

Таким образом, предложен довольно простой и эффективный способ формирования опорной траектории полета летательных аппаратов при выполнении МВП в режиме огибания рельефа местности в горизонтальной плоскости. 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.

СИНТЕЗ НЕМИНИМАЛЬНО ФАЗОВЫХ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ

А.В. Уткин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65, Россия
utkin-av@rambler.ru
тел: +7 (495) 334-93-21

Ключевые слова: *линейные динамические системы, канонические представления, неустойчивая нулевая динамика, задача слежения.*

Abstract
In this paper, the output tracking control of reference signal methodology is applied for general form of linear system with unstable zero dynamics and unknown state vector.

Введение

Задача слежения относительно выходных переменных является центральной проблемой в теории управления. К наиболее практически значимым постановкам задачи слежения относится случай, когда требуется обеспечить стабилизацию компонент вектора выходных переменных относительно независимых задающих функций времени, что в принципе возможно только в случае, когда количество управляющих воздействий не меньше чем компонент вектора выходных переменных. В рамках геометрического подхода [1] получены необходимые и достаточные условия разрешимости задачи слежения с расширением пространства состояния [2]. Дополнительными ограничениями в решении задачи стабилизации является требование устойчивости нулевой динамики модели объекта управления или, другими словами, обеспечение внутренней устойчивости замкнутой системы, а также отсутствие информации о векторе состояния. В случае если собственно задача слежения имеет решение, а нулевая динамика не устойчива, синтезируемая система считается технически нереализуемой, и, следовательно, задача слежения не имеет практического решения.

1 Постановка задачи

Рассмотрим задачу слежения относительно выходной переменной в линейной динамической системе с одним входом и одним выходом (SISO - системы):

(1) $\dot{x} = Ax + bu,\ \ y_1 = d^T x$,

где $x \in R^n$, $u, y_1 \in R^1$ - вектор состояний, управление и выходная координата, соответственно, пара (A,b) - управляемая и пара (d^T, A) наблюдаемая. Предполагается, что относительная степень системы $v = 1$.

Для системы (1) ставится задача слежения выходной переменной за заданным сигналом

(2) $e_1 = y_1 - \eta_1(t) \to 0$,

описываемым динамической моделью генератора заданий

(3) (3) $\dot{w} = Ww, \eta_1 = r^T w$,

где $w \in R^l, \eta_1 \in R^1$, пара (r^T, W) наблюдаемая.

2 Каноническое представление относительно выходных координат

Покажем, что, используя метод расширения пространства состояний [2], любая управляемая и наблюдаемая линейная SISO-система сводится к совместной канонической форме управляемости и наблюдаемости и, следовательно, в полной мере могут быть решены модальные задачи управления, в том числе и поставленная задача слежения.

Сконструируем динамический компенсатор следующей структуры:

$$(4)\quad u = \xi_1,\ \dot{\xi}_i = \xi_{i+1},\ i = \overline{1,\ n-v-1};\ \dot{\xi}_{n-v} = b_n \bar{u},$$

где $\bar{u}$ - новое управление, v - относительная степень системы (1).

Утверждение 1. Система (1), (4) является управляемой относительно нового управления $\bar{u}$.

Действительно, используем двухуровневую декомпозицию в решении задачи стабилизации системы (1) и (4). На первом шаге синтез локальной обратной связи в системе (1) $u = \xi_1 = f^T x$ в силу управляемости системы (1) позволяет обеспечить заданный спектр матрицы замкнутой системы $(A + bf^T)$. На втором шаге решим задачу слежения в системе (4) за заданным сигналом $e_1 = \xi_1 - f^T x$, которая имеет решение в силу канонического вида системы (4). Здесь, по - сути, использовано одно из определений управляемых систем, заключающееся в том, что в них можно обеспечить произвольный спектр матрицы замкнутой системы.

Дифференцируя выходную переменную системы (1) n раз с учетом (4), получим каноническое представление модели объекта управления (1) вида

$$(5)\quad \begin{aligned}
&\dot{y}_1 = d^T A x = y_2,\\
&...,\\
&\dot{y}_v = d^T A^v x + d^T A^{v-1} b \xi_1 = y_{v+1},\\
&\dot{y}_{v+1} = d^T A^{v+1} x + d^T (A^v b \xi_1 + A^{v-1} b \xi_2) = y_{v+2},\\
&...\\
&\dot{y}_n = d^T A^n x + d^T (A^{n-v-1} b \xi_1 + ... + A^v b \xi_{n-v}) + b_n \bar{u},
\end{aligned}$$

где $b_n = d^T A^{v-1} b \neq 0$, v - относительная степень системы (1).

Отметим, что в случае $v = n$ производные по истинному управлению в системе (4) отсутствуют и, следовательно, вводить динамический компенсатор нет необходимости. Система (5) получена неособой заменой переменных вида $y = Hx + G\xi$, где $\det H \neq 0$ - матрица наблюдаемости системы (1).

Перепишем систему (5) в компактной форме, для удобства вместе с динамическим компенсатором (4), в следующем виде:

$$(6)\quad \dot{y}_i = y_{i+1},\ i = \overline{1, n-1},\ y_n = a^T y + g^T \xi + b_n \bar{u};$$

$$(7)\quad \dot{\xi}_i = \xi_{i+1},\ i = \overline{1,\ n-v-1};\ \dot{\xi}_{n-v} = b_n \bar{u},$$

где $y = col(y_1, ..., y_n)$, $b_n = d^T A^{v-1} b \neq 0$ $g = col(d_1, ..., d_{n-v})$, $d_i = d^T A^{n-i} b,\ i = \overline{1, n-v}$, $\xi = col(\xi_1, \xi_2, ..., \xi_{n-v})$.

Утверждение 2. В системе (6) вектор - строки a^T и g^T не равны нулю одновременно.

Действительно, в противном случае система (6), (7) является неуправляемой (поскольку представляет собой две несвязанные канонические подсистемы с одним управлением), что противоречит утверждению 1.

Следующий результат позволяет использовать двухуровневую декомпозицию из утверждения 1 в решении задачи слежения применительно к системе (6), (7).

Теорема 1. Система (6), (7) неособой заменой переменных вектора состояния динамического компенсатора приводится к виду

(8) $\dot{y}_i = y_{i+1},\ i = \overline{1, n-1},\ y_n = \bar{a}^T y + \bar{g}^T \bar{\xi} + b_n \bar{u};$

(9) $\dot{\bar{\xi}}_i = \bar{\xi}_{i+1} + c_i y_1,\ i = \overline{1,\ n-\nu-1};\ \dot{\bar{\xi}}_{n-\nu} = -\bar{g}^T \bar{\xi} + c_{n-\nu} y_1,$

где $\bar{\xi} = col(\bar{\xi}_1, \bar{\xi}_2, ..., \bar{\xi}_{n-\nu})$ и система (9) является управляемой относительно фиктивного управления y_1 в силу управляемости системы (6), (7).

Для доказательства приведём неособую замену переменных вектора состояния динамического компенсатора (7), которая меняет только коэффициенты в последнем уравнении (6), но не меняет ее каноническую структуру, что отражено в (8).

$$\bar{\xi}_i = \xi_i - c_i^T \bar{y},\ i = \overline{1, n-\nu-2},$$
$$\bar{\xi}_{n-\nu-1} = \xi_{n-\nu-1} - c_{n-\nu-1}^T \bar{y},$$
$$\bar{\xi}_{n-\nu} = \xi_{n-\nu} - c_{n-\nu}^T \bar{y} - y_n,$$

где $\bar{y} = col(y_1, ..., y_{n-1})$ и в силу (13) $\dot{\bar{y}} = col(y_2, ..., y_n)$.

Запишем систему (7) в новых переменных в расширенном виде

$$\dot{\bar{\xi}}_1 = \xi_2 - c_1^T \dot{\bar{y}} = \bar{\xi}_2 + c_2^T \bar{y} - c_1^T \dot{\bar{y}},$$
$$\dot{\bar{\xi}}_2 = \xi_3 - c_2^T \dot{\bar{y}} = \bar{\xi}_3 + c_3^T \bar{y} - c_2^T \dot{\bar{y}},$$
$$...,$$
$$\dot{\bar{\xi}}_{n-\nu-2} = \xi_{n-\nu-1} - c_{n-\nu-2}^T \dot{\bar{y}} = \bar{\xi}_{n-\nu-1} + c_{n-\nu-1}^T \bar{y} - c_{n-\nu-2}^T \dot{\bar{y}},$$
$$\dot{\bar{\xi}}_{n-\nu-1} = \xi_{n-\nu} - c_{n-\nu-1}^T \dot{\bar{y}} = \bar{\xi}_{n-\nu} + c_{n-\nu}^T \bar{y} + y_n - c_{n-\nu-1}^T \dot{\bar{y}},$$
$$\dot{\bar{\xi}}_{n-\nu} = -a^T y - g^T (\bar{\xi} - Cy) - c_{n-\nu}^T \dot{\bar{y}} =$$
$$= -g^T \bar{\xi} - (a^T - g^T C)\bar{y} - c_{n-\nu}^T \dot{\bar{y}} = -g^T \bar{\xi} + \bar{c}^T \bar{y} - c_{n-\nu}^T \dot{\bar{y}},$$

где введены обозначения $C_{(n-\nu)\times n} = \begin{pmatrix} c_1^T & 0 \\ ... & ... \\ c_{n-\nu-1}^T & 0 \\ c_{n-\nu}^T & 1 \end{pmatrix}$ и $\bar{c}^T = g^T C - \bar{a}^T$.

Отметим, что в последнем уравнении управляющее воздействие аннулируется.

Далее последовательный выбор строк c_i^T в уравнениях снизу вверх так, чтобы исключить все компоненты вектора $\bar{y}$, кроме первой компоненты y_1.

$c_{n-v}^T = (\overline{c}_2,...,\overline{c}_n) \Rightarrow \overline{c}^T y - c_{n-v}^T \dot{\overline{y}} = \overline{c}_1 y_1$

$c_{n-v-1}^T = (c_{n-v,2},...,c_{n-v,n-1},1) \Rightarrow c_{n-v}^T \overline{y} + y_n - c_{n-v-1}^T \dot{\overline{y}} = c_{1,n-v} y_1,$

$c_{n-v-2}^T = (c_{n-v-1,2},...,c_{n-v-1,n-1},0) \Rightarrow c_{n-v-1}^T \overline{y} - c_{n-v-2}^T \dot{\overline{y}} = c_{1,n-v-1} y_1,$

...,

$c_2^T = (c_{3,2},...,c_{3,n-1},0) \Rightarrow c_3^T \overline{y} - c_2^T \dot{\overline{y}} = c_{3,1} y_1,$

$c_1^T = (c_{2,2},...,c_{2,n-1},0) \Rightarrow c_2^T \overline{y} - c_1^T \dot{\overline{y}} = c_{2,1} y_1$

Что приводит систему (7) к виду (9).

Отметим, что, если в утверждении 1 каноническую форму имел динамический компенсатор (4), то в результате применения процедуры из доказательства теоремы 1 собственно модель объекта управления (8) имеет каноническую структуру, выход который подается на управляемую подсистему динамического компенсатора (9).

В следующем разделе решается задача слежения (2) за заданным сигналом, порождаемой генератором задания (3) применительно к системе (8), (9). В случае устойчивой нулевой динамики, что эквивалентно тому, что собственные движения системы (9) устойчивы, задача стабилизации сводится к задаче стабилизации применительно к канонической системе (8). В противном случае ставится также дополнительная задача обеспечения устойчивости собственных движений системы (9).

3 Синтез следящей системы при неустойчивой нулевой динамике

Перепишем систему (8), (9) в невязках $e_1 = y_1 - \eta_1$ и ее производных:

$$(10)\quad \begin{aligned} &\dot{e}_i = e_{i+1},\ i = \overline{1, n-1}, \\ &\dot{e}_n = \overline{a}^T (e+\eta) + \overline{g}^T \overline{\xi} + \eta_1^{(n)} + b_n \overline{u}; \end{aligned}$$

$$(11)\quad \begin{aligned} &\dot{\overline{\xi}}_i = \overline{\xi}_{i+1} + c_i (e_1 + \eta_1),\ i = \overline{1,\ n-v-1}; \\ &\dot{\overline{\xi}}_{n-v} = c_{n-v}(e_1 + \eta_1) + \overline{g}^T \overline{\xi}, \end{aligned}$$

где $e = col(e_1,...,e_n)$, $\eta = col(\eta_1, \dot{\eta}_1, ..., \eta_1^{(n-1)})$, $\eta_1^{(i)} = r^T W^{i-1} w$.

Система (11) трактуется как нулевая динамика системы (1) относительно выходной переменной e_1. Если она устойчива, задача слежения решается непосредственно выбором стабилизирующего управления в системе (10). В противном случае замкнутую систему следует считать неработоспособной с технической точки зрения. Далее полагается, что динамика системы (11) неустойчива.

Запишем генератор задания (3) в канонической форме в предположении наблюдаемости пары (r^T, W) в переменных η_1 и ее производных

(12) $\dot{\eta}_i = \eta_{i+1}, i = \overline{1, l-1},\ \dot{\eta}_l = h^T \eta$, было – $\dot{w} = Ww,\ \eta_1 = r^T w$,

где $\eta = col(\eta_1,...,\eta_l) \in R^l$, $h^T = r^T W^l \overline{H}^{-1}$, $\det \overline{H} \neq 0$ - матрица наблюдаемости системы (3) или в компактной форме:

(13) $\dot{\eta} = \overline{W}\eta$, $\eta_1 = q^T \eta$, $q^T = (1,0,...,0)$.

В случае неустойчивой нулевой динамики, приведем процедуру синтеза задачи слежения с использованием методологии блочного подхода [3].

На первом шаге, рассматривая переменную e_1 в системе (11) в качестве фиктивного управления введем новую переменную

(14) $\bar{e}_1 = e_1 - f_0^T \bar{\xi} - n^T \eta$.

Тогда система (17), (18) в новых переменных (21) запишется в следующем виде:

(15) $\begin{array}{l} \dot{\bar{e}}_i = \bar{e}_{i+1},\ i = \overline{1, n-1}, \\ \dot{\bar{e}}_n = \bar{\bar{a}}^T \bar{e} + \bar{\bar{g}}^T \bar{\xi} + w^T \bar{\eta} + b_n \bar{u}; \end{array}$

(16) $\begin{array}{l} \dot{\bar{\xi}}_i = \bar{\xi}_{i+1} + c_i[\bar{e}_1 + f_0^T \bar{\xi} + (n^T + q^T)\eta],\ i = \overline{1,\ n-v-1}, \\ \dot{\bar{\xi}}_{n-v} = c_{n-v}[\bar{e}_1 + f_0^T \bar{\xi} + (n^T + q^T)\eta] + \bar{\bar{g}}^T \bar{\xi}. \end{array}$

где $\bar{\eta} = col(\eta, \dot{\eta}, ..., \eta^{(n)})$, $\eta^{(i)} = q^T \bar{W}^{(i-1)} \eta$.

Выбором вектор - строки f_0^T в системе (16) можно обеспечить устойчивость собственных движений динамического компенсатора. Такой выбор всегда возможен в силу управляемости исходной системы.

На втором шаге решается задача стабилизации выходной переменной (14) в системе (15). При этом будет решена и задача слежения при выполнении условия

(17) $f_0^T \xi + n^T \eta = 0$.

Для решения задачи обеспечения равенства (17) введем конструкцию, аналогичную, приведенной в разделе 2 применительно к системе (16), записанной в виде:

(18) $\dot{\bar{\xi}} = G\bar{\xi} + c[f_0^T \bar{\xi} + (n^T + q^T)\eta + \bar{e}_1]$.

Представим вектор состояния системы (18) в виде суммы двух компонент

(19) $\bar{\xi} = \bar{\xi}_s + P\eta$,

где первая составляющая удовлетворяет уравнению $\dot{\bar{\xi}}_s = \bar{G}\bar{\xi}_s$, $\bar{G} = (G + cf_0^T)$, а матрица P подлежит определению.

Из соотношения, получаемого после подстановки (19) в (17) $g = f_0^T(\bar{\xi}_s + P\eta) + n^T \eta = 0$, с учетом $\bar{\xi}_s \to 0$ получаем первое матричное уравнение: $f_0^T P + n^T = 0$, которое разрешимо в явном виде относительно вектора n :

(20) $n^T = -f_0^T P$.

С другой стороны, подставляя (19) в (18) получим:

(21) $\dot{\bar{\xi}} = \bar{G}\bar{\xi}_s + \bar{G}P\eta + c(n^T + q^T)\eta + l\bar{e}_1$.

Запишем дифференциальное уравнение относительно переменной (19) с учётом (13):

(22) $\dot{\bar{\xi}} = \bar{G}\bar{\xi}_s + P\bar{W}\eta$, где $\dim P = (n-v) \times l$.

Приравнивая слагаемые с компонентами вектора η в уравнениях (21) и (22) получим второе матричное уравнение $\bar{G}P + c(n^T + q^T) = P\bar{W}$ или, с учетом $\bar{G} = (G + cf_0^T)$ и после подстановки (20):

(23) $GP + cq^T = P\overline{W}$.

Таким образом, совместное решение системы матричных уравнений (20), (23) сводится к последовательному решению системы (20) и подстановки его в (23).

С учетом того, что с помощью выбора вектор - строки f_0^T обеспечивается устойчивость собственных движений динамического компенсатора (16) далее решается задача стабилизации невязок слежения системы (15) посредством выбора управления в классе непрерывных функций: $b_n\overline{u} = -\overline{\overline{a}}^T\overline{e} - \overline{\overline{g}}^T\overline{\xi} - w^T\overline{\eta} + k^T\overline{e}$, где выбором вектор – строки k^T обеспечивается стабилизация замкнутой системы (22)

$\dot{\overline{e}}_i = \overline{e}_{i+1}, i = \overline{1, n-1}, \dot{\overline{e}}_n = k^T\overline{e}$.

Для практической стабилизации системы (22), необходима информация о компонентах $\overline{e}$, или компонент y в системе (8).

Решим задачу наблюдения компонент в системе (8), полагая, что для измерения доступна переменная y_1 и вектор состояния динамического компенсатора $\overline{\xi}$, с использованием наблюдателя состояния на скользящих режимах [4], структура которого аналогична структуре системы (8):

(24) $\dot{\overline{y}}_i = \overline{y}_{i+1} + v_i,\ i = \overline{1, n-1};\ \dot{\overline{y}}_n = a^T\overline{y} + g^T\overline{\xi} + b_n\overline{u} + v_n,$

где $\overline{y} = \mathrm{col}(\overline{y}_1,...,\overline{y}_n) \in R^n$ – вектор состояния наблюдателя; v_i $(i = \overline{1, n})$ – корректирующие воздействия наблюдателя.

Далее, известная техника [4] последовательного синтеза разрывных корректирующих воздействий наблюдателя состояния (24), позволяет получить текущие оценки компонент вектора состояния системы (8).

Заключение

В работе предложена процедура синтеза в рамках задачи слежения по выходной координате для так называемых неминимально фазовых систем, в предположении о невозможности измерения вектора состояния. Поставленная задача решается на основе приведения системы к канонической форме управляемости и наблюдаемости с расширением пространства состояния, что возможно только в предположении об управляемости и наблюдаемости исходной системы. На основе полученного канонического представления появляется возможность получения оценок вектора состояния, с использованием наблюдателя на скользящих режимах. Стабилизация неустойчивой нулевой динамики осуществляется на основе решения системы матричных уравнений.

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ №12-08-00865-а, №12-08-13105-офи_м_РЖД.

Список литературы

[1] Уонем У.М. Линейные многомерные системы управления. Геометрический подход. М.: Наука, 1980.
[2] Уткин А.В. Метод расширения пространства состояния в задаче синтеза автономного управления // АиТ. 2007. № 6. С. 81–98.
[3] Дракунов С.В., Изосимов Д.Б., Лукьянов А.Г., Уткин В.А., Уткин В.И. Принцип блочного управления // АиТ. 1990. Ч. 1. №5. С.38–47; Ч. 2. №6. С.20–32.
[4] Краснова С.А., Уткин В.А., Михеев Ю.В. Каскадный синтез наблюдателей состояния нелинейных многомерных систем // АиТ. 2001. №2. С. 43–63.

ЯЗЫК И ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В.И. Шелехов

Институт систем информатики СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 6, Россия
vshel@iis.nsk.su
тел: +7 (383) 330-27-2, факс: +7 (383) 332-34-94

Ключевые слова: *логика программы, предикатное программирование, унифицированная теория программирования, язык SDL, уровень адаптации ATM, реактивная система*

Abstract

Program classification is presented as a sound theoretical basis for software engineering. At the moment there are four program classes: non-interacting, object-oriented, simple process, and reactive system. The predicate programming is a suitable paradigm for non-interacting programs. A hyperfunction is a new language construct that allows flexible program decomposition. FORTRAN-like language constructs are introduced to express a simple process in the form of a finite state machine automaton. A precise, concise, and transparent program for Sender of ATM adaptation layer (type 2) protocol is presented as opposed to a long, imprecise and complicated description in the standard ITU-T Recommendation I.363.2, Section 10.1.

Введение

В программной инженерии нет универсальных методов, одинаково хорошо применимых для всех программ. При этом каждый известный метод оказывается успешным для некоторого класса программ. Иногда полезна комбинация разных методов. В настоящей работе *классификация программ* определяется как теоретический базис в программной инженерии. Теория программ каждого класса ориентирована на разработку методов спецификации, тестирования, дедуктивной верификации, моделирования и эффективной реализации программ.

На текущий момент определены следующие классы: невзаимодействующие программы, объектно-ориентированные программы, простые процессы и реактивные системы. Предикатное программирование [3-6, 8] изначально ориентировано на класс невзаимодействующих программ. Классификация программ появилась при попытке распространения методов верификации с класса невзаимодействующих программ на класс реактивных систем. Гиперфункция – конструкция нового вида, позволяющая проводить гибкую декомпозицию программы. Конструкция особенно полезна в ситуациях со сложным ветвлением в программе.

Автоматное программирование – наиболее подходящая парадигма для класса простых процессов. Программа представляется в виде автомата, машины конечных состояний, на языке в стиле ФОРТРАН. Технология автоматного программирования иллюстрируется на примере протокола передачи данных ATM Adaptation Layer уровня Type 2 AAL [1].

1 Классификация программ

Логика программы [4] – набор свойств, выраженных в форме логических утверждений (предикатов), используемых программистом при построении программы. Эти утверждения следуют из математического решения задачи и должны быть истинны в определенных местах программы. Формально, логика программы – сильнейший предикат, истинный при завершении исполнения программы. Данное понятие введено для программ, не взаимодействующих с

внешним окружением программы. Такие программы реализуют функции, отображающие входные данные в результаты программы. Для невзаимодействующей программы S ее логика L(S) совпадает с сильнейшим постусловием sp(**true**, S).

Логику программы легко построить для различных видов операторов императивного или функционального языка программирования. На ее базе разрабатываются методы дедуктивной верификации, статического анализа и тестирования программ.

Проблематика классификации программ возникла при попытке переноса понятия логики программы на взаимодействующие программы. На текущий момент классификация представлена четырьмя классами:

- невзаимодействующих программ;
- объектно-ориентированных программ;
- простых процессов;
- реактивных систем.

Каждый следующий класс является расширением предыдущего. Основой классификации являются следующие характеристики:

- минимальное ядро (набор конструкций) языка программирования;
- формы определения спецификации программы;
- виды условий корректности программы относительно спецификации.

Цель построения теории программ каждого класса – разработать методы спецификации, верификации (в широком смысле), моделирования и эффективной реализации программ. Представленные четыре класса программ – всего лишь начальная часть той иерархии классов, которую надо построить. Например, такие программы, как трансляторы и операционные системы существенно сложнее и не вписываются в приведенную классификацию. Полная иерархия классов будет иметь древовидную структуру, не линейную. Необходимо определить точные границы между классами. Для класса реактивных систем следует построить внутреннюю классификацию, в частности, определить гибридные и вероятностные реактивные системы.

1.1 Класс невзаимодействующих программ

По меньшей мере включает программы для задач дискретной и вычислительной математики. Минимальное ядро этого класса определяется языком исчисления вычислимых предикатов CCP (Calculus of Computable Predicates) [2]. Программа на языке CCP – набор рекурсивных определений вида: A(x: y) ≡ K(x: y), где A – имя предиката, аргументы x и результаты y – непересекающиеся наборы переменных. Оператор K(x: y) есть либо *оператор суперпозиции* B(x**:** z); C(z**:** y), либо *параллельный оператор* B(x**:** y) || C(x**:** z), либо *условный оператор* **if (**e) B(x**:** y) **else** C(x**:** y), где B и C – имена предикатов; наборы переменных x, y и z не пересекаются; e – логическая переменная. Всякая переменная характеризуется типом. Типы следующие: примитивные (**bool**, **int**, **real** или **char**), подмножество {x∈X | P(x, d)} на базе предиката P с параметром d, произведение X×Y, размеченное объединение X+Y, множество подмножеств SET(X), предикатный тип PRED(D: E) = {φ(d: e) | d∈D, e∈E, φ∈CCP}, где X и Y – имена типов, D и E – списки имен типов. Для языка CCP разработана формальная (операционная и логическая) семантика [2].

Язык предикатного программирования P [3] построен на базе языка CCP. Другие чистые языки функционального программирования также могут быть сконструированы на базе CCP.

Для программы S(x**:** y) *спецификация* [P(x), Q(x, y)] определяет предикаты P(x) и Q(x, y), называемые, соответственно, *предусловием* и *постусловием*. Предусловие должно быть истинно перед исполнением программы, постусловие – после завершения ее исполнения. *Тотальная корректность* программы S(x**:** y) относительно спецификации [P(x), Q(x, y)] определяется формулой:

(1) $P(x) \Rightarrow \forall y.\ [\ L(S(x{:}\ y)) \Rightarrow Q(x, y)\ ]\ \&\ \exists y.\ L(S(x{:}\ y))$

Предикат L(S(x: y)) – логика программы S(x: y). Предикат ∃y. L(S(x: y)) определяет условие завершение исполнения программы. Заметим, что программа должна завершаться, потому что незавершающаяся и невзаимодействующая программа бесполезна.

На базе формулы (1) разработан генератор формул корректности программы для доказательства в системе автоматического доказательства PVS [7]. Генератор реализован как back-end в трансляторе с языка P на C++. Данный метод дедуктивной верификации применен для ряда программ: сумматора Ling [5], эффективных программ целочисленных стандартных функций floor, isqrt и ilog2 [6], трех алгоритмов пирамидальной сортировки [8] и др.

В парадигме предикатного программирования эффективность программы достигается применением специальных оптимизирующих преобразований, переводящих программу на императивное расширение языка P. Далее программа может быть конвертирована на любой из императивных языков программирования, включая C, C++, ФОРТРАН. Базисными трансформациями являются:

- замена хвостовой рекурсии циклом;
- подстановка тела программы на место ее вызова;
- склеивание переменных: замена всех вхождений одной переменной на другую переменную;
- кодирование рекурсивных структур данных (списков, деревьев, …) с помощью массивов и указателей.

Итоговая программа по эффективности не уступает написанной вручную и, как правило, короче. Отметим, что для функциональных языков (при общеизвестной ориентации на предельную компактность и декларативность [12]) не удалось достичь приемлемой эффективности даже с применением изощренных методов оптимизации. Предикатная программа декларативна, но не обязательно компактна, поскольку важнейшая оптимизация реализуется программистом на алгоритмическом уровне. Технология предикатного программирования позволяет воспроизвести любую реализацию, проводимую в императивном программировании. Для сложных задач предикатная программа на порядок проще ее императивного аналога.

1.2 Класс объектно-ориентированных программ

Минимальное языковое ядро этого класса является расширением ядра предыдущего класса конструкцией Class, являющейся описанием типа нового вида, и конструкцией <объект>.<имя элемента класса> для доступа к элементу некоторого объекта. Описание класса определяет переменные, константы и методы как элементы класса. Всякий метод – это предикат. Следующие классы программ дополняются другими видами методов, например, процессами.

В языковом ядре должны быть отражены такие свойства, как инкапсуляция и наследование. Разумеется, даже минимальное объектно-ориентированное расширение может оформлено в разных стилях, например таких, как в языках C++, Java и Scala [18]. Проблема в том, какой из них использовать в языковом ядре.

Спецификация программы должна включать спецификации всех используемых классов. Спецификация класса состоит из спецификаций методов класса. Спецификация метода состоит из предусловия и постусловия. Дополнительно, например, в случае использования объекта класса в составе состояния процесса, спецификация класса может включать инвариант класса, который должен быть истинным при завершении исполнения каждого метода.

Для каждого метода должна быть истинной формула тотальной корректности (1). Дополнительно, для вызовов наследуемых методов применяются правила подстановки Barbara Liskov [9]: инвариант класса и постусловия должны оставаться истинными в подклассах, а предусловия могут быть ослаблены.

1.3 Класс простых процессов

Если возможно перестроить последовательную программу таким образом, чтобы все операторы ввода данных находились в начале программы, а весь вывод собран в конце программы, то такая программа относится к классу невзаимодействующих программ. В противном случае программа принадлежит классу простых процессов. Типичной программой этого класса является бесконечный цикл вида:

(2) **while (true)** A(s**:** s′)

Здесь s′ обозначает набор переменных s в точке программы после исполнения оператора A(s**:** s′). Фундаментальный факт: логика программы для цикла (2) не существует (формально, равна **false**). Поэтому верификация на основе формулы (1) не применима к циклу (2). Введем инвариант R(s) для цикла (2) и представим его в виде следующего *сегмента*:

(3) L: **invariant** R(s);

A(s**:** s′) #L

Здесь #L используется как обозначение для оператора **goto** L. Теперь возможно верифицировать программу A(s**:** s′) относительно спецификации [R(s), R(s′)] по формуле (1). Заметим, что условие завершения для A(s**:** s′) также включено.

В общем случае, программа простого процесса представляется автоматом – графом в виде машины конечных состояний. Программа состоит из нескольких сегментов. Каждый *сегмент* определяет дугу автомата. Сегмент определяет оператор, вычисление которого завершается оператором перехода на начало другого сегмента программы. В начале сегмента вставляется инвариант.

Минимальное языковое ядро для класса простых процессов должно также включать средства для взаимодействия с внешним окружением: ввода и вывода данных, посылки и приема сообщений с возможными параметрами. Оператор **send** m(e) посылает сообщение m с параметрами, значения которых определяются набором выражений e. Оператор приема сообщений определяется следующим правилом:

<оператор приема сообщений>::=

receive <имя сообщения>(<параметры>) <оператор> |

receive <имя сообщения>(<параметры>){ <оператор> }

else <оператор приема сообщений>

Для второго варианта правила при отсутствии первого сообщения в канале проверяются другие сообщения из **else**-части оператора. Оператор приема сообщений исполняется многократно до тех пор, пока в канале не появится одно из сообщений, принимаемых оператором. После получения сообщения переменные, указанные <параметрами>, получают значения параметров сообщения, и выполняется соответствующий <оператор>.

Программируемые логические контроллеры PLCs (programmable logic controllers) определяют важнейший подкласс программ простых процессов. Большая часть контроллеров PLCs разрабатывается в соответствии со стандартом IEC 61131-3. Контроллеры PLCs используются как часть систем управления в разных отраслях, таких как массовый транспорт и энергетика. На каждом шаге вычислительного цикла контроллер PLC получает входную информацию из окружения и обрабатывает ее. Результаты вычисления используются для передачи управляющего сигнала в окружение контроллера.

1.4 Класс реактивных систем

Реактивная система строится в виде параллельной композиции простых процессов, взаимодействующих между собой и с внешним окружением с помощью сообщений и через разделяемые переменные. Минимальное языковое ядро класса реактивных систем есть расширение ядра предыдущего класса конструкцией *параллельный оператор* $F_1 \parallel F_2 \parallel \ldots \parallel F_n$, где F_1, F_2, …, F_n – простые процессы, исполняемые параллельно.

Формальная семантика (логика программы) параллельного оператора определяется через *интерливинг*: произвольное перемешивание действий от разных процессов. *Действие* простого процесса – фрагмент программы, исполняемый мгновенно во избежание коллизий с другими параллельно исполняемыми простыми процессами. Каждый сегмент простого процесса состоит из одного или нескольких действий. Логика программы для каждого действия определена, поскольку действие – невзаимодействующая программа. *Трасса* – последовательность действий по одному из путей исполнения простого процесса. Исполнение простого процесса можно представить исполнением некоторой его трассы. Множество всех трасс параллельного оператора $F_1 \parallel F_2 \parallel \ldots \parallel F_n$ определяется произвольным перемешиванием (интерливингом) всевозможных комбинаций трасс процессов F_1, F_2, …, F_n. Исполнение параллельного оператора эквивалентно последовательному исполнению одной из его трасс. *Логика программы параллельного оператора* для некоторой его трассы есть конкатенация логик действий, входящих в трассу. Трасса *достижима*, если ее логика отлична от **false**.

Разработан метод спецификации параллельного оператора [4]. Спецификация представляется автоматом такой же структуры, что и для простого процесса. Вершина автомата содержит инвариант. Дуга автомата – некоторое действие простого процесса из композиции для параллельного оператора. Таким образом, спецификация определяет последовательную недетерминированную программу и представляет ее интерливинговую развертку. Ее можно исполнять в целях моделирования. На ее базе можно реализовать различные схемы тестирования и другие виды верификации. Для установления эквивалентности параллельного оператора с его спецификацией необходимо доказать: 1) все инварианты автомата истинны; 2) автомат покрывает все достижимые трассы. Разработанный метод спецификации, дедуктивной верификации и тестирования реактивных систем опробован для алгоритма взаимного исключения Петерсона, протокола рукопожатия и протокола ABP.

2 Гиперфункции

Представим сначала одно золотое правило программирования[1]: “Если на некотором этапе декомпозиции программы программист вводит логическую переменную, чтобы далее по ней рулить, то такая декомпозиция плоха, а программист не справился с управлением. Следует декомпозировать программу другим способом без введения внутренней логической переменной”.

Рассмотрим типичное решение задачи: взять второй элемент списка s и обработать его программой B; если второго элемента нет, запустить программу D.

(4) Elem2(s**:** e, exists); **if** (exists) B(e…) **else** D(…);

Программа Elem2 на языке P:

```
pred Elem2(list(int) s: int e, bool exists )
{   if (s = nil ∨ s.cdr = nil)      exsts = false
    else       { e = s.cdr.car || exists = true }
} post exists = (s ≠ nil  & s.cdr ≠ nil) &  (exists ⇒ e = s.cdr.car);
```

Подставим тело Elem2 на место вызова в (4). Итоговой код после упрощений не содержит логической переменной exists:

if (s = nil ∨ s.cdr = nil) D(…) **else** { e = s.cdr.car; B(e…) }

Такой код – это намек, что переменная exists не нужна. Во избежание использования переменной exists во фрагменте (4) введем новую конструкцию, называемую гиперфункцией. Дадим определение гиперфункции для Elem2:

[1] Геннадий Кожухин, разработчик транслятора АЛЬФА, собирал золотые правила программирования в 1960-х гг.

hyper Elem2(list (**int**) s **: int** e #1**:** #2)
pre 1: s ≠ nil & s.cdr ≠ nil
{ **if** (s = nil ∨ s.cdr = nil) #2
else { e = s.cdr.car #1 }
} **post** 1: e = s.cdr.car;

Гиперфункция Elem2 имеет две ветви результатов: первая ветвь включает переменную e, а вторая ветвь не имеет результатов – она пуста. Метки 1 и 2 – дополнительные параметры, обозначающие два различных выхода гиперфункции. Спецификация гиперфункции состоит из двух частей. Утверждение после "pre 1:" есть предусловие первой ветви; предусловие второй ветви – просто отрицание предусловия первой ветви. Утверждение после "post 1:" есть постусловие для первой ветви. Постусловие второй ветви отсутствует, потому что секция результатов пуста. Фрагмент (4) заменяется следующим:

Elem2(s**:** e #L1**:** #L2) **case** L1: B(e…) **case** L2: D(…);

Здесь вызов гиперфункции завершает исполнение либо по метке L1, либо по метке L2. Подконструкция case определяет различные продолжения после вызова гиперфункции.

Чтобы дать общее определение гиперфункции, рассмотрим следующее определение предиката:

(5) **pred** A(x: y, z, c)
pre P(x)
{ … }
post c = C(x) & (C(x) ⇒ S(x, y)) & (¬C(x) ⇒ R(x, z));

Здесь x, y и z – возможно пустые наборы переменных; P(x), C(x), S(x, y) и R(x, z) – логические утверждения. Предположим, что все присваивания вида c = **true** и c = **false** – последние исполняемые операторы в теле предиката. Определение предиката (5) может быть заменено следующим определением гиперфункции:

(6) **hyp** A(x**:** y #1**:** z #2)
pre P(x) **pre** 1**:** C(x)
{ … }
post 1: S(x, y) **post** 2: R(x, z);

В теле гиперфункции каждое присваивание c = **true** заменено на #1, а c = **false** – на #2. Заметим, что для пустой секции результатов постусловие опускается. При замене (5) на (6) изменяется операционная семантика: гиперфункция имеет два независимых выхода в разные точки программы.

Использование гиперфункций делает программу короче, быстрее и проще для понимания. Гиперфункции дают возможность предельно гибкой декомпозиции программы, недостижимой другими средствами.

Аппарат гиперфункций позволяет существенно улучшить модель простых процессов. Программу простого процесса будем представлять автоматом (машиной конечных состояний) в виде гиперграфа. Гиперребро определяет сегмент простого процесса в форме гиперфункции: сегмент может содержать несколько переходов на разные сегменты простого процесса.

3 Передатчик в протоколе AAL-2

Изложенные выше методы иллюстрируются на программе Передатчика, описанной на языке спецификаций SDL в разделе 10.1 стандарта [1]. Использование списков вместо массивов и аппарата гиперфункций позволили существенно улучшить описание программы Передатчика. Для упрощения иллюстрации опущена детальная информация по протоколу, напрямую не связанная с программой. Хотя представленная программа значительно отличается от оригинального алгоритма ([1], раздел 10.1), большая часть обозначений сохранена.

Уровень адаптации 2 (AAL type 2) в асинхронном способе передачи данных ATM (Asynchronous Transfer Mode) используется для высокоэффективной передачи низкоскоростных, коротких пакетов переменной длины в приложениях, чувствительных к задержкам. Используются три уровня передачи данных: подуровень конвергенции SSCS (Service Specific Convergence Sublayer), общий подуровень CPS (Common Part Sublayer) и уровень ATM. Передатчик получает пакеты с уровня SSCS, пакует их в одну или несколько ячеек ATM и посылает ячейки на уровень ATM.

Передатчик получает очередной пакет через сообщение CPSpacket(pd, atrs), где pd – данные пакета переменной длины, atrs – атрибуты пакета. Передатчик строит заголовок пакета ph (packet header) длиной 3 октета[2]. Пакет, состоящий из ph и pd, пакуется в один или несколько блоков данных PDUs (protocol data units). Блок данных PDU состоит из начального поля STF (start field) длиной в 1 октет и основной части (payload) длиной 47 октетов. Блок PDU в точности помещается в пользовательскую часть (длины 48 октетов) ячейки ATM. Пакет, не вместившийся в очередном блоке PDU, продолжается в следующем PDU. В этом случае начальное поле STF следующего блока PDU содержит длину в октетах перенесенной части текущего пакета. Очередной построенный блок PDU передается на уровень ATM посылкой сообщения ATM_cell(PDU).

Упаковка пакетов в ячейки ATM плотная: следующий пакет размещается в ячейке непосредственно после предыдущего. Таким, образом, ячейка может содержать несколько пакетов.

Имеется несколько особенностей, усложняющих алгоритм. Во-первых, заголовок пакета ph может не поместиться целиком в очередном блоке PDU и тогда продолжается в следующем PDU. Очередной построенный блок PDU может быть отправлен на уровень ATM только после получения запроса на посылку – сообщения SEND_request(). Эта особенность увеличивает число управляющих состояний и усложняет алгоритм. Построение очередного блока PDU управляется таймером. При истечении установленного времени построение очередного блока PDU завершается заполнением нулями оставшейся части блока PDU.

Ниже даются описания программы Передатчика.

type OCTET = **byte**;
type DATA = list(OCTET);
type ATRS; // атрибуты пакета
bool UnspecCondition;

Тип DATA определяет списки, элементами которого являются октеты. Переменная UnspecCondition обозначает неопределенное условие, введенное для будущей стандартизации.

OCTET ConstructSTF(**nat** len_of_packet_continuation);
DATA ConstructCPSPacketHeader(DATA pd, ATRS atrs);

Здесь даны предописания функций для создания заголовков STF и ph.

pred fill(DATA buf**:** DATA buf′)
pre len(buf) ≤ 48
post len(buf′) = 48 & ∃pad. buf′ = buf + pad & null(pad);

Предикат fill расширяет список buf до длины в 48 октетов с обнулением добавленных октетов. Обозначение buf′ используется для итогового значения buf, модифицированного предикатом. Операция “+” означает конкатенацию двух списков.

pred split(DATA x, **nat** r: DATA y, x′)
pre len(x) ≥ r **post** x = y + x′ & len(y) = r;

Предикат split извлекает список y длины r из списка x; при этом x′ – оставшаяся часть списка.

[2] Октет состоит из 8 битов; термин «байт» не используется, т.к. имеет иную смысловую нагрузку.

```
hyper move(DATA x, buf : DATA x′, buf′ #1
 : DATA x′, buf′ #2)
  pre len(buf) ≤ 48 pre 1: len(buf) + len(x) ≤ 48
{  if (len(buf) + len(x) > 48)   { split(x, 48 - len(buf): DATA y, x′); buf′ = buf + y #2 }
   else { buf′ = buf + x; x′ = nil #1 }
} post 1: len(buf′) ≤ 48  & buf′ = buf + x & x′ = nil
  post 2: len(buf′) = 48 & buf + x = buf′ + x′;
```

Гиперфункция move добавляет список x к списку buf. Если длина buf + x больше 48 (ветвь 2), список x расщепляется на y и x′, причем len(buf + y) = 48 и x = y + x′; при этом лишь часть списка x перемещается на buf, а x′ – оставшаяся часть. Заметим, что присваивание x′ = nil на первой ветви необходимо, потому что переменная x′ включена в состояние процесса программы Передатчика; в противном случае x′ можно было бы изъять из результатов первой ветви, что упростило бы алгоритм.

Чтобы обеспечить эффективность программы в трансляторе с языка P реализуется трансформация замены списков массивами. Список x кодируется внутри массива X в виде вырезки массива X[jx: px-1], buf – кодируется вырезкой BUF[0: pBuf-1]. Транслятор с языка P проводит следующие замены: len(x) → px – jx, x = nil → px ≤ jx, y → X[jx : py - 1], len(buf) → pBuf. Ниже представлен код после трансформаций.

```
hyper move(X, jx, px, BUF, pBuf : jx′, px′, pBuf′ #1
: jx′, px′, pBuf′ #2)
{  if (pBuf + px – jx > 48)
     { nat py = 48 + jx - pBuf; BUF[pBuf: 48] = X[jx: py-1]; jx′=py #2 }
   else { BUF[pBuf: ] = X[jx: px-1];  pBuf = pBuf + px – jx; jx′ = px  #1 }
};
```

Программа Передатчик принадлежит классу простых процессов. Переменные состояния программы представлены следующими описаниями:

DATA pd = nil, ph = nil, buf; **bool** permit;

Пакеты, пакуемые в текущий блок PDU, помещаются в буфер buf; pd – данные текущего пакета; ph – заголовок пакета, конструируемый для текущего пакета; флаг permit становится равным **true** при получении сообщения message SEND_request(). Если текущий блок PDU полностью заполнен, а текущий пакет переносится в следующий PDU, то переменные ph и pd соответствуют оставшейся части пакета. Случай ph = nil означает, что пакет полностью перенесен в текущий PDU; в противном случае ph содержит оставшуюся часть пакета.

Программа Передатчика, представленная ниже на рис. 1, имеет 11 управляющих состояний. Состояния H и G – новые. Остальные состояния – те же, что и в оригинальном алгоритме. Состояния A и E оригинального алгоритма заменены на G. Все управляющие состояния, кроме первого имеют инвариант.

Оператор set Timer_CU включает таймер компьютера, устанавливая его в ноль. После истечения стандартного временного интервала посылается сообщение Timer_CU(), сигнализирующее об истечении временного интервала. Условие active(Timer_CU) – истинно, если время еще не истекло. Всякое следующее исполнение оператора set Timer_CU отменяет установку предыдущего оператора. Имеются некоторые отличия во временном управлении в сравнении с оригинальным алгоритмом [1].

```
START: permit := false;
       buf = ConstructSTF(0);
IDLE:  inv pd = nil & len(buf) = 1;
       receive CPSpacket(pd, ATRS atrs) {
          set Timer_CU;
C:        inv len(buf) < 48 & pd≠nil & ph=nil;
          ph=ConstructCPS_PacketHeader
```

```
B:        inv len(buf) = 48;
          send ATM_cell(buf);
          set_Timer_CU;
          permit = false;
          buf = ConstructSTF(
                  if (len(ph) + len(pd) > 47)  47
                  else len(ph) + len(pd) );
```

```
                                        (pd, atrs);
H:      inv len(buf) < 48 & pd≠nil & ph≠nil;
        move(ph, buf: ph′, buf′ #G:
                                        ph′, buf′ #F);
G:      inv len(buf) < 48 & pd≠nil & ph=nil;
        move(pd, buf: pd′, buf′: pd′, buf′ #F);
        if (len(buf) = 48) #F
        else if (active(Timer_CU)) #PART
        else #SEND
    } else receive SEND_request() {
            if (UnspecCondition) #D
            else { permit = true; #IDLE }
    }
F:  inv len(buf) = 48;
    if (permit) #B else #FULL
D:  inv ¬active(Timer_CU) or
                            UnspecCondition;
    fill(buf: buf′);
```

```
        if (ph ≠ nil) #H
        else if (pd = nil) #IDLE
        else #G

FULL:   inv len(buf) = 48 & ¬permit;
        receive SEND_request() #B
PART:   inv len(buf) < 48 & pd = nil & ph = nil;
        receive CPSpacket(pd, ATRS atrs) #C
        else receive Timer_CU()
                { if (permit) #D else #SEND }
        else receive SEND_request()
            if (UnspecCondition)
                { set Timer_CU; #D }
            else { permit = true; #PART }
SEND:   inv len(buf) < 48 & pd = nil & ph = nil
            &¬active(Timer_CU) & ¬permit;
        receive CPSpacket(pd, ATRS atrs) #C
        else receive SEND_request() #D
```

Рисунок 1 – Основная часть программы Передатчика

Код сегмента IDLE после получения сообщения CPSpacket выглядит просто: построение заголовка пакета ph, пересылка заголовка ph на буфер buf и пересылка данных пакета pd на буфер buf. Возможные переносы на следующий блок PDU отслеживаются внутри гиперфункции move. В коде сегмента B пересылка оставшейся части заголовка пакета на буфер buf для случая ph ≠ nil, представленная в оригинальном алгоритме, заменена переходом #H на вызов гиперфункции move, делающий то же самое.

4 Смежные работы

Классификации языков программирования и парадигм программирования слабо отражают классификацию программ, представленную в настоящей статье. Гораздо больше связей с унифицированными теориями программирования UTPs (unifying theories of programming) [13]. Сигнатура UTP – минимальное языковое ядро некоторой парадигмы программирования. Теории UTPs поставляют формальную семантику программ как унифицированный базис в программной инженерии. По сравнению с UTP теория конкретного класса программ дополнительно включает технологии и методы, специфические для данного класса.

Предложено много формальных языков для описания программ, реализующих процессы (последовательные, параллельные, распределенные или реактивные), таких VDM [14], SDL [17], TLA+ [15] и Event-B [16]. Эти языки определены как универсальные для всех программ. Язык в стиле ФОРТРАН, предложенный в данной статье, для описания простых процессов использует оператор перехода как естественную и адекватную конструкцию, что противоречит структурному программированию. Этот язык не универсален, однако хорошо подходит для программ со сложной структурой управления, такой как в программе Передатчика. Различие между программами-функциями (невзаимодействующими) и программами-процессами слишком существенно чтобы разделить их в классификации программ. Циклы программ-функций и программ-процессов (и, соответственно, их инварианты) имеют различную природу. В парадигме программирования на базе инвариантов [11] для цикла сначала строится инвариант, а затем код цикла на базе инварианта. Однако этот подход совершенно непригоден при программировании циклов для программ-процессов.

Термин «логика программы» используется как логика Хоара [10] с 2000 гг. Наше значение этого термина близко к логическому программированию, где программа и логика тождественна – различия чисто синтаксические. Логика программы (в нашем смысле) совпадает с сильнейшим постусловием (но не для программ-процессов) и имеет то же значение, что и observational semantics, введенная Хоаром [13].

Технология автоматного программирования Анатолия Шалыто [19] доказала свою эффективность при разработке программной части (контроллеров) систем управления[3], реализуемых в аэрокосмической отрасли, энергетике, медицине и др. отраслях. Однако реализация технологии нарушает золотое правило программирования (см. раздел 2): вместо управляющих состояний используются логические переменные как часть состояния программы, что, как следствие, приводит к более сложной и менее эффективной программе. Это пример того, как следование принципам структурного программирования в автоматном программировании наносит ощутимый вред. Язык C++, являющийся базовым в switch-технологии, неадекватен для автоматных программ.

Заключение

Классификация программ является новой темой исследований в программной инженерии. Представленная часть классификации – лишь начало будущих развертывающихся исследований в этой области. Первый класс невзаимодействующих программ появился в результате эволюции предикатного программирования. Объектно-ориентированные программы и простые процессы как часть классификации введены пять месяцев назад.

В предикатном программировании применяется несколько новых методов. В данной работе представлены только два из них: гиперфункции и использование списков вместо массивов. Разработана концепция автоматного программирования, в которой автомат программы (машина конечных состояний) имеет вид гиперграфа. Для автоматного программирования введены новые конструкции в стиле языка ФОРТРАН.

Предложенные методы иллюстрируются на программе Передатчика для стандарта AAL-2. Наш Передатчик использует 4 переменные, определяющих состояние программы, против 7 переменных оригинального алгоритма (фактически 9, однако seq попала под сокращение в нашем Передатчике, а tmp неправильно считать переменной состояния). Это существенное улучшение, поскольку сложность программы экспоненциально зависит от числа переменных состояния программы.

Использование логической переменной permit в программе Передатчика – это живой пример нарушения золотого правила программирования. Возможно ли исключить эту переменную из программы? Конечно, да. Необходимо удалить прием сообщений SEND_request() в сегментах кода IDLE и PART. Модифицированная программа будет проще, однако не очевидно, что она будет эффективней.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 12-01-00686.

Список литературы

[1] ITU-T Recommendation I.363.2 (11/2000): ′B-ISDN ATM Adaptation Layer Specification: Type 2 AAL′.

[2] Shelekhov V. The language of calculus of computable predicates as a minimal kernel for functional languages / BULLETIN of the Novosibirsk Computing Center. Series: Computer Science. IIS Special Issue. 29. – Novosibirsk, 2009. – P. 107-117.

[3] А.А. Шалыто использует термин «система логического управления».

[3] Карнаухов Н.С., Першин Д.Ю., Шелехов В.И. Язык предикатного программирования Р. – Новосибирск, 2010. – 42с. – (Препр. / ИСИ СО РАН; N 153).
[4] Shelekhov V. Tumurov E. Logic of non-interacting programs and reactive systems // Vestnik of Buryat State University. Section: mathematics, informatics. Issue 9/2012. – Ulan-Ude, 2012. – P 81-90.
[5] Shelekhov V. I. 2011. Verification and Synthesis of Addition Programs under the Rules of Correctness of Statements. *Automatic Control and Computer Sciences*. Vol. 45, No. 7, 421–427.
[6] Шелехов В.И. Верификация и синтез эффективных программ стандартных функций floor, isqrt и ilog2 в технологии предикатного программирования // Тр. 12-й межд. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». – Самара, Самарский научный центр РАН, 2010. – С. 622-630.
[7] PVS Specification and Verification System. – SRI International. – http://pvs.csl.sri.com/
[8] Шелехов В.И. Разработка и верификация алгоритмов пирамидальной сортировки в технологии предикатного программирования. – Новосибирск, 2012. – 30с. – (Препр. / ИСИ СО РАН. N 164).
[9] Liskov B. Keynote address - data abstraction and hierarchy. OOPSLA '87: Addendum to the Proceedings on Object-oriented programming systems, languages and applications (Addendum). – 1987. – P. 17–34.
[10] Hoare C. A. R. An axiomatic basis for computer programming // Communications of the ACM. Vol. 12 (10). – 1969. – P. 576–585.
[11] Eriksson J. and Back R.-J. Applying PVS Background Theories and Proof Strategies in Invariant Based Programming // LNCS 6447. – 2010. – P. 24–39.
[12] Cooke D. E., Rushton J. N. Taking Parnas′s Principles to the Next Level: Declarative Language Design // Computer, Vol. 42, no. 9. – 2009. – P.56-63.
[13] Hoare C.A.R. and Jifeng He. Unifying Theories of Programming / Prentice Hall Series in Computer Science. Prentice Hall Europe. – 1998.
[14] Jones C.B. Systematic Software Development using VDM / Prentice Hall International. – 1990.
[15] Lamport L. Specifying Systems: The TLA+ Language and Tools for Hardware and Software Engineers / Addison-Wesley. – 1999.
[16] Abrial J.-R. Modelling in Event-B: System and Software Engineering / Cambridge University Press, 2010.
[17] Specification and description language (SDL). *ITU-T Recommendation Z.100* (03/93).
[18] The Scala programming language. http://www.scala-lang.org/
[19] Поликарпова Н.И., Шалыто А.А. Автоматное программирование / СПб.: Питер. 2009, 176с. http://is.ifmo.ru/books/_book.pdf

ДЕКОМПОЗИЦИОННАЯ ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗА ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ

Ю.М. Рассадин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65, Россия
rassadin@ipu.ru
тел: +7 (495) 334-93-21

Ключевые слова: *дискретные системы, метод разделения движений, декомпозиция*

Abstract
The decomposition procedure of synthesis of digital systems is described. It is based on block approach and motions separation technique. Decomposition of the original problem to a chain of successive elementary subproblems of smaller dimension allows the synthesis controller on the simplified model of the object. The results are applied to an AC induction motor model.

Введение

Микропроцессорные устройства активно развиваются. Их возможности и соотношение цена/качество сделали микроэлектронику неотъемлемой частью любого сложного или высокоточного устройства. В силу различных обстоятельств, к конструированию электроприводов сформировался консервативный подход, приоритетом считается простота в производстве, эксплуатации и ремонте. Эффективность использования энергии, универсальность устройств и сложность доступных алгоритмов рассматриваются далеко не в первую очередь. Вместе с тем, применение микропроцессорных устройств может существенно повысить точность работы и КПД таких устройств, расширить круг решаемых задач. В связи с этим сильно возрастает значение дискретных систем управления. В работе предложена декомпозиционная процедура синтеза дискретных систем на основе методов разделения движений. Точность дискретного представления удается сделать зависимой не от шага по времени, который определяется условиями задачи, а от желаемого спектра замкнутой системы, назначаемого в процессе синтеза обратной связи. В качестве объекта управления рассмотрена нелинейная модель асинхронного двигателя.

Конструктивной основой работы является блочный подход, который состоит из двух этапов. Первый этап включает в себя анализ структурных свойств математической модели объекта, который определяет разрешимость поставленной задачи (стабилизации, слежения, наблюдения и т.п.). С целью понизить размерность задачи уже на этапе анализа, вводятся пошаговые процедуры невырожденных преобразований математической модели объекта управления к блочной форме, которая отражает структурные свойства исходной системы. Отмечая тот факт, что блочная форма представляет собой последовательную цепочку интеграторов, на основе метода разделения движений проводится построение дискретного представления объекта. На основе полученной блочной формы на втором этапе осуществляется блочный синтез в терминах преобразованных координат, который сводится к последовательному решению элементарных подзадач, размерности которых соответствуют индексам управляемости блочной формы.

1 Построение дискретной модели

Рассмотрим математическую модель управляемого технического объекта, которая описывается линейной непрерывной многомерной стационарной системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

(1) $\dot{x} = Ax + Bu$,

где $x \in R^n$ – вектор состояния, $u \in R^m$ – вектор управления, $A \in R^{n\times n}, B \in R^{n\times m}$ – известные матрицы с постоянными коэффициентами, пара (A, B) управляема. Как показано в [1], управляемая система (1) с помощью неособого преобразования может быть представлена в виде БФУ:

(2) $\dot{x}_j = \sum_{i=r}^{j} A_{ji}x_i + B_j x_{j-1}, j = \overline{r,0}, x_{-1} = u$.

Согласно теории размерности, единицы измерения всех независимых величин, участвующих в описании объекта, могут выбираться произвольным образом. Тогда с помощью неособой замены переменных систему (2) можно представить в виде

(3) $\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_j &= k_j \bar{x}_j + \bar{x}_{j-1}, j = \overline{r,1}, \\ \dot{\bar{x}}_0 &= \sum_{i=r}^{0} \tilde{A}_{0i}\bar{x}_i + B_0 u, \end{aligned}$

где $k_l >> k_n >> 1,$ при $l < n$. Тогда к системе (3) применимы методы разделения движений [2], которые позволяют получить приближенные решения задачи Коши для каждого блока переменных. Последовательно переходя «снизу вверх», от более быстрых фазовых переменных к более медленным, можно построить дискретную математическую модель с точностью, которая определяется исходной структурой объекта (2) и желаемым набором коэффициентов преобразования (2)-(3).

Рассмотрим подробнее первый шаг дискретизации. Особый вид имеют уравнения блока переменных x_0, содержащего управление. Они представляют собой линейную комбинацию предыдущих фазовых величин, а значит постоянная времени для x_0 определяется ограничениями на управляющие воздействия. Характерное время для данного блока определяется неравенством $T_0 < (1/k_j) \forall j$. Тогда система (3), в приближении по малому параметру, примет вид регулярно-возмущённой системы ОДУ:

(4) $\begin{aligned} \dot{x}_j &= 0, j = \overline{r,1}, \\ \dot{x}_0 &= \sum_{i=r}^{1} A_{0i}x_i(0) + A_{00}x_0 + B_0 u(0). \end{aligned}$

Для системы (4), в силу оговоренных условий задачи можно записать точное аналитическое решение соответствующей задачи Коши:

(5) $\begin{aligned} x_j(t) &= x_j(0) = const, j = \overline{r,1}, \\ x_0(t) &= \exp(A_{00}t)x_0 + \left(I - \exp(A_{00}t)\right)\left(\sum_{i=r}^{1} A_{0i}x_i(0) + B_0 u(0)\right). \end{aligned}$

Выделенная подзадача для блока переменных x_0 обладает рядом преимуществ при синтезе обратной связи. Полный ранг матрицы B_0 позволяет отнести задачу к классу элементарных, а пониженная размерность снижает вычислительную нагрузку. Необходимо помнить, что

для линейной системы, содержащей нестационарные коэффициенты, переходную матрицу можно записать в явном виде только при коммутативности матриц $A(t)$ и $\int_0^t A(\tau)d\tau$ [3].

Последовательно применяя аналогичные рассуждения для каждого блока переменных, получим приближённые решения с требуемой точностью для системы (4). Декомпозиция исходной задачи позволяет при численном эксперименте организовать вложенные разновременные циклы расчета алгоритмов управления – в более «медленных» подсистемах интервал дискретизации по времени больше, чем в более «быстрых».

2 Синтез базового закона управления при полных измерениях

Следуя алгоритму, изложенному выше, управляемая система вида (1) преобразуется к блочной форме управляемости,

$$(6)\quad x_i(k+1)=\sum_{j=i}^{r}A_{ij}(k)x_j(k)+B_i(k)x_{i-1}(k),\ i=\overline{r,0},x_{-1}(k)=u(k)$$

где $x_i\in R^{n_i}$, $\sum_{i=0}^{r}n_i=n$, $\mathrm{rank}B_i=\mathbf{dim}\,x_i=n_i$ [1].

Следуя блочному принципу, в уравнениях для i-го блока будем полагать переменные $x_{i-1}(k)$ в качестве фиктивных управлений. Приведём пошаговую процедуру назначения зависимостей для фиктивных управлений. Традиционно, блочный синтез подразумевает рассмотрение блоков переменных «сверху вниз».

Шаг 1. Уравнение для r блока $x_r(k+1)=A_{rr}(k)x_r(k)+B_r(k)x_{r-1}(k)$. Важной особенностью блочной формы является полный ранг матриц B_i. Значит, существуют псевдообратные матрицы $B_{i,(\mathbf{dim}\,x_i\times\mathbf{dim}\,x_i)}^{+}$. Тогда выберем $x_{r-1}(k)=-B_r^{+}(k)A_{rr}(k)x_r(k)$.

Шаг 2. Обеспечим назначенную зависимость для $x_{r-1}(k)$. Из уравнения $r-1$ блока выразим невязку желаемого и реального значения $\bar{x}_{r-1}(k)=x_{r-1}(k)+B_r^{+}(k)A_{rr}(k)x_r(k)$. Запишем это выражение для следующего шага по времени:

$$\bar{x}_{r-1}(k+1)=A_{r-1,r}(k)x_r(k)+A_{r-1,r-1}(k)\{\bar{x}_{r-1}(k)-B_r^{+}(k)A_{rr}(k)x_r(k)\}+B_{r-1}(k)x_{r-2}(k)+$$
$$+B_r^{+}(k+1)A_{rr}(k+1)B_r(k)\bar{x}_{r-1}(k)$$

Если учесть, что $x_r(k)=\bar{x}_r(k)$, итоговое выражение принимает вид

$$\bar{x}_{r-1}(k+1)=[A_{r-1,r}(k)-A_{r-1,r-1}(k)B_r^{+}(k)A_{rr}(k)]\bar{x}_r(k)+$$
$$+[A_{r-1,r-1}(k)+B_r^{+}(k+1)A_{rr}(k+1)B_r(k)]\bar{x}_{r-1}(k)+B_{r-1}(k)x_{r-2}(k)$$

Шаг r. Видно, что намеченная процедура носит рекуррентный характер. Полная матрица преобразования формируется аналогичными заменами вплоть до нижнего блока. Система уравнений для невязок будет иметь следующую структуру

$$\bar{x}(k+1)=T(k+1)A(k)T^{-1}(k+1)\bar{x}(k)+T(k+1)B(k)u(k)$$

Матрица невырожденного преобразования $T(k)$ набирается в соответствии с изложенной выше процедурой:

$$T(k)=\begin{pmatrix} I & 0 & 0 & 0\\ B_r^{+}(k)A_{rr}(k) & I & 0 & 0\\ B_{r-1}^{+}\{A_{r-1,r}(k)+ & B_{r-1}^{+}(k)\{A_{r-1,r-1}(k)+ & I & 0\\ +B_r^{+}(k+1)A_{rr}(k+1)A_{rr}(k)\} & +B_r^{+}(k+1)A_{rr}(k+1)B_r(k)\} & & \\ \Theta & \Theta & B_1^{+}(k)\{A_{11}(k)+\sum\Theta\} & I \end{pmatrix}$$

В продолжение намеченной процедуры, на последнем шаге выбирается истинное управление $u(k)$, в результате чего замкнутая система приходит к виду $\bar{x}(k+1) = \tilde{A}(k)\bar{x}(k)$, где матрица $\tilde{A}(k)$ - нильпотентная, система сходится за r шагов. Отметим, что сходимость за конечное число шагов в дискретной системе имеет большое сходство с реализацией глубоких обратных связей в непрерывном случае.

3 Разностное представление математической модели асинхронного электропривода

Динамическая модель асинхронного электропривода описывается в неподвижной системе координат (α, β) в векторном виде системой нелинейных дифференциальных уравнений шестого порядка [3]:

(7) $\dot{x}_1 = a_1(a_2 P(x_3)x_2 - a_5 x_1 + u)$,

(8) $\dot{x}_2 = -P(x_3)x_2 + a_4 x_1$,

(9) $\dot{x}_0 = x_3, \dot{x}_3 = \frac{1}{J}(a_2 x_2^T S^T x_1 - x_4), \dot{x}_4 = f(t)$,

где $x_1 = \mathrm{col}(x_{1\alpha}, x_{1\beta})$ – компоненты тока статора, $x_2 = \mathrm{col}(x_{2\alpha}, x_{2\beta})$ – компоненты потокосцепления ротора, $x_0 \in R$ – угловое положение вала двигателя, $x_3 \in R$ – скорость вращения вала двигателя, $x_4 \in R$ – момент нагрузки на валу (полагается неизвестным ограниченным внешним воздействием, $|f(t)| \le F$ – известная константа), $u = \mathrm{col}(u_\alpha, u_\beta)$ – компоненты напряжения питания статора, которые полагаются управляющими воздействиями;

$$P(x_3) = \begin{pmatrix} a_3 & x_3 \\ -x_3 & a_3 \end{pmatrix} > 0, \quad S = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$P(x_3)x_2 = P(0)x_2 + x_3 S x_2, \quad x_2^T S^T x_1 = x_1^T S x_2, \quad a_1 = \frac{L_r}{L_s L_r - L_h^2}, \; a_2 = \frac{L_h}{L_r}, \; a_3 = \frac{R_r}{L_r},$$

где $a_4 = R_r a_2$, $a_5 = a_2 a_4 + R_s$; R_s, R_r, L_s, L_r, L_h – приведенные активные и индуктивные сопротивления статора, ротора и взаимоиндукции, $a_i > 0$, $i = \overline{1,5}$.

Модель асинхронного электропривода (7)–(9) представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений седьмого порядка, для которой решение задачи Коши весьма затруднительно. Продемонстрируем использование метода разделения движений для преобразования непрерывной модели асинхронного электродвигателя к описанию в разностном виде на основе решения задачи Коши, необходимом для микропроцессорной реализации алгоритмов управления.

Иерархия движений по темпам в электроприводе обусловлена тем, что самым медленным контуром является механическая подсистема (9), более быстрой является модель поля (8), а самым быстродействующим является токовый контур (7). Отсюда следует следующий алгоритм дискретизации динамической модели привода [4]:

1) в токовом контуре будем полагать механические переменные и поле постоянными на интервале квантования, что дает простое аналитическое решение дифференциальных уравнений относительно токов;

2) в модели поля будем полагать механические переменные постоянными на интервале квантования, а вместо истинных токов статора подставим расчетные значения, полученные в результате решения первой задачи;

3) в механическую подсистему подставим расчетные значения компонентов поля и токов статора, полученные в результате решения первых двух задач.

В предположении, что регулирование организовано так, что моменты подачи управляющих воздействий совпадают с предыдущим тактом дискретизации, в уравнения (7)–(9) добавляется запаздывание по управлению $z(k+1)=u(k)$. Аналогично (6) разностное представление системы (7)–(9) примет вид:

$$(10)\quad \begin{aligned} x_{1\alpha}(k+1) &= \mathbf{exp}(-a_1a_2\Delta)a_1x_{1\alpha}(k)+\tfrac{1}{a_1}(1-\mathbf{exp}(-k_1a_1\Delta))\times(a_2(a_3x_{2\alpha}(k)+x_3(k)x_{2\beta}(k))+u_\alpha(k)),\\ x_{1\beta}(k+1) &= \mathbf{exp}(-a_1a_2\Delta)k_1x_{1\beta}(k)+\tfrac{1}{a_1}(1-\mathbf{exp}(-k_1a_1\Delta))\times(a_2(a_3x_{2\beta}(k)+x_3(k)x_{2\alpha}(k))+u_\beta); \end{aligned}$$

$$(11)\quad \begin{aligned} x_{2\alpha}(k+1) &= \mathbf{exp}(-a_3\Delta)(\mathbf{cos}(x_3(k)\Delta)x_{2\alpha}(k)-\mathbf{sin}(x_3(k)\Delta)x_{2\beta}(k)+\tfrac{a_4}{x_3(k)}(-\mathbf{sin}(x_3(k)\Delta)x_{1\alpha}(k)+\\ &+(\mathbf{cos}(x_3(k)\Delta)-1)x_{1\beta}(k))),\\ x_{2\beta}(k+1) &= \mathbf{exp}(-a_3\Delta)(\mathbf{sin}(x_3(k)\Delta)x_{2\alpha}(k)+\mathbf{cos}(x_3(k)\Delta)x_{2\beta}(k)+\tfrac{a_4}{x_3(k)}((1-\mathbf{cos}(x_3(k)\Delta))x_{1\alpha}(k)-\\ &-\mathbf{sin}(x_3(k)\Delta)x_{1\beta}(k))); \end{aligned}$$

$$(12)\quad \begin{aligned} x_0(k+1) &= x_0(k)+x_3(k)\Delta+\tfrac{1}{J}(z(k)-x_4(k))\Delta^2/2,\\ x_3(k+1) &= x_3(k)+\tfrac{1}{J}(z(k)-x_4(k))\Delta,\\ x_4(k+1) &= x_4(k),\\ z(k+1) &= z(k)+a_2(x_{1\alpha}(k)x_{2\beta}(k)-x_{1\beta}(k)x_{2\beta}(k)). \end{aligned}$$

Уравнения относительно квадрата модуля потокосцепления имеют вид

$$\left|x_2(k+1)\right| = \mathbf{exp}(-k_3\Delta)\left|x_2(k)\right|+(1-\mathbf{exp}(-k_3\Delta))\tfrac{a_4}{a_3}(x_{1\alpha}(k)x_{2\alpha}(k)+x_{1\beta}(k)x_{2\beta}(k)).$$

Отметим, что в уравнениях (10), (11) вместо переменной $x_3(k)$ может оказаться целесообразным использовать усредненное значение скорости на интервале квантования.

Заключение

В работе рассмотрен вопрос адаптации известных методов синтеза непрерывных систем к микропроцессорной реализации. На основе блочного подхода [1] и метода разделения движений [2] предложена процедура построения дискретных моделей объектов управления и синтеза базовых законов обратной связи в условиях полной информации о векторе состояния системы. Предложенная процедура разделяет поиск фундаментального решения систем высокой размерности на независимые подзадачи меньшей размерности. Для каждой подзадачи строится решение задачи Коши с помощью метода разделения движений. Таким образом точность дискретного представления определяется не временным шагом, который определяется условиями поставленной задачи и может оказаться неприемлемо большим, а назначенным набором коэффициентов неособого преобразования (3). Синтез закона обратной связи проводится в терминах дискретной модели (4) и с учетом элементарного характера выделенных подзадач.

Не секрет, что для нелинейных систем в общем случае получить аналитическое решение не представляется возможным. В работе показано, что для нелинейных систем, чья структура соответствует блочной форме, удается применять предложенный подход. Тот факт, что каждая подзадача является элементарной, позволяет в процессе пошагового синтеза компенсировать нестационарные и нелинейные составляющие модели объекта управления и осуществить конечношаговую сходимость в дискретной модели.

Список литературы

[1] Принцип блочного управления / Дракунов С.В., Изосимов Д.Б., Лукьянов А.Г., Уткин В.А., Уткин В.И. // Автоматика и Телемеханика, 1990. Часть 1. №5. С.38–47; Часть 2. №6. С.20–32.

[2] Новожилов, И.В. Фракционный анализ – М.: Издательство МГУ, 1991. – 192 с.

[3] Куо, Б. Теория и проектирование цифровых систем управления – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.
[4] Метод разделения движений в задачах управления асинхронным электроприводом/ Уткин В.А. // Автоматика и Телемеханика, 1993, № 12, С. 53-65.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЕНСАЦИОННО-НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРИ СИНТЕЗЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ ПО УПРАВЛЕНИЮ

А.З. Асанов, В.С. Каримов

Казанский федеральный (приволжский) университет
423812, Набережные Челны, пр-т Сююмбике, 10А, Россия
kvs-chelny@mail.ru
тел: +7 (8552) 38-34-05, факс: +7 (8552) 38-34-05

Ключевые слова: *адаптивная система управления с эталонной моделью, запаздывания по управлению, компенсационно-наблюдательная схема, технология вложения систем*

Abstract

It was proposed an analytical solution to the problem of design of adaptive automatic control system with a reference model for multivariable controlled plant with time delays on the input vector on basis of system embedding technology. To compensate for the delays of the input vector and search of the state vector apply to object compensatory and observation scheme. Were calculated the algebraically expressions which to determine solution set of problem design and existence conditions this solution.

Введение

Присутствие в объекте управления такого фактора, как явление запаздывания, безусловно, отрицательно влияет на синтез систем автоматического управления (САУ). Это явление может способствовать возникновению автоколебательности системы управления, ухудшению качества процессов управления и даже потери устойчивости системы [1]. Другим фактором, затрудняющим реализацию закона управления, может быть неполнота информации о параметрах объекта. Поэтому в работе с учетом недоступности вектора состояния для непосредственного наблюдения предлагается при синтезе САУ применение компенсационно-наблюдательной схемы [2], а для сбора недостающей исходной информации об объекте – использование адаптивной системы с эталонной моделью [3, 4]. Далее с помощью технологии вложения систем при синтезе по вынужденной составляющей рассогласования замкнутой динамической системы будет определяться матричная передаточная функция (МПФ) регулятора, а также условия ее определяющие, при которых поведение системы управления будет описываться желаемой МПФ.

Синтез адаптивной системы управления с запаздываниями по управлению

Пусть поведение динамического объекта с сосредоточенными запаздываниями по управлению может быть представлено в виде дифференциально-разностных уравнений:

$$(1)\quad \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + \sum_{i=0}^{r} B_i u(t-\tau_i), \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned}$$

где $\tau_0 = 0, \quad 0 < \tau_1, \tau_2, ..., \tau_l$ – постоянные времена запаздываний, $i = 0, 1..., l$, $y(t) \in R^m$ – вектор выходных переменных, $x(t) \in R^n$ – фазовый вектор объекта управления. Матрица A имеет

размер $n \times n$, $B_i - n \times s$, $C - m \times n$. Матрицы B_i являются постоянными матрицами при временах запаздывания τ_i, $u(t-\tau_i) \in R^s$ – вектор входных переменных.

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.

Компенсационно-наблюдательную схему управления, одновременно вычисляющую текущий фазовый вектор $x(t)$ объекта и компенсирующую запаздывания в контуре управления в этом случае можно описать уравнениями [2]:

$$\begin{aligned} &\dot{x}_1(t) = Ax_1(t) + \sum_{i=0}^{r} B_i u(t-\tau_i), \\ &y_1(t) = Cx_1(t), \\ &\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + L(y(t) - y_1(t)) + \sum_{i=0}^{r} B_i u(t), \end{aligned} \tag{2}$$

где $x_1(t)$ – фазовый вектор состояния модели объекта, $y_1(t)$ – вектор выхода модели объекта, L – матрица наблюдателя, $\hat{x}(t)$ – воспроизведенный вектор состояния объекта.

Проанализируем процессы в компенсационно-наблюдательной схеме, присоединенной к объекту управления, рассмотрев уравнения (1) и (2). Для этого найдем МПФ $F_{\hat{x}}^{u}(p)$ от управляющего сигнала $u(t)$ к фазовому вектору состояния компенсационно-наблюдательного устройства $\hat{x}(t)$. Применим преобразования Лапласа к уравнениям (1) и (2):

$$\begin{aligned} &px(p) = Ax(p) + \sum_{i=0}^{r} B_i e^{-\tau_i p} u(p), \\ &y(p) = Cx(p), \\ &px_1(p) = Ax_1(p) + \sum_{i=0}^{r} B_i e^{-\tau_i p} u(p), \\ &y_1(p) = Cx_1(p), \\ &p\hat{x}(p) = A\hat{x}(p) + L(y(p) - y_1(p)) + \sum_{i=0}^{r} B_i u(p). \end{aligned} \tag{3}$$

Из системы уравнений (3) путем последовательных математических действий и сокращения одинаковых членов, получим уравнение:

$$\hat{x}(p) = (pI_n - A)^{-1} \sum_{i=0}^{r} B_i u(p). \tag{4}$$

Следовательно, МПФ $F_{\hat{x}}^{u}(p)$ равное:

$$F_{\hat{x}}^{u}(p) = \frac{\hat{x}(p)}{u(p)} = (pI_n - A)^{-1} \sum_{i=0}^{r} B_i,$$

может соответствовать объекту управления

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + \sum_{i=0}^{r} B_i u(t).$$

Это свидетельствует о компенсации запаздываний по управлению и воспроизведении вектора состояния объекта.

Целью управления в данной работе будет являться эталонная модель поведения синтезируемой системы управления, которая описывается в пространстве состояний следующими уравнениями:

$$(5) \quad \begin{aligned} \dot{x}_M(t) &= A_M x_M(t) + B_M \nu(t), \\ y_M(t) &= C_M x_M(t), \end{aligned}$$

где $y_M(t) \in R^m$ – вектор выходных переменных модели объекта, $x_M(t) \in R^n$ – вектор состояния модели объекта, A_M, B_M, C_M – матрицы пространства состояний эталонной модели, $\nu(t) \in R^m$ – вектор управления на входе системы.

Пусть закон управления в общем случае описывается матричным уравнением:

$$(6) \quad \nu(p) = K(p)(\hat{x}(p) - x_M(p)) + u(p),$$

где $K(p)$ – МПФ регулятора размера $n \times s$.

Требования к синтезируемой системе управления зададим на основе сигнала рассогласования $\Delta x = \hat{x} - x_M$ матричной передаточной функцией $E^{\nu}_{\Delta x}(p)$:

$$E^{\nu}_{\Delta x}(p) = E^{\nu}_{\hat{x}}(p) - E^{\nu}_{x_M}(p),$$

где $E^{\nu}_{\hat{x}}(p)$ – МПФ от управляющих воздействий к воспроизведенному вектору состояния объекта, $E^{\nu}_{x_M}(p)$ – МПФ от управляющих воздействий к состоянию модели объекта, $E^{\nu}_{\Delta x}(p)$ – МПФ от управляющих воздействий к рассогласованию модели и объекта.

Задача управления: для ОУ (1), цели управления (5) и закона управления (6) необходимо найти МПФ регулятора или условия ее определяющие, при которых поведение САУ (рисунок 1) будет описываться желаемой МПФ $E^{\nu}_{\Delta x}(p)$.

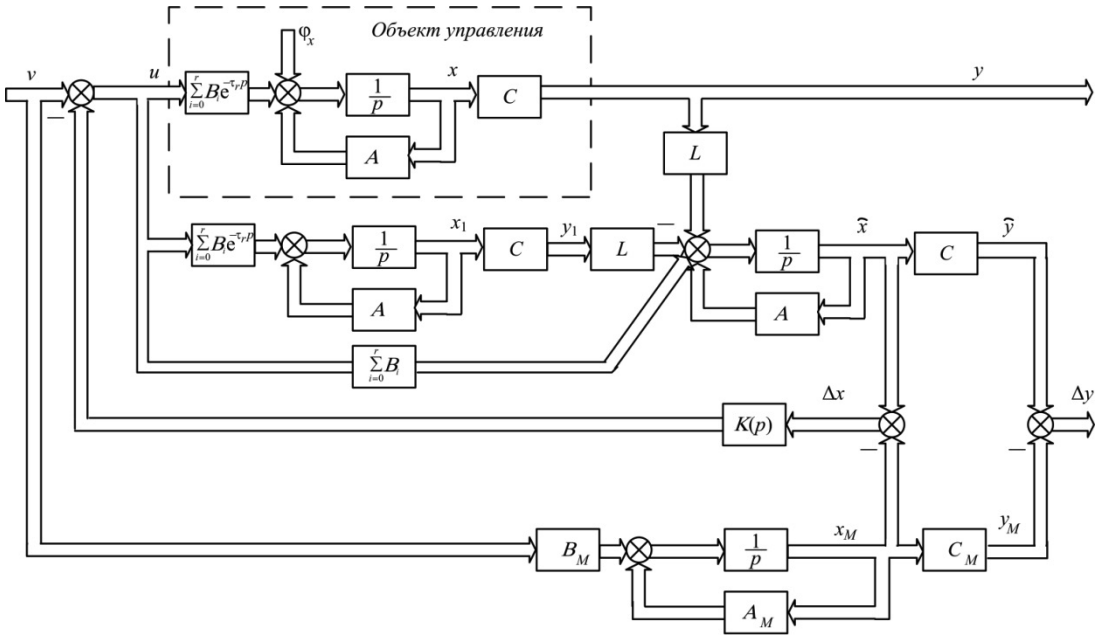


Рисунок 1 – Адаптивная система управления с запаздываниями по входу

При синтезе системы управления будем использовать технологию вложения систем [5]. На первом этапе метода вложения систем с учетом уравнений (1), (2), (5), (6) составим проблемную матрицу (проматрицу) рассматриваемой задачи:

$$\Omega(p)=\begin{bmatrix}
(pI_n-A) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sum_{i=0}^{r} B_i e^{-\tau_i p} & 0 \\
-C & I_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & (pI_n-A) & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sum_{i=0}^{r} B_i e^{-\tau_i p} & 0 \\
0 & 0 & -C & I_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -L & 0 & L & (pI_n-A) & 0 & 0 & -\sum_{i=0}^{r} B_i & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (pI_n-A_M) & 0 & 0 & -B_M \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_M & I_m & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -K(p) & K(p) & 0 & -I_s & I_s \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_s
\end{bmatrix}.$$

На втором этапе определим матрицы вложения α и β, используемые при вложении систем:

$$\alpha=\begin{bmatrix}0&0&0&0&0&0&0&0&I_s\end{bmatrix}^T,\quad \beta=\begin{bmatrix}0&0&0&0&I_n&-I_n&0&0&0\end{bmatrix}\ \text{при}\ \omega=E^{\nu}_{\Delta x}(p),$$

где ω – образ синтезируемой системы – желаемая передаточная функция системы.

На третьем этапе после выполнения 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 $K(p)$ синтезе по вынужденной составляющей $E^{\nu}_{\Delta x}(p)$ рассогласования Δx замкнутой динамической системы:

$$
\begin{aligned}
&\pi_{\tilde{x}}(p)\sum_{i=0}^{r} B_i K = I_n - \pi_{\tilde{x}}(p)(pI_n - A),\\
&\pi_{x_M}(p)(pI_n - A) = \pi_{\tilde{x}}(p)\sum_{i=0}^{r} B_i K(p) - I_n,\\
&E^{\nu}_{\Delta x}(p) = \pi_{x_M}(p)B_M + \pi_{\tilde{x}}(p)\sum_{i=0}^{r} B_i,
\end{aligned} \tag{7}
$$

где $\pi_{x_M}(p)$, $\pi_{\tilde{x}}(p)$ – вспомогательные дробно-полиномиальные матрицы.

Для решения матричных уравнений, которые получаются в результате применения процедур вложения, возможно применение аппарата канонизации матриц [5].

Из системы уравнений (7) можно определить множество регуляторов $K(p)$:

$$
\begin{aligned}
\{K(p)\}_{\mu,\eta} = &(\sum_{i=0}^{r} B_i e^{-\tau_i p})^{\sim}[\sum_{i=0}^{r} B_i e^{-\tau_i p} - (pI_n - A)((pI_n - A_M)^{-1}B_M +\\
&+E^{\nu}_{\Delta x}(p))](E^{\nu}_{\Delta x}(p))^{\sim} + \overline{\Big(\sum_{i=0}^{r} B_i e^{-\tau_i p}\Big)}^{R}\mu(p) + \eta(p)\overline{\Big(\sum_{i=0}^{r} B_i e^{-\tau_i p}\Big)}^{L},
\end{aligned} \tag{8}
$$

где $\mu(p)$ и $\eta(p)$ – вспомогательные дробно-полиномиальные матрицы соответствующих размеров.

Следовательно, по технологии вложения систем условия разрешимости уравнений (7), а значит и существования множества решений (8) имеют вид:

$$
\begin{aligned}
&\overline{\Big(\sum_{i=0}^{r} B_i e^{-\tau_i p}\Big)}^{L}[\sum_{i=0}^{r} B_i e^{-\tau_i p} - (pI_n - A)((pI_n - A_M)^{-1}B_M + E^{\nu}_{\Delta x}(p))] = 0,\\
&[\sum_{i=0}^{r} B_i e^{-\tau_i p} - (pI_n - A)((pI_n - A_M)^{-1}B_M + E^{\nu}_{\Delta x}(p))]\overline{E^{\nu}_{\Delta x}(p)}^{R} = 0
\end{aligned} \tag{9}
$$

или

$$
\begin{aligned}
&[\sum_{i=0}^{r} B_i e^{-\tau_i p} - (pI_n - A)((pI_n - A_M)^{-1}B_M + E^{\nu}_{\Delta x}(p))] = \sum_{i=0}^{r} B_i e^{-\tau_i p}(\sum_{i=0}^{r} B_i e^{-\tau_i p})^{\sim R}\chi(p),\\
&[\sum_{i=0}^{r} B_i e^{-\tau_i p} - (pI_n - A)((pI_n - A_M)^{-1}B_M + E^{\nu}_{\Delta x}(p))] = \xi(p)(E^{\nu}_{\Delta x}(p))^{\sim L}E^{\nu}_{\Delta x}(p),
\end{aligned} \tag{10}
$$

где $\xi(p)$, $\chi(p)$ – произвольные дробно-полиномиальные матрицы соответствующих размеров.

На методическом примере показаны эффективность применения компенсационно-наблюдательной схемы и адаптивной системы управления с эталонной моделью.

Заключение

Таким образом, для управления многосвязным объектом с сосредоточенными запаздываниями по управлению и неполной исходной информацией была построена адаптивная система с эталонной моделью и компенсационно-наблюдательной схемой. Было получено множество регуляторов, реализующих закон управления, а также условия существования множества решений задачи синтеза.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-08-00311).

Список литературы

[1] Филимонов А.Б. Спектральная декомпозиция систем с запаздываниями. Компенсация запаздываний. М.: Издательство Физико-математической литературы, 2002. – 288 с.

[2] Синтез системы автоматического управления для многосвязного объекта с запаздываниями по управлению на основе компенсационно-наблюдательной схемы / А. З. Асанов, В. С. Каримов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XII Международной конференции. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2010.– С. 224-231.

[3] Асанов А.З. Аналитическое конструирование систем управления нестационарными технологическими объектами. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2003. –296 с.

[4] Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах. –М.: Наука, 1990. – 292 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.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ АДАПТАЦИИ СИГНАЛОВ К ПОМЕХАМ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ КАНАЛЕ ТЕЛЕМЕХАНИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

А.В. Волынская

Уральский государственный университет путей сообщения
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, Россия
anna@usurt.ru
тел. +7(922) 205-95-92

Ключевые слова: каналы телемеханики, шумоподобные сигналы, адаптация к помехам, закон распределения плотности вероятности

Abstract
Theoretical preconditions of adaptation of laws of distribution of density of probability of noise-type signals to hindrances are considered. It is shown that operators of transformation of the law of distribution exist and can be found, at least for uniform, Rayleigh distributions and distribution of instant values of a sinusoid with the casual evenly distributed initial phase.

Введение

В работах автора [1, 2] приведены результаты исследований по повышению надежности каналов телемеханики за счет адаптации управляющих сигналов к характеристикам канала, прежде всего, к помехам. Показано, что следует применять сложные шумоподобные сигналы, спектр которых адаптирован к спектру помех. Приведены результаты исследований характеристик помех в контактной сети электровоза. Разработанная аппаратура позволяет, кроме исследования спектральных характеристик помех, определять и их статистические характеристики, в частности закон распределения плотности вероятности (рисунки 1–3).

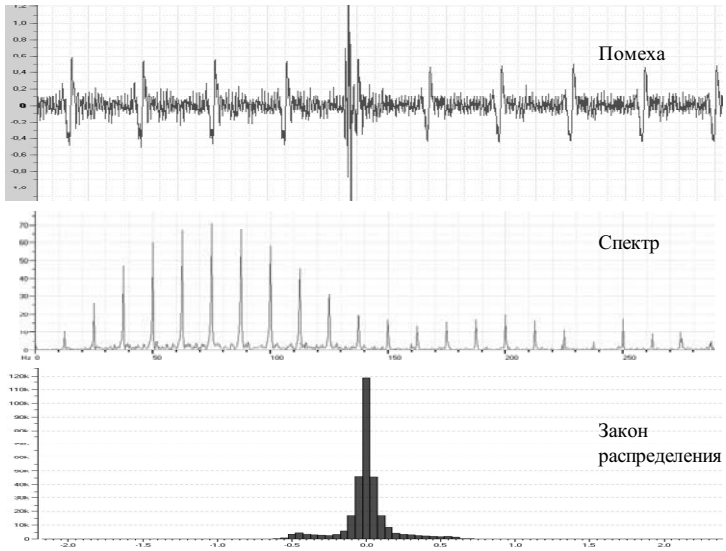


Рисунок 1 – Результат измерения помех на перегоне

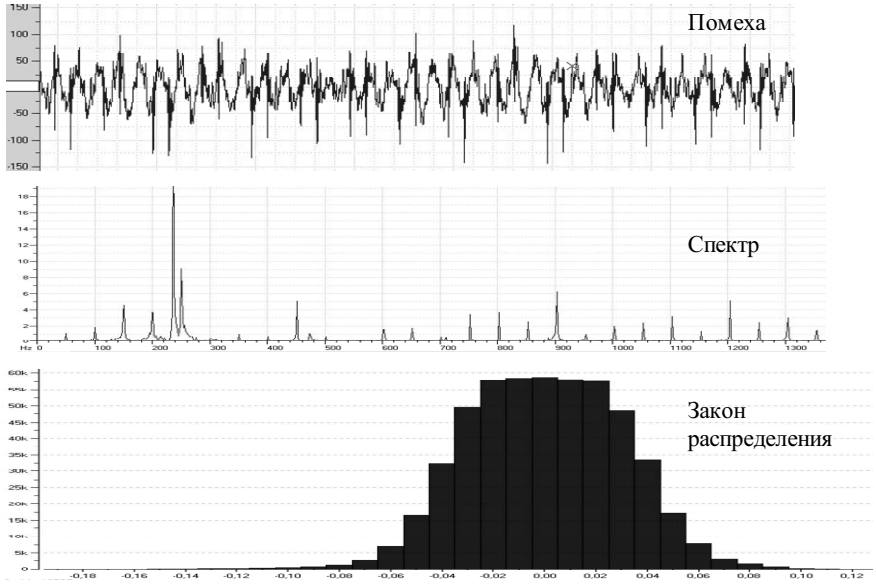


Рисунок 2 – Результат измерения помех на перегоне с удаленного датчика

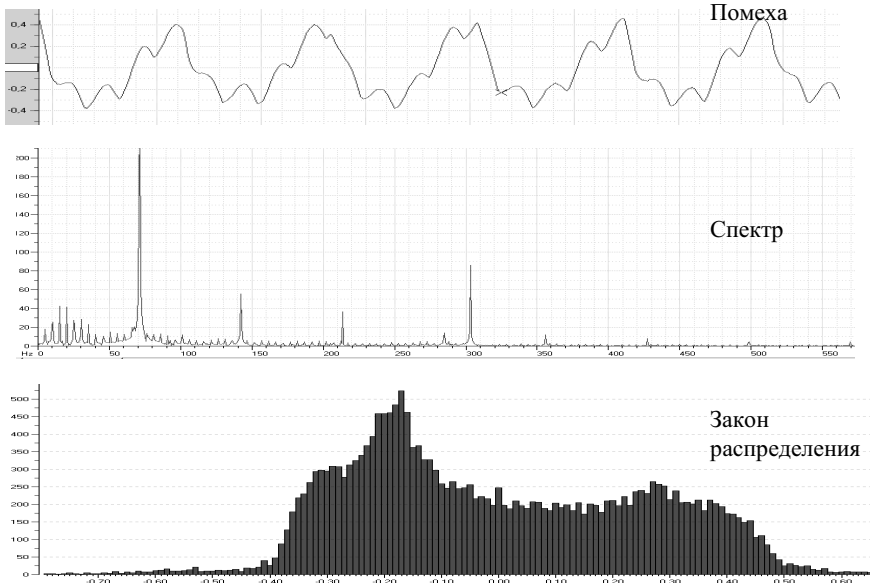


Рисунок 3 – Результат измерения помех у тяговой подстанции

В классической литературе по теории информации, например в [3], показано, что для извлечения максимального количества информации из сигнала на входе приемника (сигнал + помеха), необходимо полезный сигнал формировать таким, чтобы его закон распределения дополнял закон распределения помехи до нормального (гауссового) распределения. В данной статье исследуется возможность целенаправленного преобразования закона распределения сложного шумоподобного сигнала.

Пусть сигнал $x_0(t)$ имеет закон распределения $p_0(x)$. Этот сигнал необходимо преобразовать в $y_1(t)$ с законом распределения $p_1(y)$. Характеристику преобразования обозначим некоторым оператором D

(1) $$y = y(x) = D[x_0(t)].$$

Линейный оператор обладает ограниченными возможностями преобразования, поэтому будем искать его в классе нелинейных преобразователей. При любом нелинейном однозначном преобразовании некоторому участку dx оси x соответствует некоторый участок dy оси y так, что

(2) $$p_0(x)dx = p_1(y)dy$$

или

$$p_1(y)dy - p_0(x)dx = 0.$$

Данное уравнение является дифференциальным уравнением первого порядка с разделёнными переменными. Задача состоит в отыскании закона преобразования $y = y(x)$. Общий интеграл этого уравнения равен

(3) $$\int_{-\infty}^{y} p_1(y)dy - \int_{-\infty}^{x} p_0(x)dx = c.$$

Данное уравнение может быть решено относительно y.

Для нормального закона имеем:

$$\int_{-\infty}^{y} p_1(y)dy = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1}\int_{-\infty}^{y} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_1^2}}dy = F(y) = \int_{-\infty}^{x} p_0(x)dx + c,$$

где $F(y)$ – интегральная функция нормального распределения.

Установим смысл постоянной c. Рассмотрим случай, когда процессы $y_1(t)$ и $x_0(t)$ не содержат постоянных составляющих

$$\overline{y_1(t)} = y_0 = 0; \quad \overline{x_0(t)} = x_0 = 0.$$

Это условие означает, что при преобразовании в процессе на выходе не появляется постоянная составляющая, если её нет в процессе на входе. Подставим эти пределы в интегралы (3):

$$\int_{-\infty}^{y_0=0} p_1(y)dy - \int_{-\infty}^{x_0=0} p_0(x)dx = c_0 = 0.$$

Оба интеграла равны 1/2, и постоянная c обращается в ноль. Равенство одновременно означает, что кривая $y = y(x)$ проходит через начало координат.

В общем случае может быть $x_0 \neq 0$. Так как постоянная составляющая информации не несёт, то и в этом случае можно допустить $y_0 = 0$. Тогда получим из (3):

$$\int_{-\infty}^{0} p_1(y)dy - \int_{-\infty}^{0} p_0(x)dx = c_0 \neq 0$$

или

$$\int_{-\infty}^{0} p_1(y)dy - \int_{-\infty}^{x_0} p_0(x)dx + \int_{0}^{x_0} p_0(x)dx = c.$$

Сумма первых двух интегралов равна нулю. Получаем

$$c = \int_0^{x_0} p_0(x)dx.$$

Значит, постоянная c имеет смысл вероятности попадания случайного процесса $x_0(t)$ в полосу между 0 и x_0. Она характеризует величину смещения закона распределения $p_0(x)$.

Подставим найденное значение c в (3)

$$\int_{-\infty}^{y} p_1(y)dy = \int_{-\infty}^{x} p_0(x)dx + \int_0^{x_0} p_0(x)dx. \quad (4)$$

Если $x_0 = 0$, то последний интеграл обращается в ноль:

$$\int_{-\infty}^{y} p_1(y)dy = \int_{-\infty}^{x} p_0(x)dx \quad (5)$$

и для нормального распределения

$$F(y) = \int_{-\infty}^{x} p_0(x)dx. \quad (6)$$

Смысл выражения (5) следующий: при заданных законах p_0 и p_1 зависимость $y = y(x)$ должна быть подобрана так, чтобы интегральные функции их распределений совпадали.

Нам удалось найти лишь три примера, когда уравнение (5) может быть разрешено явно относительно y.

1. Сигнал $x_0(t)$ преобразуется к равномерному распределению

$p_1(y) = A$; $-a \le y \le a$; $x_0 = 0$.

Подставим в (5) и решим относительно y

$$\int_{-a}^{y} A dy = A(y + a) = \int_{-\infty}^{x} p_0(x)dx \quad ;$$

$$y = \frac{1}{A}\int_{-\infty}^{x} p_0(x)dx - a; \qquad -a \le y \le a$$

2. Сигнал $x_0(t)$ преобразуется к релеевскому распределению

$$p_1(y) = \frac{y}{\sigma^2} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}}.$$

Так как в данном случае $y_0 \neq 0$, пользуемся общим уравнением (3)

$$\int_0^{x} \frac{y}{\sigma^2} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} dy = 1 - e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} = \int_{-\infty}^{x} p_0(x)dx + c;$$

$$y = \sigma\sqrt{2\ln\frac{1}{1 - \int_{-\infty}^{x} p_0(x)dx - c}}; \quad y \ge 0.$$

Постоянная c здесь должна быть надлежащим образом определена.

3. Сигнал $x_0(t)$ преобразуется к следующему распределению

$$p_1(y) = \frac{1}{\pi\sqrt{1 - y^2}}; \qquad x_0 = 0.$$

По такому закону распределены мгновенные значения синусоиды со случайной равномерно распределенной начальной фазой. Подставим в (5)

$$\int_{-1}^{y} \frac{dy}{\pi\sqrt{1-y^2}} = \frac{1}{\pi}\mathbf{arcsin}\, y - \frac{3}{2} = \int_{-\infty}^{x} p_0(x)dx;$$

$$y = \mathbf{sin}\left[\pi \int_{-\infty}^{x} p_0(x)dx + \frac{3}{2}\pi\right].$$

Маловероятно, что на практике мы встретим эти ситуации, они приведены скорее как иллюстрация того, как можно реализовать статистическое согласование законов распределения сигналов и помех. Однако, ясно, что такое согласование в принципе возможно. Поскольку законы распределения – неотрицательные функции, то и производная от характеристики преобразования закона распределения будет неотрицательной, следовательно, и сами характеристики преобразования всегда монотонные однозначные функции. Для них обратные преобразования тоже однозначные и монотонные.

Поиск способов построения таких характеристик преобразования – предмет наших дальнейших исследований.

Список литературы

[1] [1] Волынская А.В., Сергеев Б.С. Предпосылки применения псевдослучайных сигналов-переносчиков в каналах телемеханики железнодорожного транспорта // Транспорт: наука, техника, управление : Научный информационный сборник РАН ВИНИТИ, 2011. – Вып. 6. – С. 39-41.

[2] [2] Волынская А.В. Пробные эксперименты по изучению спектральных и статистических характеристик электромагнитных помех в каналах телемеханики железнодорожного транспорта // Семинар докторантов УрГУПС : сб. науч. докл. / под науч. ред. С.П. Баутина. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. – С. 29-40.

[3] [3] Станфорд Голдман. Теория информации. – М.: Изд. иностранной литературы, 1957. - 446 с.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МАНИПУЛЯТОРА

В.Ф. Филаретов[1,2], А.С. Губанков[1,2]

[1]Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Радио, 5, Россия
{filaret, gubankov}@iacp.dvo.ru
тел: +7 (432) 231-37-83

[2]Дальневосточный федеральный университет
690091, Владивосток, ул. Суханова, 8, Россия
{filaretov.vf, gubankov.as}@dvfu.ru
тел: +7 (423) 245-08-64

Ключевые слова: *многозвенный манипулятор, адаптивная система, программный сигнал, заданная точность, максимальная скорость*

Abstract
Paper deals with synthesis method of input signals forming for actuators of multilink manipulators. This method allows to form program signals depending on location of processing objects in the working area of manipulator which provide the maximum speed of working tools without reduction of given dynamic accuracy. It also provides an approach to the processing objects without overshooting.

Введение

Робототехническое оборудование, используемое в современном производстве, должно выполнять рабочие операции с максимально возможной скоростью, а при переходе от одной детали или изделия к другому должно обеспечиваться плавное перемещение рабочего органа с его точной остановкой вблизи объектов работ без перерегулирования.

В настоящее время при формировании траекторий движения рабочего инструмента точки рабочей зоны, в которых расположены детали, интерполируется сплайнами не ниже третьего порядка. А при необходимости обеспечения плавного движения порядок сплайнов может повышаться до пятого [1, 2]. При произвольных и постоянных изменениях координат деталей в рабочей зоне манипуляторов вычислительная нагрузка на управляющие ЭВМ существенно возрастает. При этом для сохранения требуемой точности движения рабочих органов на всех участках траекторий средняя скорость их движения часто специально занижается, настраиваясь на самый неблагоприятный случай, с целью исключения брака на отдельных участках этих траекторий даже тогда, когда она может быть существенно повышена. В результате резко снижается производительность работы манипулятора.

В работе [3] рассмотрен метод синтеза системы управления (СУ) режимом движения рабочего инструмента многозвенного манипулятора, которая автоматически формирует максимально возможную текущую скорость его перемещения вдоль траектории с заданной динамической точностью. Однако для эффективного использования этой СУ необходимо постоянно определять отклонение рабочего инструмента от задаваемой траектории, что в процессе движения манипулятора сложно реализуемо.

В работе [4] предложен метод подстройки параметров программных сигналов движения манипулятора на основе амплитудно-частотных характеристик его приводов, обеспечивающий максимально возможную скорость движения без снижения заданной динамической точности управления. Указанный метод можно применить и для синтеза системы формирования про-

граммных сигналов движения многозвенных манипуляторов, однако при этом необходимо учитывать кинематические и динамические особенности рассматриваемого сложного многосвязного динамического объекта управления и непрерывное изменение его конфигурации в процессе выполнения требуемых технологических операций.

1 Постановка задачи

Целью данной работы является создание метода синтеза легко реализуемых информационно-управляющих систем многостепенных манипуляторов, которые в зависимости от текущего расположения обрабатываемых объектов должны формировать такие программные сигналы для всех электроприводов этих манипуляторов, которые будут обеспечивать движение рабочих органов с максимально возможной скоростью и заданной динамической точностью. При этом подход к объектам работ должен совершаться плавно и без перерегулирования.

2 Описание объекта управления

Синтез предлагаемой системы формирования программных сигналов рассмотрим на примере двухстепенного манипулятора 1 (см. рисунок 1), совершающего технологические операции с объектами 2 расположенными на паллете 3, которая находится в рабочей зоне манипулятора. Каждый рабочий цикл в рабочую зону манипулятора подается новая паллета с расположением объектов, отличным от предыдущего. Технологические операции со всеми объектами выполняются только тогда, когда скорость движения рабочего органа манипулятора относительно них равна нулю. Телекамера 4, находится над паллетом и позволяет определять текущее расположение всех объектов на ней (координаты x_j и y_j в абсолютной системе координат Oxy, где j – количество объектов на паллете).

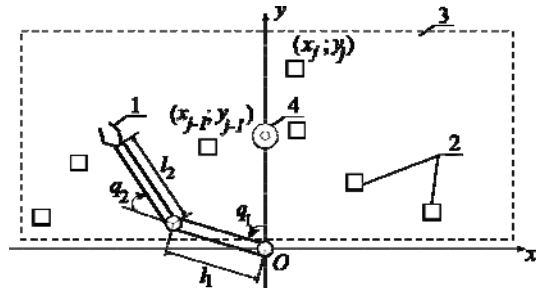


Рисунок 1 – Схема технологического процесса

Исполнительными элементами манипулятора (см. рисунок 1) являются электроприводы постоянного тока независимого возбуждения или с постоянными магнитами. С учетом дифференциального уравнения электрической цепи якоря электродвигателя и уравнения моментов на его валу [5], а также взаимовлияний между всеми степенями подвижности многозвенника [6] i-ый электропривод можно описать уравнением (здесь индекс i для удобства опущен)

$$(1)\quad \begin{aligned} &L(J_\Sigma + H^*)\ddot{\alpha} + (L\dot{H}^* + Lh^* + RJ_\Sigma + RH^*)\ddot{\alpha} + (Rh^* + L\dot{h}^* + K_\omega K_M)\dot{\alpha} + \\ &+ R(M_{\text{стр}} + M^*_{\text{вн}}) + L(\dot{M}_{\text{стр}} + \dot{M}^*_{\text{вн}}) = K_M K_y u, \end{aligned}$$

где R, L - соответственно, активное сопротивление и индуктивность якорной цепи электродвигателя; K_M, K_ω, - соответственно, коэффициенты крутящего момента и противоЭДС; K_y - коэффициент усиления усилителя мощности; u – входной сигнал; $H^* = H(q)/i_p$; $h^* = h(q,\dot{q})/i_p$; $M^*_{\text{вн}} = M_{\text{вн}}(q,\dot{q},\ddot{q})/i_p$; $H(q)$ - компонента, характеризующая

инерционные свойства соответствующей степени подвижности манипулятора; $h(q, \dot{q})$ - компонента кориолисовых сил; $M_{\text{вн}}(q, \dot{q}, \ddot{q})$ - моментное воздействие, учитывающее гравитационные силы и эффекты взаимовлияния между всеми степенями подвижности манипулятора в процессе его движения; i_p - передаточное отношение редуктора; q_i, $\dot{q}_i, \ddot{q}_i$ – соответствующие обобщенные координаты, скорости и ускорения звеньев манипулятора (i = 1, 2 – число степеней подвижности манипулятора); J_Σ - суммарный момент инерции, приведенный к валу электродвигателя; $\dot{\alpha}$, $\ddot{\alpha}$ - соответственно, скорость и ускорение вращения вала электродвигателя; $M_{\text{стр}}$ - нелинейная характеристика момента сухого трения, приведенного к валу электродвигателя.

Для обеспечения инвариантности показателей качества работы каждого электропривода к эффектам взаимовлияния между всеми степенями подвижности перемещающегося манипулятора (для стабилизации их параметров, а значит и коэффициентов уравнения (1), на номинальном уровне) в СУ каждым электроприводом введены самонастраивающиеся корректирующие устройства, описанные в работах [7, 8].

Для обеспечения требуемых показателей качества работы в прямую цепь обоих электроприводов с уже застабилизированными с помощью самонастройки параметрами введены типовые последовательные корректирующие устройства с передаточными функциями вида [5]:

$$(2) \qquad W_{ki}(s) = \frac{T_{1i}s + 1}{T_{2i} + 1},$$

где T_{1i} и $T_{1i} > T_{2i}$ – постоянные времени, зависящие от конкретных параметров электроприводов. Их выбор будет пояснен ниже.

3 Формирование программных сигналов для электроприводов манипулятора

Алгоритм работы предлагаемой системы описан ниже.

После определения координат (x_j, y_j) j-го изделия в рабочей зоне двухзвенного манипулятора 1 с помощью телекамеры 4 (см. рисунок 1) и решения обратной задачи кинематики для по методике, описанной, например, в работе [9], несложно найти обобщенные координаты $\tilde{q}^*_{1j}(x_j, y_j)$ и $\tilde{q}^*_{2j}(x_j, y_j)$ этого манипулятора, соответствующие рассматриваемому изделию. Очевидно, что перенос рабочего инструмента от одного изделия к другому может осуществляться путем последовательной подачи на входы соответствующих электроприводов ступенчатых воздействий 1 (см. рисунок 2), соответствующих обобщенным координатам, вычисленным с учетом положения в плоскости каждого из рассматриваемых изделий.

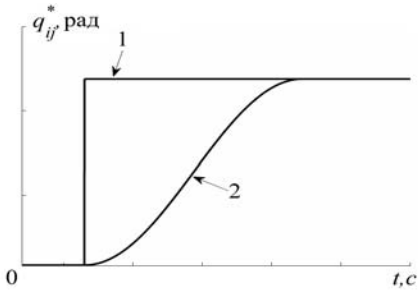


Рисунок 2 – Формы входных сигналов

Однако, как показано в работе [4], при ступенчатых воздействиях приходится существенно увеличивать время выполнения каждого из этапов рабочего цикла, специально ограничивая резко возрастающий ток в обмотках электроприводов в начале движения и обеспечивая приемлемую величину перерегулирования на конечных участках перемещения рабочего органа, которая должна находиться в заданных пределах даже при использовании простейшей коррекции вида (2).

Но высокое качество переходных процессов и требуемую точность в рассматриваемой системе можно обеспечить и при наличии простейших регуляторов (2), формируя программные сигналы в виде отдельных участков плавных кривых (участков гармонических сигналов). В качестве таких воздействий, подаваемых на входы каждого электропривода, в работе предлагается использовать сигналы, являющиеся участками гармонических кривых разной частоты (см. кривую 2 на рисунке 2):

$$(3)\quad q_{ij}^{*}=\begin{cases} A_{pij}(1-\cos(\omega_{pij}\tilde{t}_j))+\tilde{q}_{i,j-1}, \text{если } \tilde{t}_j \le \pi/\omega_{pij}; \\ 2A_{pij}, \text{если } \dot{q}_{ij}^{*}=0, \dot{q}_{kj}^{*}\neq 0, i\neq k, \end{cases}$$

где A_{pij}, ω_{pij} - амплитуды и частоты программных сигналов q_{ij}^{*}; $\tilde{t}_j$ - время выполнения j-ой операции, которое обнуляется в начале каждой операций; $\tilde{q}_{i,j-1}$ - обобщенные координаты степеней подвижности манипулятора, соответствующие нахождению его рабочего органа у j-1-ого объекта. При этом полагается, что время переходных процессов во всех приводах манипулятора меньше времени перемещения его рабочего органа от одного объекта к другому.

В начале рабочего цикла манипулятор находится в исходном положении, в котором $q_{i0}^{*}=0$. При этом амплитуды входных программных сигналов для всех его электроприводов вычисляются по формуле $A_{pij}=0{,}5(\tilde{q}_{ij}-\tilde{q}_{i,j-1})$.

В работе [4] показано, что без снижения динамической точности управления частоту ω_{pij} можно изменять в зависимости от текущих значений параметров манипуляторов и амплитуд гармонического входного сигнала, существенно повышая скорость работы и, соответственно, производительность используемого технологического оборудования без изменения структуры и параметров используемых регуляторов. При этом величина ω_{pij} для очередного перемещения рабочего органа может рассчитываться по формуле

$$(4)\qquad \omega_{pij}=\sqrt{-1+\sqrt{1+4T_i^2K_i^2\varepsilon_{di}^2A_{pij}^{-2}}}\Big/\sqrt{2}T_i\ ,$$

где $T_i=0{,}5T_{3i}+\sqrt{0{,}5T_{3i}^2-T_{4i}}$; $T_{3i}=R_iJ_{\Sigma i}/K_{Mi}K_{\omega i}$; $T_{4i}=L_iJ_{\Sigma i}/K_{Mi}K_{\omega i}$; $K_i=K_{yi}/K_{\omega i}i_{pi}$; ε_{di} - допустимая динамическая ошибка перемещения рабочего органа.

В указанном случае при движении рабочего органа манипулятора от одного объекта к другому в ходе одного рабочего цикла i-ый электропривод манипулятора согласно выражению (3) будет отрабатывать часть гармонической траектории, двигаясь с максимальной частотой (скоростью). При этом каждый из двух электроприводов должен отработать угол $2A_{pij}$. Закончив свой поворот, один из них останавливается, ожидая остановки другого.

4 Исследование системы формирования программных сигналов

При моделировании исследовался процесс установки манипулятором некоторых деталей на шесть объектов, размещенных на паллете (см. рис. 1). Указанные детали помещались в накопитель манипулятора. Движениями звеньев манипулятора одинаковой длины $l_1 = l_2 = 0{,}4$ м управляли одинаковые электроприводы, построенные на основе электродвигателей постоянного тока. Эти электроприводы имеют следующие параметры: $K_y = 800$, $K_M = 0{,}02$ Нм/А, $K_\omega = 0{,}02$ Вс, $R = 0{,}4$ Ом, $L = 0{,}004$ Гн, T_1=0,07 с, T_2=0,0035 с, $i_p = 100$.

В исходном положении манипулятора $q_{i0}^{*}=0$, то есть все его звенья расположены вдоль оси y. Его рабочий орган (накопитель) последовательно подходит к объектам, которые располагаются на паллете в следующих точках: (-0,7;0,1), (-0,15;0,65), (-0,6;0,3), (0,1;0,7), (0,2;0,5),

(0,1;0,4). При этом J_Σ у каждого электропривода манипулятора при введении самонастраивающихся корректирующих устройств [7, 8] остается неизменным и равным 0,0005 кг·м^2, а ε_d= 0,0015 рад.

На рисунке 3 показаны сформированные предлагаемой системой (в соответствии с выражением (3) и рассмотренной методикой) входные программные сигналы электроприводов манипулятора (см. рис.1), а на рисунке 4 – законы изменения ω_p в этих сигналах, которые рассчитываются с помощью выражения (4).

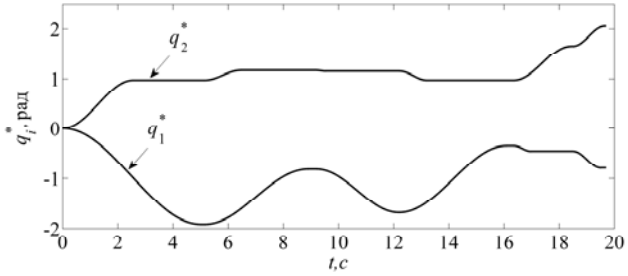


Рисунок 3 – Сформированные программные сигналы электроприводов манипулятора

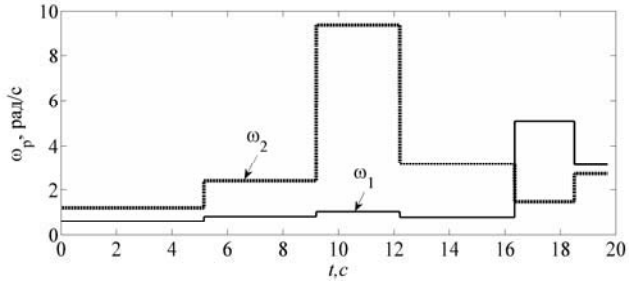


Рисунок 4 – Частоты входных программных сигналов

Из рисунка 3 видно, что при движении к первому объекту первому звену манипулятора необходимо отработать почти вдвое больший угол, чем его второму звену. То есть амплитуда входного сигнала, подаваемого на первый электропривод, в два раза больше амплитуды сигнала, подаваемого на второй электропривод. Поэтому для сохранения заданной точности подхода рабочего органа к этому объекту (см. рисунок 5) СУ, используя выражение (4), автоматически снижает частоту (скорость) поворота первого звена. В результате второе звено, не превышая εd и поворачиваясь на заданный угол с большей скоростью, останавливается и ждет подхода первого звена. Из рисунка 3 также видно, что при переходе к пятому объекту уже первое звено поворачивается быстрее и ожидает второе.

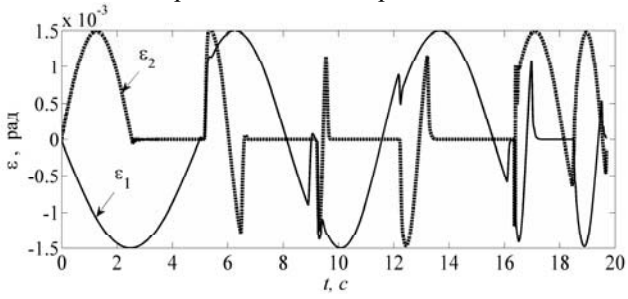


Рисунок – 3. Динамические ошибки движения электроприводов манипулятора

Следует отметить, что наибольшее увеличение (в 4-9 раз) ω_p (см. рис.4) наблюдается при повороте звеньев манипулятора на углы менее 30 градусов. Результаты проведенных исследований показали, что при использовании во всех электроприводах рассматриваемого двухзвенного манипулятора корректирующих устройств вида (2) общее время выполнения работы с шестью объектами при формировании программных сигналов с помощью выражений (3), а ω_p по формуле (4) составляет 19,7 с. Если ω_p выбираются постоянными с учетом заданной точности работы всех электроприводов, то время выполнения этой работы увеличивается до 30,5 сек. Если же на входы всех электроприводов манипулятора будут подаваться ступенчатые сигналы, то с учетом того, что очередная ступенька на соответствующий привод будет формироваться только тогда, когда установившаяся ошибка ее отработки не будет превышать ε_d = 0,0015 рад, время выполнения указанной работы возрастает до 55 с. То есть за счет подстройки только ω_p, удается в 1,55 раза повысить быстродействие работы всей системы, а с учетом введения гармонических программных сигналов это быстродействие может быть повышено в 2,79 раза. Указанное подтверждает высокую эффективность разработанной системы, позволяющей формировать программные сигналы электроприводов многозвенных манипуляторов в виде отрезков гармоник с переменной амплитудой и подстраиваемой частотой.

Заключение

В работе предложен метод построения системы формирования программных сигналов для электроприводов многозвенных манипуляторов, при отработке которых указанные электроприводы обеспечивают движения его звеньев с максимальной скоростью (частотой) без снижения заданного уровня динамической точности. При этом выполняется плавный подход рабочего органа манипулятора к объектам работ (без перерегулирования). Реализация предлагаемой системы не вызывает затруднений.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России, ГК №02.G25.31.0025) и грантов РФФИ.

Список литературы

[1] Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Пер. с англ. М.: Мир,1989. - 624 с.
[2] K. Koray Ayten, P. Iravani, M. Necip Sahinkaya. Optimum trajectory planning for industrial robots through inverse dynamics //Proc. of 8th International conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Noordwijkerhout, The Netherlands. 2011. Vol. 1. P. 105-110.
[3] Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю. Метод синтеза системы автоматического управления режимом движения схвата манипулятора по сложным пространственным траекториям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 6. С. 47-54.
[4] Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Синтез адаптивных систем управления, настраиваемых по амплитудным частотным характеристикам объектов с переменными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2010. - № 1. - С. 15-21.
[5] Андреев В.Д., Ивкин А.М., Кулешов В.С. и др.: Под ред. Лакоты Н.А. Основы проектирования следящих систем. М.: Машиностроение, 1978. - 391 с.
[6] Филаретов В.Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2000. - 304 с.
[7] Патент РФ № 2057001. Устройство для управления приводом робота / В.Ф.Филаретов. Бюл. № 9. 1996.
[8] Патент РФ № 2057002. Устройство для управления приводом робота / В.Ф.Филаретов. Бюл. № 9. 1996.
[9] Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2004. - 478 с.

MEASURING, CONTROL AND DIAGNOSTICS IN EXTREME CONDITIONS

ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ АКТИВНЫХ МЕТОДОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.Н. Жирабок, А.Ю. Суворов

Дальневосточный федеральный университет
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, Россия
zhirabok@mail.ru, suvorov_alexey@mail.ru
тел: 7(423)2450864

Ключевые слова: *сложные системы, недифференцируемые нелинейности, диагностирование, диагностические наблюдатели*

Abstract

The problem of robust fault diagnosis in complex technical systems described by nonlinear models with non-smooth nonlinearities is considered. So-called logic-dynamic approach to construct the nonlinear observer with non-smooth nonlinearities by linear methods is suggested. The method allowing obtaining a full set of solutions with given robust properties is suggested. This set of solutions can be used to choose the optimal solution with maximal sensitivity to the faults.

Введение

Функциональное диагностирование является одним из мощных средств повышения эффективности эксплуатации сложных технических систем, поскольку оно позволяет оперативно поставлять информацию о возникающих сбоях и дефектах. Один из подходов к решению задач диагностирования связан с использованием диагностических наблюдателей, главная задача при построении которых – обеспечение робастности (минимальной чувствительности) к внешним возмущающим воздействиям, параметрическим неопределенностям и ошибкам модели; ниже все указанные факторы обобщенно называются возмущениями [1,2,4-7].

Робастность может достигаться как на этапе генерации невязки, так и при принятии решений, в соответствии с чем различают активный и пассивный методы ее достижения. Активный метод направлен на уменьшение отношения шум/сигнал, где под шумом понимается составляющая невязки, вызываемая возмущениями, а под сигналом – составляющая, вызываемая дефектами в системе. В отличие от этого пассивный метод предполагает загрубление общей чувствительности процедуры диагностирования по отношению как к возмущениям, так и к дефектам; для его реализации обычно используется пороговая логика принятия решений.

Известные работы в области активных методов характеризуются тем, что они позволяют получать единственное решение, робастные свойства которого затем подвергаются анализу, и в случае неудовлетворительного результата ищется новое решение с последующим аналогичным анализом, что говорит о переборном характере известных процедур. В настоящей работе ставится задача разработки метода построения наблюдателей на основе логико-динамического подхода [5,8], позволяющего получить полное описание множества возможных решений с определенными робастными свойствами, на основе которого затем можно выбрать оптимальное решение, например, по критерию максимальной чувствительности к дефектам.

Предполагается, что исходная система может быть приведена к виду с разделенными линейной и нелинейной составляющими, что всегда можно сделать [5,8]:

$$(1) \qquad x(t+1) = Fx(t) + Gu(t) + C \cdot \begin{pmatrix} \varphi_1(A_1 x(t), u(t)) \\ \dots \\ \varphi_p(A_p x(t), u(t)) \end{pmatrix} + Dd(t) + L\rho(t), \qquad y(t) = Hx(t),$$

где $x(t) \in X \subseteq R^n$, $u(t) \in U \subseteq R^m$, $y(t) \in Y \subseteq R^l$ – векторы состояния, управления и выхода; F, G, H, D и L – известные постоянные матрицы, $d(t)$ – вектор, описывающий дефекты: при их отсутствии $d(t) = 0$, при появлении $d(t)$ становится неизвестной функцией времени; $\rho(t)$ – неизвестная функция времени, описывающая возмущения, действующие на систему; C – постоянная матрица размера $n \times p$: если в правую часть уравнения для i-й компоненты вектора состояния системы (2) входит нелинейность $\varphi_j(A_j x(t), u(t))$, то $C(i, j) \neq 0$, в противном случае $C(i, j) = 0$. В общем случае функция φ_j может иметь несколько членов вида $A_i x(t)$.

1 Основные соотношения в линейном случае

Согласно логико-динамическому подходу [5,8] вначале рассматривается случай $C = 0$, т.е. нелинейная составляющая отсутствует, и система (1) описывается линейной моделью

(2) $$x(t+1) = Fx(t) + Gu(t) + Dd(t) + L\rho(t), \qquad y(t) = Hx(t).$$

Описание линейного диагностического наблюдателя имеет следующий вид:

(3) $$x_*(t+1) = F_* x_*(t) + G_* u(t) + Jy(t) + Kr(t), \qquad y_*(t) = H_* x_*(t),$$

где K – матрица обратной связи, $r(t)$ – невязка, формируемая в виде $r(t) = Ry(t) - y_*(t)$ для некоторой матрицы R. Предполагается, что при отсутствии дефектов и возмущений векторы $x(t)$ и $x_*(t)$ связаны равенством $x_*(t) = \Phi x(t)$ для некоторой матрицы Φ, которая удовлетворяет следующим уравнениям [5, 7]:

(4) $$\Phi F = F_* \Phi + JH, \qquad RH = H_* \Phi, \qquad G_* = \Phi G.$$

Вопросы выбора матрицы K детально изложены в ряде публикаций, в частности, в [9], поэтому в настоящей работе они не рассматриваются.

Известно, что полная развязка от возмущений является наиболее благоприятной с точки зрения робастности. Для обеспечения такой развязки, а также чувствительности к дефектам матрица Φ должна удовлетворять условиям $\Phi L = 0$ и $\Phi D \neq 0$ [1,2,4].

Предполагается, что наблюдатель ищется в канонической форме с матрицами [2,4]

(5) $$F_* = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}, \qquad H_* = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix}.8$$

В этом случае уравнения (4) могут быть приведены к виду

(6) $$RH = \Phi_k, \qquad \Phi_i F = \Phi_{i-1} + J_i H, \quad i = 2, ..., k, \qquad \Phi_1 F = J_1 H,$$

где Φ_i и J_i – i-е строки матриц Φ и J, $i = 1, ..., k$, k – размерность наблюдателя. В [2] показано, что уравнения (4.1) можно свернуть в одно:

(7) $$RHF^k = J_k HF^{k-1} + J_{k-1} HF^{k-2} + \dots + J_1 H.$$

Решение этого уравнения сводится к определению минимальной размерности наблюдателя k и описывающих его матриц R и J; дополнительно с использованием соотношений (6) определяется матрица Φ, которая необходима для нахождения матрицы G_* и проверки условий $\Phi L = 0$ и $\Phi D \neq 0$.

Недостатком метода является невозможность непосредственного включения в него условия $\Phi L = 0$, поэтому после решения уравнения (7) приходится проверять это условие и при

его невыполнении находить другое решение при прежней или увеличенной размерности наблюдателя, т.е. фактически производить определенный перебор. Для преодоления этого недостатка предлагается новый подход, состоящий в явном учете условия $\Phi L = 0$ в уравнениях (6), который также позволяет получить полное описание множества возможных решений с определенными робастными свойствами и выбрать из них оптимальное по некоторому критерию решение, например, с максимальной чувствительностью к дефектам.

2 Обеспечение полной развязки от возмущений

2.1 Общие соотношения

Для реализации предлагаемого подхода вводится матрица L_*, содержащая в качестве строк все линейно независимые решения уравнения $L_* L = 0$, в этом случае из условия $\Phi L = 0$ следует равенство $\Phi = ML_*$ для некоторой матрицы *M*. Заменим в (6) строки матрицы Φ на выражения вида $M_i L_*$, в результате чего получим уравнения

$$RH = M_k L_*, \qquad M_i L_* F = M_{i-1} L_* + J_i H, \quad i = 2,\ldots,k, \qquad M_1 L_* F = J_1 H,$$

здесь M_i – *i*-я строка матрицы *M*. Преобразуем полученные соотношения к блочному виду, отделив известные матрицы от неизвестных:

$$(R \quad -M_k)\begin{pmatrix} H \\ L_* \end{pmatrix} = 0, \tag{8}$$

$$(M_i \quad -M_{i-1} \quad -J_i)\begin{pmatrix} L_* F \\ L_* \\ H \end{pmatrix} = 0, \tag{9}$$

$$(M_1 \quad -J_1)\begin{pmatrix} L_* F \\ H \end{pmatrix} = 0\,. \tag{10}$$

Решение полученной системы уравнений начнем с последнего, находя на каждом шаге все линейно независимые решения очередного рассматриваемого уравнения, что можно сделать с помощью математических пакетов, например, Matlab и Maple. Результатом каждого шага является заключение о том, можно ли построить наблюдатель с определенными робастными свойствами; если можно, то он строится, если нет, то его размерность увеличивается на 1 и осуществляется переход к следующему шагу. Рассмотрим отдельные шаги более детально.

2.2 Первый шаг

Уравнение (10) имеет решение в том случае, когда между строками матриц $L_* F$ и H имеется линейная зависимость, что можно проверить с помощью критерия

$$rank\begin{pmatrix} L_* F \\ H \end{pmatrix} < rank(L_* F) + rank(H)\,. \tag{11}$$

При невыполнении этого неравенства полная развязка от возмущений невозможна, и необходимо обращаться к робастным методам [3-5]. Будем полагать, что условие (11) выполняется.

Пусть матрица $(N_1 \quad -P_1)$ содержит все линейно независимые решения уравнения (10), тогда можно принять $M_1 = W_1 N_1$ для некоторой матрицы W_1. Проверяя возможность построения наблюдателя размерности $k = 1$, обратимся к уравнению (8), заменяя в нем M_1 на $W_1 N_1$ и записывая полученное в блочном виде:

(12) $$\begin{pmatrix} R & -W_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H \\ N_1 L_* \end{pmatrix} = 0 .$$

Критерием существования решения этого уравнения является ранговое неравенство

(13) $$rank \begin{pmatrix} H \\ N_1 L_* \end{pmatrix} < rank(H) + rank(N_1 L_*) .$$

Если оно выполняется, то наблюдатель размерности 1 существует, он может быть построен следующим образом. Пусть матрица $\begin{pmatrix} R_0 & -P_0 \end{pmatrix}$ содержит все линейно независимые решения уравнения (12), тогда выполняется равенство $R_0 H = P_0 N_1 L_*$ и можно принять $R = W_0 R_0$ для некоторой матрицы W_0. Отметим, что матрица R_0 описывает все возможные линейно независимые решения, обеспечивающие полную развязку от возмущений при $k = 1$.

Выбирая конкретную матрицу W_0, приходим к равенству $RH = W_0 R_0 H = W_0 P_0 N_1 L_*$, сравнивая которое с $RH = M_k L$ при $k = 1$, нетрудно заключить, что можно принять $M_1 = W_0 P_0 N_1$. Тогда из соотношения $N_1 L_* F = P_1 H$, полученного в результате решения уравнения (10), следует $W_0 P_0 N_1 L_* F = W_0 P_0 P_1 H$, т.е. можно принять $\Phi_1 = W_0 P_0 N_1 L_*$ и $J_1 = W_0 P_0 P_1$. Вычисление матрицы $G_* = \Phi_1 G$ завершает построение линейного наблюдателя.

2.3 Второй шаг

Если условие (13) не выполняется, необходимо искать наблюдатель большей размерности, что чего обратимся к уравнению (9) при $i = 2$, заменив в нем M_1 на $W_1 N_1$ и записывая полученное в блочном виде:

(14) $$\begin{pmatrix} M_2 & -W_1 & -J_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_* F \\ N_1 L_* \\ H \end{pmatrix} .$$

Поскольку уравнение (14) отличается от (10) наличием дополнительного слагаемого $W_1 N_1 L_*$, а (10) по предположению имеет решение, то уравнение (14) также имеет решение.

Пусть матрица $\begin{pmatrix} N_2 & -Q_1 & -P_2 \end{pmatrix}$ содержит все линейно независимые решения уравнения (14), тогда можно принять $M_2 = W_2 N_2$ для некоторой матрицы W_2. Проверяя возможность построения наблюдателя размерности $k = 2$, вновь обратимся к уравнению (8), заменяя в нем M_2 на $W_2 N_2$. Нетрудно видеть, что такая проверка сведется к уравнению (12) и критерию (13) с заменой в них N_1 на N_2 и W_1 на W_2. Из сравнения уравнений (10) и (14) следует, что все строки матрицы N_1 содержатся в матрице N_2, поэтому для выполнения условия (13) и решения уравнения (12) на втором шаге появляются дополнительные возможности.

При выполнении условия (13) обозначим решение уравнения (12) также через $\begin{pmatrix} R_0 & -P_0 \end{pmatrix}$, примем $R = W_0 R_0$, что даст равенства $RH = W_0 P_0 N_2 L_*$ и $M_2 = W_0 P_0 N_2$. Тогда из соотношения $N_2 L_* F = Q_1 N_1 L_* + P_2 H$, полученного в результате решения уравнения (14), следует $W_0 P_0 N_2 L_* F = W_0 P_0 Q_1 N_1 L_* + W_0 P_0 P_2 H$, т.е. можно принять $\Phi_2 = W_0 P_0 N_2 L_*$, $J_2 = W_0 P_0 P_2$ и $M_1 = W_0 P_0 Q_1 N_1$. Умножая обе части уравнения $N_1 L_* F = P_1 H$ на $W_0 P_0 Q_1$ слева, получаем $W_0 P_0 Q_1 N_1 L_* F = W_0 P_0 Q_1 P_1 H$, откуда $\Phi_1 = W_0 P_0 Q_1 N_1 L_*$ и $J_1 = W_0 P_0 Q_1 P_1$ Вычисление матрицы $G_* = \begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} G$ завершает построение линейного наблюдателя размерности 2.

Если условие (13) не выполняется, вновь обращаемся к уравнению (9) при $i = 3$, заменив в нем M_2 на $W_2 N_2$, и продолжим аналогичный анализ соотношения (14), заменив в нем N_1 на N_2. Процедура продолжается до тех пор, пока на очередном шаге наблюдатель будет построен либо для некоторого i выполнится условие $N_i = N_{i-1}$. Последнее означает, что возможности решения уравнения (12) перестали улучшаться, и если оно не имело решения на шаге $i-1$, то на последующих шагах решение также будет отсутствовать.

2.4 Нелинейный случай

Согласно процедуре логико-динамического подхода [5,8], на первом его шаге строится линейный наблюдатель (3), что было писано выше. Нелинейная составляющая модели (2.3) учитывается следующим образом. После построения матрица Φ вычисляется произведение

$$\Phi C \begin{pmatrix} \varphi_1(A_1 x(t), u(t)) \\ \dots \\ \varphi_p(A_p x(t), u(t)) \end{pmatrix}, \quad (15)$$

в котором приводятся подобные члены, если таковые имеются, например, сумма $A_i x u_k + A_j x u_k$ записывается в виде $(A_i + A_j) x u_k = A_{ij} x u_k$; отметим, что без такого приведения размерность наблюдателя может оказаться завышенной. Далее из находящихся в этом произведении матриц-строк вида A_i и A_{ij} формируется блочная матрица A и проверяется условие

$$rank\begin{pmatrix} \Phi^T & H^T \end{pmatrix} = rank\begin{pmatrix} \Phi^T & H^T & A^T \end{pmatrix}. \quad (16)$$

При его выполнении решается алгебраическое уравнение

$$A = A_* \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix}, \quad (17)$$

из которого определяются матрицы-строки $A_{*i1}, \dots, A_{*id}$, где d – число строк матрицы A. Эти матрицы используются для формирования аргумента нелинейной составляющей $\varphi_*(x_*, y, u)$ путем замены в произведении (15) выражений вида $A_{ij} x$ на $A_{*i} \begin{pmatrix} x_* \\ y \end{pmatrix}$ в соответствии с равенством (17). В результате нелинейный наблюдатель примет вид

$$x_*(t+1) = F_* x_*(t) + G_* u(t) + J y(t) + \varphi_*(x_*(t), y(t), u(t)) + K r(t).$$

Если условие (16) не выполняется, необходимо найти другое решение линейной задачи при прежней либо увеличенной размерности наблюдателя или использовать дополнительный наблюдатель, процедура построения которого описана ниже.

Дополнительный наблюдатель

Если условие (16) нарушается для всех возможных линейных наблюдателей, необходимо использовать дополнительный наблюдатель. Пусть A_0 – строка матрицы A, для которой условие (16) нарушается. По аналогии с (4) можно записать уравнения

$$A_0 = H_0 \Phi_0, \quad \Phi_0 F = F_0 \Phi_0 + J_0 H, \quad (18)$$

где индекс “0” соответствует матрицам, описывающий дополнительный наблюдатель. По аналогии с матрицей Φ, матрица Φ_0 должна удовлетворять условию $\Phi_0 = M_0 L_*$ для некоторой матрицы M_0. Заменим Φ_0 в (1) на $M_0 L_*$ и получим следующее:

$$A_0 = H_0 M_0 L_*, \quad (M_0 \quad -F_0 M_0 \quad -J_0)(L_* F^{\mathrm{T}} \quad L_*{}^{\mathrm{T}} \quad H^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}} = 0$$

Обозначим решения этих уравнений D_0 и $(D_1 \quad D_2 \quad D_3)$ соответственно. Из предыдущего уравнения следуют равенства $D_0 = H_0 M_0$, $D_1 = M_0$, $D_2 = -F_0 M_0$ и $D_3 = -J_0$. Три первых равенства говорят о том, что строки матриц D_0 и D_2 линейно зависят от строк матрицы D_1. Тогда если некоторая строка матрицы D_2 независима от строк матрицы D_1, то эта строка должна быть удалена их матрицы $(D_1 \quad D_2 \quad D_3)$. Указанная процедура производится для всех строк матрицы D_1.

Обозначим результат этого анализа в виде $(D_1' \quad D_2' \quad D_3')$. Аналогичная процедура должна быть проделана с матрицами D_0 и D_2' с удалением соответствующих строк матрицы D_0. Если $D_0' \neq 0$, дополнительный наблюдатель может быть построен решением уравнения $D_2' = -F_0 D_1'$ относительно F_0; положим далее $J_0 = -D_3'$, $\Phi_0 = D_1' L_*$, $G_0 = \Phi_0 G$ и $A_0 = D_0' L_*$. Описание дополнительного наблюдателя имеет вид, аналогичный (3), с точностью до обозначения вектора состояния и соответствующих матриц. Если $D_0' = 0$, дополнительный наблюдатель не существует.

Заключение

В работе предложен новый подход к построению робастных диагностических наблюдателей для систем, описываемых нелинейными моделями с негладкими нелинейностями и функционирующих в условиях действия внешних возмущающих воздействий, параметрических неопределенностей и ошибок моделей. Достоинством подхода является возможность получения исчерпывающего описания множества решений с полной развязкой от возмущений.

Список литературы

[1] Мироновский Л.А. Функциональное диагностирование динамических систем. М.-СПб.: МГУ-ГРИФ, 1998.

[2] Шумский А.Е., Жирабок А.Н. Методы и алгоритмы диагностирования и отказоустойчивого управления динамическими системами. Владивосток: ДВГТУ, 2009.

[3] Low X., Willsky A., Verghese G. Optimally robust redundancy relations for failure detection in uncertain systems // Automatica. 1996. Vol. 22. P. 333-344.

[4] Frank P. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy. A survey and some new results // Automatica. 1990. V. 26. P. 459-474.

[5] Жирабок А.Н., Кучер Д.Н., Филаретов В.Ф.Обеспечение робастности при диагностировании нелинейных систем // Автоматика и телемеханика. 2010. № 1. С.159-173.

[6] Ding X., Frank P.M. An adaptive observer-based fault detection scheme for nonlinear dynamic systems // Proc. of the 12th World Congress IFAC, Sydney, Australia. 1993. Vol. 8. P.307-310.

[7] Жирабок А.Н. Диагностические наблюдатели и соотношения паритета: сравнительный анализ // Автоматика и телемеханика. 2012. № 5. С. 141-160.

[8] Жирабок А.Н., Усольцев С.А. Линейные методы при диагностировании нелинейных систем // Автоматика и телемеханика. 2000. № 7. С.149-159.

[9] Schreier G., Ragot J., Patton R., Frank P. Observer design for a class of nonlinear systems // Proc. IFAC Symposium 'Safeprocess-97', Hull, UK. 1997. P. 498-503.

Biography

Alexey Zhirabok, professor at Far Eastern Federal University (Vladivostok). He received the Doctor of Science degree in automatic control in 1996. His research interests include nonlinear control theory with application to fault diagnosis and fault tolerant control.

Alexey Suvorov, post graduate student at Far Eastern Federal University (Vladivostok). His research interests include nonlinear control theory with application to fault diagnosis.

МЕТОД ЭКСПРЕСС ДИАГНОСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

В.Б. Гусев, А.М. Анохин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
117997, Москва, Профсоюзная ул., д.65
amanohin@mail.ru, gusvbr@mail.ru
Тел. 8 495 334 88 21

Ключевые слова: диагностика, математическая модель, параллельные вычисления, технологический процесс, контроль состояния.

Abstract

Algorithms of operation of the information and diagnostic computer system providing automated management with tests and functioning of object at the expense of connection of a complex of mathematical and imitating models of real time are considered. In work the method of diagnostics of the process of this kind, carrying out recognition of an initial (preliminary) stage of emergence of accident in the conditions of measurements from the noise komponenty is offered and tested for models. Possibility of use of parallel calculations for diagnostics realization in real time scale is considered.

The admissible delay of time of calculations is provided with algorithm realization on the multiprocessor computer.

Введение

Объект контроля – технологический процесс, обладающий определенным набором технических характеристик (ТХ), имеет векторы входных и выходных параметров. Управление входными параметрами традиционно осуществляется оператором на основе известных свойств объекта и практического опыта (интуиции). Целью контроля является определение реальных значений ТХ, вывод процесса на заданный режим, исключение аварийных ситуаций.

Целью работы является разработка алгоритмов работы информационно-диагностического вычислительного комплекса (ИДВК), обеспечивающего автоматизированное управление испытаниями и функционированием объекта за счет подключения комплекса математических и имитационных моделей реального времени (реализованного на многопроцессорном вычислительном устройстве).

Аварийная защита объектов в процессе испытаний и функционирования должна реагировать на разнообразный спектр нештатных ситуаций: неисправности, устранимые в процессе испытаний; аварийные ситуации, устранимые в оперативном режиме, аварийные ситуации, требующие остановки процесса и допускающие ликвидации последствий аварии; катастрофические ситуации, требующие априорной реакции с целью их недопущения [1,2].

Требование надежности и безопасности технологического процесса при проведении испытаний объекта и системы управления этим объектом предполагает создание комплекса программных и аппаратных средств, объединенных единым подходом, гарантирующим с достаточной надежностью своевременную и адекватную реакцию на проблемную ситуацию. Эти средства должны обеспечивать:

—обнаружение нештатной (проблемной) ситуации,

—распознавание с достаточной точностью характеристик проблемной ситуации (параметров отклонения от штатного режима, прогноза развития ситуации при инерционном сценарии, типа ожидаемых последствий – от устранимой неисправности до аварийной ситуации),

—выработку оптимального решения по своевременному парированию возмущений с оценкой последствий этого парирования на модели прогноза. При этом, в зависимости от типа определяемой неисправности, реакция комплекса может быть реализована как в автоматическом режиме, так и с помощью оператора.

Для надежного функционирования комплекса необходимо привлечь достаточно разнообразный набор методов автоматизированного управления, диагностики и обеспечения технологической безопасности:

—статистические методы оценки разладки процесса;

—методы математического моделирования физических и техногенных процессов,

—методы автоматизированного управления и регулирования для нелинейных систем с неполной информацией;

Предмет разработки – комплекс средств диагностики, прогнозирования и предотвращения аварийных ситуаций при выполнении технологического процесса (комплекс технологической безопасности).

Функции ИДВК:

- Мониторинг состояния ТХ объекта
- Определение диапазонов входных характеристик
- Определение диапазонов выходных характеристик
- Определение причин несоответствия ТХ
- Обеспечение безаварийного режима испытаний

Состав ИДВК:

- Телеметрическая подсистема
- Система диагностики
- Система управления и аварийной защиты

Существенным требованием к ИДВК является достаточное быстродействие, позволяющее не допустить развития нежелательных последствий быстропротекающего контролируемого процесса.

1 Модель технологического процесса

Технологический процесс может быть представлен во времени последовательностью случайных событий, зависящих как от текущего состояния, так и от предыстории. Возможно катастрофическое развитие событий, когда в результате накопленных дефектов происходит их лавинообразное нарастание и разрушение процесса. Пример такого режима дает следующая модель.

Будем полагать, что процесс обладает свойством саморегулирования: скорость процесса v обратно пропорциональна фактору сопротивления r, а рост этого фактора, приводя к падению скорости процесса, приводит к уменьшению сопротивления (за счет эффекта вязкости). Кроме того, процесс рассчитан на некую регулярную величину сопротивления s, которая зависит от состояния оборудования и может интерпретироваться как управляющий параметр. Рассматриваемый процесс обладает механизмом стабилизации: скорость роста фактора сопротивления r пропорциональна превышению регулярной величины сопротивления s над его текущим значением. Скорость активной компоненты процесса пропорциональна значению r со случайным мультипликатором b, характеризующим влияние дефектов. Эта компонента обладает инерционностью, а скорость изменения мультипликатора b в каждый момент времени – случайная величина с определенным законом распределения. Таким образом, модель процесса может быть представлена в следующем виде.

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} r = k \cdot (s - r) + b \cdot r, \\ \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} b = \mathrm{normal}(0, D), \end{cases} \quad (1)$$

где k - коэффициент связи, $\mathrm{normal}(0, D)$ - генератор нормального распределения с нулевой средней и дисперсией D.

Стационарный уровень $\hat{r}$ определяется формулой

$$\hat{r} = \frac{k \cdot s}{k - b},$$

что при $D = 0$ приводит к равенству стационарного и регулярного уровней $\hat{r} = s$.

Пример реализации случайного процесса b приведен на рис. 1. Здесь и ниже по оси абсцисс – модельное время t.

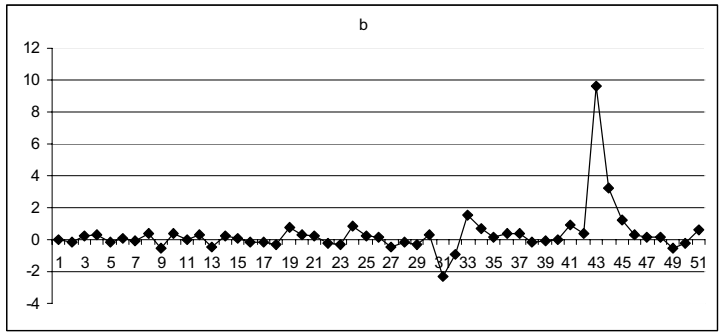


Рисунок 1 – Пример реализации случайного процесса выбытия $b(t)$

Пример реализации случайного процесса r приведен на рис. 2, 3.

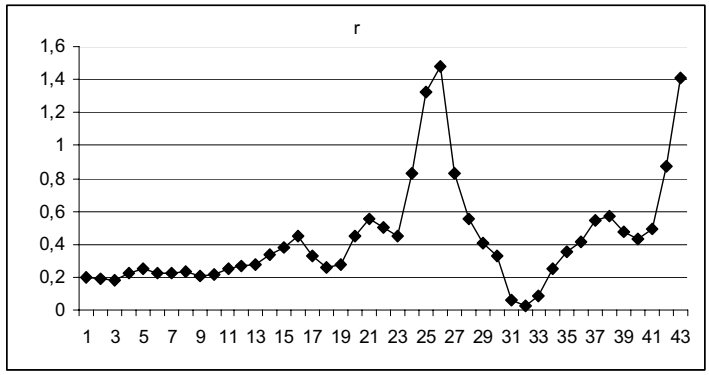


Рисунок 2 – Пример реализации случайного процесса $r(t)$ на начальном интервале времени в мелком масштабе

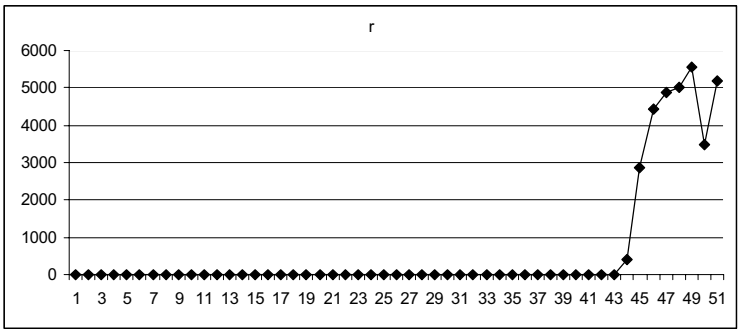


Рисунок 3 – Пример реализации случайного процесса $r(t)$ на продолжительном интервале в крупном масштабе

Резкий рост фактора r после момента $t = 43$ представляет катастрофическое событие, которое необходимо идентифицировать на начальном этапе его развития, до достижения процессом больших значений.

Измеряемый параметр X содержит случайную компоненту шума $X = r + \text{normal}(0, D1)$, где $D1$ - дисперсия измерений.

2 Алгоритм диагностики

В основе алгоритма диагностики в реальном масштабе времени лежит метод распознавания нештатной ситуации для наблюдаемого случайного процесса, включающий:

Периодическое формирование вектора информативных характеристик $Y(t_i)$ на основе потока измеряемых величин $X(t)$. Здесь t – реальное время; t_i – дискретные моменты формирования вектора $Y(t_i)$ с определенной скважностью τ, определяемой характерным временем контролируемого процесса, когда его регулярное изменение соизмеримо с амплитудой шумовой компоненты. В состав потока обрабатываемых данных входят как характеристики, измеряемые на выходе процесса, так и параметры управления технологическим процессом.

Классификацию информационного вектора $Y(t_i)$ с целью выявления типа текущей ситуации (определяемого прогнозом ее развития) с учетом прогноза ее развития и в случае необходимости выработки соответствующих управляющих воздействий.

Набор процедур формирования $Y(t_i)$ включает методы статистического анализа, использующие регрессионный анализ, быстрое преобразование Фурье, расчет моментов различного порядка, и др. Кроме того, вектор $Y(t_i)$ может включать компоненты, получаемые в результате расчета параметров динамической экспресс модели контролируемого процесса. Все эти процедуры независимы и образуют параллельные потоки вычислений. Кроме того, имеется возможность распараллеливать и каждый из отдельных процессов. Основное требование к указанным процедурам – их быстродействие должно с запасом укладываться в промежуток Δt_i.

Процедура классификации сводится к определению области значений S_k вектора $Y(t_i) \in S_k \subset U \subset R^n$, соответствующей нештатной ситуации с индексом k, где U - область значений вектора $Y(t_i)$. Области S_k формируются на этапе обучения процедуры диагностики, выполняемой на предварительном этапе с использованием как предварительно полученных данных, так и результатов крупномасштабного моделирования.

Информативным признаком начала катастрофы является устойчивый (несколько тактов измерения параметра $X(t)$ подряд, принадлежащих достаточно малому интервалу T обнаружения $t \in [t_i, t_i + T]$) рост кривизны измеряемой траектории $X(t)$, когда сама измеряемая величина имеет тенденцию к росту. С этой целью формируется оценка y_1 производной $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}X$, в определенной степени отфильтрованная от шума

$$y_1(t_i) = (\sum_{j=0}^{n} X(t_i + \tau \cdot j) - X(t_i - \theta + \tau \cdot j)) / ((n+1) \cdot \theta),$$

где τ (шаг замеров) и θ (шаг вариации) подобраны так, что $\tau \cdot n \le T$, $\theta \ne \tau \cdot j$ при $j = 1,...,n$. Аналогичным способом формируется оценка второй производной y_2

$$y_2(t_i) = (\sum_{j=0}^{n} y^1 X(t_i + \tau \cdot j) - y^1(t_i - \theta + \tau \cdot j)) / ((n+1) \cdot \theta) \quad (2)$$

Таким образом, превышение величиной

$$z(t) = X(t) \cdot y_2(t) \quad (3)$$

порогового значения $\bar{z}$ является сигналом развития процесса по катастрофическому типу.

Для предотвращения ложной диагностики целесообразно применить сжимающее отображение

$$y(t) = \frac{a \cdot z(t)}{a + |z(t)|}, \quad (4)$$

в результате которого пороговое значение может иметь значение порядка $\bar{y} = a/2$

В приведенном алгоритме диагностики процесса параметры τ, θ, n, T, $\bar{z}$, a настраиваются на предварительном этапе адаптации (обучения).

3 Результаты расчетов

Ниже приведен пример динамики величины $X(t)$ и диагностического признака $z(t)$.

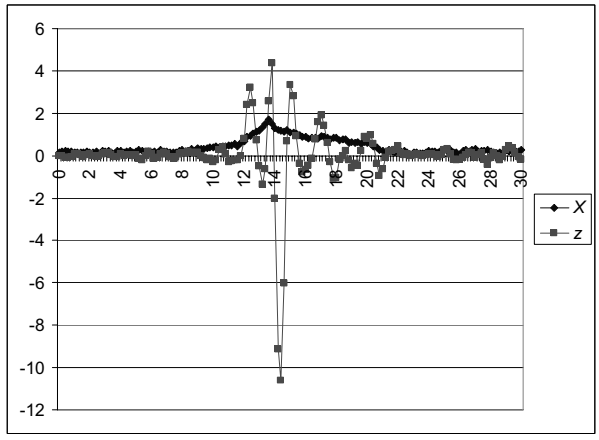


Рисунок – 4. Динамика параметра $X(t)$ и диагностического признака $z(t)$.

Достоверным признаком начала роста $X(t)$ является пик $z(t)$ после $t = 12$ при пороговом значении $\bar{z} = 2$.

На рисунке 5 приведена реализация динамики $X(t)$ и $y(t)$ на длительном интервале времени.

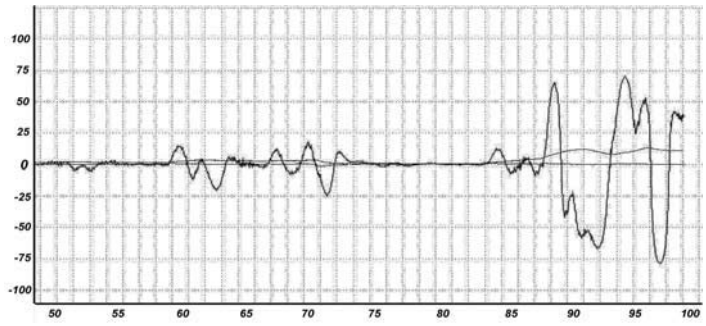


Рисунок 5 – Реализация динамики $X(t)$ и $y(t)$ на длительном интервале времени.

Первый по времени скачок $z(t)$ соответствует началу каждой волны измеряемой величины $X(t)$ и является признаком начального этапа развития катастрофы при постоянном значении управляющего параметра s. Таким образом, динамика пары $(y, \Delta s)$ является информативным признаком катастрофы: ее начало характеризуется парой признаков

(5) $(y > \bar{y}, \Delta s = 0)$.

Логическая свертка (5) представляет собой интегральный логический признак состояния процесса: $(true \& true)$ соответствует началу катастрофы.

Для ускорения счета расчет вычисление интегрального логического признака состояния в реальном времени осуществляется параллельной организацией вычислительного процесса. На 1- м шаге происходит суммирование значений $X(t_i)$ в соответствии с выражением (2), на 2-м в соответствии с выражениями (3), (4) производится вычисление показателя $y(t)$, на 3-м формируется интегральный признак состояния (5). Распараллеливание этого алгоритма может потребовать порядка $\log_2 n$ процессоров.

В реальном процессе, когда одновременно измеряются k параметров, для повышения надежности распознавания ситуации все они могут быть использованы совместно, что требует соответствующего $(\log_2 n \cdot k)$ количества процессоров. Интегральному признаку катастрофы соответствует логическая свертка выражений типа (5).

Заключение

Разработана модель неустойчивого технологического процесса со случайными компонентами и возможным выходом на катастрофические состояния. Предложен и опробован на модели метод диагностики такого типа процесса, осуществляющий распознавание начального (предварительного) этапа возникновения катастрофы в условиях измерений с шумовой компонентой. Рассмотрена возможность использования параллельных вычислений для реализации диагностики в реальном масштабе времени.

Литература

[1] ГОСТ Р ИСО 13379-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Руководство по интерпретации данных и методам диагностирования. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Национальный стандарт российской федерации. – Москва, Стандартинформ, 2010.

[2] Беркут А. И., Рульнов А. А. Системы автоматического контроля технологических параметров: – Санкт-Петербург, Издательство Ассоциации строительных вузов, 2005 г.- 144 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Г.В. Безмен, Н.В. Колесов

ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30, Россия
kolesovnv@mail.ru
тел: +7 (812) 232-35-62, факс: +7 (812) 499-81-53

Ключевые слова: *модель динамической системы, диагностирование, банк наблюдателей состояния.*

Abstract
A method of fault diagnosis in dynamic systems based on a fuzzy approach is proposed. This method uses a bank of interacting observers instead of traditional independent observers. which makes it possible to specify a decision making rule for fault diagnosis.

Введение

Применение моделей при диагностировании информационно-управляющих систем представляет собой достаточно традиционное направление, в рамках которого опубликовано достаточно много работ [1]. Однако интерес к этому направлению сохраняется, причем исследования проводятся в направлении увеличения глубины диагностирования и учета сопровождающих решение задачи неопределенностей. Эти вопросы затрагиваются и в настоящей работе.

В литературе проблема диагностирования рассматривается в различных постановках, зависящих от используемой модели системы: детерминированная [1–6], стохастическая [7, 8], нечеткая [9–11] и т.п. Выбор постановки определяется как задачами, которые решает диагностируемая система, так и априорной информацией о системе и возможных отказах, имеющейся в распоряжении разработчика. В рамках каждого из обозначенных подходов можно выделить определенные направления. При этом использование при синтезе средств диагностирования модели диагностируемой системы представляется одним из наиболее эффективных. Это направление развивается всеми подходами и реализуется через применение в составе средств диагностирования либо одиночных наблюдателей состояния [1 – 4] (при стохастическом подходе – фильтров Калмана или Винера [7, 8]) или выхода [2], либо их наборов (банков) [5 – 11]. В последнем случае каждый из наблюдателей O_i настроен на одно из технических состояний системы (работоспособное S_0 – O_0, неработоспособное S_1 с 1-м отказом – O_1, неработоспособное S_2 со 2-м отказом – O_2 и т.д.). Формируются в общем случае векторные невязки (разностные сигналы) ν_0, ν_1, …, ν_N между наблюдаемым выходом динамической системы и выходом каждого из наблюдателей. По результатам их анализа принимается решение о техническом состоянии диагностируемой системы.

В настоящей работе в рамках нечеткого подхода предлагается метод диагностирования динамических систем, отличающийся рядом особенностей от других известных нечетких методов, основанных на использовании банка наблюдателей. Во-первых, указывается на целесообразность рассмотрения более широкого класса отказов, нежели традиционно моделируемые в пространствах сигналов и параметров. Во-вторых, данный метод рекомендует применять в ряде случаев банк взаимодействующих наблюдателей, в то время как традиционно используются лишь независимые наблюдатели. Наконец, последняя особенность предлагаемого метода

состоит в том, что предполагается отсутствие четкой границы между работоспособным и неработоспособным техническими состояниями как системы, так и ее элементов. Это позволяет уточнить правило принятия решения при диагностировании отказов.

1 Правило принятия решения об отказе

Правило основано на определяемом ниже понятии коэффициента уверенности K_i в i-м техническом состоянии. Оно требует достижения заданного уровня A коэффициентом уверенности K_i для доминирующего по значению этого коэффициента технического состояния, т.е. должно выполняться

(1) $K^* = \max\limits_i \{K_i\} \geq A.$

Поясним процедуру вычисления коэффициентов уверенности. Процедура опирается на две группы параметров, определяющих техническое состояние динамической системы, – невязки $\nu_i \quad i = \overline{0,N}$, формируемые при сопоставлении выходов системы с выходами наблюдателей, а также оценки уровней отказов $\hat{\delta}_i, \hat{\Delta}_i \quad i = \overline{0,N}$ при диагностировании в пространстве сигналов и параметров соответственно. Предполагается, что невязка $\nu_i \quad i = \overline{0,N}$, формируемая при сопоставлении выходов системы и i-го наблюдателя, может быть представлена лингвистической переменной, например, с двумя термами – «малая» и «большая», для которых заданы функции принадлежности $\mu^0_{\nu_i}$ и $\mu^1_{\nu_i} \quad i = \overline{0,N}.$

Терм «малая» соответствует ситуации, когда модель, использованная при синтезе наблюдателя, адекватна текущему техническому состоянию диагностируемой системы. Появление хотя и малого, но не нулевого значения этой невязки объясняется переходными процессами, сопровождающими оценивание, отсутствием на практике полной адекватности используемой при синтезе наблюдателя модели диагностируемой системы, неучтенными возмущениями ее динамики или выхода. Терм «большая» соответствует ситуации, когда модель, использованная при синтезе наблюдателя, существенно неадекватна текущему техническому состоянию диагностируемой системы. Так бывает, если, например, диагностируемая система находится в i-м техническом состоянии, а наблюдатель настроен на j–е техническое состояние. При этом параметры $\{a_i, b_i \mid i = \overline{0,N}\}$ функций принадлежности определяются равенствами:

$$a_i = \min_i \{\nu_i \mid S_j, j \neq i\}, \quad b_i = \max_i \{\nu_i \mid S_j, j = i\}.$$

В отношении переменных $\hat{\delta}_i, \hat{\Delta}_i \quad i = \overline{0,N}$, моделирующих отказ, будем также предполагать, что они описывается лингвистическими переменными с двумя термами – «работоспособно» и «неработоспособно», для которых заданы соответствующие функции принадлежности $\mu^0_{\hat{\delta}_i}$ и $\mu^1_{\hat{\delta}_i} \quad i = \overline{1,N}$ или $\mu^0_{\hat{\Delta}_i}$ и $\mu^1_{\hat{\Delta}_i} \quad i = \overline{1,N}.$

Для получения коэффициентов уверенности $\{K_i \mid i = \overline{0,N}\}$ предварительно определяются характеристики, которые назовем обобщенными степенями принадлежности $\{\tilde{\mu}_i \mid i = \overline{0,N}\}$ технического состояния диагностируемой системы к каждому из возможных нечетких технических состояний. Эти характеристики обобщают информацию о техническом состоянии системы по всем наблюдателям и формируются на основе множеств значений $\{\nu_i \mid i = \overline{0,N}\}$. Значение обобщенной степени принадлежности $\tilde{\mu}_i$ формируется в соответствии со следующим выражением:

$$\tilde{\mu}_i = \mu^0_{\nu_i}\ \mu^1_{\hat{\delta}_i} \prod_{\substack{j=0 \\ j\neq i}}^{N} \mu^1_{\nu_j}.$$

Объяснение этого выражения очевидно. Действительно, наблюдатель, адекватный техническому состоянию системы, будет формировать малую невязку, остальные же наблюдатели – большую. При этом говорить о соответствующем отказе можно лишь в том случае, когда величина δ_i – большая. Пока исключим из рассмотрения ситуации, когда среди рассматриваемых отказов присутствуют эквивалентные или малоразличимые.

Далее коэффициент уверенности K_i для каждого технического состояния S_i вычисляется по правилу «весовых коэффициентов» путем определения вклада обобщенной степени принадлежности $\tilde{\mu}_i$ в сумму этих степеней для всех состояний:

$$K_i = \frac{\tilde{\mu}_i}{\sum_{j=0}^{N} \tilde{\mu}_j}.$$

2 Алгоритмы синтеза средств диагностирования

В настоящей работе последовательно будут рассмотрены три различных модели отказа: структурные нарушения, отказы в пространстве сигналов и отказы в пространстве параметров. Сначала обсудим диагностирование структурных нарушений. Для описания таких отказов удобно обратиться к структурной схеме системы.

Здесь и далее диагностируемую динамическую систему будем описывать во временной области (дифференциальными или разностными уравнениями), т.е. для линейной системы:

(2) $\dot{x}(t) = Fx(t) + Gu(t), \quad y(t) = Hx(t),$

для нелинейной системы

(3) $\dot{x}(t) = \varphi(x(t), u(t), \Theta), \quad y(t) = Hx(t),$

где x – n-мерный вектор состояния, u – m-мерный вектор входа, y – p-мерный вектор выхода, F – n x n-матрица динамики, G – входная n x m-матрица, H – выходная p x n-матрица, φ – функция динамики, Θ – вектор параметров.

В рассматриваемой задаче синтеза средств ФД можно выделить два основных вопроса – формирование правила принятия решений и синтез банка наблюдателей. Считая, что ответ на первый вопрос приведен в предыдущем разделе, перейдем к обсуждению второго вопроса. Далее будут исследованы варианты ФД, использующие банки как независимых, так и взаимодействующих наблюдателей. Под этим понимается способ формирования оценки вектора состояния системы в каждом из наблюдателей. Если она формируется автономно, то говорим о независимых наблюдателях и рассматриваем получаемые оценки как условные к некоторому техническому состоянию. Если при формировании оценки учитываются также и оценки, получаемые в других наблюдателях, то говорим о взаимодействующих наблюдателях.

Таким образом, алгоритм ФД произвольных отказов в рассматриваемой постановке выглядит следующим образом.

Алгоритм 1.

1) Формирование перечня отказов.
2) Синтез наблюдателя для каждого из отказов.
3) Фазификация значений невязок – задание функций принадлежности для рассматриваемых нечетких невязок, основываясь на эмпирическом представлении разработчика о работоспособности системы.

4) Принятие решения об отказах путем формирования коэффициентов уверенности.

При диагностировании в пространстве сигналов отказ моделируется как дополнительное слагаемое δ в уравнении динамики, т.е. для исходной линейной системы имеем:

(4) $\dot{x}(t) = F\,x(t) + Gu(t) + \delta, \quad y(t) = H\,x(t),$

а для нелинейной

(5) $\dot{x}(t) = \varphi(x(t), u(t), \Theta) + \delta, \quad y(t) = H\,x(t),$

При этом число типов N однократных отказов равно размерности n вектора состояния диагностируемой системы. Первый тип моделируется дополнительным слагаемым в первом уравнении динамики для первой компоненты вектора x, второй тип – во втором уравнении для первой компоненты вектора x и т.д. Отказы внутри типа различаются уровнем слагаемого δ.

При диагностировании в пространстве сигналов вектор x_i^* состояния наблюдателя $\mathrm{O_i}\ (\mathrm{i} = \overline{0,\mathrm{N}})$ образуется путем добавления в вектор x состояния диагностируемой системы переменной δ_i, моделирующей отказ, т.е. $\mathrm{x_i}^{*\mathrm{T}} = [\mathrm{x}^{\mathrm{T}}\ \delta_{\mathrm{i}}^{\mathrm{T}}]$. Причем с учетом предположения о постоянстве значения δ_i уравнение для нее имеет вид:

$\dot{\delta}_{\mathrm{i}} = 0.$

В результате матрицы диагностируемой системы при наличии в ней i-го отказа принимают вид:

$$F_i = \begin{bmatrix} & 0 \\ & \dots \\ F_0 & 1 \\ & \dots \\ 0\dots0 & 0 \end{bmatrix}, \quad G_i = \begin{bmatrix} \\ G_0 \\ \\ 0\dots0 \end{bmatrix}, \quad H_i = \begin{bmatrix} & 0 \\ H_0 & \dots \\ & 0 \end{bmatrix},$$

где в матрице динамики единица последнего столбца размещается в i-й строке. При этом если в диагностируемой системе в процессе работы возникает i-й отказ, то в наблюдателе формируется оценка этого составного вектора, в том числе формируется и оценка $\hat{\delta}_{\mathrm{i}}$ значения переменной δ_i.

В настоящем разделе рассматриваются два алгоритма диагностирования, предполагающие использование банка взаимодействующих наблюдателей. При этом применяется описанное в предыдущем разделе правило принятия решения об отказе. Как будет показано ниже, в общем случае эффективность рассматриваемых алгоритмов выше, нежели в случае независимых наблюдателей.

Определяющая особенность первого алгоритма заключается в том, что на каждом очередном шаге вычислений каждый из наблюдателей опирается не на автономно сформированную им частную оценку $\hat{x}_i(t)$ вектора состояния, а на оценку состояния $\hat{x}(t)$, полученную в результате осреднения по всем наблюдателям сформированных на предыдущем шаге частных оценок. Причем в качестве весовых коэффициентов при осреднении выступают текущие значения сформированных на данном шаге коэффициентов уверенности:

(6) $\hat{x}(t) = \sum_i K_i \hat{x}_i(t)\,.$

В результате организуется нелинейная обратная связь по состоянию. Действительно, невязка (ошибка оценивания), формируемая адекватным наблюдателем будет стремиться к нулю, а соответствующий коэффициент уверенности будет возрастать при уменьшении коэффициентов уверенности для других технических состояний. Таким образом, в выражении (6) от-

носительный вес оценки, формируемой в адекватном наблюдателе, будет возрастать. Можно также говорить об обратной связи по невязке, которая для невязки адекватного наблюдателя будет отрицательной, а для остальных невязок – положительной.

Второй рассматриваемый алгоритм, будучи похожим на предыдущий, отличается от него, прежде всего, тем, что наблюдатели сопоставляются не с техническими состояниями, а с переходами между ними. При этом будем говорить, что наблюдатель сопоставлен с переходом $S_i \to S_j$, если он опирается на оценку состояния, полученную при условии S_i, а синтезирован на основе модели системы в состоянии S_j. При этом среди анализируемых переходов учитываются также и переходы типа $S_i \to S_i$, т.е. сохраняющие техническое состояние. В результате коэффициенты уверенности (обозначим их $-K_{ij}$), вычисляемые в данном алгоритме по правилу из предыдущего раздела, будут соответствовать не техническим состояниям, а переходам $S_i \to S_j$ между ними. В связи с этим на каждом шаге для каждого технического состояния S_j необходимо формировать условную к нему оценку $\hat{x}_j(t)$, что будем делать по правилу:

$$\hat{x}_j(t) = \sum_i K_{ij}\hat{x}_{ij}(t),$$

Для принятия решения по правилу (1) должны быть определены коэффициенты уверенности $K_i \quad (i = \overline{0,N})$ и для технических состояний:

$$K_i = \sum_{j=0}^{N} K_{ij}.$$

Очевидно, что используемый во втором алгоритме анализ поведения диагностируемой системы оказывается более детальным, в связи с чем от этого метода можно ожидать и большей эффективности. Это в общем случае и подтверждают результаты моделирования, приводимые ниже.

При диагностировании в пространстве параметров отказ моделируется как отклонение значения какого-либо параметра системы от номинального значения. Так, например, для линейной системы элементов системных матриц от номинала:

(7) $\dot{x}(t) = F(\Theta + \Delta\Theta)x(t) + G(\Theta + \Delta\Theta)u(t), \quad y(t) = H(\Theta + \Delta\Theta)x(t),$

а для нелинейной системы

(8) $\dot{x}(t) = \varphi(x(t), u(t), \Theta + \Delta\Theta), \quad y(t) = H\,x(t).$

При этом в данном случае число типов N однократных отказов равно числу параметров системы.

Применим рассмотренные в предыдущем разделе алгоритмы при диагностировании в пространстве параметров. Пусть параметр Θ принадлежит к числу диагностируемых. Разделим интервал значений параметра на l подынтервалов $\{(\Theta_i, \Theta_{i+1} \mid i = \overline{1,l})\}$. С каждым из подынтервалов соотнесем наблюдатель, основанный на модели системы при значении параметра $\{\Theta_i \mid i = \overline{1,m}\}$. Будем учитывать, что в рассматриваемом случае наблюдатели не формируют оценку величины отказа $\hat{\Delta}$ непосредственно, однако она может быть получена в соответствии с выражением:

$$\hat{\Delta} = \Theta_{i*} - \Theta_{ном},$$

где $i* = \arg\min_i \nu_i$, $\Theta_{ном}$ - номинальное значение параметра Θ.

В случае, когда модель диагностируемой системы известна неточно, т.е. имеет место параметрическая неопределенность, должны применяться робастные методы, использующие, например, интервальные наблюдатели [12]. Укажем на возникающие при этом особенности решения задачи диагностирования. Будем предполагать, что для диагностирования используется банк независимых наблюдателей. Однако в этом случае банк наблюдателей превращается в банк пар наблюдателей, каждая из которых соотнесена с определенным техническим состоянием системы, т.е. каждый наблюдатель заменяется на два, один из которых вычисляет верхнюю, а другой – нижнюю границу для выхода диагностируемой системы. Для формирования невязки с каждым выходом системы сопоставляется среднее значение соответствующих выходов наблюдателей верхней и нижней границ. Далее формирование информации об отказе осуществляется по выше описанной схеме.

Заключение

В настоящей работе предлагается метод диагностирования для информационно-управляющих систем, основанный на использовании программных моделей, реализованных в виде банка взаимодействующих наблюдателей и нечетких правил анализа и принятия решения об отказе. Посредством моделирования в среде Simulink метод был сопоставлен с известным методом, использующим независимые наблюдатели. В результате показано, что предложенный метод позволяет достигать более высокого качества диагностирования.

Список литературы

[1] Isermann R., Model_Based Fault Detection and Diagnosis—Status and Applications, in Proceedings of 16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, St. Petersburg, Russia, 2004, pp. 150–157.

[2] Zhirabok A. N., Robust Observer Design: Logic-dynamic Approach//7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Barcelona, Spain, June 30 -July 3, 2009, pp.786 – 791.

[3] Benini M., Bonfe M., Castaldi P., Geri W., Simani S., Design and Analysis of Robust Fault Diagnosis Schemes for a Simulated Aircraft Model // Hindawi Publishing Corporation, Journal of Control Science and Engineering, Volume 2008, Article ID 274313, p.p. 1 – 18.

[4] Mata-Machuca J. L., Mart´ınez-Guerra R., Aguilar-Sierra H., Fault estimation using a polynomial observer: A real-time application // 8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS), August 29-31, 2012. Mexico City, Mexico, pp.552 – 557.

[5] Adrot O., Flaus J.-M., Fault detection based on uncertain switching models with bounded parameters // 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Barcelona, Spain, June 30 - July 3, 2009, pp.774 – 779.

[6] Rıos H., Edwards C., Davila J., Fridman L., Fault Detection and Isolation for Nonlinear Systems via HOSM Multiple-Observer // 8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS), August 29-31, 2012. Mexico City, Mexico, pp.534 – 539.

[7] Davies J., Tsunashima H., Goodall R.M., Dixon R., Steffen T., Fault Detection in High Redundancy Actuation using an Interacting Multiple-Model Approach // 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Barcelona, Spain, June 30 - July 3, 2009, pp.1228 – 1233.

[8] Дмитриев С.П., Колесов Н.В., Осипов А.В. Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем. – СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 206 с.

[9] Mendouca L. F., Sousa J. M., and Sida _Cos J. M. G., Fault Isolation Using Fuzzy Model_Based Observers, in Proceedings of 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Beijing, China, 2006, pp. 142–150.

[10] Akhenak A., Chadli M., J. Ragot, Maquin D., Design of observers for Takagi-Sugeno fuzzy models for Fault Detection and Isolation // 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Barcelona, Spain, June 30 - July 3, 2009, pp.1109 – 1114.

[11] Безмен Г.В., Колесов Н.В. Функциональное диагностирование динамических систем с использованием нечетких правил анализа и принятия решений об отказе // Известия РАН. Теория и системы управления, 2011, № 3, с. 3 – 12.

[12] Efimov, D., Raissi, T., Zolghadri, A. Control of Nonlinear and LPV Systems: Interval Observer-Based Framework // IEEE Transactions on Automatic Control., 2013, vol.58, Issue 3, pp. 773 – 778.

СТРАТЕГИЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО СТЕРЕОЗРЕНИЯ

С.В. Кравцов, К.Е. Румянцев

ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет»
347922, Россия, г. Таганрог, Ростовская область, ГСП-17А, ул. Чехова, 2
krsvtg@rambler.ru, rke2004@mail.ru
тел: 8 (863-4) 31-55-07

Ключевые слова: *стереозрение, мобильный робот, точность позиционирования*

Abstract

Results of the researches directed on determination of positioning accuracy on one and two measured pointwise reference points of the fixed scene by digital television system of stereovision are given in operation. The task of an optimum choice of reference points for positioning from a priori indefinite set is considered in case of support of eligibility of measurements. Results of an optimum choice of pairs of reference points for positioning by calculations on the model of digital television system of stereovision approached to physical analog are given.

The relations obtained allow a comparative analysis of the parameters of the measuring space and accuracy in the implementation of various digital cameras with variable parameters. As digital stereovision system is analyzed system from two collinear digital camcorders.

Введение

В современных приложениях систем технического зрения особо место занимает направление применения таковых для координатных (позиционных) измерений объектов фиксируемой сцены. Актуальность, прежде всего, продиктована высокой востребованностью на рынке высоко интеллектуальных робототехнических комплексов с автономным циклом управления и способностью адаптации к изменяющимся условиям внешней среды.

Цель исследований состоит в повышении точности координатных (позиционных) измерений бинокулярных систем технического зрения на сонаправленных цифровых видеокамерах с идентичными параметрами при перемещении платформы мобильного робота. Проблематика исследований вытекает из общей проблемы определения положения автономного мобильного робота при его передвижении по неизвестной местности, именуемой в зарубежной литературе как SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

В ходе исследований

- предложена методика оценки качества измерений по всем координатам для измерительного пространства, ограниченного заданной глубиной, с привязкой к параметрам цифровой бинокулярной системы технического зрения;
- решена задача определения точности позиционирования по одному и двум ориентирам, определения выигрыша в точности позиционирования при выборе двух ориентиров по данным измерений цифровой бинокулярной системы технического зрения;
- обоснован выбор оптимальных пар ориентиров из имеющегося априорно неизвестного набора, обеспечивающих наилучшую точность позиционирования и преемственность измерений с учетом траектории перемещения мобильного робота;
- оценено влияние выбора оптимальных пар ориентиров из имеющегося априорно неизвестного набора на алгоритмическую и схемотехническую реализации системы позиционирования на базе цифровой бинокулярной системы технического зрения.

Результаты исследований могут быть применены для разработки систем позиционирования робототехнических комплексов с автономным циклом управления и способностью адаптации к изменяющимся условиям внешней среды на базе цифровых бинокулярных систем технического зрения (ЦБСТЗ).

Оценка качества измерений цифровой бинокулярной системы технического зрения

Модель измерителя на базе ЦБСТЗ на сонапраленных видеокамерах (ВК) при производстве измерений точечных особенностей сцены приведена на рис.1. Здесь обозначены две ВК, система координат ЦБСТЗ, границы измерительного пространства ЦБСТЗ, измеряемая точка пространства М. ВК имеют идентичные объективы с фокусным расстоянием f и идентичные мозаичные фотоприемники размера N×M с размером пикселя Δ. ВК разнесены на величину стереобазы b.

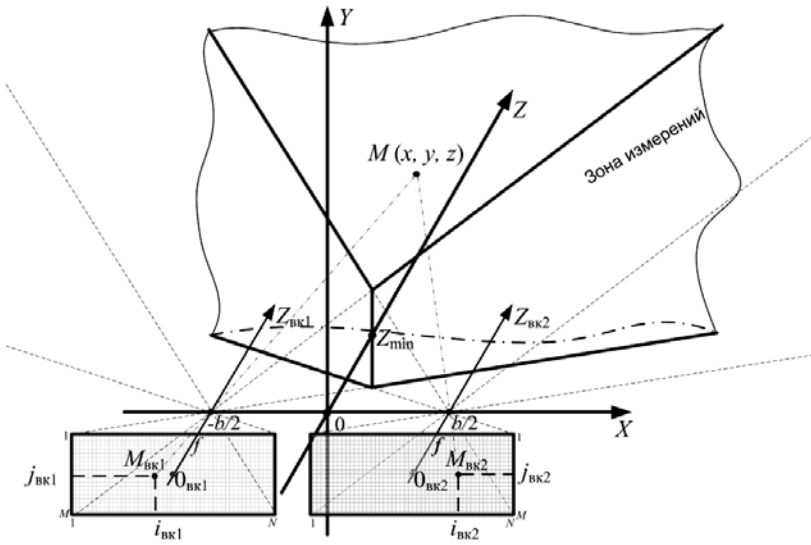


Рисунок 1 - Модель измерителя на базе ЦБСТЗ

Пиксельная дискретизация изображения фиксируемой сцены неизбежно приводит и к дискретизации ее реконструкции. Зная координаты сопряженных пикселей $\{(i_{вк1}, j_{вк1}), (i_{вк2}, j_{вк2})\}$, можно оценить координаты положения точки M в системе координат ЦБСТЗ, полагая, что они не выходят за пределы образуемого смежными пикселями области пространственного разрешения, содержащей истинное положение точки M. Точечные оценки координат M будут определяться

$$(1)\quad \begin{cases} \hat{z} = b\,\dfrac{f}{(i_{вк2} - i_{вк1})\Delta}; \\ \hat{x} = b\,\dfrac{(N+1) - (i_{вк2} + i_{вк1})}{2(i_{вк2} - i_{вк1})}; \\ \hat{y} = b\,\dfrac{(M+1) - 2\,j_{вк1}}{2(i_{вк2} - i_{вк1})}. \end{cases}$$

Интервальные оценки будут определяться границами образуемой смежными пикселями области пространственного разрешения. Величина интервальных оценок координат для одиночных измерений рассмотрена в [1]. Там же рассмотрено описание измерительного пространства, в частности, рассмотрены такие показатели как Z_{max} максимальная и Z_{min} минимальная глубина измерений, внешняя граница измерительного пространства.

Стохастическое описание измерительного пространства ЦБСТЗ приведено в [2]. Показано, что ошибки измерений имеют унимодальные распределения, параметры которых зависят от величины ограничивающей глубины измерений. Для распределений ошибок измерений по координате *Z*, кроме того, наблюдается асимметрия, величина которой растет с ростом ограничительной глубины измерений ЦБСТЗ. Все это позволяет сделать вывод о нестационарности ошибок при измерениях точечных особенностей сцены ЦБСТЗ, установленной на подвижной платформе мобильного робота.

При установке ограничительной глубины измерений качество измерений, задаваемое центральными моментами распределений ошибок измерений, определяется такими параметрами ЦБСТЗ как величина стереобазы, фокусными расстояниями ВК, размерами пикселя и их количеством в мозаичных фотоприемниках ВК при полном согласовании положения и ориентирования ВК в пространстве. Методы обеспечения согласованности положения и ориентирования ВК в пространстве, а также обеспечения идентичности фокусных расстояний ВК ЦБСТЗ рассмотрены в [3,4]. Там же приводятся методики учета в измерениях рассогласований параметров ЦБСТЗ, если их устранение по каким-либо причинам не представляется возможным.

Задача определения точности позиционирования по одному и двум ориентирам

В [6, 7] обосновывается применение ЦБСТЗ для автономного позиционирования в пространстве мобильных робототехнических комплексов. При этом задача позиционирования рассматривается как задача определения координат нескольких ориентиров в системе координат, связанной с ЦБСТЗ, что позволяет оценивать её положение (позиционировать) относительно выделенных ориентиров в окружающей сцене. Позиционирование является важным показателем, применяемым для решения большого круга задач, таких как, счисление пройденного пути, преодоление препятствий, для курсовой навигации и наведения, точного управления манипулятором и других. При этом точность выполнения указанных операций будет определяться точностью позиционирования.

В случае ориентирования по одной точке точность позиционирования ЦБСТЗ мобильного робота полностью определяется точностью измерений координат точки-ориентира. При выборе двух ориентиров точность позиционирования ЦБСТЗ мобильного робота может быть повышена. Рассмотрим решение задачи по координате, определяющей глубину измерений.

Пусть выбраны 2 точки-ориентира *А* и *Б* в фиксируемой сцене (рис. 2). Мобильный робот имеет точку позиционирования 0**,** относительно которой его ЦБСТЗ производит фиксацию окружающей сцены и измерения координат выделенных точек. Ось 0*z* направлена в глубину сцены, а ось 0*x* соединяет оптические центры ВК ЦБСТЗ, разнесенные относительно 0 на величину базы – *b*. Обе цифровые ВК имеют идентичные параметры, сонаправлены.

Точность ε_{z0} позиционирования точки 0 по координате *z* относительно двух выбранных точек-ориентиров *А* и *Б* определяется размером пересечения по координате *z* областей пространственного разрешения, содержащих выбранные ориентиры (рис. 3). Следовательно,

$$(2)\qquad \varepsilon_{z0} = b\frac{fb}{\Delta_x}\left(\frac{d_{\Delta Б}+d_{\Delta A}}{2d_{\Delta Б}d_{\Delta A}}\right)*\left(\frac{1}{(d_{\Delta Б}-1)\hat{x}_Б-(d_{\Delta A}-1)(\hat{x}_A-b)}+\frac{1}{(d_{\Delta Б}+1)\hat{x}_Б-(d_{\Delta A}+1)(\hat{x}_A-b)}\right),$$

где $d_{\Delta A,Б}$ – диспарантность, значение которой вычисляется для каждой точки $d_{\Delta A,Б}=i_{ВК2A,Б}$ - $i_{ВК1A,Б}$; $\hat{x}_A,\hat{x}_Б$ – полученные оценки (1) точек-ориентиров *А* и *Б* по координате *x*.

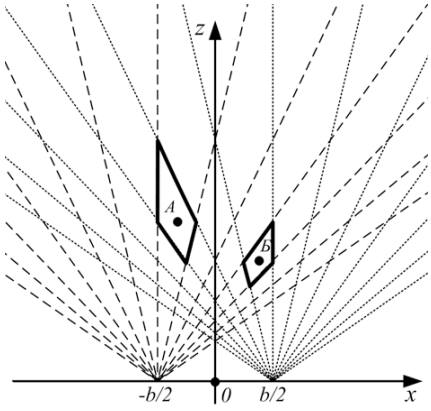


Рисунок 2 - Выбранные точки-ориентиры *А* и *Б*

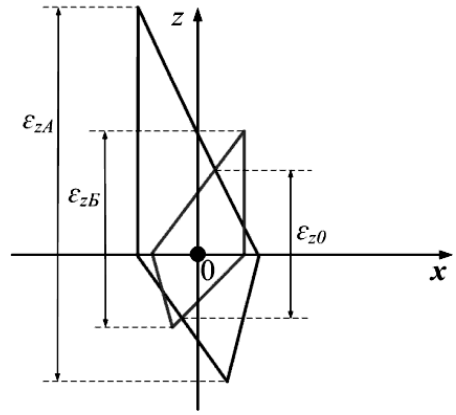


Рисунок 3 -Точность позиционирования точки 0 по координате *z* относительно точек-ориентиров *А* и *Б*

В общем случае при произвольном расположении точек ориентиров *А* и *Б* функция выигрыша $E_{z0}(A,Б)$ в точности позиционирования по координате *z* при выборе двух ориентиров *А* и *Б* по сравнению с одним из них определяется соотношением

$$(3)\qquad E_{z0}(A,Б)=\begin{cases}\dfrac{\varepsilon_{z0}}{\varepsilon_{zA}}, & \text{если } \varepsilon_{zA}<\varepsilon_{zБ}\ \ (d_{\Delta A}>d_{\Delta Б});\\ \dfrac{1}{1+r}, & \text{если } \varepsilon_{zA}=\varepsilon_{zБ}\ \ (d_{\Delta A}=d_{\Delta Б});\\ \dfrac{\varepsilon_{z0}}{\varepsilon_{zБ}}, & \text{если } \varepsilon_{zA}>\varepsilon_{zБ}\ \ (d_{\Delta A}<d_{\Delta Б}),\end{cases}$$

где ε_{zA} и $\varepsilon_{zБ}$ – протяженность (интервальная оценка) по координате *z* (рис. 3) областей пространственного разрешения для точек *А* и *Б;* $r=\left(\hat{x}_{Б}-\hat{x}_{A}\right)/b$.

Функция (3) является положительной, с максимальным значением равным 1. В частном случае, когда точки-ориентиры *А* и *Б* имеют одинаковую удаленность по координате *z,* или $d_{\Delta Б}=d_{\Delta A}=d_{\Delta}$, для достижения 10-ти кратного повышения точности позиционирования по координате *z* ($E_{z0}(A,Б)$=0,1) достаточно, чтобы точки-ориентиры *А* и *Б* имели разнесение по координате *x* на величину *r*, равную 9-ти стереобазам ЦБСТЗ.

Выбор оптимальных пар ориентиров из имеющегося априорно неизвестного набора

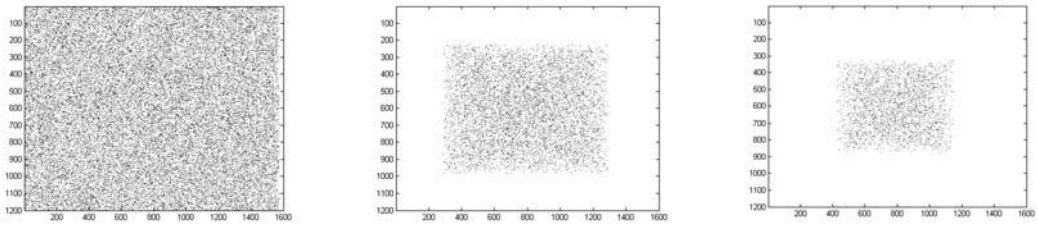
Одним из критериев выбора пары ориентиров из априорно неопределённого набора является обеспечение наибольшего выигрыша в точности позиционирования. Анализ (2) и (3) показывает, что максимальный выигрыш в точности позиционирования наблюдается для пары точек, которые равноудалены в глубину сцены и максимально разнесены по координате *x*. Последнее обстоятельство вступает в противоречие с требованием обеспечения преемственности измерений, в частности, с таким важным параметром как дистанция существования пары ориентиров. Под дистанцией существования пары ориентиров понимается минимальное из расстояний от ориентиров пары до внешней границы зоны измерений ЦБСТЗ при заданном векторе перемещения мобильного робота. Например, если вектор перемещения мобильного робота совпадает с оптической осью (осью 0*z*) ЦБСТЗ, то максимальные дистанции существований ориентиров достигаются при их расположении вблизи с оптической осью ЦБСТЗ.

Становится очевидным, что решающие правила в алгоритме выбора пары ориентиров из случайного набора должны иметь компромиссные соглашения в своих формулировках. Например, выбор 2-х ориентиров из случайного набора заключается в переборе возможных пар, обеспечивающих наибольший выигрыш (наименьшее абсолютное значение) в точности позиционирования при заданной дистанции существования ориентиров. Или другая формулировка: выбор 2-х ориентиров из случайного набора заключается в переборе возможных пар, обеспечивающих наибольшую дистанцию существования ориентиров при заданном значении выигрыша (или абсолютного значения) в точности позиционирования.

Стратегия позиционирования заключается в выборе из неизвестного набора оптимальных ориентиров и обеспечении надежности и преемственности измерений посредством использования нескольких пар. Использование нескольких пар ориентиров для позиционирования функционально обосновано и необходимо, т.к. при перемещении мобильного робота могут возникать эффекты затенения ранее определённых ориентиров, выхода их из зоны измерений ЦБСТЗ. При перемещении платформы с ЦБСТЗ процедура выбора новых пар ориентиров будет возникать по мере приближения значения пройденного расстояния к заданному значению дистанции существования ориентиров. Например, при перемещении мобильного робота на 75% от значения дистанции существования ориентиров, может быть назначена процедура выбора новых пар ориентиров, что должно обеспечить непрерывность (преемственность) позиционирования в пространстве. Алгоритм выбора пар ориентиров из априорно неизвестного набора, а также качество его функционирования детально рассмотрены в [5].

Влияние выбора оптимальных пар ориентиров на алгоритмическую и схемотехническую сложность реализации ЦБСТЗ

При технической реализации алгоритма выбора ориентиров для позиционирования ЦБСТЗ интерес представляют не только вопросы определения точности, но и вопросы описания зон поиска на изображениях стереопары смежных пикселей, фиксирующих точки-ориентиры. На рис. 4 приведены распределения точек ориентиров в плоскости мозаичных фотоприемников ВК, выбранных из случайного набора большого объема по заданной дистанции существования ориентиров. Дистанция существования ориентиров задавалась кратной величиной k от ограничительной глубины измерений ЦБСТЗ Z_{max}.



k≥0 $k\geq 1/3$ $k\geq 1/2$

Рисунок 4 - распределения точек ориентиров в плоскости мозаичных фотоприемников ВК

Видно, что при требовании увеличения дистанции наблюдения ориентиров радиус нахождения смежных пикселей на изображениях стереопары сужается относительно главной точки фотоматриц цифровых ВК. Это обстоятельство значительно уменьшает вычислительные затраты по поиску на изображениях стереопары смежных пикселей, фиксирующих точки-ориентиры трёхмерной сцены, за счет сужения самой зоны поиска.

Уменьшение (рис.4) зоны поиска на изображениях стереопары смежных пикселей, фиксирующих точки-ориентиры после отсева по заданной дистанции существования, снижает требования и к аппаратной реализации интеллектуальной составляющей ЦБСТЗ. Так, если представить, что для хранения всех возможных результатов измерений в ЦБСТЗ используется

постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), в котором одна условная ячейка хранит результат единичного измерения, то общие количество ячеек n_k (объём) ПЗУ составит

$$n_k = M(1-k)(N(1-k)-1-d_\Delta)^2/2,$$

где d_Δ – диспарантность, ограничивающая глубину зоны измерений ЦБСТЗ.

При значениях $N\times M$=1600×1200, d_Δ=25 требуемый условный объём ПЗУ составит:

1) Без адаптации зоны поиска, $k\geq 0$:

$$n_{(k\geq 0)} = M(N-1-d_\Delta)^2/2 = 1200(1600-26)^2/2 = 1.486.485.600$$ ячеек.

2) С адаптацией к зоне поиска при $k\geq 1/3$:

$$n_{(k\geq 1/3)} = (1-k)M((1-k)N-1-d_\Delta)^2/2 = 1200*2/3*(1600*2/3-26)^2/2 = 433.194.845$$ ячеек.

3) С адаптацией к зоне поиска при $k\geq 1/2$:

$$n_{(k\geq 1/2)} = (1-k)M((1-k)N-1-d_\Delta)^2/2 = 1200*1/2*(1600*1/2-26)^2/2 = 179.722.800$$ ячеек.

Таким образом, уменьшение физических объёмов требуемой памяти ПЗУ при адаптации измерений к условиям траекторной задачи (к зоне поиска ориентиров) может составить в разах: $n_{(k\geq 0)}/n_{(k\geq 1/3)} \approx 3,43;$ $n_{(k\geq 0)}/n_{(k\geq 1/2)} \approx 8,27.$

Такое же уменьшение количества итераций следует ожидать и в задаче сопоставления точечных особенностей (поиска смежных пикселей) на изображениях стереопары.

Заключение

Установлено, что точность позиционирования при выборе пары ориентиров может превышать точность позиционирования по одному ориентиру. Задача оптимизации выбора пары ориентиров из случайного набора сводится к классической минимаксной оптимизационной задаче. Стратегия позиционирования заключается в выборе из неизвестного набора оптимальных ориентиров и обеспечении надежности и преемственности измерений. Ограничение по дистанции существования ориентиров сужает область их поиска в изображениях стереопары, что значительно уменьшает вычислительные и аппаратные затраты реализации измерительного комплекса на базе ЦБСТЗ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-08-00051_а

Список литературы

[1] Румянцев К.Е., Кравцов С.В. Анализ измерительного пространства цифровой телевизионной стереоскопической системы. Точечное и интервальное оценивание координат точек трехмерной сцены // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2011. Т. 7. № 3. С. 38-48.

[2] Румянцев К.Е., Кравцов С.В. Анализ ошибок измерений глубины точек трехмерной сцены цифровой телевизионной стереоскопической системой // Радиотехника. 2011. № 9. С. 83-93.

[3] Кравцов С.В. Определение рассогласований параметров цифровой системы стереозрения посредством информационного и корреляционного анализа изображений стереопары // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2012. Т. 129. № 4. С. 108-113.

[4] Кравцов С.В. Методы учета рассогласований параметров цифровой системы стереозрения в измерениях точечных объектов наблюдаемой сцены // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2012. Т. 130. № 5. С. 199-205.

[5] Румянцев К. Е., Кравцов С. В. Оптимизация выбора пар ориентиров для позиционирования по данным измерений цифровой телевизионной системы стереозрения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. № 4. С. 12-21.

[6] Кемурджиан Л. А. Планетоходы / Л. А. Кемурджиан, В. В. Громов, И. Ф. Кажукало и др.; Под ред. Л. А. Кемурджиана. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1993. – 400 с. ISBN 5-217-01207-2.

[7] Петров Д. А. Система навигации по оптическим изображениям // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2008. Т. 80. № 3. С. 219-222.

СИНТЕЗ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СМАЗАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ

В.И. Батищев, И.И. Волков, А.Г. Золин

Самарский государственный технический университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
datatech@samgtu.ru
тел: +7 (846) 337-12-74

Ключевые слова: *смазанное изображение, восстановление, метод регуляризации, алгоритм*

Abstract
The article describes the method of constructing algorithms for solving problems of reconstruction of blurred images using regularization mechanisms. The studies were obtained in a simple recursive algorithm for implementing evaluations of the original image, independent of the initial conditions.

Введение

Высокоточные пассивные системы наведения и целеуказания (ВПСНЦ) предъявляют особые требования к качеству первичной информации, на основе которой строятся модели наблюдаемых сцен (сцен обзора). Такой первичной информацией в современной ВПСНЦ часто являются изображения сцен в телевизионных или иных оптическо-электронных форматах.

Одним из факторов дестабилизирующих получаемые ВПСНЦ изображения, являются смазы, вызванные движением наблюдаемых сцен. Параметры смаза могут существенно варьироваться от долей до десятков пикселей и иметь как одну, так и две пространственные составляющие.

В настоящее время известны основные подходы к решению задачи восстановления смазанных изображений, однако их практическое применение связано с различными недостатками конкретных реализаций. Так, в статье [1] рассматривается метод восстановления изображения с неизвестным параметром смаза. Тем не менее, описанная итерационная процедура восстановления, требует наличия не смазанной области, что может быть труднодостижимо в ВПСНЦ.

В статье [2] рассматриваются два подхода: спектральный метод коррекции, основанный на использовании фильтра Виннера и алгебраический метод, основанный на решении систем линейных уравнений методами псевдообращений. К сожалению, при реализации обоих подходов появляются заметные тени от контрастных объектов.

В настоящем докладе рассматривается метод восстановления смазанного изображения с известным параметром смаза с точностью 3-5%, имеющего одну пространственную составляющую. Задача получения параметров смаза рассматривается в [3].

Описание алгоритма

Рассмотрим процесс смаза изображения как динамическую систему (рисунок 1) с известной передаточной функцией *W(z)*. Известен также ее выходной сигнал *Y(z)*. Необходимо определить входной сигнал *X(z)*. Из рисунка 1 видно, что

$$(1) \quad X(z) = \frac{Y(z)}{W(z)}$$

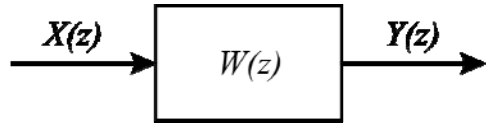


Рисунок 1 – Динамическая система смаза изображения.

Для успешного нахождения *X(z)* необходимо знать начальные условия. На практике, в большинстве случаев они не известны. Для нахождения оценки значений исходного изображения без начальных условий, рассмотрим динамическую систему следующего вида (рисунок 2):

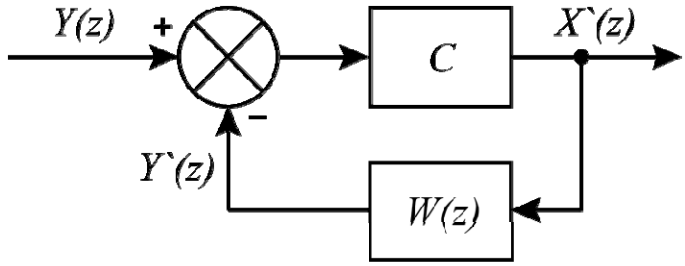


Рисунок 2 - Динамическая система восстановления изображения.

Здесь: *X`(z)* – оценка входного сигнала; *C* – регуляризирующий параметр (*0*<*C*<∞).

Из рисунка 2 следует, что

$$(2) \quad X`(z) = \frac{C}{1 + CW(z)} Y(z)$$

при этом

$$\lim_{c \to \infty} X`(z) = \frac{Y(z)}{W(z)},$$

как и следует из (1). Таким образом, соответствующим выбором значения параметра C, возможно обеспечить заданную точность восстановления.

Рассмотрим подход к восстановлению смазанного изображения по схеме, показанной на рисунке 2. Смаз осуществляется по строке (вдоль горизонтальной оси) на три пикселя. Тогда, точка смазанного изображения описывается соотношением:

$$(3) \quad y_m = \frac{x_m + x_{m-1} + x_{m-2}}{3};$$

в этом случае, согласно рисунку 1

$$(4) \quad W(z) = \frac{1 + z^{-1} + z^{-2}}{3}.$$

Подставив *W(z)* из (4) в (2), получим

$$(5) \quad X`(z) = \frac{3C}{C + 3 + Cz^{-1} + Cz^{-2}} Y(z).$$

Для простоты введем новый регуляризирующий параметр:

$$(6) \quad A = \frac{C}{C + 3}, \text{ где } 0 < A < 1.$$

Тогда соотношение (5) принимает вид

(7) $$X`(z) = \frac{3A \cdot y(z)}{1 + Az^{-1} + Az^{-2}}.$$

Передаточная функция системы, показанной на рисунке 2, для данного случая описывается следующим образом

$$\Phi(z) = \frac{X`(z)}{Y(z)} = \frac{3A}{1 + Az^{-1} + Az^{-2}},$$

весовая функция имеет вид

$$h_m = \frac{(-1)^m \cdot 3A}{\lambda_1 - \lambda_2}(\lambda_1^{m+1} - \lambda_2^{m+1}) = 3A(-1)^m (\sqrt{A})^m \frac{\sin(m+1)\varphi}{\sin\varphi},$$

где

$$\begin{cases} \lambda_1 = \dfrac{A + j\sqrt{4A - A^2}}{2} \\ \lambda_2 = \dfrac{A - j\sqrt{4A - A^2}}{2} \\ \varphi = arctg\sqrt{\dfrac{4}{A} - 1} \end{cases}$$

Данная система представляет собой фильтр с бесконечной памятью типа АР. В явном виде между $x`_m$ и y будет следующим:

$$x`_m = \sum_{v=0}^{m-q} h_v y_{m-v} + h_{m-q+1} x`_{q-1} - A h_{m-q} x`_{q-2}$$

Для получения соотношения вычисления точки исходного изображения, умножим левую и правую части (7) на $(1+Az^{-1}+Az^{-2})$. В результате будем иметь:

$$X`(z) + Az^{-1}X`(z) + Az^{-2}X`(z) = 3AY(z)$$

Выполнив обратное Z-преобразование, перейдем в область действительных координат изображения:

(8) $$x`_m + Ax`_{m-1} + Ax`_{m-2} = 3Ay_m.$$

Отсюда получаем следующее соотношение для вычисления оценки $x`_m$:

(9) $$x`_m = 3Ay_m - Ax`_{m-1} - Ax`_{m-2}$$, где $m=q, q+1, \ldots$

Начальные условия (значения $x`_{q-1}$ и $x`_{q-2}$) можно выбрать любыми. При этом в установившемся режиме работы будем иметь

$$x`_m = x_m.$$

Значение регуляризирующего параметра A подбирается экспериментально: чем ближе оно к единице, тем выше точность, но больше время переходного процесса.

Аналогично могут быть получены соотношения для восстановления изображений, смазанных на произвольное количество пикселей.

Апробация алгоритма

Для апробации алгоритма было взято тестовое изображение виде черных и белых квадратов («шахматная доска»). Был выполнен смаз изображения вдоль горизонтальной оси на три пикселя, после чего предприняты попытки восстановления по алгоритму (9) с различными значениями регуляризирующего параметра A. Наилучшие результаты были получены при зна-

чениях A близких к 1. Так на рисунке 3 показан фрагменты строк исходного (пунктирная линия) и восстановленного изображений в устоявшемся режиме с значением A=0,99. Относительная среднеквадратическая погрешность составила 0,01339.

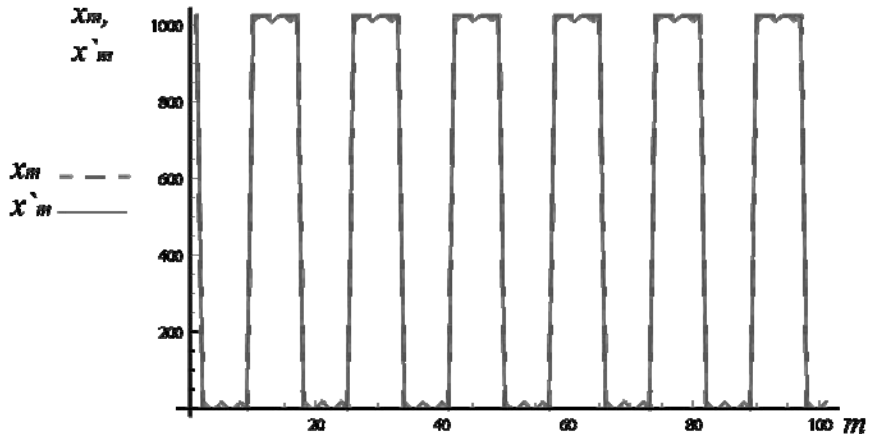


Рисунок 3 - Фрагмент строки исходного и восстановленного изображений

Заключение

В результате исследований был поучен простой в реализации алгоритм восстановления смазанных изображений. Приведенные результаты апробации показали достаточно высокое качество реконструкции исходного изображения. В настоящее время ведутся работы по сокращению времени переходного процесса восстановления, а также применения данного алгоритма к изображениям, смаз которых имеет две пространственные составляющие.

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] Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Коррекция смаза изображений в системах космического наблюдения земли // Цифровая обработка сигналов. 2010. №4.

[3] 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".

MEASUREMENT OF HIGH FREQUENCY INDUCTION CURRENT IN POWERFUL INDUCTION SYSTEMS

P. Votava, I. Poznyak
Research Centre Rez Ltd.
25068, Husinec-Rez 130, Czech Republic
vot@cvrez.cz
olin24@yandex.ru
тел: +7 (911) 976-51-88

Keywords: *induction system, current sensor, high frequency*

Abstract
Гарантированная работа индукционной системы в соответствии с эксплуатационными режимами основывается на знании всех параметров системы, включая электрические. К сожалению, мощные высокочастотные источники питания для электротехнологических установок не комплектуются устройствами для измерения электрических параметров индуктора. Использование стандартных лабораторных устройств для измерения электрических параметров, в большинстве случаев, либо неудобно, с технологической точки зрения, либо невозможно. Поэтому необходима разработка датчиков, адаптированных для их непрерывной работы. В статье описываются различные методы измерения тока индуктора до 1000 А при частоте 1,5 – 4,5 МГц и предлагаются конструкции датчиков. Принципы калибровки и обработки данных представлены также.

Introduction

The induction systems are completing devices for heating or melting of any electrical conductive materials. In principle induction process is based on direct application of two physical laws, the Lenz law and the Joule effect, where any electrical conductive material placed in a variable magnetic field, generated by inductor, is the site of induced electric currents, known as eddy currents. In general, the systems for heating are composed of HF generator, busses and inductor. Systems for induction melting of material are most usually supplemented by cold crucible.

Technologies of high temperature liquid-phase synthesis of oxides, ceramics and glasses are realized in induction furnaces with cold crucible [1]. Technological installations are characterized by frequency up to 5 MHz, inductor voltage up to 10 kV and inductor current more than 1 kA. Using of standard laboratory measuring instruments, in most cases, is either inconvenient, from technological point of view, or impossible because there are not of them [1].

Unfortunately, a powerful high frequency power supplies are not completing regular devices for measurement of inductor current. That is the reason why we need to measure the current directly before inductor on the supply busses. The current measurement in experimental conditions, as mentioned above, is very difficult due to very high power going through, high frequency, strong electromagnetic interference and other dependences.

Whereas the whole induction system and measured variables by contact or noncontact method of current measurement are dependent on temperature, frequency, voltage and other is necessary to remember on this situation during a calibration of the sensors. In ideal case it is good to work with it also in the evaluation and processing of signal and do not calibrate the sensors to exactly one, usually mean value of the whole unit range.

From point of view of laboratory experiments and also application in industry is important to measure current consumption with high accuracy due to reproducibility, stability and controllability

of performed experiments. In this paper is described using of current sensors for noncontacting and contacting measurement with necessary galvanic isolation between measuring contacts and data processing electronics.

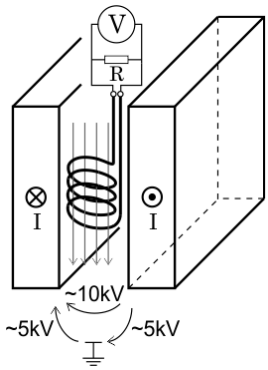
1 Methods of HF current measure

Noncontact using simple solenoid

The first possibility of measuring current going through the busses is using simple solenoid placed between the busses, as shown in Fig. 1. Due to a larger size of busses height and smaller size of the solenoid length we can say, that the coil was placed in a summary homogeneous magnetic field of busses. Induced voltage across the solenoid will be according to Faraday's and Maxwell's equations:

$$u(t) = -NS\frac{dB(t)}{dt} \tag{1}$$

where N is the number of turns of the wire in solenoid, B is the vector of magnetic field, dS is an infinitesimal area element on a surface bounded by the solenoid and Φ_B is an alternating magnetic flux going through the solenoid. In our case, if $B(t)$ is uniform inside the solenoid and points along the axial axis of the coil and if the cross sectional area is S, the equation (1) becomes to



$$u(t) = -NS\ \frac{dB(t)}{dt}. \tag{2}$$

Fig 1. Current measurement by Solenoid

During current measuring by the coil occurs to an additional phase angle shift on the coil. So the measured current includes two phase angle items

$$\varphi = \varphi_{ind} + \varphi_s, \tag{3}$$

where φ_{ind} is phase angle of inductor current and φ_s is phase shift of phase angle of inductor current by current sensor. This is unpleasant for example by measurement or calculation of total power of the inductor. Problematic of the calculation power factor of inductor current is shown in [1].

Noncontact using Rogovsky belt

As a second approach of measuring the inductor current is possible to use a Rogovsky belt placed in the same area as solenoid on the Fig. 1. The Rogovsky belt is a toroidal-solenoid geometry without magnetic core for better linearity. So the induced voltage is driven by the same Faraday's law.

$$u(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -M\ \frac{di}{dt}, \tag{4}$$

where Φ is magnetic flux passing through the coil turns and M is a mutual inductance. Electrical scheme of the sensor is shown on the Fig. 2.

In case of signal processing by this method are important two facts. The first problem is integration of measured signal for getting real current waveform in the busses. The integrator can be implemented in analog or digital form. Digital is better, because the analog integrator is frequency dependent and it may cause the other signal distortion, as well as any other signal pre-processing. If we will design a special coil construction especially for our application and we will choose the right value of added resistance, we can make the direct connection between the sensor and data processing electronics.

The second problem is definition of quantitative distortion and equivalent inductance. For equivalent inductance calculation of measuring system is necessary to connect an additional resistance, carry out the measurement of integrated induced voltage with and without the resistance and the comparison of the both values give equivalent inductance value as the characteristic of the particular device. This calibration of Rogovsky coil, which represent a coefficient of proportionality with connection between voltage output and derivation of measured flux is given by geometry, number of turns, dimensions and the other characteristics of the coil.

From laws of electromagnetic is current flowing through the coil given by relation (5), where u_{ind} is real induced voltage by the coil. Unfortunately, this voltage includes an integral value of voltage distortion , which is summarized to ideal voltage waveform as shown in equation (6). The sum can be written only if we consider linear approximation of it.

$$i(t) = \frac{1}{L}\int_0^t u_{ind}(t)\cdot dt, \tag{5}$$

$$u_{ind}(t) = u_{ideal}(t) + \Lambda, \tag{6}$$

$$\Lambda \approx \lim_{t\to\infty} \frac{\int_0^t u_{ideal}(t)dt}{t}. \tag{7}$$

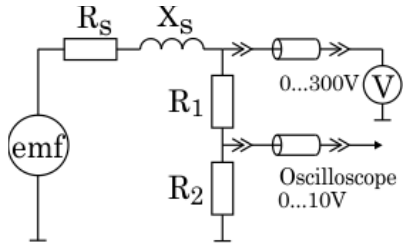


Fig 2. Electrical scheme of the coil sensors

Substitution by equation (6) to (5), performing their integration and calculation the limit by time going to infinity is possible to express the value of the distortion (7). The correction of measured signal significantly refines the result, as shown in [4]. The calibration of sensor is possible to do with HF low power generator and value of equivalent inductance calculate as a mean value of measured frequency characteristic or count the frequency from the measured signal by data processing electronics and include the frequency-impedance dependent to the data processing calculations.

Contact on the base of voltage drop measure on the bus

This method of measurement the current is based on Ohm's law, where the current passing through the bus with specific impedance invokes a drop of voltage on the bus (8). The easiest way how to measure the current is calculate or measure the impedance-frequency response of the bus, estimate the total impedance, measure the drop of voltage between two points on the bus and calculate the current according to Ohm's law as shown in Fig. 3.

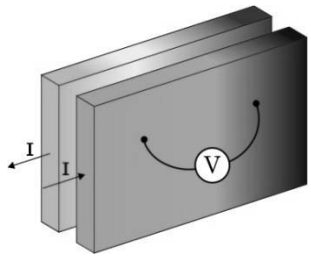


Fig 3. Drop of voltage current measurement

$$(8) \quad I_{RMS} = \frac{U_{RMS}}{\sqrt{R_b^2 + X_b^2}}$$

The difficult question of this problem is estimation of the total impedance between two measuring points, because it is thermal, frequency and voltage dependent. For the first estimation of impedance is possible to idealize busses and proximity effect to take without boundary conditions. So the current will go through almost on the surface of the inner conductors wall in a penetration depth δ. Then is possible to calculate active resistance R_b by equations (9) and (10), where f is current frequency, σ is electrical conductivity, l is a distance between the measuring points and h is high of the busses. Calculation of reactance X_b is more complicated because we need to estimate self inductance L, mutual inductance M and capacitive reactance C. Calculation of self and mutual inductance is described in [5] and the final equation for total impedance is (11), where a,b,c,d and l are dimensions of the busses showed on the Fig X, ρ is specific electrical resistivity of copper and φ and ψ are parameters depended on the strip line construction, both are described in [5].

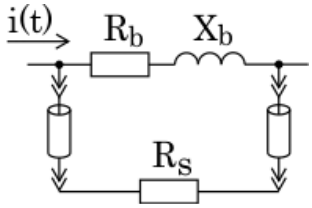


Fig 4. Electrical scheme of voltage drop current measurement

$$(9) \quad \delta = 503\sqrt{\frac{1}{f \cdot \sigma}}$$

$$(10) \quad R_b = \rho \frac{l}{h \cdot \delta}$$

$$(11) \quad Z = \rho \frac{2l}{ab}\varphi + j\left[\rho \frac{2l}{ab}\psi + \omega\mu \frac{2cl}{b}\right]$$

The sensors are strongly dependent on the busses construction, where is more options how to distribute the voltage. First possibility is shown on the Fig 1, the grounding point is in the middle of inductor and the second possibility is ground at the end of the one bus. It has an impact on the design and performance of the sensor. If the busses construction will be according to first option, is necessary to use a galvanic isolation between sensors contacts on the bus and data processing electronics. Application of the isolation is very good idea in the case of both options, due to very high power, which could cause the destruction of the entire measurement chain. But using it adds a small additional signal distortion to the measured data.

This method of measurement the inductor current should have a smaller distortion of the signal wave, without galvanic isolation, because there is not accumulated energy. Second advantage is no shift of power factor as with measured by coils, which is good for example for calculation of power factor.

Noncontact on the base of calorimetric measurement of power losses

This approach is based on the measurement of power losses in the inductor. It is possible to measure power losses in inductor by calorimetric method via measure drop of temperature at input and output cooled water and flow rate of water at inductor. In that case current at inductor can be define as:

$$(12)\quad \left|\bar{I}_{ind}\right| = \sqrt{\frac{P_{losses}}{R_{ind}}}$$

where R_{ind} - resistance of the inductor. R_{ind} can be measured by RLC meter or defined as:

$$(13)\quad R_{ind} = \rho\frac{\pi \cdot W(D+\delta)}{\delta \cdot h}$$

where ρ - resistivity of inductor material, W - number of loop of the inductor, D - inner diameter of the inductor, h - high of the inductor loop, δ - penetration depth of electromagnetic field to the inductor. Power losses defined as:

$$(14)\quad P_{losses} = C_p \cdot Q \cdot \gamma \cdot \Delta\vartheta$$

where C_p - thermal capacity of water; Q - Flow rate of water; γ - water density; $\Delta\vartheta$ - drop of water temperature between outlet and inlet of the inductor.

Advantages of this method are simplicity, well accuracy and independent from signal form of the measuring current.

Fiber-optic current sensor

Optical AC-current sensor is based on a fiber Bragg grating (FBG) deformed or stretched by a magnetostrictive material, which enables a simultaneous measurement of high AC-current. This system enables to monitor high voltage busses and can be installed without interrupting the current line

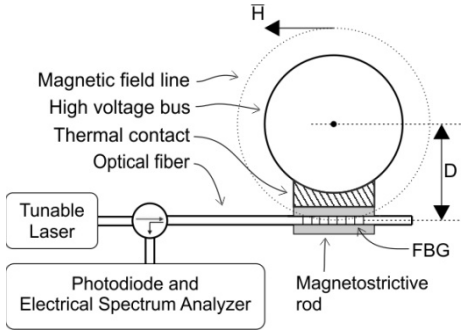


Fig 5. Electrical scheme of voltage drop current measurement

Principle of operation is showed in Fig. 5. Magnetic field H_L at the distance D from the centre of the bus line is created by AC-current I_L, which is driven into the high voltage bus. The magnetic field H_L is given by:

(15) $H_L = \frac{I_L}{2\pi D}$.

The head sensor consists of uniform FBG, fixed into a magnetostrictive rod at the distance D, parallel to the direction of the magnetic field lines. So, when the bus carries current $I_L(t)$, the magnetostrictive rod is extended in length due to the magnetic field in the same direction as the magnetic field lines.

In proposal, the light source is a tuning laser that is launched into the uniform FBG through a circulator. The reflected optical signal is driven to a photodiode and the electrical signal V(t) is measured by an electrical spectrum analyzer at the second end. In this way, when the high voltage bus caries an AC-current $I_L(t) = I_0\cos(\Omega t)$, where I_0 is current amplitude and Ω the modulation frequency, the optical signal reflected by the uniform FBG will exhibit a modulation. The magnetostriction makes the harmonics of the electrical signal V(t) to be integer multiples of 2Ω. So, with an electrical spectrum analyzer, we can measure the electrical signal amplitude $V_{2\Omega}$, that means harmonic amplitude at frequency 2Ω, given by [2]:

(16) $V_{2\Omega}(\lambda, I0) = P_{TL}\frac{\partial R(\lambda)}{\partial \lambda}\left[C_{eff} I_0^2 + \frac{K}{(2\pi D)^2} I_0^2\right]$,

where, P_{TL} is optical power emitted by the TL; $\partial R(\lambda)/\partial\lambda$ - the first derivation of the reflectivity and C_{eff} and K are magnetostrictive parameters of the rod.

2 Investigation of the current measure method via voltage drop measure on the bus

Description of laboratory stand

For the experiment was made an induction system composed by LF generator, copper strip conductors and inductor as a load. The system is sketched on Fig. 6, where LF generator was connected to strip conductors via two-wire isolated line and connection between tested strip conductors and inductor was made from soldered copper plates. The dimensions and characteristics of the strip conductors are described on the Fig. 7.

The target of the measurement was investigation of voltage drop characteristic on the strip conductors dependent on the frequency and alternating current. Second target was evaluation the method for the accurate measurement of inductor current.

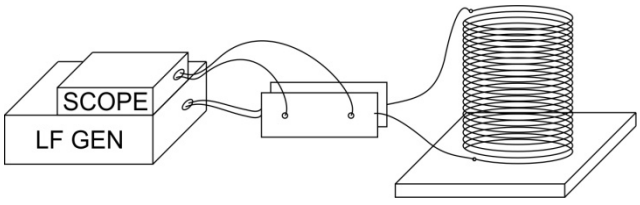


Fig 6. Sketch of the experimental installation

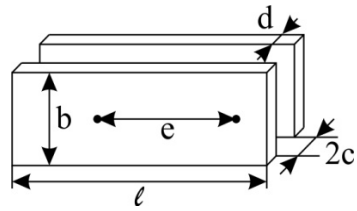


Fig 7. Strip line dimensions

Table 1 shows the expected waveform of the voltage drop depending on the current and self, mutual and total inductance, total impedance and active resistance calculated by equation (11), with diameters and parameters of measuring by table 2. Table 3 shows the calculated values from equation (11) for two frequencies in comparison with values of active resistance and self inductance measured by RLC meter.

Table 1

I [A]	15	25	35	45	55	65	75	85
R [Ω]	4,33E-04	9,72E-04	9,73E-04	1,02E-03	9,52E-04	9,35E-04	9,09E-04	9,00E-04
X_{self} [Ω]	1,62E-06	5,00E-06	6,20E-06	6,84E-06	7,36E-06	7,99E-06	8,61E-06	1,02E-05
X_{mutual} [Ω]	4,70E-04	2,82E-03	3,29E-03	3,76E-03	4,23E-03	4,70E-03	5,17E-03	5,64E-03
Z [Ω]	6,40E-04	2,99E-03	3,44E-03	3,90E-03	4,34E-03	4,80E-03	5,26E-03	5,72E-03
U [V]	6,49E-03	1,08E-02	1,52E-02	1,95E-02	2,38E-02	2,81E-02	3,25E-02	3,68E-02

Table 2 – Dimensions of strip line construction

b [Ω]	0,094
c [Ω]	0,014
d [Ω]	0,00008
l [Ω]	0,2

Table 3 – Comparison of R, L values

f [Hz]	120	1000
$R_{measured}$ [Ω]	9,4E-2	9,2E-2
$R_{calculated}$ [Ω]	1,00E-03	4,33E-04
$L_{measured}$ [H]	1E-6	0,3E-6
$L_{calculated}$ [H]	1,04E-07	1,62E-06

So, from Table 1 is see, that drop of voltage should grow approximately by 0,43mV with 1A. Unfortunately, our measurement didn't confirm this hypothesis, because measured signal was steadily at level about 176mV drop of voltage in all current range. The current range of measurement signal was continuously changed from 15A till 100A. The measured signal by oscilloscope is shown on Fig. 8, where the first yellow signal is the real measured signal of voltage drop by differential probe between measuring points and the blue signal is measured by current probe on the cable before strip line.

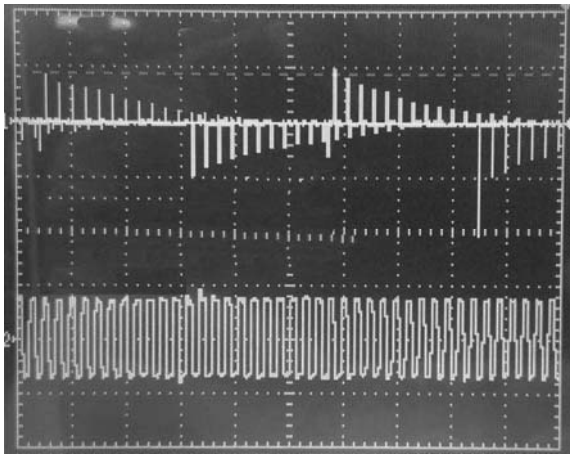


Fig 7. Measured signal by oscilloscope

3 Analyzing results

Theoretically this method of current measurement should work grate, with sufficient accuracy and voltage drop in all range. Unfortunately the measurement by voltage differential probe showed that the method is not comfortable for the construction the sensors, because the noise and random deformation of signal caused by LF generator was to much bigger than readable value of voltage drop.

The steadily value of voltage drop on the bus, could be caused by compensation the value by total impedance, where the active resistance should rise and total reactance should rise too, by equation (11).

Acknowledgment

This work partly has been supported by the SUSEN Project CZ.1.05/2.1.00/03.0108 realized in the framework of the European Regional Development Fund (ERDF).

Literature

[1] A. Pechenkov, I. Poznyak, A. Shatunov, Yu. Petrov. *Measurement of high frequency voltage, current and power factor of inductor.* International Scientific Colloquium, Modeling for Material Processing, Riga, June 8-9, 2006.

[2] J. Mora, L1.Martínez-León, A. Díez, J.L. Cruz, M.V. Andrés. *Simultaneous temperature and ac-current measurements for high voltage lines usány fiber Bragg gratings.* ICMUV, 9 November 2005.

[3] I.V. Pozniak, A.Yu. Pechenkov, A.N. Shatunov. *Induction Furnace with Cold Crucible as a Tool for Investigation of High Temeprature Melts*. Department of Elektrotechnology, Electrotechnical University 197346, St. Petersburg, Prof. Popov str., 5, Russia.

[4] U. Batygin, G.Serikov, E. Chaplygin. *Measuring results numeral treatment of impulsive currents by means of Rogowsky belt application.* 2009, Russia, Kharkiv

[5] Emil Langer. *Teorie indukčního ohřevu a dielektrického tepla.* ACADEMIA, Praha 1979

МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ОДНОВИТКОВОГО ВИХРЕТОКОВОГО ДАТЧИКА С ТОРЦОМ ЛОПАТКИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

М.М.Кутейникова, 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

kuteynikova@iccs.ru

тел. +7(846)333-26-77, факс +7(846)333-27-70

***Ключевые слова**: одновитковый вихретоковый датчик, чувствительный элемент, модель, метод конечных элементов, имитатор лопатки, эквивалентная индуктивность, связь с координатами смещений, электрофизическими и геометрическими параметрами.*

Abstract

The article contains a description of a new model of an electromagnetic interaction between an idealized sensor and blade simulator with given size and shape. The model is based on using of the finite element method, the Biot-Savart law and the Kirchhoff law for the lumped parameter circuits. The model provides an obtaining of sensor equivalent inductance dependences not only from coordinates of a blades simulator displacement, electrical and geometrical parameters of the objects of the electromagnetic interaction, but also it time dependences from the moment of the power supply pulse.

1 Введение

Одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) с чувствительными элементами в виде отрезка проводника используются в кластерных методах и средствах измерения многокоординатных смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах газотурбинных двигателей (ГТД) [1,2]. При этом наиболее значимыми являются смещения в радиальном направлении, которые определяют величину радиальных зазоров (РЗ) между статорной оболочкой и торцами лопаток, и, как следствие, экономичность и надежность ГТД.

Модели электромагнитного взаимодействия ЧЭ с торцом лопатки можно считать весьма полезным инструментом для исследования основных характеристик ОВТД на этапе его проектирования или в процессе разработки новых кластерных методов.

В настоящее время известны две группы таких моделей: упрощенные (они названы аналитическими [2]) и более сложные – численные [3-5].

В моделях первой группы обеспечивается представление результатов в виде упрощенных формул, не содержащих численных итераций (что снижает трудоемкость вычислений), а получению математического описания предшествует геометрическое и электрическое представления электромагнитного взаимодействия. При этом ЧЭ и лопатка заменяются имитирующими электропроводными контурами с допущениями, что параметры магнитного поля в пределах каждого контура не зависят от координат, а проводники, образующие контур, имеют ничтожно малый диаметр [2].

По закону Био-Савара [6] определяются величина индукции магнитного поля, которое создает каждая из сторон контуров в окружающем пространстве, и магнитные потоки, связанные с контурами. Далее находятся соответствующие электродвижущие силы (ЭДС) индукции и на основе второго закона Кирхгофа [7] для всех контуров, как электрических цепей с сосре-

доточенными параметрами, составляется система уравнений, позволяющая найти токи в ветвях и семейство функций преобразования (ФП) в виде формул, связывающих индуктивности[1] ЧЭ с координатами смещений, а также параметрами ЧЭ и лопатки. Там же [2] показана возможность повышения адекватности моделей первой группы путем увеличения числа контуров в имитаторе лопатки с последующим интегрированием создаваемых ими индукций.

Вместе с тем, необходимо отметить, что все без исключения кластерные методы измерения многокоординатных смещений торцов лопаток предусматривают применение измерительных цепей (ИЦ) с импульсным питанием, в которых фиксация выходного сигнала происходит с задержкой во времени от переднего фронта прямоугольного импульса напряжения питания, составляющей от сотых до десятых долей и даже единиц микросекунд (в зависимости от используемых разновидностей ИЦ и датчиков) [1, 2, 8-10].

Однако работоспособность аналитических моделей обеспечивается только с допущением, предполагающим фиксацию изменений индуктивности ЧЭ, связанных с координатами смещений, в момент подачи импульса питания ИЦ, т.е. в момент t=0, что является очевидной идеализацией и может оказаться серьезным ограничением к применению моделей первой группы.

От указанного ограничения свободны известные модели второй группы (численные модели), которые обеспечивают получение искомых изменений индуктивностей ЧЭ не только от изменений координат смещений, электрофизических и геометрических параметров ЧЭ и имитатора лопатки, но и от времени. Модели второй группы отличаются применением метода конечных элементов (КЭ), хотя в подходе к их построению просматриваются очевидные аналогии – геометрическое и электрическое представление с использованием закона Био-Савара, эквивалентные электрические схемы и закон Кирхгофа для составления системы дифференциальных уравнений. Описания такого подхода к построению моделей электромагнитного взаимодействия одного ЧЭ с торцом лопатки, а также нескольких ЧЭ ОВТД в составе кластера между собой и с торцом лопатки с учетом объема элементов конструкции датчиков и лопатки приведены в работах [3] и [4, 5].

Разбиение на КЭ производится с заданным шагом по длине, ширине и высоте. При этом формируется геометрическое представление модели – объемная сетка из бесконечно тонких проводящих нитей, проходящих по ребрам КЭ. В этом случае электрически-представленный КЭ сохраняет пространственное положение и геометрию исходного КЭ, а потому и все объекты электромагнитного взаимодействия, которые складываются из электрических эквивалентов соответствующих КЭ, в своих электрических представлениях будут адекватны исходным геометрическим представлениям.

Каждый проводник КЭ рассматривается в [3] как элемент тока. Соединения проводников в точке образует узел, а замкнутое соединение – контур. В контурах объемной сетки под воздействием магнитного поля, возбуждаемого током ЧЭ, возникают ЭДС и соответствующие контурные (вихревые) токи. Каждый элемент тока в окружающем пространстве создает дополнительное магнитное поле, взаимодействующее с контуром ЧЭ и со всеми контурами КЭ. Далее производится замена сетки из проводящих нитей на электрическую схему, в которой сохраняются контуры сетки, а в ветвях между узлами включены эквивалентные сопротивления, величина которых зависит от электропроводности материала и размеров КЭ. Математическое описание процессов в эквивалентной схеме при импульсном питании ЧЭ можно представить системой дифференциальных уравнений. Число уравнений в системе будет определяться общим количеством контуров.

Следует подчеркнуть, что реализация изложенного подхода была осуществлена лишь в упрощенном варианте, где датчики в составе кластера представлены идеализированными контурами ЧЭ без учета их объема, а имитатор лопатки – плоской пластиной исчезающе малой

[1] Индуктивности вычисляются по найденным магнитным потокам (потокосцеплениям) и токам.

толщины [4, 5][2]. Такая имитация приемлема для лопаток компрессора, кривизна поверхности которых и толщина не столь существенны.

Однако для имитации турбинной лопатки прямоугольная плоская пластина недопустима, что вызывает необходимость разработки такой модели, в которой имитация осуществляется с учетом объема, повышенной кривизны ее пера и формы ее торцевой части.

В настоящей статье приводится описание вновь разработанной модели (относящейся ко второй группе) с идеализированным ЧЭ, но отличающуюся от существующих моделей имитатором лопатки, который отвечает всем вышеперечисленным требованиям – сечения имитатора плоскостями перпендикулярной и параллельной его оси имеют явно выраженную «серповидную» и «U-образную» формы соответственно [11, 12].

2 Разработанная модель

На рисунке 1 в центре представлен имитатор лопатки, он же в препарированном виде изображен на периферии. Имитатор разделен на пять частей: выпуклая и вогнутая поверхности пера лопатки, названные спинкой и корытом соответственно [11], поверхности сопряжения спинки и корыта со стороны входа и выхода газового потока – входная и выходная кромки, а также поверхность между выступами всех четырех перечисленных частей в торце лопатки, названная дном (пятая часть).

Предполагается, что толщины поверхностей спинки, корыта, входной и выходной кромок, а также дна исчезающе малы. Кроме того, принят ряд дополнительных упрощений: в отношении спинки и корыта – образующие их поверхностей – это прямые линии, которые параллельны между собой и оси *Y*, а также перпендикулярны плоскости поверхности дна, т.е. плоскости 0*XZ*, причем сечения пера лопатки плоскостями, параллельными плоскости дна, одинаковы по форме и площади по высоте имитатора от корневой части до торца в направлении оси *Y*; в отношении входной и выходной кромки – они представлены плоскими поверхностями в форме прямоугольника, две стороны которого также параллельны оси *Y*.

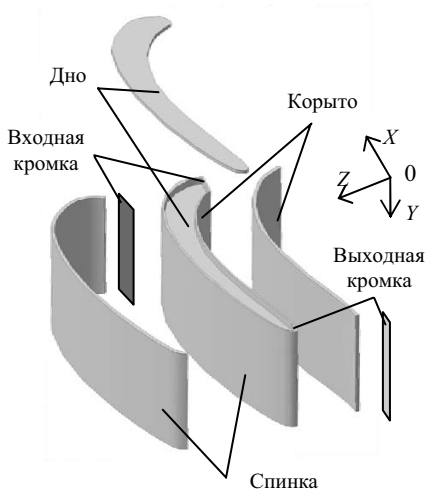


Рисунок 1 – Имитатор лопатки

При этом в каждом из указанных сечений пера лопатки в плоскости 0*XZ* спинка и корыто представляются как функция $z(x)$ выражением:

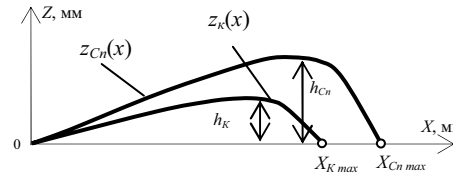
$$(1)\quad z(x)=\left(A\cdot\left(1-e^{-\frac{x}{a}}\right)-F\cdot x\right)\cdot h$$

где h – максимальные прогибы спинки (h_{Cn}) и корыта (h_K); A (A_{Cn}, A_K) и a (a_{Cn}, a_K)– коэффициенты, найденные экспериментально для спинки и корыта реальной лопатки;

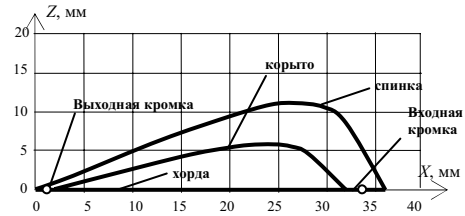
[2] Аналогичная модель представлена и в работе [3] с тем лишь различием, что в ней используется только один контур ЧЭ.

$F = \frac{A}{x_{\max}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{x_{\max}}{a}}\right)$ – коэффициент (x_{max} ($x_{Cn\,max}$, $x_{K\,max}$) – проекции спинки и корыта на ось X соответственно).

На рисунке 2, а представлены графики функции z (x) для спинки ($z_{Cn}(x)$) и корыта ($z_к(x)$). Путем сдвига по оси X начала кривой $z_к(x)$ на величину ширины выходной кромки можно сформировать профиль сечения имитатора лопатки. Его изображение, полученное в результате расчета при A_{Cn}=1,626, a_{Cn}=4,375, h_{Cn}=7,5 мм, $x_{Cn\,max}$=36 мм ($z_{Cn}(x)$) и $A_к$= 1,627, $a_к$=4 ($z_к(x)$), $h_к$=4,5 мм, $x_{к\,max}$=29 мм ($z_K(x)$), а также при ширине выходной кромки 1,5 мм представлено на рисунке 2, б. На том же рисунке показаны хорда[3] и выходная и входная кромки - отрезки, равные их ширине, причем, как видно из рисунка 2, б, оба отрезка лежат на одной прямой[4].



а)



б)

Рисунок 2 –Функции $z_{сп}(x)$ и $z_к(x)$ (а) и результаты расчета профиля имитатора (б)

Результаты расчета координаты z распространяются на любое сечение плоскостью, параллельной плоскости 0XZ, с заданной координатой y. Координаты профиля дна определяются аналогично координатам спинки и корыта.

Таким образом, имитатор представляет собой полое тело, объем и форма которого с учетом принятых допущений соответствуют объему и форме реально существующих конструкций турбинных лопаток, внутри которых предусмотрены полости, занимающие значительную часть объема и предназначенные для охлаждения лопаток потоком воздуха.

Геометрическое представление ЧЭ и имитатора лопатки приведено на рисунке 3. ЧЭ и тоководы изображены в идеализированном виде как отрезки проводников (без учета их объема), образующие контур с источником импульсного напряжения. Предполагается, что магнитное поле создает только ЧЭ и влияние тока остальных проводников контура ЧЭ не учитывается.

В отличие от известных моделей [3-5], разбиение имитатора на КЭ проводится для каждой из его пяти частей отдельно, причем число КЭ в каждой части задается пользователем системы моделирования. Учитывая кривизну лопатки и тот факт, что КЭ образуются из отрезков прямых, необходимо иметь в виду негативное влияние на точность вычислений малого количества разбиений.

Формирование КЭ производится с равномерным шагом, причем количество разбиений будет одинаково по высоте имитатора от торца до корневой части для спинки, корыта, входной и выходной кромок; для спинки, корыта и дна в направлении от выходной к входной кромке; для входной, выходной кромок и дна в направлении от корыта к спинке.

Как показано на рисунке 3, нумерация КЭ увеличивается от хвостовой к головной части имитатора и от торца к корневой части (для дна – в направлении от корыта к спинке). При этом принадлежность КЭ к каждой из пяти частей имитатора обозначается следующим образом: Сп – спинка, К – корыто, ВхК –входная кромка, ВК –выходная кромка, Д –дно. Номер КЭ

[3] Хорда, согласно [11], - это «отрезок, соединяющий точки пересечения средней линии профиля пера с профилями входной и выходной кромок пера»

[4] Входная и выходная кромки по форме – прямоугольники, расположенные в одной плоскости (рисунок 1).

определяется индексом, где первое число – порядковый номер в направлении от выходной кромки к входной (1,2,…,*m*) для КЭ спинки, корыта и дна, в направлении от спинки к корыту и от корыта к спинке для КЭ выходной (1,2, …, *k*) и входной (1,2, …, *p*) кромок соответственно; второе число – в направлении от торца к корневой части имитатора для КЭ спинки, корыта и кромок (1,2, …, *n*), для КЭ дна – в направлении от корыта к спинке (1,2, …, *d*).

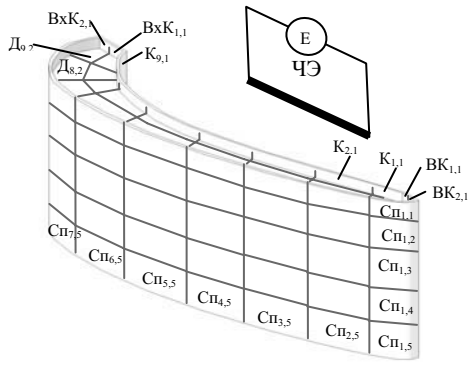


Рисунок 3 – Геометрическое представление ЧЭ и имитатора с разбиением его на КЭ при *m*=9, *n*=5, *k*=2, *p*=2 *d*=2.

Для перехода от геометрического представления к электрическому все отрезки, образующие КЭ (ребра [3]), заменяются на электропроводные нити, сохраняя при этом пространственное положение, геометрические размеры и форму имитатора.

В результате формируется объемная сетка из тонких проводящих нитей – элементов тока (ЭТ) [3] (рисунок 4). Точки соединения таких проводников образуют узлы, а замкнутое соединение – контуры. Каждый ЭТ создает в окружающем пространстве магнитное поле. Индукция от ЭТ в произвольной точке А (*x,y,z*) определяется по закону Био-Савара [6]:

$$(2)\quad d\overline{B_A} = \frac{\mu_0 \cdot i}{4\pi \cdot r^3} \cdot \left[d\bar{l}, \bar{r}\right]$$

где i – ток в ЭТ ($d\bar{l}$); μ_0 – магнитная проницаемость воздуха (вакуума); $\bar{r}$ –радиус–вектор от центра ЭТ до точки А, в которой определяется индукция[5], r–его модуль.

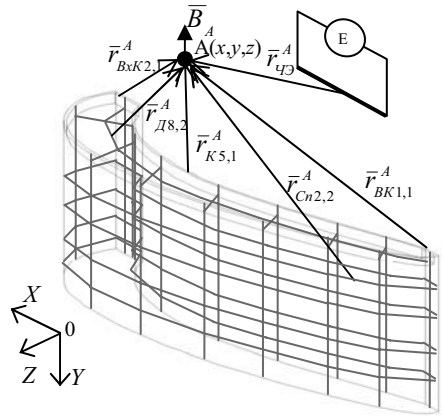


Рисунок 4 – Электрическое представление электромагнитного взаимодействия ЧЭ и имитатора

После расчета индукции для каждого контура можно найти электродвижущую силу:

$$(3)\quad \varepsilon = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \cdot \left(\overline{S} \cdot \overline{B}\right),$$

где Ψ – потокосцепление, равное магнитному потоку Φ; $\overline{S}$ - вектор площади контура (направлен перпендикулярно к плоскости контура); $\overline{B}$ – вектор индукции в центре контура.

При этом влияние контуров КЭ частей имитатора лопатки друг на друга не учитывается. Индукция вычисляется только для взаимодействия КЭ каждой части имитатора с ЧЭ и с КЭ внутри этой части.

Далее модель представляется в виде эквивалентных электрических схем (рисунок 5). Для этого каждая нить сетки заменяется эквивалентным омическим сопротивлением, которое определяется с учетом толщины и электропроводности материала лопатки, а также числа делений на КЭ [3]:

[5] На рисунке 4 в качестве примера показаны несколько радиус-векторов, в обозначениях которых нижние индексы показывают принадлежность к КЭ той или иной части имитатора, а также его порядковый номер.

(4) $$R_{КЭ} = \rho \cdot \frac{l}{S_{cКЭ}}$$

где ρ–удельное сопротивление материала; l, $S_{cКЭ}$–длина и площадь сечения КЭ соответственно.

Каждая часть имитатора представляется независимой эквивалентной схемой. Нумерация сопротивлений R производится аналогично нумерации КЭ, с тем лишь отличием, что названия частей имитатора находятся в нижних индексах, а порядковые номера – в верхних (рисунок 5). Кроме того, в нижних индексах указаны признаки пространственной ориентации α, β, γ, где α – направление от выходной кромки к входной, β – от торца имитатора к его корневой части, а γ – направление от корыта к спинке.

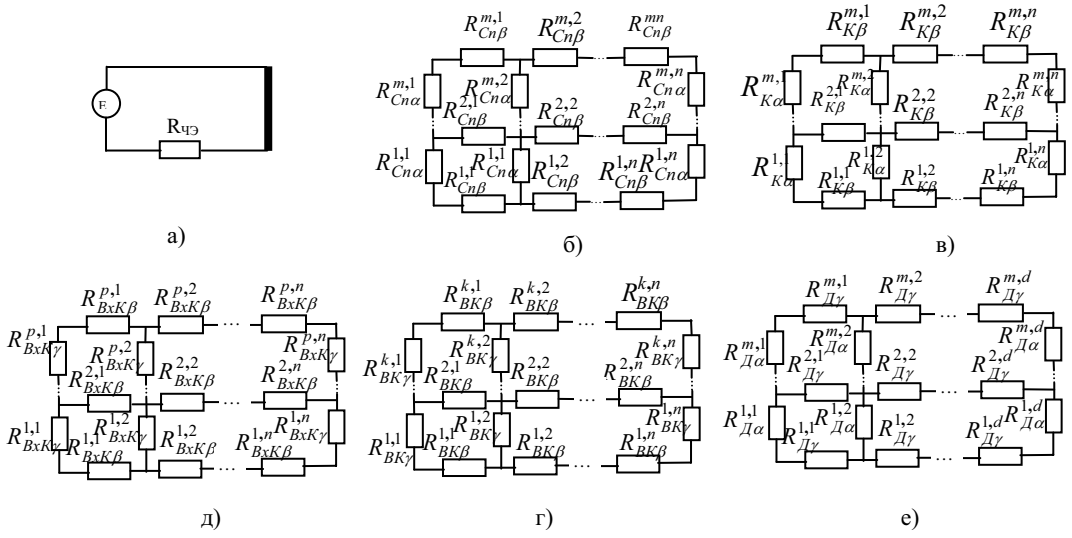


Рисунок 5 – Эквивалентные схемы контуров ЧЭ (а), спинки (б), корыта (в), входной кромки (г), выходной кромки (д), дна (е)

Поведение эквивалентных схем описывает система уравнений, составленная на основе закона Кирхгофа, которая содержит уравнение контура ЧЭ, а также $m \cdot n$ уравнений контуров КЭ Сп, $m \cdot n$ уравнений контуров КЭ К, $p \cdot n$ уравнений контуров КЭ ВхК, $k \cdot n$ уравнений контуров КЭ ВК. Общее число уравнений в системе равно $1 + 2 \cdot m \cdot n + p \cdot n + k \cdot n + m \cdot d$, а сама система имеет вид:

$$\begin{cases}
\underline{\textit{Уравнение контура ЧЭ}} \\
i_{кЧЭ} \cdot R_{кЧЭ} = E + \varepsilon_{кЧЭ}, \\
\underline{\textit{Уравнение контуров КЭ имитатора}} \\
i^{12}_{Cn\alpha} \cdot R^{12}_{Cn\alpha} - i^{11}_{Cn\alpha} \cdot R^{11}_{Cn\alpha} + i^{11}_{Cn\beta} \cdot R^{11}_{Cn\beta} - i^{21}_{Cn\beta} \cdot R^{21}_{Cn\beta} = \varepsilon^{11}_{Cn}, \\
\ldots \\
i^{m,n+1}_{Cn\alpha} \cdot R^{m,n+1}_{Cn\alpha} - i^{m,n}_{Cn\alpha} \cdot R^{m,n}_{Cn\alpha} + i^{m,n}_{Cn\beta} \cdot R^{m,n}_{Cn\beta} - i^{m+1,n}_{Cn\beta} \cdot R^{m+1,n}_{Cn\beta} = \varepsilon^{m,n}_{Cn}, \\
\ldots \\
i^{m,n+1}_{K\alpha} \cdot R^{m,n+1}_{K\alpha} - i^{m,n}_{K\alpha} \cdot R^{m,n}_{K\alpha} + i^{m,n}_{K\beta} \cdot R^{m,n}_{K\beta} - i^{m+1,n}_{K\beta} \cdot R^{m+1,n}_{K\beta} = \varepsilon^{m,n}_{K}, \\
\ldots \\
i^{p,n+1}_{\text{Вх}K\gamma} \cdot R^{p,n+1}_{BxK\gamma} - i^{p,n}_{BxK\gamma} \cdot R^{p,n}_{BxK\gamma} + i^{p,n}_{BxK\alpha} \cdot R^{p,n}_{BxK\alpha} - i^{p+1,n}_{BxK\alpha} \cdot R^{p+1,n}_{BxK\alpha} = \varepsilon^{p,n}_{BxK}, \\
\ldots
\end{cases}$$

$$
\begin{cases}
\vdots \\
i_{BK\gamma}^{k,n+1}\cdot R_{BK\gamma}^{k,n+1}-i_{BK\gamma}^{k,n}\cdot R_{BK\gamma}^{k,n}+i_{BK\alpha}^{k,n}\cdot R_{BK\alpha}^{k,n}-i_{BK\alpha}^{k+1,n}\cdot R_{BK\alpha}^{k+1,n}=\varepsilon_{BK}^{k,n}, \\
\ldots \\
i_{Д\alpha}^{m,d+1}\cdot R_{Д\alpha}^{m,d+1}-i_{Д\alpha}^{m,d}\cdot R_{Д\alpha}^{m,d}+i_{Д\gamma}^{m,d}\cdot R_{Д\gamma}^{m,d}-i_{Д\gamma}^{m+1,d}\cdot R_{Д\gamma}^{m+1,d}=\varepsilon_{Д}^{m,d},
\end{cases}
$$

где ε – ЭДС в контурах ЧЭ и КЭ имитатора. При этом нижние индексы параметров ε, i, R определяют принадлежность к контурам ЧЭ ($к ЧЭ$), имитатора (Cn, K, BxK, BK, $Д$) и показывают пространственную ориентацию (α, β, γ), а верхние индексы – порядковый номер КЭ.

Система уравнений, в которой ЭДС выражены через производные токов, а коэффициенты определяются электрофизическим и геометрическими параметрами, представлена выражениями:

(5)
$$
\begin{cases}
\underline{\textit{Уравнение контура ЧЭ}} \\
i_{кЧЭ}\cdot R_{кЧЭ}=E-\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}(C_{кЧЭ}^{ЧЭ}\cdot i_{ЧЭ}+C_{кЧЭ}^{Cn11}\cdot i_{Cn}^{11}+\ldots+C_{кЧЭ}^{Cn(mn)}\cdot i_{CП}^{mn}+\ldots+C_{кЧЭ}^{K11}\cdot i_{K}^{11}+ \\
+C_{кЧЭ}^{K(mn)}\cdot i_{K}^{mn}+C_{кЧЭ}^{BxK11}\cdot i_{BxK}^{11}+\ldots+C_{кЧЭ}^{BxK(pn)}\cdot i_{BxK}^{pn}+C_{кЧЭ}^{BK11}\cdot i_{BK}^{11}+\ldots+ \\
+C_{кЧЭ}^{BK(kn)}\cdot i_{BK}^{kn}+C_{кЧЭ}^{Д11}\cdot i_{Д}^{11}+\ldots+C_{кЧЭ}^{Д(md)}\cdot i_{Д}^{md}), \\
\underline{\textit{Уравнение контуров КЭ имитатора}} \\
i_{Cn}^{11}\cdot R_{Cn}^{11}=-\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\left(C_{Cn11}^{ЧЭ}\cdot i_{ЧЭ}+C_{Cn11}^{Cn11}\cdot i_{Cn}^{11}+\ldots+C_{Cn11}^{Cn(mn)}\cdot i_{Cn}^{mn}\right), \\
\ldots \\
i_{Cn}^{mn}\cdot R_{Cn}^{mn}=-\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\left(C_{Cn(mn)}^{ЧЭ}\cdot i_{ЧЭ}+C_{Cn(mn)}^{Cn11}\cdot i_{CП}^{11}+\ldots+C_{Cn(mn)}^{Cn(mn)}\cdot i_{Cn}^{mn}\right), \\
i_{K}^{11}\cdot R_{K}^{11}=-\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\left(C_{K11}^{ЧЭ}\cdot i_{ЧЭ}+C_{K11}^{K11}\cdot i_{K}^{11}+\ldots+C_{K11}^{K(mn)}\cdot i_{K}^{mn}\right), \\
\ldots \\
i_{K}^{mn}\cdot R_{K}^{mn}=-\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\left(C_{K(mn)}^{ЧЭ}\cdot i_{ЧЭ}+C_{K(mn)}^{K11}\cdot i_{K}^{11}+\ldots+C_{K(mn)}^{K(mn)}\cdot i_{K}^{mn}\right), \\
i_{BxK}^{11}\cdot R_{BxK}^{11}=-\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\left(C_{BxK11}^{ЧЭ}\cdot i_{ЧЭ}+C_{BxK11}^{BxK11}\cdot i_{BxK}^{11}+\ldots+C_{BxK11}^{BxK(pn)}\cdot i_{BxK}^{pn}\right), \\
\ldots \\
i_{BxK}^{pn}\cdot R_{BxK}^{pn}=-\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\left(C_{BxK(pn)}^{ЧЭ}\cdot i_{ЧЭ}+C_{BxK(pn)}^{BxK11}\cdot i_{BxK}^{11}+\ldots+C_{BxK(pn)}^{BxK(pn)}\cdot i_{BxK}^{pn}\right), \\
i_{BK}^{11}\cdot R_{BK}^{11}=-\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\left(C_{BK11}^{ЧЭ}\cdot i_{ЧЭ}+C_{BK11}^{BK11}\cdot i_{BK}^{11}+\ldots+C_{BK11}^{BK(kn)}\cdot i_{BK}^{kn}\right), \\
\ldots \\
i_{BK}^{kn}\cdot R_{BK}^{kn}=-\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\left(C_{BK(kn)}^{ЧЭ}\cdot i_{ЧЭ}+C_{BK(kn)}^{BK11}\cdot i_{BK}^{11}+\ldots+C_{BK(kn)}^{BK(kn)}\cdot i_{BK}^{kn}\right), \\
i_{Д}^{11}\cdot R_{Д}^{11}=-\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\left(C_{Д11}^{ЧЭ}\cdot i_{ЧЭ}+C_{Д11}^{Д11}\cdot i_{Д}^{11}+\ldots+C_{Д11}^{Д(md)}\cdot i_{Д}^{md}\right), \\
\ldots \\
i_{Д}^{md}\cdot R_{Д}^{md}=-\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\left(C_{Д(md)}^{ЧЭ}\cdot i_{ЧЭ}+C_{Д(md)}^{Д11}\cdot i_{Д}^{11}+\ldots+C_{Д(md)}^{Д(md)}\cdot i_{Д}^{md}\right),
\end{cases}
$$

где C – коэффициенты с размерностью индуктивности, которые вычисляются с помощью выражений (2), (3) и зависят от параметров $\mu_0, \bar{S}, d\bar{l}, r, \bar{r}$, причем нижний индекс этого коэффициента (C) определяет контур КЭ для которого рассчитывается индукция, а верхний – контур КЭ, в котором вычисляется индукция; нижнее индексы токов i и сопротивлений R определяют

принадлежность к контуру ЧЭ или части имитатора (Сп, К, ВхК, ВК, Д), а верхний – порядковый номер контура.

Решение системы уравнений (5) обеспечивает получение зависимости токов от времени. Информативный параметр – эквивалентная индуктивность контура ЧЭ, которая согласно [3-5] также является функцией времени.

$$(6) \quad L_{ЧЭ}(t) = \frac{\Phi(t)}{i_{ЧЭ}(t)}$$

Фиксируя значение индуктивности в заданный момент времени для заданных значений параметров ЧЭ ОВТД в составе кластера и имитатора можно получить семейство ФП – зависимостей индуктивностей ЧЭ от координат смещений торца имитатора, исследовать влияние на ФП топологии размещения ЧЭ ОВТД в составе кластера, электрофизических и геометрических параметров объектов электромагнитного взаимодействия, а также температуры окружающей среды.

Заключение

Разработана новая модель электромагнитного взаимодействия идеализированного ЧЭ с имитатором лопатки, построенная на основе метода КЭ, законов Био-Савара и Кирхгофа. В отличие от существующих в разработанной модели учитываются объем и форма имитатора, повышенная кривизна поверхности спинки и корыта, влияние выступов и дна в торцевой части реально существующих турбинных лопаток. Модель обеспечивает получение зависимости эквивалентной индуктивности ЧЭ, включенного в контур с импульсным питанием, не только от координат смещения имитатора лопатки, электрофизических и геометрических параметров объектов электромагнитного взаимодействия, но и от времени с момента подачи импульса питания.[6]

Список литературы

[1] Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок [Текст] / Под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. – Самара: Самарский НЦ РАН, 2001.– 188с.

[2] Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях [Текст] / под общ. ред. О.П. Скобелева – М.: Машиностроение, 2011.-298с.

[3] Секисов, Ю.Н. Методы и средства измерений многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок [Текст]:Дисс. докт техн. наук: 05.11.16. / Секисов Юрий Николаевич.-Самара,1999.–321 с.

[4] Боровик С.Ю., Модель кластерного одновиткового вихретокового датчика на основе метода конечных элементов [Текст]/ С.Ю.Боровик, Ю.В. Маринина, Ю.Н. Секисов // Вестник СамГТУ, Серия «Технические науки». – 2007. – №1(19). - с.76-83.

[5] Боровик С.Ю. Кластерные методы и системы измерения деформаций статора и координат смещения торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях [Текст] Дис. докт. техн. наук: 05.11.16/ Боровик Сергей Юрьевич - Самара, 2011. – 306 с.

[6] Бондарев, Б.В. Курс общей физики [Текст]: в 3-х т. / Б.В. Бондарев, Калашников Н.П., Спирин Г.Г. – М., Высшая школа, 2003, 438с – 2т.

[7] Афанасьев, Б.П Теория линейных электрических цепей / Б.П.Афанасьев, О.Е.Гольдин. и др. – М., «Высшая школа», 1973 – 592с.

[8] Беленький, Л.Б. Электронный аналог измерительной цепи в виде моста Блумлейна с одновитковыми вихретоковыми датчиками [Текст] / Л.Б.Беленький, О.П.Скобелев // Проблемы управления и моде-

[6] Результаты применения разработанной модели рассматриваются в статье тех же авторов, публикуемой в настоящем сборнике [13].

лирования в сложных системах. Труды XIII Международной конференции. Самара: Самарский НЦ РАН, 2011, с.300-304.
[9] Беленький, Л.Б. Измерительная цепь с одновитковыми вихретоковыми датчиками и приближенным дифференцированием [Текст] / Л.Б.Беленький, О.П.Скобелев //Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIV Международной конференции. Самара: Самарский НЦ РАН, 2012, с.602-606.
[10] Хритин, А.А. Система измерения радиальных зазоров в турбомашинах [Текст]: Дисс. канд. техн. наук: 05.11.16. / Хритин Александр Алексеевич. - Самара, 1993. – 180 с.
[11] ГОСТ 23537-79 Лопатки авиационных осевых компрессоров и турбин. Термины и определения [Текст]. – Москва: Издательство стандартов, 1979. – 33с
[12] Беленький, Л.Б. Методы измерения радиальных и осевых смещений лопаток с уменьшением влияния некоторых мешающих факторов [Текст] / Л.Б.Беленький, М.М.Кутейникова, Б.К.Райков, Ю.Н.Секисов, О.П.Скобелев. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIII Международной конференции. Самара: Самарский НЦ РАН, 2011, с.294-299.
[13] М.М.Кутейникова Результаты моделирования электромагнитного взаимодействия чувствительных элементов одновитковых вихретоковых датчиков в составе кластера с торцом лопатки сложной формы// Проблемы управления и моделирования в сложных системах. [Текст] / М.М.Кутейникова, Ю.Н.Секисов, О.П.Скобелев. // Труды XV Международной конференции. Самара: Самарский НЦ РАН, 2013 (настоящий сборник).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОДНОВИТКОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ В СОСТАВЕ КЛАСТЕРА С ТОРЦОМ ЛОПАТКИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

М.М.Кутейникова, 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

kuteynikova@iccs.ru

тел. +7(846)333-26-77, факс +7(846)333-27-70

***Ключевые слова**: модель электромагнитного взаимодействия, чувствительный элемент, лопатка сложной формы, вычислительные эксперименты, эквивалентная индуктивность, вихревые токи в лопатке, реализуемость метода измерения смещений торцов лопатки, функции преобразования*

Abstract

The article contains the results of computational experiments obtained using model of the electromagnetic interaction between an idealized sensing element (SE) of single-coil eddy current sensor and a simulator of a blade with a complex shape. Experiments included the studies of a transient response - the current changes in a SE circuit with a pulse supply; time dependence of eddy currents in a blade simulator and time dependence of a sensor informative parameter - the equivalent inductance of its SE. In addition, the obtained results are destinated for a confirmation of a working effiency of the cluster method for measuring of radial and axial displacements of blade's tips. This confirmation consists of SE inductance studies that are corresponded with linear displacement of blade's tips, and studies of a SE transfer function set specified with given range of tips radial and axial displacements.

Введение

В работе [1] приведено описание модели электромагнитного взаимодействия идеализированного чувствительного элемента (ЧЭ) одновиткового вихретокового датчика (ОВТД) с имитатором лопатки сложной формы, применяемой в турбинах газотурбинных двигателей (сечения такой лопатки плоскостью, перпендикулярной ее оси, имеет явно выраженную «серповидную», а плоскостью, параллельной, – «U-образную» форму соответственно).

Вместе с тем, в работе [2] предложен кластерный метод измерения радиальных и осевых смещений торцов турбинных лопаток, т.е. y, x – координат смещений в системе отсчета $0XYZ$, начало которой (точка 0) находится на статорной оболочке, ось X параллельна ее оси, ось Y направлена по радиусу, а ось Z соответствует направлению вращения лопаточного колеса. Предложенный метод предусматривает использование распределенного кластера из двух ОВТД, ЧЭ которых размещены таким образом, чтобы электромагнитное взаимодействие осуществлялось с «хвостовой» частью лопатки, а, благодаря развороту обоих ЧЭ ($ЧЭ_1$ и $ЧЭ_2$) относительно оси Z на угол 30 град., в процессе вращения лопаточного колеса обеспечивалось по одному минимальному значению индуктивности $ЧЭ_1$ и $ЧЭ_2$ при их последовательном прохождении каждой лопаткой. Указанные минимумы фиксируются в моменты времени $t_{1\min}$ и

t_{2min}[1]. Можно утверждать, что при равномерном вращении минимальным значениям индуктивности ЧЭ будут соответствовать определенные угловые и, как следствие, линейные z-координаты, причем величины z_{1min} и z_{2min} пропорциональны значениям t_{1min} и t_{2min} соответственно. Это означает, что первым условием реализуемости предложенного метода является наличие одного минимума на каждой из двух зависимостей индуктивности $L_{ЧЭ1}(z)$ и $L_{ЧЭ2}(z)$ при любых значениях искомых координат x и y в заданных диапазонах.

Вторым условием является монотонность функций преобразования (ФП) в семействе, которое представляет собой зависимости минимальных значений индуктивностей от координат x и y ($L_{ЧЭ1}(x,y)$ $L_{ЧЭ2}(x,y)$). Координаты смещений вычисляются путем решения системы из двух уравнений, основу которых составляют указанные ФП, аппроксимируемые, как правило, полиномиальными функциями двух переменных [3].

В настоящей статье приведены результаты вычислительных экспериментов, проведенных с помощью модели электромагнитного взаимодействия идеализированного ЧЭ с имитатором турбинной лопатки [1], которые включают исследования переходной характеристики - изменений тока в контуре ЧЭ во времени при импульсном питании, изменений во времени вихревых токов в имитаторе лопатки и связанных с ними изменениями информативного параметра – эквивалентной индуктивности ЧЭ. Кроме того, приводятся результаты, призванные подтвердить реализуемость кластерного метода измерений радиальных и осевых смещений (координат y и x) [2], и связанные с исследованием зависимостей индуктивностей $ЧЭ_1$, $ЧЭ_2$ от координаты z на наличие в каждой из них по одному минимуму, а также семейства ФП на монотонность в заданных диапазонах изменений искомых координат.

Вычислительные эксперименты

Вычислительные эксперименты по исследованию процессов электромагнитного взаимодействия ЧЭ с имитатором лопатки были выполнены для значений параметров ЧЭ и имитатора, приведенных в таблице 1. Взаимное расположение ЧЭ и имитатора, а также системы отсчета представлены на рисунке 1, что соответствует данным в работе [2]. При этом хорда имитатора повернута на угол 37 град. от оси Z по часовой стрелке (как и хорды реальных лопаток

Таблица 1 – Значения параметров ЧЭ и имитатора лопатки.

Параметры ЧЭ и имитатора	*Значения параметров*
Ширина контура ЧЭ (длина ЧЭ)	8 мм
Длина контура ЧЭ	7 мм
Сопротивление контура ЧЭ	0,004 Ом
Длина хорды лопатки	36 мм
Высота спинки (Сп)	7,5 мм
Высота корыта (К)	4,5 мм
Длина пера	10 мм
Ширина входной кромки (ВхК)	4 мм
Ширина выходной кромки (ВК)	3 мм
Число разбиений на КЭ по длине пера (m)	10
Число разбиений на КЭ по ширине спинки и корыта (n)	36
Число разбиений на КЭ по ширине выходной кромки (p)	2
Число разбиений на КЭ по ширине входной кромки (k)	2
Число разбиений на КЭ по ширине дна (d)	2
Удельное сопротивление (ρ) материала лопатки (нержавеющая сталь)	$0{,}6\cdot10^{-6}$ Ом·м

[1] Следует подчеркнуть, что выбор места размещения ЧЭ в совокупности с разворотом позволяют избежать эффект «двоения» минимумов, связанный с «U-образным» профилем и наличием двух выступов в торцевой части турбинной лопатки [1].

рабочего колеса турбины, значения параметров которых соответствуют приведенным в таблице 1). В расчетах, связанных с получением временных зависимостей токов и эквивалентной индуктивности, положение середины выходной кромки (ВК) имитатора было выбрано в центре ЧЭ$_1$ (x=1 мм, y=0.5 мм, z=0 мм). Следует отметить, что при заданных и неизменных значениях параметров ЧЭ и имитатора коэффициенты C в модели [1] являются собственными индуктивностями контуров. Это позволяет найти постоянную времени контура ЧЭ и выбрать временной шаг для вычисления изменений $L_{ЧЭ}(t)$ (постоянная времени составляет 0,925 мкс, а шаг выбран равным 0,1 нс).

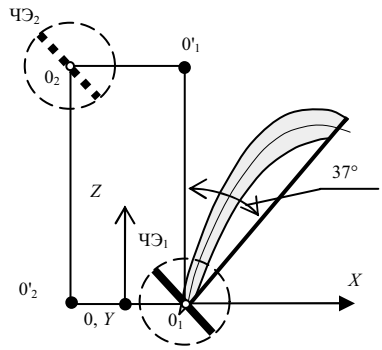


Рисунок 1 – Взаимное расположение ЧЭ и имитатора, а также система отсчета

Характер временных зависимостей тока контура ЧЭ (его переходная характеристика) и токов контуров имитатора аналогичен приведенным в работах [3-6] зависимостям. Ток контура ЧЭ близок к экспоненциально-нарастающей зависимости[2] (рисунок 2,а). Что касается вихревых токов контуров имитатора, то они нарастают в начале переходного процесса, а затем уменьшаются до нуля[3], определяя характер изменения эквивалентной индуктивности контура ЧЭ во времени (рисунок 2,б). Эти изменения ($L_{ЧЭ}(t)$) представлены на ри-

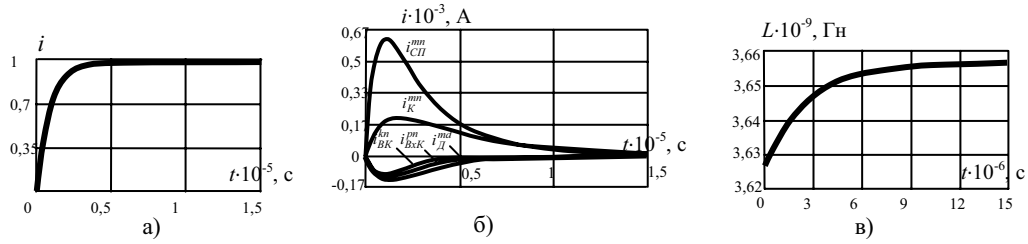


Рисунок 2 – Временные зависимости нормированных токов контуров ЧЭ (а) и нескольких КЭ имитатора (б), а также эквивалентной индуктивности контура ЧЭ (в)

сунке 2,*в*: в начале переходного процесса индуктивность минимальна, но после затухания вихревых токов в имитаторе она возрастает и становится равной собственной индуктивности контура ЧЭ. При этом начальные изменения индуктивности определяют ее информативное содержание, связанное с положением лопатки относительно ЧЭ. Поэтому для таких измерений целесообразно использовать значение $L_{ЧЭ}$, максимально приближенное к началу переходного процесса в контуре ЧЭ. Обычно это время не превышает $0{,}2\cdot10^{-6}$ с.

Рисунок 3 иллюстрирует получение искомых функций $L_{ЧЭ1}(z)$ и $L_{ЧЭ2}(z)$ в предположении, что ЧЭ$_1$ является рабочим, а ЧЭ$_2$ – компенсационным (а) и в предположении, что рабочим является ЧЭ$_2$, а компенсационным – ЧЭ$_1$(б), причем координаты центров ЧЭ$_1$ (точка 0_1) и ЧЭ$_2$ (точка 0_2) по оси X составляет +1 и -1 мм соответственно. Расчет функций $L_{чэ1}(z)$ и $L_{чэ2}(z)$ производится для трех значений координаты x (-1; 0; +1мм) при y=0.5 мм (на рисунке 3 показаны перемещения имитатора по оси Z при x=0 (что соответствует положению геометрического центра (г.ц.) и виртуального геометрического центра (в.г.ц.) на оси Z)). Угол разворота ЧЭ составляет 30° против часовой стрелки. Результаты вычислительных экспериментов представлены на рисунке 4. Они подтверждают наличие единственного минимума на каждой из зави-

[2]Отклонение от экспоненциальной зависимости $i_{ЧЭ}(t)$ незначительно и связано с влиянием вихревых токов контуров имитатора, величина которых на несколько порядков меньше тока контура ЧЭ.

[3] Расшифровка верхних и нижних индексов токов приведена в таблице 1.

симостей в семействах $L_{ЧЭ1}(z)$ и $L_{ЧЭ2}(z)$. Аналогичные результаты наблюдаются и при увеличении угла разворота ЧЭ$_1$ и ЧЭ$_2$ до 60 град., но величина минимального значения индуктивности увеличивается, что отрицательно влияет на чувствительность ОВТД к изменениям координат x и y. С уменьшением угла разворота ЧЭ все сильнее проявляется второй минимум.

Далее приводятся результаты вычислительных экспериментов, связанных с получением семейств ФП ЧЭ$_1$ и ЧЭ$_2$ ($L_{ЧЭ1}(x,y)$ и $L_{ЧЭ2}(x,y)$). Размещение центров ЧЭ$_1$ и ЧЭ$_2$ на оси X представлено на рисунке 5 и соответствует рисунку 3 (+1 и -1 мм). Кроме того, рисунок 5 иллюстрирует смещение имитатора по оси X в диапазоне ±1 мм.

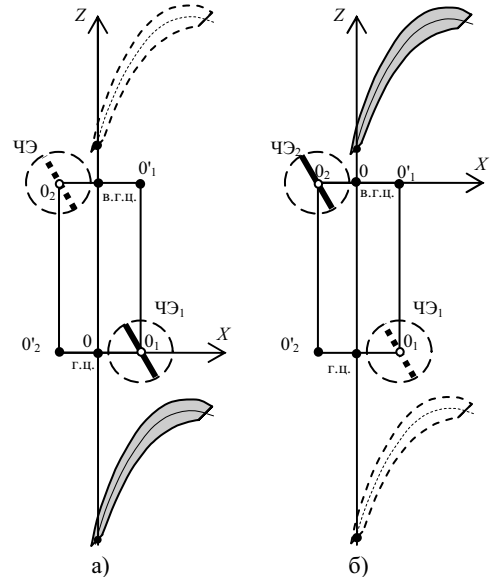


Рисунок 3 – Смещение имитатора по оси Z относительно рабочих ЧЭ – ЧЭ$_1$(а), ЧЭ$_2$(б)

Результаты вычислений представлены как семейства ФП $L_{ЧЭ1}(x)$ при y=const и $L_{ЧЭ1}(y)$ при x=const (рисунок 6,*а*), а также $L_{ЧЭ2}(x)$ при y=const и $L_{ЧЭ2}(y)$ при x=const (рисунок 6,*б*), при этом диапазон изменений x составляет от -1 до 1 мм, а диапазон изменений y от 0,5 до 1,5 мм. В указанных диапазонах изменений x и y наблюдаются монотонные зависимости индуктивностей ЧЭ$_1$ и ЧЭ$_2$ от координат смещений x и y.

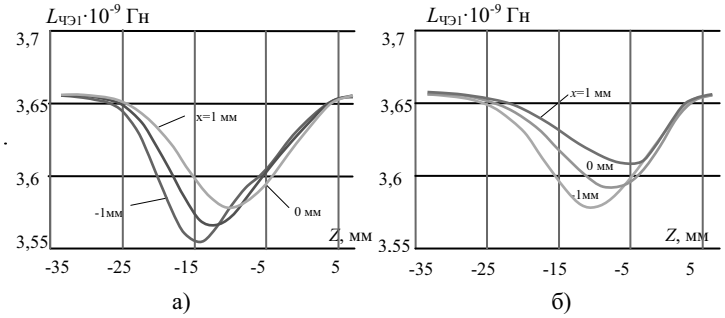
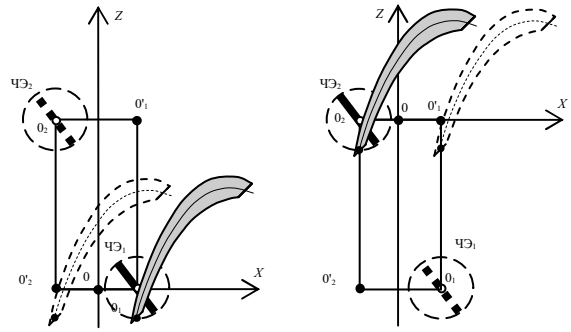


Рисунок 4 – Семейства $L_{ЧЭ1}(z)$ (а) и $L_{ЧЭ2}(z)$ (б) при угловом положении ЧЭ = 30° относительно оси Z

Полученные ФП ЧЭ$_1$ и ЧЭ$_2$ по определению являются независимыми уравнениями двух переменных – x и y. Путем последующих линейных (в первом приближении) преобразований в ОВТД и измерительной цепи они трансформируются в систему из двух уравнений, каждое из которых представляет собой зависимости цифрового кода от координат смещения x и y, сохраняющих характер изменения индуктивности ЧЭ$_1$ и ЧЭ$_2$ в том же диапазоне изменения координат смещений. Независимость уравнений в системе и монотонность ФП (при аппроксимации ФП полиномиальными функциями двух переменных [3]) гарантирует ее решение и реализуемость предлагаемого в работе [2] кластерного метода.



а) б)

Рисунок 5 – Смещение имитатора по оси X относительно рабочих ЧЭ$_1$ (а) и ЧЭ$_2$(б)

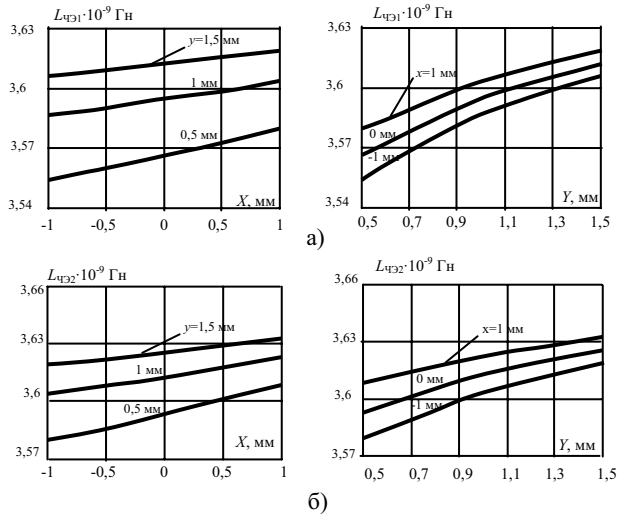


Рисунок 6 – Семейство ФП ЧЭ$_1$ (а) и ЧЭ$_2$ (б)

Заключение

С помощью модели электромагнитного взаимодействия идеализированного ЧЭ с имитатором турбинной лопатки проведена серия вычислительных экспериментов, в ходе которых исследованы переходная характеристика контура ЧЭ (изменения тока контура во времени при импульсном питании), вихревые токи в конечных элементах спинки, корыта и других частях лопатки, изменения во времени информативного параметра – эквивалентной индуктивности ЧЭ. Показано, что вихревые токи в лопатке в начале переходного процесса возрастают, а затем затухают до нуля, оказывая влияние на переходную характеристику и вызывая изменения во времени эквивалентной индуктивности. При этом наибольшие изменения индуктивности наблюдаются в самом начале переходного процесса, где индуктивность минимальна и монотонно возрастает в ходе переходного процесса (полученные результаты не противоречат результатам исследований с имитаторами лопатки в виде плоских прямоугольных пластин исчезающе малой толщины [3-6]).

Кроме того исследованы зависимости индуктивностей $ЧЭ_1$ и $ЧЭ_2$ от координаты z и показано, что на каждой из них имеется только один минимум, а исследование семейства ФП показало их монотонность в заданных диапазонах изменений координат x и y. Последние результаты подтверждают реализуемость кластерного метода измерения радиальных и осевых смещений торцов турбинных лопаток [2].

Список литературы

[1] Кутейникова М.М. Модель электромагнитного взаимодействия идеализированного чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика с лопаткой сложной формы [Текст] / М.М.Кутейникова, Ю.Н.Секисов, О.П.Скобелев. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. // Труды XV Международной конференции, 2013 (настоящий сборник)

[2] Беленький, Л.Б. Методы измерения радиальных и осевых смещений лопаток с уменьшением влияния некоторых мешающих факторов [Текст] / Л.Б.Беленький, М.М.Кутейникова, Б.К.Райков, Ю.Н.Секисов, О.П.Скобелев. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIII Международной конференции. Самара: Самарский НЦ РАН, 2011, с.294-299.

[3] Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях [Текст] / под общ. ред. О.П. Скобелева – М.: Машиностроение, 2011.-298с.

[4] Секисов, Ю.Н. Методы и средства измерений многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок [Текст]: Дисс. докт. техн. наук: 05.11.16. / Секисов Юрий Николаевич. - Самара, 1999. – 321 с.

[5] Боровик С.Ю., Модель кластерного одновиткового вихретокового датчика на основе метода конечных элементов [Текст]/ С.Ю.Боровик, Ю.В. Маринина, Ю.Н. Секисов // Вестник СамГТУ, Серия «Технические науки». – 2007. – №1(19). - с.76-83.

[6] Боровик С.Ю. Кластерные методы и системы измерения деформаций статора и координат смещения торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях [Текст] Дис. докт. техн. наук: 05.11.16/ Боровик Сергей Юрьевич - Самара, 2011. – 306 с.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИНДУКТИВНОСТЕЙ ОДНОВИТКОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ В ЦИФРОВОЙ КОД

Л.Б. Беленький, А.В. Логвинов, О.П. Скобелев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук

443020, Самара, Садовая, 61, Россия

belenki@iccs.ru

тел.: +7(846)333-26-77, факс:+7(846)333-27-70

Ключевые слова: *преобразователь индуктивностей, одновитковые вихретоковые датчики, распределенный кластер, приближенное дифференцирование, измерительная цепь, измерение радиальных и осевых смещений, лопатка сложной формы*

Abstract

The description of the converter inductance single-coil eddy current sensors in a digital code, which was built on the basis of the measurement circuit that implements the method of the first derivative with the approximate differentiation, is given. The converter provides for presence in measuring circuit two sensors that are part of a distributed cluster and use the ADC on its output. Transducer is focused on the application in a system designed to measure the radial and axial displacements of the tips of the blades of complex shape.

Введение

Известно, что наиболее эффективное преобразование индуктивности одновиткового вихретокового датчика (ОВТД) обеспечивает так называемый метод первой производной (МПП), что связано с возможностями получения наибольшей чувствительности к перемещениям электропроводного объекта (в частности, торцевой части лопатки компрессора или турбины), малой длительности преобразования (до сотых долей микросекунды) и уменьшения влияния омического сопротивления (например, от изменений температуры в широких пределах). При этом предполагается, что первая производная тока (или напряжения) в измерительной цепи (ИЦ) фиксируется в начале переходного процесса, возбуждаемого импульсом питания [1, 2].

На сегодняшний день существуют несколько разновидностей ИЦ, в которых использован МПП. Первая из них содержит мост Блумлейна с импульсным питанием, включающий ОВТД и катушки индуктивности с тесной магнитной связью, осуществляющие дифференцирование токов в датчиках [3]. Вторая разновидность – это обычная мостовая схема, в плечи которой помимо ОВТД включены резисторы. Выходное напряжение моста подается на дифференцирующий усилитель, и максимум его производной фиксируется в запоминающем устройстве (ЗУ) [1, 2] (аналогичное ЗУ применяется и в первой разновидности ИЦ). В работе [4] производится анализ достоинств и недостатков обеих разновидностей ИЦ и предлагается новая (третья) разновидность, названная авторами “электронным аналогом моста Блумлейна”, в которой резисторы отсутствуют, а токи в ОВТД поступают непосредственно на входы преобразователей ток – напряжение (ПТН), а выходное напряжение обоих ПТН дифференцируется и запоминается аналогично второй разновидности. И, наконец, последний вариант ИЦ [5], как и предыдущий, содержит ПТН, но вместо дифференцирующего используется масштабирующий усилитель (МУс), который в сочетании с импульсным источником питания малой длительности обеспечивает приближенное дифференцирование напряжений, соответствующих токам в датчиках.

Преимущества этого варианта подтверждают результаты вычислительных экспериментов на моделях ИЦ. Вместе с тем, в указанной публикации отсутствуют какие-либо сведения о реализациях предложенной разновидности ИЦ и конкретных примерах ее применения.

В настоящей статье устраняется существующий пробел – приводится описание преобразователя индуктивностей ОВТД в цифровой код, построенного на основе ИЦ с приближенным дифференцированием. Преобразователь предусматривает включение в ИЦ двух ОВТД, которые входят в состав распределенного кластера (РК), и использование АЦП на выходе ИЦ. Преобразователь ориентирован на применение в системе, предназначенной для измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы (в соответствии с методом, изложенным в работе [6]).

Описание преобразователя

В ИЦ преобразователя (ПР) включены два датчика РК – $ОВТД_1$ и $ОВТД_2$, каждый из которых на рисунке 1 представлен чувствительными элементами в виде отрезка проводника ($ЧЭ_1$ и $ЧЭ_2$), а также согласующими трансформаторами ($СТ_1$ и $СТ_2$) [1, 2]. Кроме того, в состав ИЦ входит линия связи (ЛС) (длиной до 0.5 м в зависимости от условий применения), два ПТН ($ПТН_1$ и $_{ПТН2}$), МУс и АЦП. В дополнение к перечисленным элементам ИЦ в состав ПР входят два ключа на униполярных транзисторах ($К_1$ и $К_2$) с резисторами ($R_{РС1}$ и $R_{РС2}$) для рассеивания энергии в разомкнутом состоянии ключей, формирователь (Ф), а также блок питания (БП).

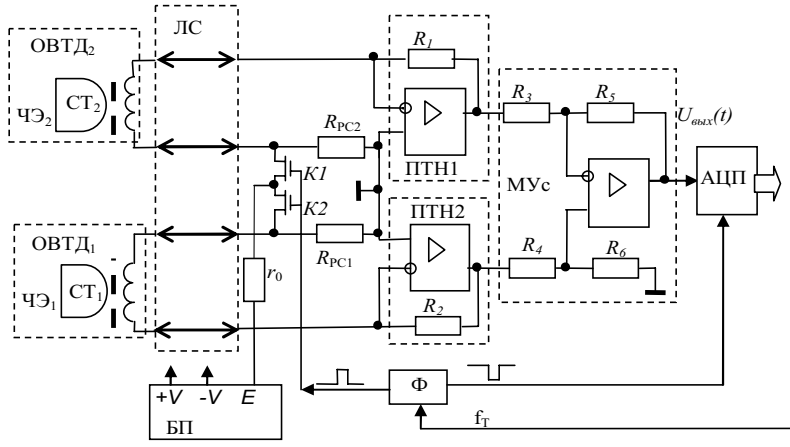


Рисунок 1 - Преобразователь индуктивностей ОВТД в цифровой код.

Формирователь Ф по сигналам тактовой частоты fT, получаемым извне от системы измерения, вырабатывает импульсы строго постоянной длительности (Δt) и необходимого уровня, управляющие ключами К1 и К2 (транзисторы FDG6306P).

На другом его выходе формируются импульсы логического уровня для управления запуском АЦП. В результате на оба ОВТД РК подается стабилизированное напряжение питания Е от БП только на время Δt, т.е. формируется импульсное питание ИЦ. БП также обеспечивает напряжения питания +V и –V для остальных элементов ПР.

Следует отметить, что применение двух ключей (К1 и К2) обусловлено необходимостью развязки входов ПТН1и ПТН2 друг от друга.

Если предположить, что ОВТД в составе РК используются для измерения смещений торцов лопатки в процессе вращения лопаточного колеса, то при прохождении выбранной лопаткой ЧЭ1 и ЧЭ2 будут наблюдаться уменьшения индуктивностей обоих ЧЭ – $L_{ЧЭ1}$ и $L_{ЧЭ2}$ (эпю-

ры 1 и 2, рисунок 2). При этом функцию рабочего сначала выполняет ЧЭ$_1$ (ОВТД$_1$), а компенсационного ЧЭ$_2$ (ОВТД$_2$), и затем их функции меняются на противоположные.

При импульсном питании с постоянной частотой (до 1 МГц) и длительностью импульса $\Delta t = 0.2$ мкс (эпюра 3) токи в ЧЭ и первичных обмотках СТ ОВТД изменяются практически по линейному закону (начало апериодического переходного процесса). Также изменяется напряжение на выходах ПТН (входах МУс). Поэтому усиленное напряжение на выходе МУс имеет пилообразную форму, а его амплитудные значения модулируют изменения индуктивностей ЧЭ1 и ЧЭ2 (эпюра 4). Выходное напряжение МУс, соответствующее приближенному значению производной тока в рабочем датчике в начале переходного процесса, зависит от изменений индуктивностей ЧЭ1 и ЧЭ2 (эпюра 4).

Выходное напряжение МУс (UМУс) поступает на вход конвейерного АЦП AD9200 [7] (ПТН и МУС собраны на ОУ AD8056). С окончанием импульса питания его задний фронт запускает процесс аналого-цифрового преобразования, начинающийся с операции выборки – хранения, которую осуществляет первый каскад АЦП. Всего последовательных каскадов преобразования в АЦП - четыре, причем каждый этап преобразования начинается с новым тактовым импульсом при одновременной работе всех каскадов. Поэтому результат первого преобразования в виде десятиразрядного параллельного кода появится через 4Т, где Т – период следования тактовых импульсов, а результаты последующих преобразований – один раз за период Т, однако, каждый из них задержан по отношению к моменту начала преобразования на 4Т.

На рисунке 3 представлен внешний вид ПР, встроенного в ЛС, с двумя ОВТД, предназначенными для работы в турбинах газотурбинного двигателя.

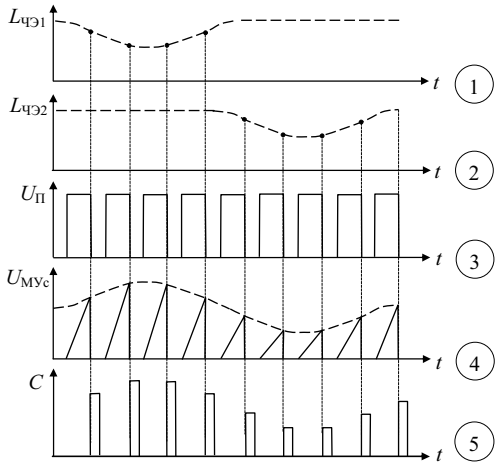


Рисунок 2 – Временные диаграммы.

Рисунок 3 – Внешний вид ПР с датчиками.

Заключение

Разработан и изготовлен ПР на основе ИЦ, которая включает ОВТД с кратковременным импульсным питанием, ПТН и МУс, обеспечивающие линейно нарастающее напряжение на выходе МУс с амплитудой, соответствующей приближенному значению производной тока в рабочем датчике в начале переходного процесса. С помощью АЦП в составе ПР амплитудное значение напряжения преобразуется в цифровой код.

Работоспособность и метрологическая состоятельность ПР была подтверждена в процессе экспериментальных исследований действующего макета системы измерения радиальных и

осевых смещений торцов лопаток сложной формы, в составе технических средств которой использовался ПР индуктивностей ОВТД РК [8].

Суммарная погрешность измерения наиболее значимых радиальных смещений (они определяют величину радиального зазора между торцами лопаток и статором), которая включает погрешности ПР и алгоритмические погрешности, связанные с обработкой, не превышают 2.5%. При этом случайная составляющая погрешности (она оценивалась по СКО) – не более 0.5%.

Список литературы

[1] Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок [Текст] / Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Беленький Л.Б. [и др.]; под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2001. – 188с.

[2] Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях [Текст] / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, Б.К. Райков [и др.]; под общ. ред. Скобелева О.П. – М.: Машиностроение, 2011. – 298с.

[3] Хритин, А.А. [Текст]: Дисс. канд. техн. наук Система измерения радиальных зазоров в турбомашинах: дисс. канд. техн. наук: 05.11.16./ Хритин Александр Алексеевич. - Самара, 1993. – 180 с.

[4] Беленький, Л.Б. Электронный аналог измерительной цепи в виде моста Блумлейна с одновитковыми вихретоковыми датчиками [Текст] / Беленький Л.Б., О.П.Скобелев. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIII Международной конференции. (15 - 17 июня 2011 г. Самара, Россия). - Самара: Изд-во Самарский НЦ РАН. – 2011. - С. 300-304.

[5] Беленький, Л.Б. Измерительная цепь с одновитковыми вихретоковыми датчиками и приближенным дифференцированием [Текст] / Беленький Л.Б., О.П.Скобелев. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIV Международной конференции (19 - 22 июня 2012 г., Самара, Россия). - Самара: Изд-во Самарский НЦ РАН. – 2012. - С. 602-606.

[6] Беленький, Л.Б. Кластерный метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток с уменьшением влияния некоторых мешающих факторов [Текст] / Беленький Л.Б., Кутейникова М.М., Райков Б.К. [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIV Международной конференции (15 – 17 июня 2011 г., Самара, Россия). - Самара: Изд-во Самарский НЦ РАН. – 2011. - С. 294-299.

[7] Complete 10-bit, 20 MSPS A/D Converter AD9200 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http:// www.analog.com/static/imported-files/Data_Sheets/AD9200.pdf, свободный. – Яз.: англ.

[8] Беленький, Л.Б. Экспериментальные исследования работоспособности и метрологической состоятельности действующего макета системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и скорости вращения лопаточного колеса [Текст] / Л.Б. Беленький, В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV международной конференции. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2013 (настоящий сборник).

АЛГОРИТМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОДОВ В СИСТЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Белопухов В.Н., Боровик С.Ю.

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, предварительная обработка данных, алгоритм*

Abstract

The description of the algorithm for preliminary codes processing in the system for measuring of radial and axial displacements of turbine blades with complex shapes of modern gas-turbine engines is given. The algorithm provides data compression in the channel with distributed cluster of two single-coil eddy-current sensors and data transmission on upper level in PC.

В работе [1] рассматриваются технические средства и программное обеспечение (ПО) системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы, применяемых в турбинах современных газотурбинных двигателей (ГТД). Там же отмечается, что в ПО системы реализована двухуровневая обработка измерительной информации. На нижнем уровне (в микроконтроллере STM32F100RBT6B [2]) производится предварительная обработка результатов аналого-цифрового преобразования выходных сигналов преобразователя индуктивностей одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) в составе распределенного кластера (РК) из двух ОВТД и передача данных на верхний уровень в ПЭВМ. На верхнем уровне осуществляется поиск экстремальных значений кода, соответствующих моментам прохождения торцами контролируемых лопаток геометрических центров чувствительных элементов ОВТД [3], расчет x, y-координат смещений торцов лопаток [4], а также отображение и архивирование полученных результатов. Ниже приводится описание алгоритма предварительной обработки измерительной информации, реализуемого в ПО нижнего уровня, целью которого является анализ массива (потока) с результатами опроса измерительного канала системы, выделение полезных сигналов, а также устранение избыточности (сжатие данных).

В качестве источника входной информации для алгоритма выступают цифровые коды на выходе преобразователя индуктивностей $ОВТД_1$ и $ОВТД_2$, включенных по дифференциальной схеме [1]. На рисунке 1 представлена временная зависимость кода АЦП $C(t)$ при прохождении лопатками зон чувствительности обоих датчиков, которая соответствуют изменениям индуктивностей $ОВТД_1$ и $ОВТД_2$ при вращении лопаточного колеса. Особенностями $C(t)$ является наличие постоянной составляющей в середине диапазона, соответствующей состоянию баланса измерительной цепи (ИЦ), противофазность и разновременность изменений кодов при прохождении торцами контролируемых лопаток под чувствительными элементами $ОВТД_1$ и $ОВТД_2$ (это связано с использованием РК датчиков и дифференциальной ИЦ), а также зашумленность сигнала.

Работа алгоритма начинается с измерения величины постоянной составляющей сигнала C_0 и оценки уровня шума. Операция выполняется при отсутствии лопаток в зонах чувствительности обоих датчиков. На основе тестовой выборки кодов сигнала $\{C_k, k = 1, N\}$ достаточ-

ного объема последовательно определяются среднее значение по выборке и среднее квадратичное отклонение (СКО) шумовой составляющей. Среднее значение по выборке является оценкой постоянной составляющей C_0, а на основе СКО определяются пороговые уровни для выделения полезных сигналов соответственно ОВТД$_1$ и ОВТД$_2$ (C_0–Δ и C_0+Δ). Величина зоны дискриминации (2Δ) выбирается на основе гипотезы о плотности распределения шума.

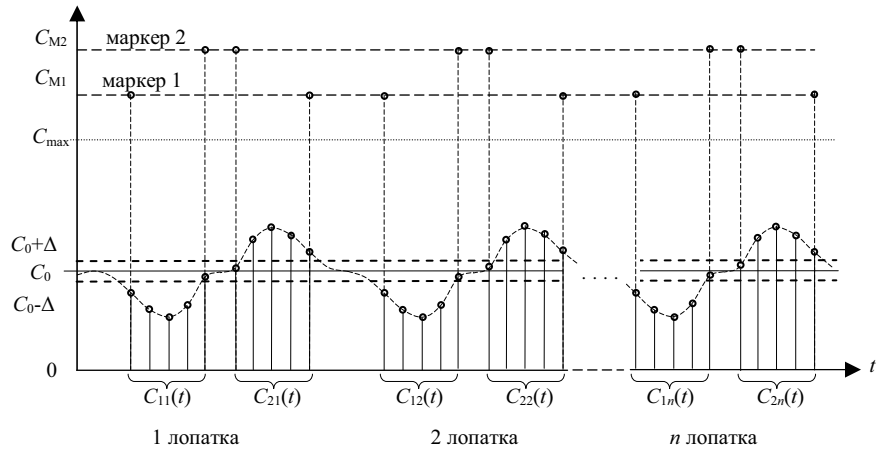


Рисунок 5.3 - Изменения кодов АЦП во времени

В рабочем цикле измерения выполняется сжатие данных путем их пороговой отбраковки на потоке с сохранением в буферной памяти лишь отрезков массива, содержащих полезную информацию о сигналах датчиков с числом отсчетов (k_{1n}+k_{2n}) для каждой лопатки с текущим номером n. Таким образом, для сохранения информации о радиальных и осевых смещениях торцов всех $n_л$ лопаток рабочего колеса за полный оборот ротора необходима буферная память для $\sum_{n=1}^{n_л}(k_{1n}+k_{2n})$ элементов массива цифровых кодов C_k. После заполнения заданного объема памяти данные передаются в ПЭВМ верхнего уровня для дальнейшей обработки.

Для корректного разделения элементов передаваемого массива в него встроены маркеры-разделители как между выборками кодов, соответствующими прохождению соседними лопатками РК датчиков, так и между выборками «противофазных» кодов, соответствующих прохождению одной и той же лопатки под чувствительными элементами каждого из датчиков в составе РК (ОВТД$_1$ и ОВТД$_2$). В качестве механизма для встраивания маркеров в алгоритме используются незаполненные старшие разряды кодовых слов. Так, например, 10-ти разрядные выходные данные АЦП сохраняются в 16-ти разрядном слове, а добавление единиц в оставшихся старших разрядах позволяет маркировать признаки, сопутствующие коду. На рисунке 1 маркерам соответствуют уровни кодов C_{M1} и C_{M2}.

На рисунке 2 приведена блок-схема алгоритма сбора и первичной обработки измерительной информации о радиальных и осевых смещениях торцов лопаток для случая, когда в РК первым по ходу вращения лопатка пробегает датчик ОВТД$_1$, а затем ОВТД$_2$. При этом спаренные маркеры C_{M1} разделяют выборки кодов между соседними лопатками, а маркеры C_{M2} являются разделителями для выборок кодов, соответствующих прохождению контролируемой лопатки под чувствительным элементом ОВТД$_1$ или ОВТД$_2$. Обработка кодов, поступающих в потоке с дискретностью по времени Δt, ($c[i]=C(i\cdot\Delta t)$) осуществляется в реальном масштабе времени.

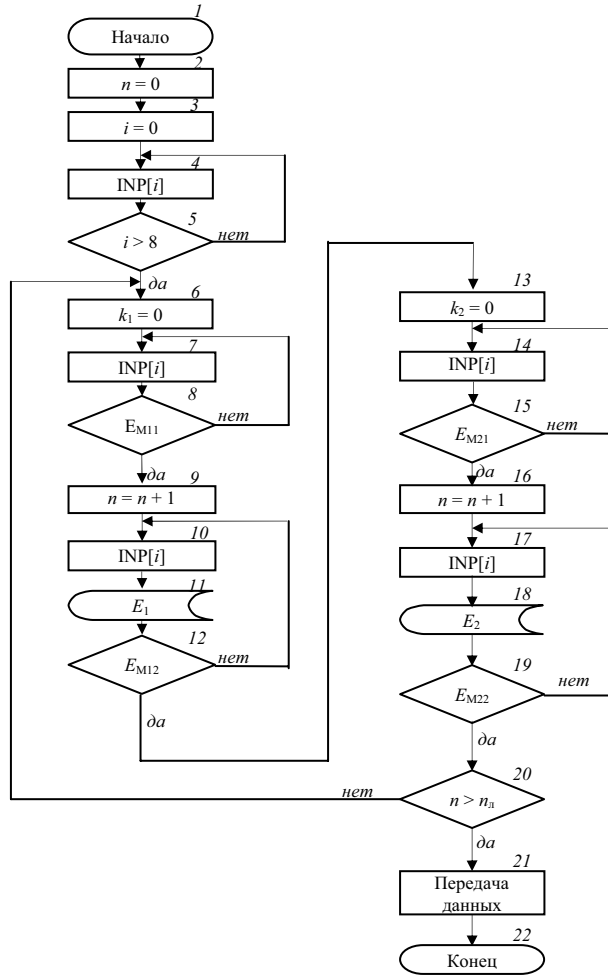


Рисунок 2 - Блок-схема алгоритма предварительной обработки

Далее алгоритм рассматривается путем описания событий и логических выражений над ними.

Представим внешнее событие INP[i], возникающее периодически с интервалом времени Δt и вызывающее операции синхронного ввода очередного цифрового кода, в виде:

$$(1)\quad \mathrm{INP}[i] \rightarrow \{i = i + 1;\ c[i] = C(i \cdot \Delta t)\}.$$

Пусть E_1 - событие, заключающееся в том, что отсчет входного потока $c[i]$, является сигналом ОВТД$_1$. При этом $c[i]$ сохраняется в буферной памяти как элемента массива $C_1[k, n]$, где k – порядковый номер отсчета в выборке полезного сигнала для лопатки с номером n. Событие E_2 – аналогично по смыслу для сигнала ОВТД$_2$. Эти события можно записать в виде:

$$(2)\quad \begin{aligned} E_1 &\rightarrow \{k_1 = k_1 + 1;\ C_1(k_1, n) = c[i]\} \\ E_2 &\rightarrow \{k_2 = k_2 + 1;\ C_2(k_2, n) = c[i]\}. \end{aligned}$$

Маркирование начала и конца каждой выборки для каналов ОВТД$_1$ и ОВТД$_2$ соответствует следующим событиям и операциям при их наступлении:

$$
\begin{aligned}
&E_{M11} \to \{C_1(0,n) = C_{M1}\},\\
&E_{M12} \to \{C_1(k_1,n) = C_{M2}\},\\
&E_{M21} \to \{C2(0,n) = C_{M2}\},\\
&E_{M22} \to \{C_2(k_2,n) = C_{M1}\}.
\end{aligned} \tag{3}
$$

Определяется также полная группа событий, связанных с пороговой обработкой:

$$
\begin{aligned}
&D_1[i] \to \{c[i] \le C_0 - \Delta\},\\
&D_2[i] \to \{c[i] \ge C_0 + \Delta\},\\
&D_0[i] \to \{C_0 - \Delta < c[i] < C_0 + \Delta\}.
\end{aligned} \tag{4}
$$

На основе множества указанных выше событий (высказываний) можно построить группу логических функций, которая определит основные решающие правила для алгоритма предварительной обработки:

$$
\begin{aligned}
&E_{M11} = D_0[i-2] \,\&\, D_1[i-1] \,\&\, D_1[i],\\
&E_{M12} = D_1[i-2] \,\&\, D_0[i-1] \,\&\, D_0[i],\\
&E_{M21} = D_0[i-2] \,\&\, D_2[i-1] \,\&\, D_2[i],\\
&E_{M22} = D_2[i-2] \,\&\, D_0[i-1] \,\&\, D_0[i].
\end{aligned} \tag{5}
$$

В итоге, процесс предварительной обработки данных (сжатия и разделения входного потока на два канала) сводится к упорядоченному изменению целых переменных *i*, *k*, *n* и проверке истинности логических выражений (1-5).

Список литературы

[1] Беленький, Л.Б. Технические средства и программное обеспечение системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и скорости вращения лопаточного колеса [Текст] / Л.Б. Беленький, В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2013 (настоящий сборник).

[2] STM32VLDISCOVERY [Электронный ресурс] –Режим доступа: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/CD00277245.pdf, свободный. –Яз.: англ.

[3] Белопухов, В.Н. Алгоритм поиска экстремальных значений кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений лопаток сложной формы [Текст] / В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV международной конференции. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2013 (настоящий сборник).

[4] Кутейникова, М.М. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток [Текст] / М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XII международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2010. -С.323-327.

АЛГОРИТМ ПОИСКА ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОДОВ В СИСТЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ЛОПАТОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Белопухов В.Н., Боровик С.Ю.

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, глобальные и локальные экстремумы, алгоритм поиска экстремумов*

Abstract

The description of the algorithm 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 is given. The algorithm is based on polynomial approximation of initial codes array and extremum seeking of received polynomial function.

В работе [1] отмечается, что программное обеспечение (ПО) системы измерения радиальных и осевых смещений торцов турбинных лопаток сложной формы имеет двухуровневую структуру. На нижнем уровне осуществляется преобразование сигналов датчиков в цифровой код, предварительная обработка данных [2] и измерение скорости вращения лопаточного колеса [3] (последняя операция происходит параллельно с двумя первыми). Остальные операции - вычисление экстремальных значений кодов, соответствующих моментам прохождения контролируемыми торцами лопаток геометрических центров чувствительных элементов одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) в составе распределенного кластера (РК), а также расчет физических значений искомых координат смещений торцов лопаток в радиальном и осевом направлении, производятся последовательно на верхнем уровне (в ПЭВМ). В статье рассматривается часть алгоритмического обеспечения ПО верхнего уровня, связанная с поиском экстремальных значений кодов в измерительном канале системы с включенным в него РК из двух ОВТД (ОВТД$_1$ и ОВТД$_2$) [1].

В соответствие с алгоритмом вычисление экстремальных значений кодов C_1 и C_2, соответствующих максимальным или минимальным значениям выходного напряжения измерительной цеп)и (ИЦ с включенными в неё ОВТД$_1$ и ОВТД$_2$, осуществляется в два этапа. На первом проводится аппроксимация полученных после предварительной обработки выборок кодов в каналах ОВТД$_1$ и ОВТД$_2$. На втором этапе локализуются глобальные экстремумы полученной полиномиальной функции одной переменной и производится уточнение значений переменной и функции в точке экстремума.

Аппроксимация экспериментальных данных осуществляется с помощью интерполяционных многочленов по методу наименьших квадратов (МНК). Используется система ортогональных полиномов Чебышева I рода, которая, в отличие от классической реализации МНК, обладает лучшей обусловленностью при больших степенях полиномов n и позволяет сократить вычислительные затраты на этапе выбора наилучшего аппроксимирующего полинома,

т.к. не требует полного пересчета всех коэффициентов при переходе от полинома степени k к полиному степени $(k+1)$ [1] [4].

Для полиномов Чебышева дискретной переменной известна двухслойная рекуррентная формула, по которой можно вычислить многочлен любой степени через начальные полиномы $\varphi_0(C_j)$ и $\varphi_1(C_j)$ [4-6]:

$$(1)\quad \begin{cases} \varphi_0(C_j) = 1; \\ \varphi_1(C_j) = C_j - \dfrac{1}{N}\sum\limits_{i=1}^{N} C_i; \\ \varphi_{k+1}(C_j) = (C_j - \beta_{k+1})\varphi_k(C_j) - \gamma_{k+1}\varphi_{k-1}(C_j), \quad k > 1, \end{cases}$$

где N – число точек интерполяции; $\varphi_k(C_j)$ – ортогональный полином Чебышева дискретной переменной C_j степени k; β_{k+1}, γ_{k+1} – коэффициенты, вычисляемые по формулам:

$$(2)\quad \beta_{k+1} = \frac{\sum\limits_{j=1}^{N} C_j \varphi_k^2(C_j)}{\sum\limits_{j=1}^{N} \varphi_k^2(C_j)}, \quad \gamma_{k+1} = \frac{\sum\limits_{j=1}^{N} \varphi_k^2(C_j)}{\sum\limits_{j=1}^{N} \varphi_{k-1}^2(C_j)}.$$

Аппроксимирующая функция $\Phi(C_j)$ определяется в виде линейной комбинации базисных функций, в качестве которых берутся полиномы Чебышева дискретной переменной $\varphi_i(C_j)$:

$$(3)\quad \Phi(C_j) = \sum_{i=0}^{k} m_i \varphi_i(C_j),$$

где m_i – коэффициенты, вычисляемые по формуле:

$$(4)\quad m_i = \frac{\sum\limits_{j=1}^{N} f(C_j)\varphi_i(C_j)}{\sum\limits_{j=1}^{N} \varphi_i^2(C_j)}.$$

Поиск наилучшего приближения осуществляется путем последовательного увеличения степени аппроксимирующего полинома $\Phi(C_j)$ и анализа остаточной дисперсии σ^2 [5]:

$$(5)\quad \sigma^2 = \frac{1}{N-k-1}\sum_{j=1}^{N} (f(C_j) - \Phi(C_j))^2 .$$

Наилучшим выбирается полином, при котором остаточная дисперсия минимальна.

Учитывая, что при оценивании неизвестных параметров по МНК выражение (3) и алгебраический полином степени k эквивалентны [5], то после нахождения наилучшего приближения с помощью функции $\Phi(C_j)$ (3), последняя может быть преобразована в традиционный степенной полином вида:

$$(6)\quad P(C_j) = \sum_{i=0}^{k} a_i^{(k-i+1)} C_j^i,$$

где $a_i^{(k-i+1)}$ – коэффициенты степенного полинома, которые могут быть рассчитаны в соответствии с рекуррентным соотношением, приведенным в источнике [4]:

[1] При использовании ортогональных полиномов оценки коэффициентов полинома степени k сохраняются без изменений и определяются только коэффициенты при полиноме степени $(k+1)$ [4].

$$(7)\quad a_i^{(l+1)} = a_i^{(l)} - a_{k-l+1}^{(l)} \frac{\sum_{i=1}^{N} C_j^{k-l+1} \varphi_i(C_j)}{\sum_{i=1}^{N} \varphi_i^2(C_j)}$$

После того, как выбран наилучший аппроксимирующий полином ($\Phi(C_j)$ или $P(C_j)$) производится поиск его глобальных экстремумов. Для этого экстремумы сначала локализуются, а затем координаты экстремума уточняются с заданной точностью ε. С целью лучшей локализации экстремумов производится расчет значений аппроксимирующей функции не только в узловых точках, но и в промежутках между ними. Затем, путем простого перебора с сравнением, приближенно определяются координаты экстремумов аппроксимирующей функции и, если они не являются граничными ячейками массивов C_1 или C_2, осуществляется их уточнение в пределах отрезка, ограниченного соседними точками для найденного приближенно экстремума.

Уточнение положения экстремума внутри локализованного отрезка осуществляется методом золотого сечения [7]. Для этого отрезок [C_k, C_l] с локализованным экстремумом делится двумя точками $p = C_k + (1-g)(C_l - C_k)$ и $q = C_k + g(C_l - C_k)$, где $g = \frac{1-\sqrt{5}}{2} \approx 0.618$. Точки p и q расположены симметрично относительно середины отрезка [C_k, C_l], причем p производит золотое сечение отрезка [C_k, q], а точка q – золотое сечение отрезка [p, C_l]. Далее вычисляются значения аппроксимирующей функции в точках деления, вычисленные значения сравниваются и отбрасывается та часть интервала, на котором заведомо отсутствует экстремум. Так как точки p и q производят золотые сечения отрезков [C_k, q] и [p, C_l] соответственно, то на оставшемся интервале определяется только одна точка, производящая золотое сечение. Процесс деления продолжается до тех пор, пока длина интервала неопределенности не станет меньше заданной точности ε. При этом на каждом шаге длина нового интервала неопределенности равна 0.618 (g) от длины предыдущего интервала. Если в результате перебора в качестве экстремальных были определены значения аппроксимирующей функции для граничных элементов массивов C_1 или C_2, то они и принимаются за искомые экстремумы.

На рисунке 1 представлена обобщенная блок-схема алгоритма вычисления экстремальных значений кодов C_1 и C_2 в каналах ОВТД$_1$ и ОВТД$_2$ системы измерения, поясняющая рассмотренные выше процедуры.

После ввода исходных данных – массива кодов C (блок 2), в соответствии с выражениями (1-4) производится аппроксимация заданной таблично функции полиномами Чебышева I рода второго порядка (k=2)[2] (блок 4) и на основании (5) определяется остаточная дисперсия σ_k^2 (блок 5). Далее, в цикле (блоки 6-9) осуществляется поиск наилучшего приближения к функции изменения кодов C_1 и C_2 для чего степень аппроксимирующего полинома увеличивается на 1. При этом, учитывая свойства ортогональных полиномов, все полученные ранее оценки коэффициентов сохраняются и находится только оценка коэффициента m_{k+1} (4) при ортогональном полиноме $\varphi_{k+1}(C_j)$ (3). После того, как определен полином степени (k+1) для него производится расчет остаточной дисперсии σ_{k+1}^2 (блок 7) и сравнение ее с σ_k^2 (блок 8). Если остаточная дисперсия уменьшилась, то степень аппроксимирующего полинома увеличивается на 1 и цикл начинается снова. Если уменьшения остаточной дисперсии не произошло, то в качестве наилучшего выбирается полином степени k.

[2]Выбор в качестве начального приближения полинома Чебышева второго порядка обусловлен анализом реальных зависимостей кодов в каналах ОВТД.

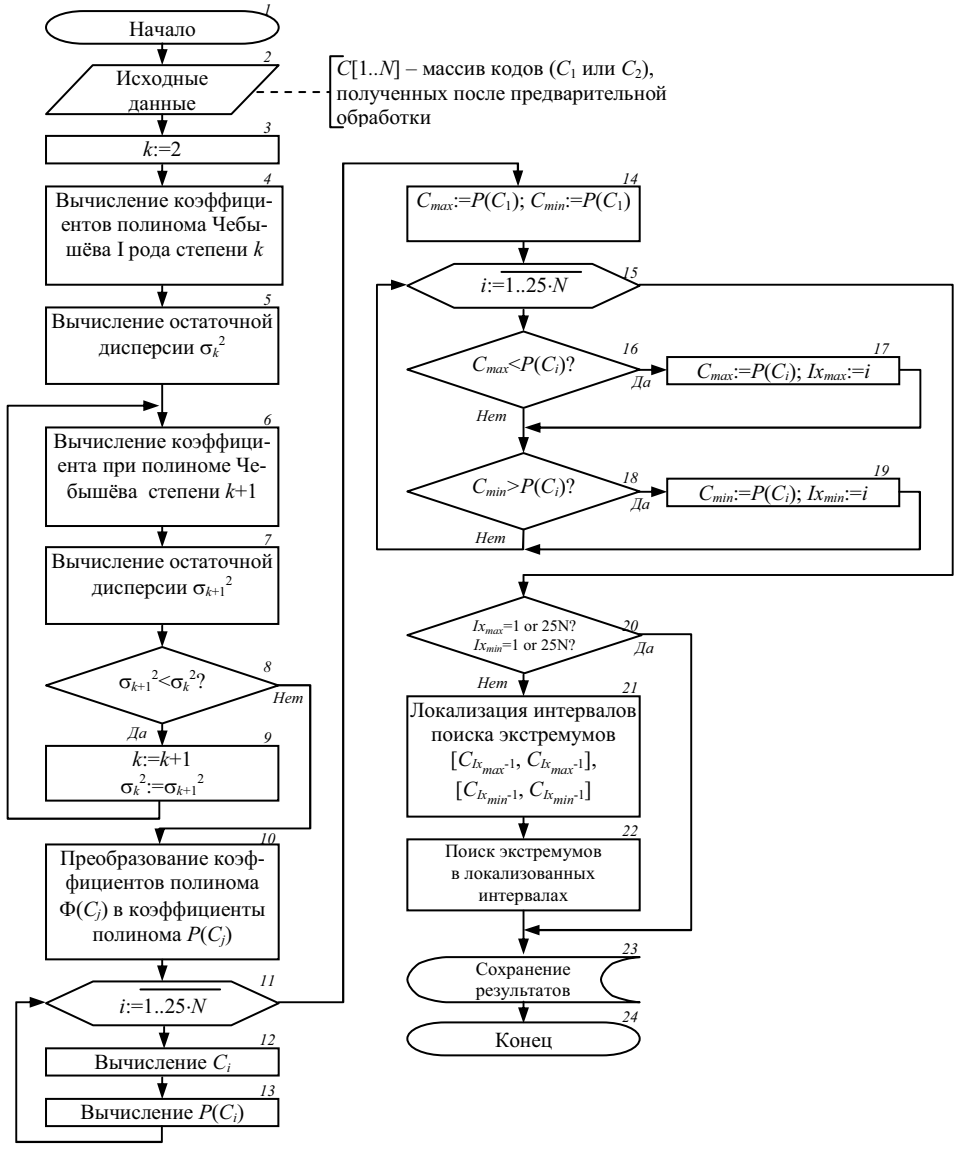


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма вычисления экстремальных значений кодов

На следующем шаге алгоритма производится преобразование коэффициентов полинома Чебышева в коэффициенты традиционного алгебраического полинома (блок 10) в соответствии с выражениями (6-7). Полученный алгебраический полином рассчитывается во всех узловых точках интерполяции, а также в промежутках между ними для чего отрезок между соседними узлами интерполяции делится на 24 равных участка (блоки 11-13).

Затем осуществляется приближенный поиск экстремумов полученной «сглаженной» аппроксимирующей функции изменения кодов (блоки 14-19). Если экстремумом является первый или последний элемент рассчитанного массива, то эти значения запоминаются и используются в последующих вычислениях физических значений радиальных и осевых смеще-

ний [8]. Если же экстремум находится внутри массива, то сначала локализуется интервал поиска путем выбора отрезка между предшествующим и последующим элементами (блок 21), а затем осуществляется собственно поиск уточненного экстремума методом золотого сечения (блок 22). Полученный результат также запоминается и используется в дальнейших алгоритмах расчета физических значений радиальных и осевых смещений.

Список литературы

[1] Беленький, Л.Б. Технические средства и программное обеспечение системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и скорости вращения лопаточного колеса [Текст] / Л.Б. Беленький, В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2013 (настоящий сборник).

[2] Белопухов, В.Н. Алгоритм поиска экстремальных значений кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений лопаток сложной формы [Текст] / В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV международной конференции. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2013 (настоящий сборник).

[3] Белопухов, В.Н. Система измерения скорости вращения ротора ГТД на основе одновитковых вихретоковых датчиков [Текст] / В.Н. Белопухов, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XIII международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2011. -С.311-315.

[4] Носач, В.В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров. [Текст] / В.В. Носач — М.: МИКАП, 1994. —382 с.

[5] Яковенко, П.Г. Моделирование систем: учебное пособие [Текст] / П.Г.Яковенко – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. –106 с.

[6] Гутер, Р.С. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта [Текст] / Р.С. Гутер, Б.В. Овчинский – М.: Физматлит, 1962. -356 с.

[7] Пантелеев, А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах.[Текст] / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. -М.: Высшая школа, 3-е изд., 2008. -544 с.

[8] Кутейникова, М.М. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток [Текст] / М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XII международной конференции. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2010. -С.323-327.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ И СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЛОПАТОЧНОГО КОЛЕСА

Беленький Л.Б., Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.

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, скорость вращения, технические средства, программное обеспечение, действующий макет системы*

Abstract

The hardware and software description of a new measuring system and it operational prototype that is made for experimental researches in order to confirm system working efficiency and it metrological justifiability is given. The system consists of two subsystems. The first one (main subsystem) provides a measuring of radial and axial displacements of turbine blades with a complex shapes. The previously designed method for measuring of aforementioned displacements is realized in this subsystem. The second one (additional subsystem) is oriented for measuring of blade wheel rotational velocity. Both systems are uses the same hardware – high-temperature single-coil eddy-current sensors, signal converters with digital and analog outputs and microcontrollers. The original algorithms for data preprocessing and rotational velocity measuring (on a lowest level) as well as the algorithms for codes extreme values seeking, calculating of radial and axial displacements, configuring, visualization and measuring information compressing (on an upper level in PC) are realized in the system software.

Введение

В работе [1] предложен метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы, применяемых в турбинах газотурбинных двигателей (ГТД)[1]. Метод предусматривает использование распределенного кластера (РК) из двух высокотемпературных одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника [2, 3]. В соответствии с методом ЧЭ ОВТД в составе РК размещены таким образом, чтобы электромагнитное взаимодействие преимущественно осуществлялось с «хвостовой» частью лопатки, что при прохождении лопаткой обоих ЧЭ приводит к появлению только одного минимума в изменениях индуктивности каждого ЧЭ, несмотря на «U-образный» профиль сечения лопатки плоскостью, параллельной её оси (такая форма профиля связана с наличием выступов в торцевой части лопатки). Предполагается, что минимальным значениям индуктивностей ЧЭ в системе измерения, реализующей предложенный метод, соответствуют экстремальные значения кодов в канале датчиков, которые с помощью семейства градуировочных характеристик (ГХ), полученных экспериментально, позволяют вычислить искомые смещения.

[1] Радиальные смещения определяют величину важнейшего параметра – радиальных зазоров между торцами лопаток и статором, от которых зависят надежность и экономичность ГТД.

Известны также публикации, в которых, в которых приводится описание технических средств (ТС), рассчитанных на применение в такой системе, которые, в частности, включают оригинальные конструктивные разновидности высокотемпературных ОВТД [4], измерительную цепь (ИЦ) для преобразования индуктивностей ЧЭ ОВТД [5], а также преобразователь, в состав которого входит ИЦ, с АЦП на выходе [6]. Программное обеспечение (ПО) системы может быть построено на основе новых разработок алгоритмов вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток [7], предварительной обработки и поиска экстремальных значений кодов [8, 9], рассматриваемых в работах, публикуемым в настоящем сборнике.

Несмотря на множество перечисленных источников [2-9] можно констатировать отсутствие каких-либо сведений о ТС и ПО системы в целом. Поэтому в настоящей статье приводится описание ТС и ПО системы измерения и её действующего макета, предназначенного для экспериментальных исследований, призванного подтвердить его работоспособность и метрологическую состоятельность. При этом в состав рассматриваемой системы входят две подсистемы. Первая обеспечивает решение основной задачи – измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы. Вторая подсистема отвечает традиционным требованиям пользователей о необходимости измерения скорости вращения лопаточного колеса в дополнение к основной задаче. Причём отличительная особенность ТС обеих подсистем – это высокая степень идентичности, связанная, в первую очередь, с использованием однотипных датчиков (высокотемпературных ОВТД) как в канале измерения смещений, так и скорости вращения [10], преобразователей (ПР) индуктивности ЧЭ ОВТД с цифровым [6] и аналоговым [10] выходом, а также однотипных микроконтроллеров в каждой подсистеме.

ПО системы реализует алгоритмы предварительной обработки [8] и измерения скорости вращения лопаточного колеса [10] (программы выполняются на нижнем уровне в микроконтроллерах), алгоритмы поиска экстремальных значений кодов [9], вычисления радиальных и осевых смещений [7], а также управления и конфигурирования в системе, отображения и архивирования измерительной информации (программы выполняются на верхнем уровне в ПЭВМ).

Технические средства

Как отмечалось во Введении, система измерения состоит из двух подсистем. Первая – обеспечивает измерение радиальных и осевых смещений торцов лопаток, вторая решает задачу измерения скорости вращения лопаточного колеса. Аналогичную структуру имеет и действующий макет системы: на рисунке 1 обе подсистемы содержат набор стандартных и нестандартных ТС.

Для обработки цифровых данных в подсистемах используются однотипные стандартные встраиваемые модули STM32VL Discovery на базе микроконтроллера STM32F100RBT6B [11]. Их отличительные особенности: 32-битное ядро Cortex-M3, 128 кВ Flash памяти программ, 8 кВ ОЗУ, 16-ти канальный 12-разрядный АЦП, 12-разрядный ЦАП, набор таймеров общего назначения с расширенными функциями, последовательные коммуникационные интерфейсы UART, достаточное число дискретных портов ввода-вывода. Все сигналы доступны на внешних разъемах модулей. Размеры модуля 84х42 мм. На рисунке 1 эти модули обозначены STM32. Для связи с ПЭВМ верхнего уровня по каналу USB модули дооснащены преобразователями интерфейсов UART↔USB (на рисунке 1 – блок USB).

Помимо модуля STM32 в состав первой подсистемы входит РК из двух нестандартных высокотемпературных ОВТД ($ОВТД_1$, $ОВТД_2$ со встроенными термопарами ($ТП_1$, $ТП_2$) для температурной коррекции [2] и преобразователь ($ПР_1$) индуктивностей ОВТД (L) в цифровой код (C) [6]. 10-ти разрядный АЦП в составе $ПР_1$ формирует на выходе параллельный код. Соответствующие разряды подключены к портам дискретного ввода-вывода модуля STM32.

Для нормализации сигналов от термопар $ТП_1$, $ТП_2$ использовано стандартное многоканальное устройство нормализации (УН) 848Т фирмы Rosemount, с выхода которого аналоговые напряжения поступают на входы АЦП модуля STM32.

Конструктивно модуль STM32 и преобразователь UART↔USB смонтированы на кросс-плате (на рисунке 1 – плата $МКР_1$). Плата имеет размеры 103х75мм, рекомендуемые стандартом DIN 43880 для размещения в типовых корпусах размера 6М, закрепляемых на DIN-рейку [12].

Преобразователь $ПР_1$ размещен в непосредственной близости от датчиков $ОВДТ_1$ и $ОВДТ_2$ и выполнен как отдельное устройство [6].

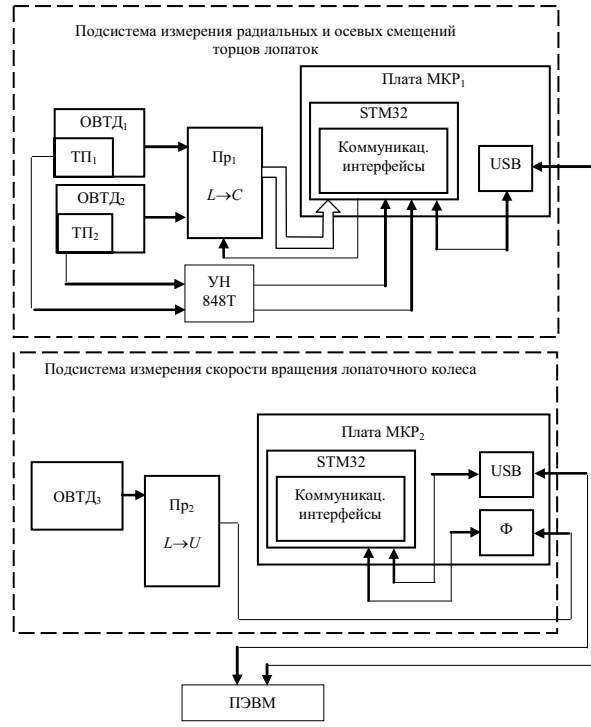


Рисунок 1 – Технические средства системы

В состав нестандартных устройств подсистемы измерения скорости вращения входят $ОВДТ_3$ [4] с дорпаботанным преобразователем ($ПР_2$) его индуктивности (L) в напряжение (U), а также формирователь (Ф) выходного импульсного напряжения $ПР_2$ в синхронную последовательность логических импульсов. Эти импульсы поступают на дискретный вход модуля STM32, размещенного на кросс-плате (плата $МКР_2$, рисунок 1), для частотно-временных измерений [10]. На одном из дискретных выходов формируются синхросигналы кадровой развертки, соответствующие началу каждого оборота лопаточного колеса.

На кросс-плате $МКР_2$, кроме модуля STM32, размещены преобразователь UART↔USB и формирователь (Ф). Кросс-плата помещена в аналогичный корпус 6М для монтажа на DIN-рейку.

Преобразователь $ПР_2$ также размещен в непосредственной близости от $ОВДТ_3$ и выполнен как отдельное устройство.

$ПР_2$, в основном, аналогичен известным [2, 3], в которых используется неравновесный мост с импульсным питанием, ОУ в режиме дифференцирования и запоминающее устройство (ЗУ), фиксирующее максимальные значения напряжения на выходе ОУ, соответствующие максимальным значениям производной. Рабочий ОВТД ($ОВТД_3$) включается в одно из плеч моста, а во второе плечо – имитатор компенсационного ОВТД (катушка индуктивности и резистор, величины индуктивности и сопротивления которых выбираются равными аналогичным параметрам рабочего ОВТД при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчика).

Импульсное питание моста подается непрерывно (с частотой 600 кГц). При этом на выходе ЗУ движение лопатки в зоне чувствительности ОВТД приводит к появлению импульсного напряжения, продолжительность которого многократно превышает период импульсного питания моста, а огибающая напряжения на выходе ЗУ имеет ступенчатый характер (длительность ступени соответствует периоду импульсов питания моста). Поэтому, в отличие от из-

вестных, в рассматриваемом $ПР_2$ на выходе ЗУ включается *RC*-фильтр, сглаживающий указанные ступени.

Далее сглаженное выходное напряжение ПР2 подается на формирователь Ф, который содержит масштабирующий усилитель и устройство сравнения напряжений, выполненные на ОУ AD8032.

Программное обеспечение системы

ПО системы и её действующего макета имеет двухуровневую структуру (и это также отмечалось во Введении). На нижнем уровне реализованы алгоритмы предварительной обработки цифровых кодов на выходе преобразователя $ПР_1$ [8] и измерения скорости вращения лопаточного колеса [10]. ПО верхнего уровня реализует алгоритмы управления системой, аппроксимации цифровых кодов и поиска экстремальных значений [9], вычисления искомых радиальных и осевых смещений [7], а также осуществляет конфигурирование системы, обеспечивает оперативное отображение и архивирование измерительной информации.

Далее рассматривается ПО нижнего уровня.

ПО предварительной обработки цифровых кодов. Для работы соответствующего алгоритма [8] в составе микроконтроллера STM32F100RB6 задействованы следующие аппаратные средства: генератор тактовой частоты, таймер в режиме формирования временных интервалов, параллельный порт для подключения АЦП, встроенного в преобразователь $ПР_1$, энергонезависимая память, а для связи с ПЭВМ верхнего уровня - встроенный модуль UART.

ПО содержит секции настройки блока внутреннего тактирования микроконтроллера, инициализации указанного периферийного оборудования и контроллера прерываний, измерения величины постоянной составляющей и уровня шума, сортировки и сжатия входного потока данных, обслуживания последовательного порта приема-передачи данных. С целью оптимизации по времени взаимодействие программы с периферийными устройствами производится в виде прямого обращения к соответствующим регистрам.

Отсчеты выходного сигнала преобразователя $ПР_1$ поступают на дискретный порт ввода-вывода в параллельном коде. Дискретизация по времени задается таймером. При этом формируются сигналы запуска преобразователя $ПР_1$ и чтения результата преобразования. В процессе синхронного чтения содержимого порта образуется входной поток исходных данных.

Процедура измерения величины постоянной составляющей и уровня шума, предшествующая получению целевой измерительной информации, представляет собой отдельную программную секцию, которая выполняется однократно в режиме ручного запуска при отсутствии лопаток в зоне чувствительности ОВТД. В результате ее работы вычисляются и сохраняются в энергонезависимой памяти параметры настройки на реальный сигнал, необходимые для дальнейшей пороговой обработки.

Начало процесса пороговой обработки входного потока при вращении имитатора ротора с лопатками инициируется подачей команды от ПЭВМ верхнего уровня. При получении этой команды производится сортировка отсчетов входного потока с целью выделения полезных сигналов от противофазных плеч дифференциальной ИЦ преобразователя $ПР_1$ с датчиками $ОВТД_1$ и $ОВТД_2$, маркировка начала и конца каждой реализации и сохранение результирующего массива в ОЗУ микроконтроллера. После заполнения заданного объема буферного ОЗУ процесс обработки завершается, накопленный массив дополняется информацией о числе отсчетов и контрольной сумме, данные передаются через последовательный порт UART в ПЭВМ верхнего уровня и становятся доступными для дальнейшей обработки.

ПО измерения скорости вращения. Для работы соответствующего алгоритма [10] в микроконтроллере STM32F100RB6 задействованы следующие аппаратные средства: генератор

тактовой частоты, блоки таймеров с опциями «захват», «сравнение» и счет внешних событий, а для связи с ПЭВМ верхнего уровня - встроенный модуль UART.

ПО содержит секции настройки блока внутреннего тактирования микроконтроллера, инициализации указанного периферийного оборудования и контроллера прерываний, вычисления расчетных соотношений и обслуживания последовательного порта приема-передачи данных. С целью оптимизации по времени взаимодействие программы с периферийными устройствами производится в виде прямого обращения к соответствующим регистрам.

Получение измеряемых результирующих параметров происходит во время обслуживания прерываний, которые возникают при поступлении импульсов входной измеряемой частоты f_x.

Базовая операция алгоритма реализована на основе «свободно бегущего» таймера, формирующего временную ось, с использованием опции «захват», которая позволяет аппаратно зафиксировать момент времени появления по фронту импульса входной частоты на внешнем контакте микросхемы. При этом подсчет числа входных импульсов для одновременного измерения частоты выполнен на другом таймере в режиме счетчика внешних сигналов. Фиксированное временное окно, ограничивающее время измерения, формируется на отдельном таймере, настроенном на опцию «сравнение».

Блок-схема, поясняющая использование внутренних периферийных средств микроконтроллера приведена на рисунке 2.

Для получения образцовой частоты f_0 использован внутренний тактовый генератор с программно настраиваемым делителем OSC/Div. Импульсы образцовой частоты поступают на вход таймера TMR-τ для формирования фиксированного временного окна, а также на вход «свободно бегущего» таймера TMR-*k* для измерения интервалов времени.

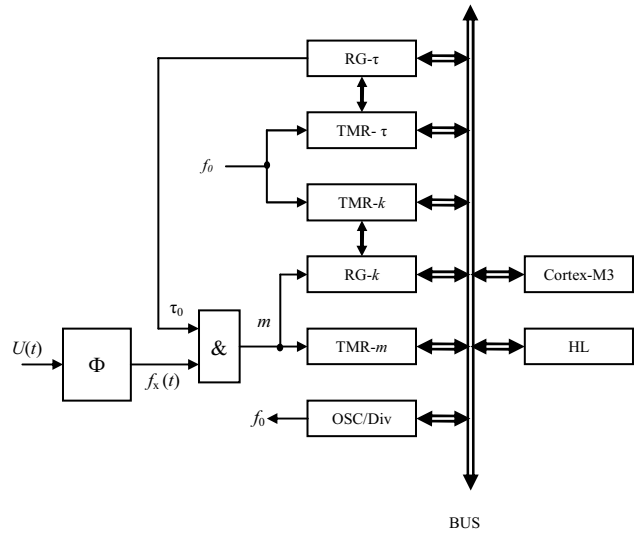


Рисунок 2 - Блок-схема, поясняющая использование внутренних периферийных средств МК STM32F100RB6 при измерении скорости вращения лопаточного колеса

В регистре сравнения RG-τ записан код, соответствующий временному интервалу τ_0. Высокий уровень на выходе схемы сравнения кодов определяет временное окно и открывает на этот отрезок времени логический клапан (реализован программно), разрешая пропуск импульсов входной частоты f_x.

Импульсы входной измеряемой частоты f_x поступают одновременно на вход счетчика TMR-*m* и на вход внешних событий регистра захвата RG-*k*. На счетчике TMR-*m* производится суммирование для накопления результата измерения частоты. Регистр «захвата» RG-*k*, получив этот импульс, считывает на «лету» показание таймера TMR-*k* для измерения периода. При этом генерируется запрос на аппаратное прерывание. Получение текущей информации в процессе измерения производится в процессе обработки данного прерывания путем считывания содержимого регистра RG-*k* и счетчика TMR-*m*.

По окончанию «временного окна», производится вычисление частотно-временных параметров вращения, результаты выдаются через модуль UART в ПЭВМ верхнего уровня. Про-

цесс периодически повторяется. Запуск процесса измерения и считывание результатов производится по командам от ПЭВМ.

Далее рассматривается ПО верхнего уровня, которое работает под управлением 32-разрядной операционной системы семейства MS Windows (Windows XP SP2 и выше).

На рисунке 3 представлено начальное (главное) диалоговое окно программы в котором пользователю предлагается выбрать один из трех режимов работы ПО: конфигурирование (пункт «Настройки»), опрос измерительных каналов системы (пункт «Измерение») и просмотр архива накопленных результатов (пункт «Результаты»).

Конфигурирование системы (рисунок 4) предполагает указание как общесистемных настроек: периодичность опроса, каталог с актуальными ГХ измерительных каналов системы, данные о личности оператора, так и параметров порта приема-передачи данных от стандартных модулей STM32VL Discovery на базе микроконтроллера STM32F100RBT6B. В последнем случае порт USB рассматривается как виртуальный COM-порт ПЭВМ.

Рисунок 3 – Окно выбора режима работы ПО верхнего уровня

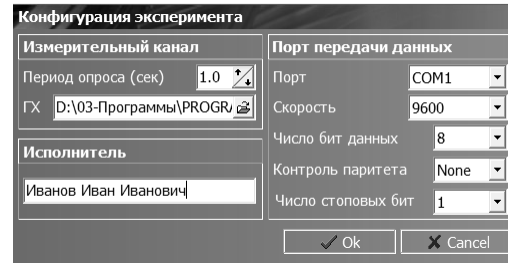


Рисунок 4 – Окно конфигурирования системы

Заданные в окне рисунка 4 настройки системы сохраняются в стандартном файле конфигурации MS Windows (*.ini) и автоматически загружаются при следующем запуске ПО системы.

При переходе ПО в режим измерения открывается диалоговое окно (рисунок 5), в котором с заданной на этапе конфигурирования периодичностью в табличном и графическом виде отображается текущая измерительная информация о скорости вращения лопаточного колеса (обороты) и температуре, радиальных и осевых смещениях (радиальных зазорах (РЗ) и ОС соответственно).

Запуск измерений осуществляется по нажатию виртуальной кнопки «СТАРТ». При этом инициализируется и запускается программный таймер, в программе обработки прерываний которого в соответствии с алгоритмом управления формируется стартовый импульс для внешних подсистем предварительной обработки цифровых кодов и скорости вращения. Упакованный массив с кодами С и результатами вычисления скорости вращения лопаточного колеса передается в ПЭВМ, где после опроса канала измерения температуры происходит его дальнейшая обработка, включая распознавание отдельных лопаток, усреднение результатов по нескольким оборотам, нахождение экстремумов и расчет физических значений радиальных и осевых смещений. Полученные результаты сохраняются на жестком диске ПЭВМ в каталоге «..\TBData» в бинарных файлах.

Каждое последующее прерывание таймера запускает процесс измерения сначала. Для остановки режима измерений необходимо нажать виртуальную кнопку «СТОП».

Если на этапе конфигурирования периодичность опроса была задана «нулевой», то запуск соответствующих подсистем, а также дальнейшая обработка измерительной информации осуществляется каждый раз вручную по нажатию клавиши «СТАРТ».

Управление внешним видом окна с результатами измерений, осуществляется с помощью специальной панели инструментов (рисунок 6), которая активизируется при перемещении курсора мыши в крайнюю правую область экрана. При этом пользователю становится доступной также некоторая отладочная информация, носящая служебный характер. В частности предусмотрен режим отключения алгоритма расчета физических значений РЗ и ОС и вывода текущей информации с измерительных каналов системы в виде упакованного массива кодов, а также просмотр пороговых значений обнаружения сигнала, полученных на предварительном этапе настройки модуля измерения смещений торцов лопаток.

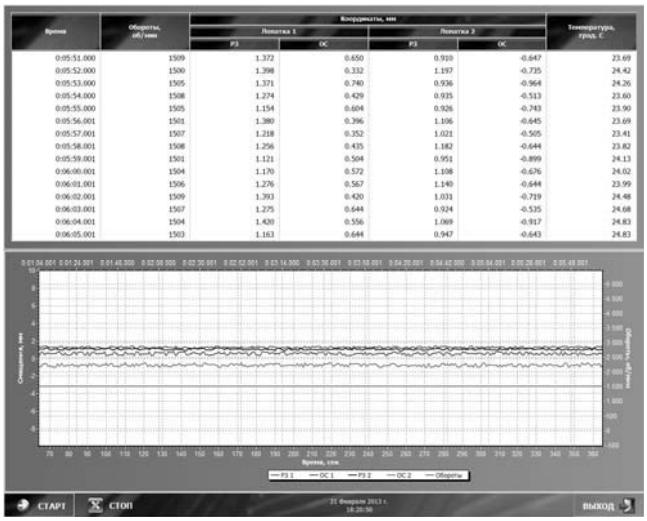


Рисунок 5 – Окно системы в режиме измерений

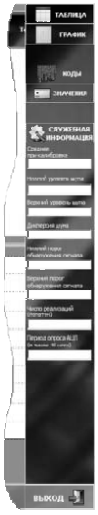


Рисунок 6 – Панель управления видом представления информации

Просмотр архива накопленных результатов осуществляется с использованием программы MS Excel, входящей в стандартный пакет офисных программ MS Office. Преобразования файлов из бинарного представления в формат файлов MS Excel осуществляется при выборе пункта меню «Результаты» главного окна программы (рисунок 3).

Заключение

Разработана система измерения и изготовлен её действующий макет, призванный экспериментально подтвердить работоспособность системы и её метрологическую состоятельность[2]. Система состоит из двух подсистем. Первая (основная) решает задачу измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы, применяемых в турбинах. Вторая (дополнительная) предназначена для измерения скорости вращения лопаточного колеса.

ТС обеих подсистем включают нестандартные высокотемпературные ОВТД, преобразователи их индуктивностей с цифровым и аналоговым выходами, формирователь, а также стандартные микроконтроллеры.

ПО системы имеет двухуровневую структуру. На нижнем уровне производится предварительная обработка информации о радиальных и осевых смещениях лопаток, представленных в

[2] Результаты экспериментальных исследований приведены в работе [13], публикуемой в настоящем сборнике

виде цифровых кодов, а также измерение скорости вращения лопаточного колеса. На верхнем уровне осуществляется управление системой в целом , поиск экстремальных значений цифровых кодов, вычисление радиальных и осевых смещений, а также конфигурирование системы, оперативное отображение и архивирование результатов.

Список литературы

[1] Беленький, Л.Б. Кластерный метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток с уменьшением влияния некоторых мешающих факторов [Текст] / Л.Б. Беленький, М.М. Кутейникова, Б.К. Райков [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XIII международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2011. -С.294-299.

[2] Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок [Текст] / Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Беленький Л.Б. [и др.]; под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2001. – 188с.

[3] Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях [Текст] / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, Б.К. Райков [и др.]; под общ. ред. Скобелева О.П. – М.: Машиностроение, 2011. – 298с.

[4] Кутейникова, М.М. Конструктивные разновидности высокотемпературных одновитковых вихретоковых датчиков [Текст] / М.М. Кутейникова, Б.К. Райков, О.П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XIV международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2012. -С.595-601.

[5] Беленький, Л.Б. Измерительная цепь с одновитковыми вихретоковыми датчиками и приближенным дифференцированием [Текст] / Л.Б. Беленький, О.П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XIV международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2012. -С.602-606.

[6] Беленький, Л.Б. Преобразователь индуктивностей одновитковых вихретоковых датчиков в цифровой код [Текст] / Л.Б. Беленький, А.В. Логвинов, О.П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2013 (настоящий сборник).

[7] Кутейникова, М.М. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток [Текст] / М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XII международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2010. -С.323-327.

[8] Белопухов, В.Н. Алгоритм предварительной обработки данных кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений лопаток сложной формы [Текст] / В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2013. (настоящий сборник).

[9] Белопухов, В.Н. Алгоритм поиска экстремальных значений кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений лопаток сложной формы [Текст] / В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV международной конференции. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2013 (настоящий сборник).

[10] Белопухов, В.Н. Система измерения скорости вращения ротора ГТД на основе одновитковых вихретоковых датчиков [Текст] / В.Н. Белопухов, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XIII международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2011. -С.311-315.

[11] STM32VLDISCOVERY [Электронный ресурс] –Режим доступа: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/CD00277245.pdf, свободный. –Яз.: англ.

[12] Корпуса для РЭА [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.gainta.ru, свободный. –Яз.: рус.

[13] Беленький, Л.Б. Экспериментальные исследования работоспособности и метрологической состоятельности действующего макета системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и скорости вращения лопаточного колеса [Текст] / Л.Б. Беленький, В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2013 (настоящий сборник).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ СОСТОЯТЕЛЬНОСТИ ДЕЙСТВУЮЩЕГО МАКЕТА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ И СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЛОПАТОЧНОГО КОЛЕСА

Беленький Л.Б., Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.

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, действующий макет, радиальные и осевые смещения, лопатка сложной формы, скорость вращения, экспериментальные оценки погрешностей*

Abstract

The description of the specially designed and made object simulator with stator simulator & blade wheel simulator with mechanical indicators of it displacements is given. The description of experimental researches of operational prototype of the system for measuring of radial and axial displacements of turbine blades with a complex shapes as well as blade wheel rotational velocity is given too. Experimental researches are consists of series of the experiments for obtaining a quantitative assessments of the most important error components. The results of the experimental researches (including the metrological one) validates the working efficiency of the prototype and it metrological justifiability.

Введение

В работе [1] рассматриваются технические средства (ТС) и программное обеспечение (ПО) системы и её действующего макета, обеспечивающих измерение радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы (применяемых в турбинах), а также измерение скорости вращения лопаточного колеса (ЛК). Система состоит из двух подсистем: первая решает основную задачу – измерение радиальных и осевых смещений торцов лопаток, вторая подсистема выполняет дополнительную функцию – измерение скорости вращения ЛК. Однако в работе [1] отсутствуют какие-либо сведения об исследованиях действующего макета системы, подтверждающих его работоспособность и метрологическую состоятельность, а потому настоящая статья посвящена таким исследованиям.

При этом основное внимание уделено результатам экспериментальных исследований подсистемы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы (т.е. y, x-координатам смещений в системе отсчета $OXYZ$, жестко связанной со статором, где точка O (начало отсчета) находится на внутренней поверхности статора, ось X параллельна оси ЛК, ось Y направлена по радиусу статора, а ось Z – в направлении вращения ЛК).

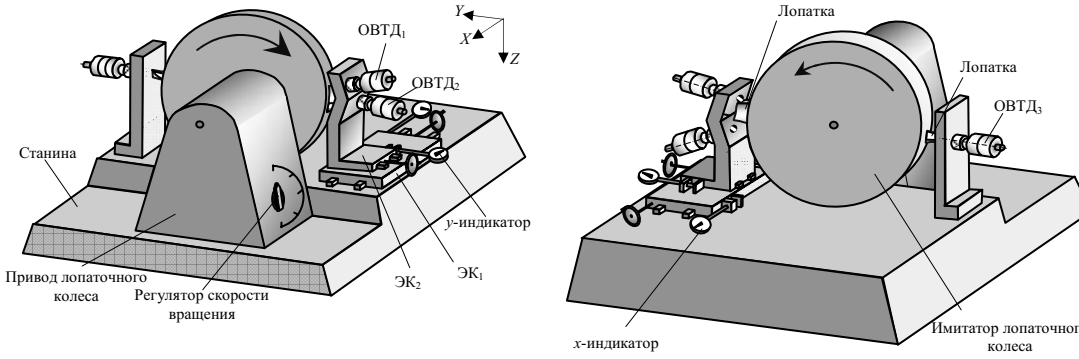
Описанию результатов экспериментальных исследований предшествует описание специально разработанного и изготовленного имитатора объекта с имитатором ЛК и имитатором статора, оснащенного механическими индикаторами перемещений. В лабораторных условиях имитатор объекта обеспечивает проверку работоспособности макета и оценку его метрологических показателей.

Метрологические исследования включают оценки случайной составляющей погрешностей преобразования в цифровой код индуктивностей одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД), погрешностей вычисления экстремальных значений кодов, а также радиальных и осевых смещений торцов лопаток – координат *y* и *x*. Кроме того, приводятся результаты исследования имитатора ЛК – с помощью семейства градуировочных характеристик (ГХ), полученного на одной из лопаток в процессе вращения имитатора ЛК, производится измерение радиальных и осевых смещений другой лопатки.

Результаты экспериментальных исследований второй подсистемы сводятся к оценкам погрешностей измерения скорости вращения.

Имитатор объекта

Содержит имитатор ЛК и имитатор статора (рисунок 1). Имитатор ЛК приводится во вращение от электропривода через редуктор и трансмиссии, что обеспечивает ступенчатое регулирование скорости вращения от 50 до 1000 об/мин.



а) б)

Рисунок 1 – Имитатор объекта: вид спереди (а) и сзади (б)

В диаметрально противоположных точках ЛК закреплены две турбинные лопатки с высокой кривизной поверхности и «*U*-образным» профилем сечения.

Имитатор статора состоит из станины с двумя элементами конструкции ($ЭК_1$ и $ЭК_2$). Оба ЭК содержат механизмы перемещения – $ЭК_1$ в направлении оси *X*, $ЭК_2$ в направлении оси *Y*, причем оба перемещения контролируются механическими индикаторами с разрешающей способностью 0.01 мм (*x*-индикатор, *y*-индикатор).

К $ЭК_2$ жестко крепится пластина, на которой размещены два ОВТД ($ОВТД_1$ и $ОВТД_2$), образующие распределенный кластер (РК). Топология размещения ОВТД и их чувствительных элементов (ЧЭ) соответствует ранее разработанному методу, описание которого приведено в работе [2]. Числовые данные о геометрических параметрах РК (размещении ЧЭ) можно найти в работе [3].

К имитатору статора также крепится дополнительный ОВТД, предназначенный для измерения скорости вращения лопаточного колеса ($ОВТД_3$).

Результаты исследований первой подсистемы

Работоспособность ТС и ПО первой подсистемы действующего макета была подтверждена ещё в процессе его наладки при использовании имитатора объекта и серии тестовых экспериментов. С помощью *x*, *y*-индикаторов (рисунок 1) задавались произвольные пары значений *x*, *y*-координат смещений в заданных диапазонах изменений (*x* от -1 до 1 мм и *y* от 0.5 до

1.7 мм) при различных скоростях вращения ЛК. Заданные значения *x*, *y*-координат сравнивались с полученными на макете результатами измерений.

Разумеется, работоспособность подсистемы была непременным условием проведения метрологических исследований. В то же время все последующие результаты метрологических экспериментов можно считать и дополнительным подтверждением работоспособности системы.

Оценки случайной составляющей погрешности преобразователя $ПР_1$ [1, 4] индуктивностей $ОВТД_1$ и $ОВТД_2$ (в составе РК). Эксперимент по оценке случайной составляющей погрешности проводился в статике при фиксированных позициях лопатки под номером *1* относительно датчиков, соответствующих экстремальным значениям кодов АЦП на выходе $ПР_1$. Объем выборки определялся объемом буферной памяти (2048). Коды АЦП регистрировались в режиме непрерывного импульсного питания измерительной цепи $ПР_1$ и оценивался их разброс (отклонение кодов от средних значений).

На рисунке 2 представлен фрагмент выборки объемом 105 кодов (C_1, $ОВТД_1$ и C_2, $ОВТД_2$). Там же в увеличенном масштабе изображен разброс кодов C_1 и C_2. Анализ полученных результатов показал, что большая часть кодов не выходила за пределы разброса в ±(4÷5) единиц. Среднеквадратическое отклонение (СКО) составило 1.69 единиц. Его относительное значение, приведенное к диапазону изменений выходных кодов в рабочих диапазонах изменений координат *x* и *y*, составляет менее 0.5%.

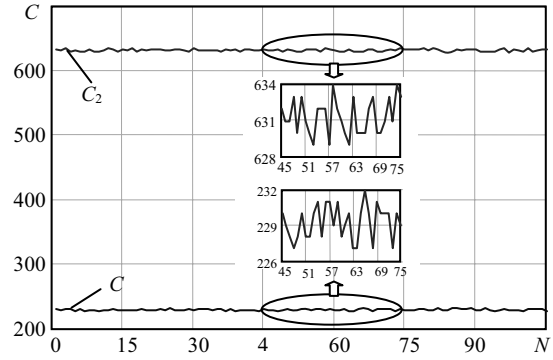


Рисунок 2 – Фрагмент выборки кодов C_1 и C_2

Оценка погрешности вычислений экстремальных значений кодов. Исходные данные (коды АЦП) для оценки искомой погрешности получены экспериментально в динамике, т.е. в процессе вращения имитатора ЛК в течение одного периода. При этом радиальные и осевые смещения были установлены с помощью соответствующих индикаторов (рисунок 1) равными 0.5 мм (*y*) и 1.0 мм (*x*) и оставались неизменными в течение эксперимента при постоянной скорости вращения (780 об/мин).

На рисунке 3, *а* представлены исходные данные в виде цифровых кодов (после предварительной обработки) в зависимости от номера отсчета (*N*), а также указаны экстремальные значения кодов – минимум C_1, который соответствует прохождению лопатки под номером *1* ЧЭ $ОВТД_1$, и максимум C_2, соответствующий прохождению той же лопатки ЧЭ $ОВТД_2$. Функции, аппроксимирующие исходные данные в окрестности минимума кода C_1 и максимума C_2 приведены на рисунках 3, *б* и 3, *в* соответственно. Разности между экстремальными значениями кодов, найденных экспериментально и расчетным путем с помощью аппроксимирующих функции [5], определяют искомые погрешности, которые не превышают 1.8% и 2.4% (это указанные разности, приведенные к диапазонам изменений кодов в рабочих диапазонах изменений координат *x* и *y*).

Представляется очевидным, что найденные погрешности могут быть существенно уменьшены, если использовать предусмотренное в подсистеме усреднение исходных данных за несколько оборотов имитатора ЛК. Можно ожидать, что даже четырех оборотов достаточно для уменьшения погрешности примерно в два раза.

Оценка погрешностей вычислений радиальных и осевых смещений торцов лопаток (y, x-координат). Для оценки искомых погрешностей необходимо семейство ГХ, представленное в

виде зависимостей кодов от координат x и y – $\mathbf{C}_1(x, y)$ и $\mathbf{C}_2(x, y)$. Для получения семейства ГХ использовался имитатор статора (рисунок 1). С помощью индикаторов осуществлялась установка заданных значений координат x и y в указанных выше диапазонах с шагом 0.4 мм (по обеим координатам). Для каждой пары из возможных сочетаний координат x и y в указанных диапазонах в динамике, т.е. в процессе вращения имитатора ЛК, для лопатки под номером *1* определялись экстремальные значения кодов – минимум C_1 в канале ОВТД$_1$ и максимум C_2 в канале ОВТД$_2$ (при использовании программ предварительной обработки цифровых кодов преобразователя ПР$_1$, аппроксимации и поиска экстремумов [1]). Полученные результаты представлены на рисунке 4. Все графики на рисунках 4 имеют монотонный характер, чувствительность кодов $\mathbf{C}_1$ и $\mathbf{C}_2$ к изменениям координаты y существенно больше, чем к изменениям координаты x.

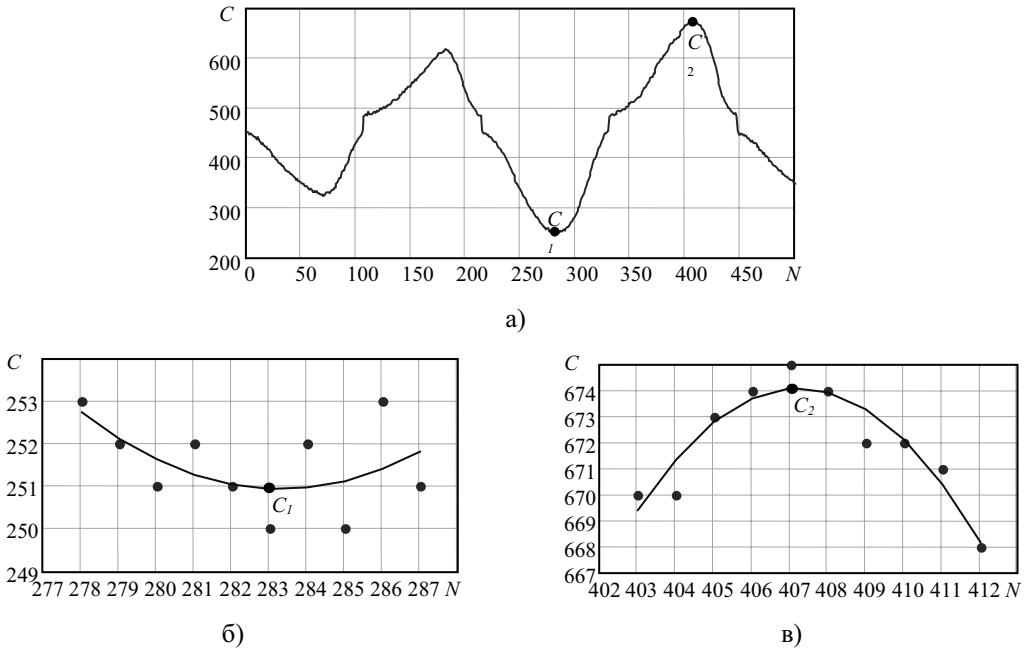


Рисунок 3 – Исходные данные (*а*), и аппроксимирующие функции в окрестности минимального значения кода (*б*) и его максимума (*в*)

Методика оценки погрешностей вычисления координат x и y также предусматривает использование имитатора статора. С помощью индикаторов устанавливается пара значений x и y, которые являются промежуточными между значениями, использованными при получении семейства ГХ. Пусть это будут значения координат x=0.8 мм и y=0.7 мм. Далее имитатор ЛК приводится во вращение и с помощью программ предварительной обработки, аппроксимации и поиска экстремумов, а также программы вычисления координат [5, 6] определяются расчетные значения координат x и y.

Разность значений заданных и расчетных координат определяет искомую погрешность, а ее отношение к диапазону изменений – приведенную погрешность. С помощью рассмотренной методики были определены погрешности для всех остальных возможных сочетаний пар координат x и y, выбранных в промежутках между значениями x и y, которые использовались при получении семейства ГХ. В таблице 1 представлены приведенные погрешности в виде функций двух переменных – $\delta_x(x, y)$ и $\delta_y(x, y)$.

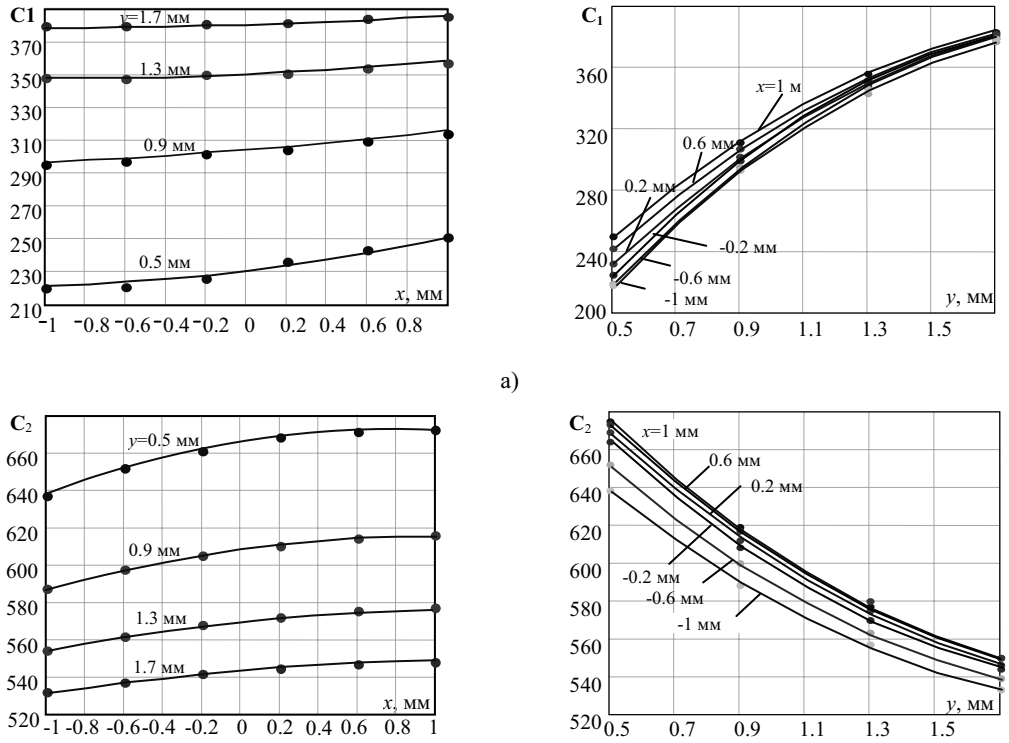


Рисунок 4 - Семейство ГХ: зависимости $\mathbf{C}_1(x)$ при $y=const$ и $\mathbf{C}_1(y)$ при $x=const$ (а), зависимости $\mathbf{C}_2(x)$ при $y=const$ и $\mathbf{C}_2(y)$ при $x=const$ (б)

Максимальные значения искомых погрешностей δ_x и δ_y (таблица 1) не превышают 8.1% и 2.4% соответственно. При этом погрешности δ_x менее 5.0% и δ_y менее 2.0% составляют очевидное большинство от общего числа погрешностей в каждой из таблиц $\delta_x(x, y)$ и $\delta_y(x, y)$ – около 70% (в таблице 1 погрешности δ_x более 5.0% и δ_y более 2.0%, в том числе и максимальные значения, выделены тонированием).

Из таблицы 1 также следует, что наиболее значимые погрешности δ_y (как погрешности измерения радиальных зазоров (РЗ)) существенно (не менее чем в 2.5 раза) меньше погрешностей измерения осевых смещений и это связано с более высокой чувствительностью кодов $\mathbf{C}_1$ и $\mathbf{C}_2$ к измерениям координаты y (рисунок 4)[1].

Необходимо также отметить, что найденные погрешности включают и те составляющие, которые рассматривались ранее. Поэтому с учетом их вклада погрешность, связанная только с вычислением координат, окажется меньше.

Кроме того, найденные погрешности позволяют оценить точность рассматриваемой подсистемы в целом.

И, наконец, в заключение раздела (и это отмечалось во Введении) приводятся результаты исследования имитатора ЛК, а конкретнее – точности установки лопатки под номером *2*. На рисунке 4 представлено семейство ГХ, полученное для лопатки под номером *1*. При этом

[1] От величины РЗ, а, следовательно, от точности его измерения, зависят важнейшие показатели надежности и экономичности газотурбинных двигателей.

предполагалось использование этого семейства ГХ для измерения координат смещений торца не только лопатки под номером *1*, но и лопатки под номером *2*, размещенных на имитаторе ЛК (рисунок 1).

Таблица 1 – Приведенные погрешности

$\delta_x(x, y)$

Координаты		*x*, мм		
		0.7	**1.1**	**1.5**
***y*, мм**	0.8	6.550936	3.960844	**8.07874**
	0.4	3.599102	2.973263	3.118643
	0	4.135071	1.877778	6.801046
	-0.4	5.312575	0.790538	3.479492
	-0.8	5.615433	4.664617	4.784181

$\delta_y(x,y)$

Координаты		*x*, мм		
		0.7	**1.1**	**1.5**
***y*, мм**	0.8	1.209208	1.159732	**2.323105**
	0.4	1.349751	2.218166	1.816463
	0	1.434636	0.966521	1.589012
	-0.4	2.161078	0.703613	2.389232
	-0.8	0.312736	1.864582	1.577775

Предполагалось также, что обе лопатки могут отличаться по радиальным и осевым смещениям (*y*, *x*-координатам). Поэтому задача эксперимента состояла в определении указанных отличий. Для ее решения лопатка под номером *1* устанавливалась в положение с координатами *y*=0.5 мм, *x*=0. Эксперимент проводился в динамике, т.е. при вращении имитатора ЛК, причем в течение каждого оборота фиксировались значения кодов АЦП преобразователя $ПР_1$ при прохождении лопаткой под номером *2* ЧЭ $ОВТД_1$ и $ОВТД_2$. После предварительной обработки, аппроксимации, а также поиска минимального и максимального значений кодов, вычислялись координаты смещений лопатки под номером *2*. Результаты расчета показали осевое смещение торца лопатки (координата *x*) равным 0.43 мм и радиальное смещение (координата *y*, РЗ) равным 0.91 мм, а искомые отличия координат от заданных 0.43 мм и 0.41 мм соответственно, что в свою очередь соответствует измерениям, выполненным с помощью штангенциркуля и щупов.

Результаты исследований второй подсистемы

Цель исследований – определение погрешностей измерения скорости вращения в двух вариантах. Первый предусматривал использование имитатора объекта с ЛК реального компрессора, приводимого в движение электродвигателем с плавно регулируемой скоростью вращения (его подробное описание приведено в работе [7]). На этом ЛК размещено 114 лопаток.

Второй вариант предусматривает использование имитатора объекта, представленного на рисунке 1. В отличие от первого варианта на имитаторе ЛК размещены всего две турбинные лопатки, и это обстоятельство стало наиболее значимой причиной проведения исследований по первому варианту.

В обоих вариантах в качестве образцового использовался измеритель частоты промышленного изготовления – «Частотомер электронно-счетный Ч3-57». Вход прибора подключался к выходу формирователя сигналов преобразователя $ПР_2$ индуктивности $ОВТД_3$ [1].

Результаты экспериментов, проведенные на разных скоростях вращения ЛК (первый вариант) и имитатора ЛК (второй вариант), показали, что погрешности подсистемы не превышают 0.1% в обоих вариантах.

Заключение

Разработан и изготовлен имитатор объекта с имитатором ЛК, которое приводится во вращение от электропривода, обеспечивающего ступенчатое изменение скорости вращения. РК ОВТД размещен на имитаторе статора с элементами конструкции, обеспечивающими установку радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы (применяемых в турбине), контролируемых механическими индикаторами.

Проведены экспериментальные исследования подсистем измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток и скорости вращения ЛК в составе действующего макета системы.

Результаты исследований первой подсистемы включали оценки случайной составляющей погрешности преобразования в цифровой код индуктивностей ОВТД в составе РК, погрешностей вычисления экстремальных значений кодов, а также радиальных и осевых смещений торцов лопаток – координат y и x. Кроме того, с помощью семейства ГХ, полученного на одной из лопаток имитатора ЛК в процессе его вращения, проведены измерения радиальных и осевых смещений торца другой лопатки. Обнаружены отличия измеренных смещений от заданных, которые подтверждаются измерениями, проведенными с помощью щупов и штангенциркуля.

Получены оценки погрешностей измерения второй подсистемы на различных скоростях вращения ЛК компрессора и имитатора ЛК (с турбинными лопатками) с помощью частотомера промышленного изготовления.

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали работоспособность и метрологическую состоятельность действующего макета системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и скорости вращения.

Список литературы

[1] Беленький, Л.Б. Технические средства и программное обеспечение системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и скорости вращения лопаточного колеса [Текст] / Л.Б. Беленький, В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2013 (настоящий сборник).

[2] Беленький, Л.Б. Кластерный метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток с уменьшением влияния некоторых мешающих факторов [Текст] / Л.Б. Беленький, М.М. Кутейникова, Б.К. Райков [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XIII международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2011. -С.294-299.

[3] Кутейникова, М.М. Результаты моделирования электромагнитного взаимодействия чувствительных элементов одновитковых вихретоковых датчиков в составе кластера с лопаткой сложной формы [Текст] / М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2013 (настоящий сборник).

[4] Беленький, Л.Б. Преобразователь индуктивностей одновитковых вихретоковых датчиков в цифровой код [Текст] / Л.Б. Беленький, А.В. Логвинов, О.П. Скобелев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2013 (настоящий сборник).

[5] Белопухов, В.Н. Алгоритм поиска экстремальных значений кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений лопаток сложной формы [Текст] / В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XV международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2013 (настоящий сборник).

[6] Кутейникова, М.М. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток [Текст] / М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XII международной конференции. –Самара: Изд-во СамНЦ РАН. -2010. -С.323-327.

[7] Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях [Текст] / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, Б.К. Райков [и др.]; под общ. ред. Скобелева О.П. – М.: Машиностроение, 2011. – 298с.

СИНТЕЗ АППРОКСИМАЦИОННЫХ МЕТОДОВ И СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО АНАЛИЗА ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ СРАВНЕНИЯ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ, РАСПРЕДЕЛЕННЫХ В ПРОСТРАНСТВЕ

В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, Д.В. Рудаков

ФГБОУ ВПО "Самарский государственный технический университет"
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия
vs_mel@mail.ru
тел: +7 (846) 337-05-45

Ключевые слова: *интегральные характеристики, гармоническая модель, мгновенные значения сигналов, сравнение сигналов, ортогональные составляющие, фазосдвигающий блок*

Abstract

New classification of methods of definition of integrated characteristics is offered on the basis of comparison and use of instant values of the basic and additional harmonious signals which allows to synthesize new methods and means of measurement.

Введение

Во многих процессах, связанных с анализом оперативной обстановки и функционирования технических средств, эффективность принятия решения по ожидаемым результатам выхода параметров на заданный режим или за пределы установленного допуска может быть существенно выше, если сокращается временной интервал, необходимый для анализа и идентификации наблюдаемого процесса или воздействующего фактора. Вследствие возрастающей роли временно́го фактора при неуклонном росте требований к точности измерения параметров на первое место выходит проблема создания единой методологии синтеза новых эффективных методов и систем, основанных на использовании априорной модели процесса или сигнала.

Многие сигналы в цепях технических объектов являются периодическими, модели которых близки к гармоническим. Для определения интегральных характеристик таких сигналов можно воспользоваться гармонической моделью, оценив погрешность, обусловленную несоответствием модели виду реального сигнала [1].

В настоящее время распространение получили методы определения интегральных характеристик гармонических сигналов (ИХГС) по отдельным мгновенным значениям, не связанным с периодом входного сигнала, что обеспечивает существенное сокращение времени измерения [2].

Дальнейшее сокращение времени измерения обеспечивают методы, основанные на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых по фазе относительно входных, и определении ИХГС: среднеквадратических значений (СКЗ) напряжения и тока, активной (АМ) и реактивной (РМ) мощности по мгновенным значениям основного и дополнительных сигналов.

Однако вопросы, связанные с реализацией систем измерения ИХГС путем сравнения основных и дополнительных сигналов практически не изучены.

В статье рассматривается классификация и основы синтеза аппроксимационных методов и систем оперативного анализа периодических сигналов на основе сравнения мгновенных значений, распределенных в пространстве.

Классификация методов измерения ИХГС на основе сравнения мгновенных значений, распределенных в пространстве

Предлагается классификация методов и систем измерения ИХГС на основе сравнения основных и дополнительных сигналов, в которой в качестве классификационных признаков ис-

пользуются: вид дополнительных сигналов; количество формируемых дополнительных сигналов; связь с характерными точками сигналов; применение разделения мгновенных значений сигналов во времени (рисунок 1).

Рисунок 1 – Классификация методов

Исключая противоположные операции (связь или отсутствие связи с характерными точками сигналов; использование или отсутствие разделения во времени), можно условно выделить шесть групп, характеризующие принципы синтеза методов.

Первую группу составляют методы, основанные на сравнении мгновенных значений основного сигнала и его ортогональной составляющей, не использующие характерные точки сигналов и разделение мгновенных значений сигналов во времени.

Для этой группы можно синтезировать методы: *IACEGL*; *IABCEGL*; *IABCEHL*.

Ко второй группе отнесены методы, основанные на сравнении мгновенных значений основных и сдвинутых относительно входных на произвольный угол дополнительных сигналов, также не использующие характерные точки сигналов и разделение мгновенных значений сигналов во времени.

Для этой группы могут быть синтезированы следующие методы: *IIACEGL*; *IIABCEGL*; *IIADEGL*; *IIABDEGL*; *IIABCEHL*; *IIABDEHL*.

Третью группу составляют методы, основанные на сравнении мгновенных значений основного сигнала и его ортогональной составляющей, использующие фиксацию переходов сигналов через ноль и исключающие разделение мгновенных значений сигналов во времени.

С учетом того, что при использовании ортогональных составляющих сигналов для методов, основанных на сравнении двух сигналов, характерные точки не требуются, для этой группы могут быть синтезированы следующие методы: *IACGJL*; *IACGKL*; *IABCGJL*; *IABCGKL*.

К четвертой группе отнесены методы, основанные на сравнении мгновенных значений основного и сдвинутого относительно входного на произвольный угол дополнительного сигналов, также использующие фиксацию переходов сигналов через ноль и исключающие разделение мгновенных значений сигналов во времени.

Для группы можно синтезировать методы: *IIACGJL*; *IIACGKL*; *IIABCGJL*; *IIABCGKL*; *IIADGJL*; *IIADGKL*; *IIABDGJL*; *IIABDGKL*; *IIABCHJL*; *IIABCHKL*; *IIABDHJL*; *IIABDHKL*.

Пятую группы составляют методы, основанные на сравнении мгновенных значений основного сигнала и его ортогональной составляющей, при реализации которых используется разделение мгновенных значений сигналов во времени.

С учетом того, что при использовании ортогональных составляющих сигналов для методов, основанных на сравнении двух сигналов, разделение сигналов во времени не требуется, для этой группы могут быть синтезированы следующие методы: *IACEFG*; *IACFGJ*; *IACFGK*; *IABCEFG*; *IABCFGJ*; *IABCFGK*; *IABCEFH*.

К шестой группе относятся методы, основанные на сравнении мгновенных значений основного и сдвинутого относительно входного на произвольный угол дополнительного сигналов, при реализации которых используется разделение мгновенных значений сигналов во времени. Для этой группы могут быть синтезированы следующие методы: *IIACEFG*; *IIACFGJ*; *IIACFGK*; *IIABCEFG*; *IIABCFGJ*; *IIABCFGK*; *IIADEFG*; *IIADFGJ*; *IIADFGK*; *IIABDEFG*; *IIABDFGJ*; *IIABDFGK*; *IIABCEFH*; *IIABCFHJ*; *IIABCFHK*; *IIABDEFH*; *IIABDFHJ*; *IIABDFHK*.

Таким образом, представленная классификация позволяет в общем случае синтезировать 50 методов.

Методы и системы измерения ИХГС на основе сравнения мгновенных значений, распределенных в пространстве

Рассмотрим примеры синтеза методов.

Метод *IABCEGL*, представляющий первую группу методов, основан на сравнении ортогональных составляющих одного из сигналов. Метод предполагает формирование дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых относительно основных на 90°; в момент равенства основного и дополнительного сигналов напряжения одновременно измеряют мгновенные значения основного сигнала напряжения, основного и дополнительного сигналов тока и определяют ИХГС по измеренным значениям [3].

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рисунке 2.

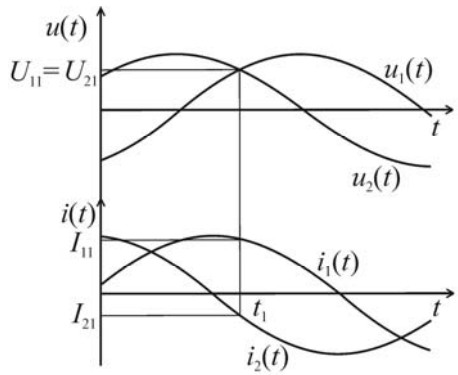


Рисунок 2 - Временные диаграммы, поясняющие первый метод

Для входного напряжения $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ и тока $i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ и дополнительных сигналов напряжения $u_2(t) = U_m \cos \omega t$ и тока $i_2(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi)$ в момент времени t_1, когда основной и дополнительный сигналы напряжения будут равны, выражения для мгновенных значений сигналов примут вид: $U_{11} = U_m \sin \alpha_1$; $U_{21} = U_m \cos \alpha_1$; $I_{11} = I_m \sin \alpha_2$; $I_{21} = I_m \cos \alpha_2$, где U_m, I_m - амплитудные значения напряжения и тока; α_1, α_2 - фазы сигна-

лов напряжения и тока в момент времени t_1; $\varphi = \alpha_2 - \alpha_1$ - угол сдвига фаз между сигналами напряжения и тока; ω - угловая частота входного сигнала.

Мгновенные значения U_{11} и U_{21} будут равны при угле $\alpha_1 = \frac{\pi}{4} + \pi l$, где $l = 0,1$.

В этом случае выражения для определения основных ИХГС примут вид:

- СКЗ напряжения и тока $U_{СКЗ} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = |U_{11}|$; $I_{СКЗ} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{I_{11}^2 + I_{21}^2}{2}}$;

- АМ и РМ $P = \frac{U_m I_m \cos\varphi}{2} = \frac{U_{11}(I_{21} + I_{11})}{2}$; $Q = \frac{U_m I_m \sin\varphi}{2} = \frac{U_{11}(I_{11} - I_{21})}{2}$.

Информационно-измерительная система (ИИС), реализующая метод, представлена на рисунке 3.

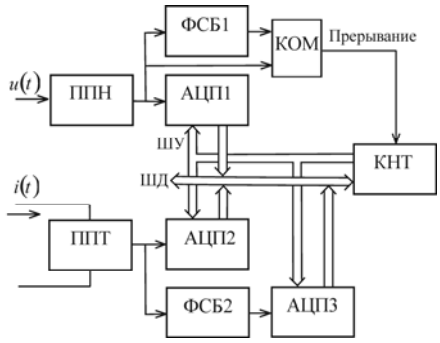


Рисунок 3 - ИИС, реализующая первый метод

В состав ИИС входят: первичные преобразователи напряжения ППН и тока ППТ, аналого-цифровые преобразователи АЦП1, АЦП2 и АЦП3, фазосдвигающие блоки ФСБ1 и ФСБ2, осуществляющие сдвиг входных сигналов на 90°, компаратор КОМ, контроллер КНТ, шины управления ШУ и данных ШД.

В рассматриваемом методе время измерения не зависит от угла сдвига фаз между напряжением и током, а определяется только временным интервалом между моментом начала измерения и моментом равенства мгновенных значений напряжений U_{11} и U_{21}.

Одним из существенных недостатков ИИС, реализующих данный методы, является частотная погрешность ФСБ. В результате этого при изменении частоты входного сигнала ФСБ производят сдвиг сигнала на угол, отличный от 90°.

Метод *IIABDEHL*, представляющий вторую группу методов, заключается в сравнении двух дополнительных сигналов и напряжения и тока, сдвинутых по фазе на произвольные (в общем случае) углы $\Delta\alpha$ и $2\Delta\alpha$. Причем в момент равенства мгновенных значений основного и, сдвинутого относительно него на $2\Delta\alpha$, дополнительного сигнала напряжения измеряют мгновенное значение сигнала напряжения, сдвинутого относительно основного на угол $\Delta\alpha$. В этот же момент времени измеряется мгновенное значение дополнительного сигнала тока, сдвинутого относительно основного сигнала на $\Delta\alpha$. В момент равенства мгновенных значений основного и, сдвинутого относительно него на $2\Delta\alpha$, дополнительного сигнала тока измеряют мгновенное значение сигнала тока, сдвинутого относительно основного на угол $\Delta\alpha$. ИХГС определяются по измеренным мгновенным значениям сигналов напряжения и тока [4].

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рисунке 4.

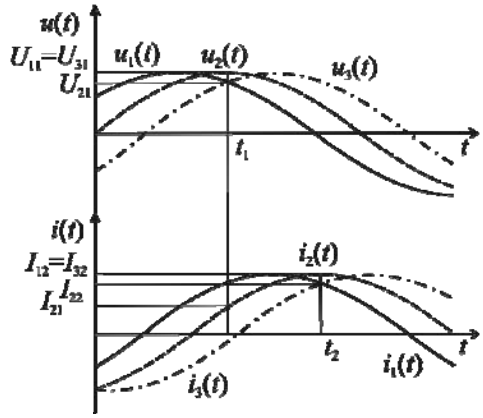


Рисунок 4 - Временные диаграммы, поясняющие второй метод

Для входных сигналов напряжения $u_1(t)$ и тока $i_1(t)$ дополнительные сигналы примут вид: $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha)$, $u_3(t) = U_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha)$ и $i_2(t) = I_m \sin(\omega t + \Delta\alpha + \varphi)$, $i_3(t) = I_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha + \varphi)$.

В момент времени t_1, когда $U_{11} = U_{31}$, мгновенное значение основного сигнала напряжения $U_{11} = U_m \sin \omega\Delta t_1$ (где Δt_1 - интервал времени между переходом сигнала $u_1(t)$ через ноль до момента времени t_1), а мгновенные значения первого и второго дополнительных сигналов будут равны: $U_{21} = U_m \sin(\omega\Delta t_1 + \Delta\alpha)$ и $U_{31} = U_m \sin(\omega\Delta t_1 + 2\Delta\alpha)$.

Равенство мгновенных значений сигналов $U_{11} = U_{31}$ выполняется в том случае, если $\omega\Delta t_1 + 2\Delta\alpha = \omega\Delta t_1$ ($\Delta\alpha \neq 0$), то есть, когда $2\Delta\alpha = \pi + 2\pi k - 2\omega\Delta t_1$ или $\omega\Delta t_1 = \frac{\pi}{2}(2k+1) - \Delta\alpha$, где k=0, 1. Отсюда $U_{21} = U_m \sin\left[\frac{\pi}{2}(2k+1)\right] = \pm U_m$.

В момент времени t_1 мгновенное значение дополнительного сигнала тока $i_2(t)$ будет равно $I_{21} = I_m \sin(\omega\Delta t_1 + \Delta\alpha + \varphi) = I_m \sin\left[\frac{\pi}{2}(2k+1) + \varphi\right] = \pm I_m \cos\varphi$.

В момент времени t_2, когда $I_{12} = I_{32}$, мгновенные значения основного и дополнительного сигналов будут равны: $I_{12} = I_m \sin(\omega\Delta t_2 + \varphi)$; $I_{22} = I_m \sin(\omega\Delta t_2 + \Delta\alpha + \varphi)$ и $I_{32} = I_m \sin(\omega\Delta t_2 + 2\Delta\alpha + \varphi)$ (где Δt_2 - интервал времени между переходом сигнала $i_1(t)$ через ноль до момента времени t_2).

По аналогии с сигналом напряжения $I_{22} = I_m \sin\left[\frac{\pi}{2}(2k+1)\right] = \pm I_m$.

Выражения для определения основных ИХГС принимают вид:

- СКЗ напряжения и тока $U_{СКЗ} = \frac{|U_{21}|}{\sqrt{2}}$; $I_{СКЗ} = \frac{|I_{22}|}{\sqrt{2}}$;

- АМ и РМ $P = \frac{U_{21} I_{21}}{2}$; $Q = \frac{U_{21} |I_{22}| \operatorname{sign}(I_{21})}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{I_{21}}{I_{22}}\right)^2}$.

Схема ИИС, реализующей метод, представлена на рисунке 5.

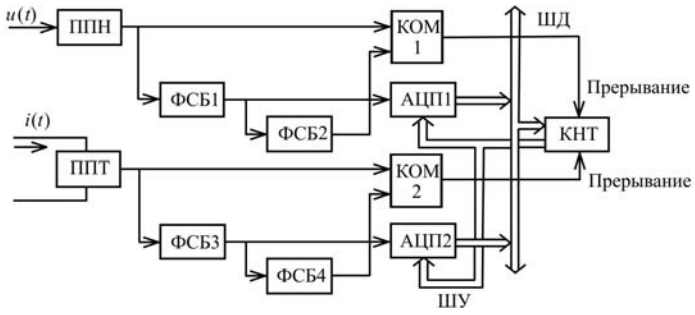


Рисунок 5 - ИИС, реализующая второй метод

Поскольку углы сдвиг фаз ФСБ $\Delta\alpha$ могут быть произвольными, то система исключает частотную погрешность фазосдвигающих блоков. Однако при отличии углов сдвига фаз ФСБ возникает существенная погрешность.

В рассматриваемом методе время измерения зависит от длительности интервала времени между моментом начала измерения и моментом равенства мгновенных значений напряжений U_{11} и U_{31}, а также зависит от угла сдвига фаз между напряжением и током.

Заключение

Предложенная классификация методов измерения интегральных характеристик на основе сравнения и использования мгновенных значений основных и дополнительных гармонических сигналов позволяет синтезировать новые методы и средства определения ИХГС.

Анализ методов и систем измерения ИХГС, для определения которых используются ортогональные составляющие сигналов, показал, что их основным недостатком является частотная погрешность ФСБ. Использование дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных на произвольный угол, исключает данный вид погрешности.

Всем методам и средствам измерения ИХГС на основе сравнения входных и дополнительных сигналов присуща погрешность, обусловленная погрешностью по модулю ФСБ, в результате которой амплитудные значения входного и дополнительного сигналов отличаются друг от друга.

Список литературы

[1] Мелентьев В.С. Анализ погрешности определения интегральных характеристик периодических сигналов по мгновенным значениям // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физико-математические науки. – 2006. - №42. – С.118 - 122.

[2] Мелентьев В.С., Батищев В.И. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 240 с.

[3] Мелентьев В.С., Лычев А.О., Миронов А.А. Синтез методов и систем измерения интегральных характеристик с использованием ортогональных составляющих гармонических сигналов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIV междунар. конф. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2012. – С. 625-633.

[4] Мелентьев В.С., Лычев А.О. Метод измерения интегральных характеристик на основе сравнения мгновенных значений гармонических сигналов, распределенных в пространстве // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2011. - № 4(32). - С. 236 - 239.

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРФЕЙСА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ РЕГИСТРАЦИИ РАЗНОЧАСТОТНЫХ ПОТОКОВ ДАННЫХ

В.В. Гучук

Институт проблем управления РАН
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65, Россия
polma@bk.ru
тел: +7 (495) 334-89-51, факс: +7 (495) 334-93-40

Ключевые слова: *пользовательский интерфейс, программное обеспечение, поток регистрируемой информации, стенд для испытания, план испытания, визуализация*

Abstract
The description of the user interfaces of the software for registration of a diverse data flow in real time is provided. In its structure of the program of preparation for carrying out tests, managements of tests, data recording and analysis of results of tests.

Введение

Сложность задачи контроля и управления испытаниями сложных научно-технических изделий, например, жидкостных ракетных двигателей, определяется необходимостью обеспечить регистрацию разнородного потока данных, контроль и управление при большом числе сигнальных каналов, каналов мониторинга и управления. Для обеспечения надежной регистрации необходимо решить целый ряд вопросов формирования полноценного интерфейса прикладных программ, используемых при подготовке испытаний, их проведении и при оперативном анализе получаемых данных. Вопросы обеспечения переноса программного обеспечения и устойчивости графического интерфейса рассмотрены в [3], а проблематика представления информационных динамических параметров анализируется в [4]. В данной работе приводится эскизное описание интерфейсных решений оригинального программного обеспечения для регистрации разнородного потока данных в реальном масштабе времени. Аппаратная асть системы реализовывалась на модульной станции сбора данных Н-2000 и крейтовой системе LTR компании L-CARD (г. Москва).

1 Программы подготовки к многоканальной регистрации данных

Подготовка к регистрации – сложный и многоплановый этап, который, как правило, занимает весьма длительный период времени. Часть функций по подготовке к регистрации в описываемой системе выполняет программа “Конфигуратор”.

Программа предназначена для задания полной структуры системы (определение расположения крейт-модулей в слотах и подключения датчиков ко входам крейт-модулей, поканальный выбор частотных трактов), а также трактовых и технологических параметров регистрации (выбор синхроканалов управления трактами - разночастотными потоками данных, выбор базовых частот опроса канала для трактов, задание размера буфера для данных и размера формируемых на аппаратном уровне блоков данных, определение минимального объема записываемых на диск данных и максимального размера файлов данных, выбор полярности и минимальной длительности управляющих синхроимпульсов).

Рабочая панель программы, дающая общее впечатление о ее возможностях и особенностях представлена на рис. 1.

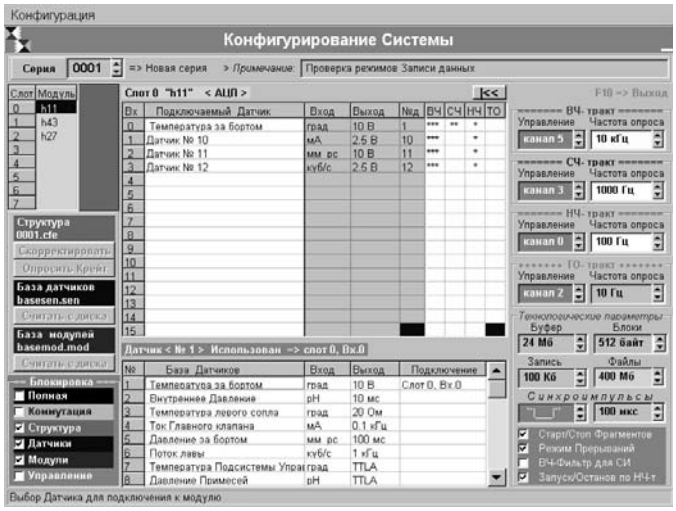


Рисунок 1 – Рабочая панель программы “Конфигуратор”

При запуске Конфигуратора путем непосредственного опроса крейта происходит определение слотовой структуры крейта. С помощью управляющих компонентов рабочей панели программы можно задавать различные параметры регистрации, например, выбрать слот с модулем и “подключить” ко входам модуля датчики из базы датчиков или внести изменения в трактовые и технологические параметры регистрации (синхроканалы управления, тракты, базовые частоты опроса для трактов, полярность и минимальная длительность управляющих синхроимпульсов и т.д.).

Подготовка к регистрации данных включает в себя также процедуры описания модулей и датчиков, тестирование подключаемых модулей, планирование регистрации и т.д. Процедуры описания реализованы в программах-редакторах, например, в редакторе базы датчиков, рабочая панель которого представлена на рис. 2.

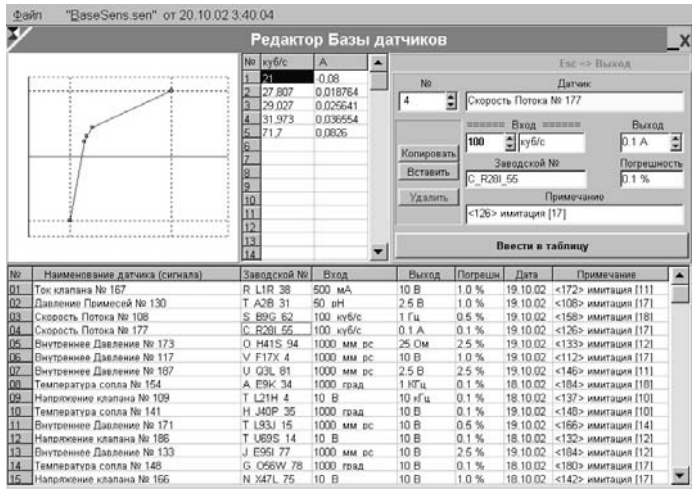


Рисунок 2 – Рабочая панель редактора базы датчиков

Программа предназначена для создания и редактирования файлов базы датчиков, содержащих наименование и тип датчиков, заводской №, входные и выходные единицы измерения, тарировочные характеристики, минимальные и максимальные значения входа и выхода датчиков (вычисляются по таблице тарировочных характеристик), величину погрешности, строку примечания произвольного содержания, дату внесения данных или дату последней их корректировки. Предусмотрено представление тарировочных кривых в виде графика, а также печать содержимого базы.

Слева вверху на рабочей панели редактора располагается панель тарировочных кривых. Справа на этой панели располагается таблица со значениями координат (по которой затем определяются минимальные и максимальные их значения), слева поле для рисования кривых (назначение которых – показать характер кривой и исключить грубые ошибки при вводе координат). При считывании информации о датчике из базы, автоматически заполняется и таблица со значениями координат, одновременно с рисованием кривой в поле для рисования.

Для тестирования подключаемых модулей используются тестовые программы. Например, в программе тестирования ТТЛ-модулей можно использовать внешнюю подачу на входы модуля различных ТТЛ-уровней и производить визуальный контроль состояния модуля. Предусмотрен также режим внутренней установки выходов цифрового модуля в различные ТТЛ-состояния и программный или визуальный контроль отработки уровня. На рис. 3 представлена рабочая панель программы комплексного тестирования модулей АЦП.

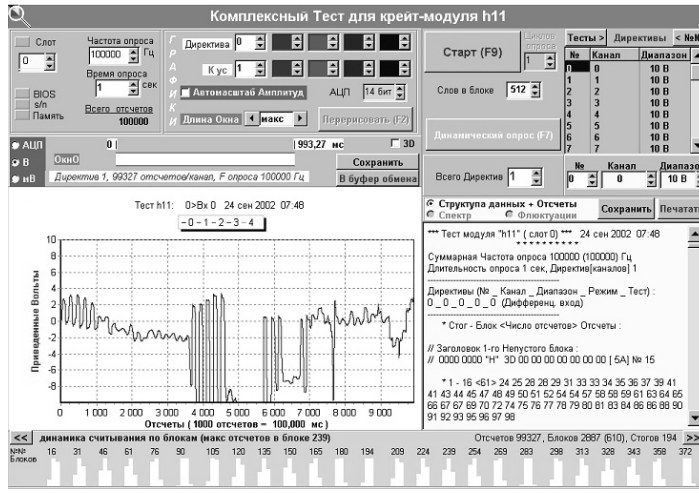


Рисунок 3 – Рабочая панель программы комплексного тестирования модуля АЦП

Программа предназначена для проверки работоспособности АЦП-модуля, включая структурно-временной анализ процесса регистрации и тестирование с использованием внутренних тестовых сигналов. На рабочей панели программы размещены управляющие компоненты, с помощью которых можно задавать различные параметры управления модулем (частота опроса, задействованные каналы, чувствительность входов и т.д.), а также выбрать параметры представления тестовых данных.

Определяющее место среди программ подготовки регистрации занимает программа “Планировщик”. Программа предназначена для задания полной временной структуры регистрации (параметров циклограмм, времени записи при непрерывном режиме), каналов воздействия и управления, частотных трактов для фрагментов, технологических параметров регистрации (выбор синхроканалов управления трактами - разночастотными потоками данных), временах задержки, длительности сигналов воздействия и управления, выбора полярности и мини-

мальной длительности управляющих синхроимпульсов и т.п.). Рабочая панель программы, дающая общее впечатление о ее возможностях и особенностях представлена на рис. 4.

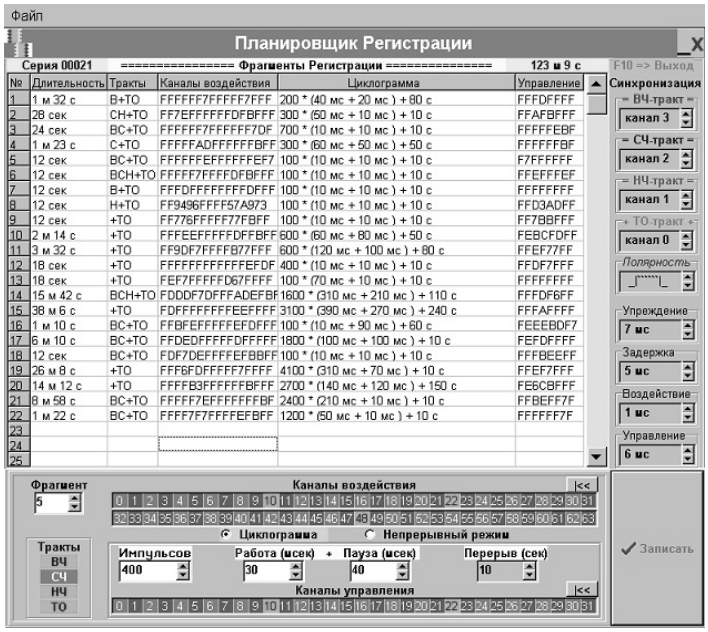


Рисунок 4 – Рабочая панель программы “Планировщик”

Основные команды главного меню программы позволяют создать новый директивный файл конфигурации с описанием структуры системы регистрации для решения конкретной задачи, считать с диска директивный файл конфигурации, записать на диск новый или отредактированный файл конфигурации, распечатать конфигурации (вся информация будет представлена в табличном виде).

Центральную часть рабочей панели “Планировщика” занимает таблица фрагментов, дающая общее представление о структуре процесса регистрации. Редактирование данных производится с помощью панели задания параметров, а таблица позволяет выбрать фрагмент для редактирования. Внизу расположена Панель задания параметров.

Сверху посредине на информационной панели расположены индикаторы каналов воздействия (№№ ТТЛ-модуля управления). Включение и выключение канала в список каналов воздействия осуществляется щелчком курсора по индикатору. О включении канала в список свидетельствует салатовый цвет индикатора. Кнопка “|<<” позволяет отключить все каналы.

Под индикаторами каналов воздействия расположены *элементы управления временной структурой* фрагмента.

Если переключатель выбора режима установлен в положение “Циклограмма”, то доступны такие *элементы управления временной структурой* Фрагмента, как: - Окошко “к-во импульсов” с позиционером для задания количества импульсов в Циклограмме, - Окошко “Работа (мсек)” с позиционером для задания длительности активного состояния в каждом цикле, - Окошко “Пауза (мсек)” с позиционером для задания длительности пассивного состояния, перемежающего активные состояния в каждом цикле, - Окошко “Перерыв (сек)” с позиционером для задания длительности простоя между Циклограммами, - Индикаторы каналов Управления (№№ Адресов Управления), работа с которыми организована аналогично работе с индикаторами каналов воздействия.

Если переключатель выбора режима “Циклограмма” - “Непрерывный режим” установлен в положение “Циклограмма”, то становится доступным окошко “Длительность фрагмента (сек)” с позиционером для задания длительности фрагмента в “Непрерывном режиме”, а также соответствующие *элементы управления временной структурой.*

2 Программы проведения регистрации

Управление процессом регистрации осуществляет программа “Регистратор”. Программа работает в двух режимах: с внешним управлением и под непосредственным управлением человека-оператора. Рабочая панель программы в первом режиме представлена на рис. 5.

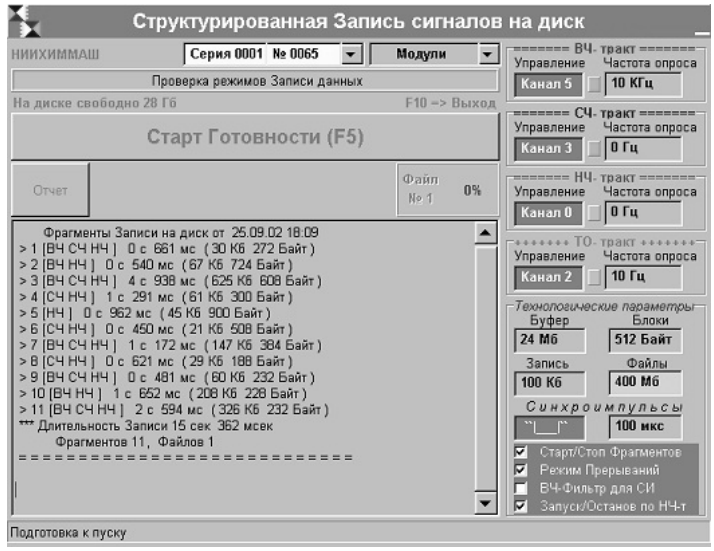


Рисунок 5 – Рабочая панель программы “Регистратор” в режиме с внешним управлением

В этом режиме программа осуществляет пофрагментную записи на диск разночастотных и разнородных сигналов с динамически перестраиваемым составом частотных трактов и внешним программным управлением. Регистратор использует подготовленный заранее программой “Конфигуратор” директивный файл, после считывания которого заполняются информационные окна и выставляются индикаторы, а также производит предварительный опрос крейта. Временная структура внешнего управления задается программой “Планировщик”.

Сверху на рабочей панели Менеджера находятся позиционеры для задания общих технологических параметров. Ниже находятся позиционер для задания смещения времени выставления импульсов воздействия и включатели каналов воздействия. Еще иже – позиционер для задания смещения времени включения трактов измерения и включатели трактов. В центре рабочей панели Менеджера находятся позиционеры и кнопки задания параметров каналов управления.

Нижнюю часть рабочей панели Менеджера занимают временные диаграммы, наглядно представляющие временную структуру регистрации. При помещении курсора на шкалу времени его позиция будет отображаться во всплывающем окошке в мс от начала регистрации. Справа внизу на рабочей панели Менеджера находится кнопка “Старт”.

Процесс регистрации сопровождают и другие программно-аппаратные службы, в частности, направленные на предупреждение возникновения нештатных ситуаций и обеспечиваю-

щие в целом проведение эксперимента. В них используется большое число методов и алгоритмических решений, например, описанных в [5].

3 Программы анализа экспериментальных данных

Интерпретация результатов регистрации – это нередко сложнейшая часть экспериментальных исследований. Помимо программ анализа, программный комплекс включает в себя программы визуализации экспериментальных данных, в том числе программу “Осциллограф”, предназначенную для просмотра данных, полученных с помощью программ регистрации. Программа работает с данными, полученными от модулей “АЦП”, “Омметр”, “Частотомер”, “Амперметр” и “ТТЛ”. Осциллограф содержит окно графиков, в котором отображаются графики сигналов, всплывающую электронную лупу (окно-линзу) для увеличенного представления выбранной области окна (для лупы можно использовать весь экран монитора), информационные окошки а также кнопки и позиционеры для: задания файла данных, выбора фрагмента и каналов данных, масштабирования и сдвигов по оси времени и оси амплитуд, непосредственного задания ширины и положения окна на фрагменте, выбора параметров представления. Реализована работа в единицах измерения физической величины для каждого из каналов и предусмотрено использование тарировочной кривой датчиков из базы датчиков. Предусмотрен запуск произвольного числа независимых копий Осциллографа, что позволяет одновременно выводить в отдельных окнах различные кривые без нагромождения их друг на друга, в том числе с группировкой кривых, например, по наименованию единиц измерения.

Имеются также блок программ диагностического плана.

Заключение

В работе описаны некоторые интерфейсные решения для программного обеспечения, направленного на организацию регистрации разнородных потоков данных в реальном масштабе времени. Приведено описание нескольких базовых программ, обеспечивающих подготовку к регистрации. Проиллюстрирован интерфейс, сопровождающий процесс регистрации данных.

Разработанное программное обеспечение было использовано в системе контроля и интерактивного управления стенда для испытания жидкостных ракетных двигателей малой тяги[1].

Список литературы

[1] Нестеров В.С., Гучук В.В., Рябых В.Ю. Технологические аспекты организации процесса многоканальной регистрации разночастотного потока данных. // Труды международной научно-практической конференции “Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях”, М.- ИПУ РАН, 2011 г., С. 629 – 637.

[2] Карепанов А. Новая многофункциональная система сбора данных Chroma 51101 // Современная электроника, 2012 г., №8, С. 36-41.

[3] Гучук В.В. Применение программной фиксации графического интерфейса прикладных программ. / Материалы 6-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2012, Москва). М.: ИПУ РАН, 2012. Т. 2. С. 298-301.

[4] Гучук В.В., Нестеров В.С. Визуализация информационных динамических параметров в системах контроля и управления. / Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (УКИ-2010): Труды конференции. / М.- ИПУ РАН, 2010. С. 370 – 375.

[5] Дубовик Е.А., Дубовик А.Е. Численные методы и алгоритмы диспетчеризации вычислений с динамически изменяющимися приоритетами. М.: Синтег. 2006 г., 120 С.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВОЗМУЩЕНИЙ

В.А. Засов, М.В. Ромкин

г.Самара, Самарский государственный университет путей сообщений

443066, Самара, 1-ый Безымянный пер., 18, Россия

vzasov@mail.ru

тел: +7 (846) 999-54-60

Ключевые слова: *разделение сигналов, возмущения параметров, устойчивость решения, детерминированные и стохастические вариации, модели сигналов, сингулярные интервалы.*

Abstract

The paper deals with the algorithm of stability control of the signal separation. Stability analysis is performed by calculating the singular intervals of the mixing matrix for the absolute, relative, critical and stochastic variations of matrix parameters. The authors consider singular intervals as parameter intervals ranging from the source condition to the singular condition of the mixing matrix. Computer modeling proved the algorithm is valid under uncertainty of parameter perturbation.

Введение

Разделение сигналов - это решение задачи выделения отдельных сигналов из аддитивной смеси нескольких сигналов, поступающих в точки измерения от различных источников сигналов, недоступных для непосредственных измерений. Решение этой задачи необходимо во многих областях практической деятельности: мониторинге и диагностике технических объектов (например, виброакустической диагностике), связи, в медицинской диагностике, обработке речевых сигналов и т.д. Так как задача разделения сигналов относится к классу обратных задач, из чего следуют возможные некорректность и неустойчивость решения, актуальными являются исследования в области анализа и контроля устойчивости решения этой задачи в условиях неполной информации о параметрах объектов. Причинами неполной информации могут быть, например, погрешности определения параметров объектов, а также вариации этих параметров под влиянием возмущений, учесть и заранее предсказать влияние которых на устойчивость не представляется возможным. Такого рода изменения параметров вносят априорную неопределенность, вследствие чего требуется применение анализа и контроля устойчивости решения задачи разделения сигналов [1].

Целью работы является разработка алгоритмов и программ, позволяющих осуществлять анализ и контроль устойчивости решения задачи разделения сигналов в условиях априорной неопределенности возмущений параметров объектов.

Алгоритмы анализа и контроля устойчивости решения задачи разделения сигналов

Лежащая в основе предлагаемого подхода к исследованию математическая модель образования сигналов отличается возможностью задания различных видов вариации параметров каналов, связывающих каждый из M выходов многомерной модели со всеми ее N входами. Модель образования сигналов представлена на рисунке 1 и описывается системой уравнений типа дискретной свертки:

$$(1)\quad x_m(k)=\sum_{n=1}^{N}\sum_{g=0}^{G-1}(h_{mn}(g,l)+\delta\tilde{h}_{mn}(g,l)+\delta\hat{h}_{mn}(g,l))s_n(k-g)+y_m(k)$$

Входные сигналы модели в момент времени k представляются в виде N - мерного вектора $\mathbf{s}(k)=\left[s_1(k),s_2(k),\ldots,s_N(k)\right]^T$, выходные сигналы – в виде M - мерного вектора $\mathbf{x}(k)=\left[x_1(k),x_2(k),\ldots,x_M(k)\right]^T$, а шум – в виде вектора шума $\mathbf{y}(k)=\left[y_1(k),y_2(k),\ldots,y_M(k)\right]^T$. В модели (1) обозначены: $h_{mn}(g,l)$ - элементы $M\times N$ матрицы $\mathbf{h}(g,l)$ каналов передачи сигналов, описываемых конечными импульсными характеристиками с числом отсчетов G; $\delta\tilde{h}_{mn}(g,l)$ - элементы $M\times N$ матрицы $\delta\tilde{\mathbf{h}}(g,l)$ детерминированных сингулярных вариаций параметров, а $\delta\hat{h}_{mn}(g,l)$ - элементы $M\times N$ матрицы $\delta\hat{\mathbf{h}}(g,l)$ стохастических сингулярных вариаций параметров каналов, которые отражают возможные малые возмущения в каналах, погрешности измерения параметров каналов и т.п.;

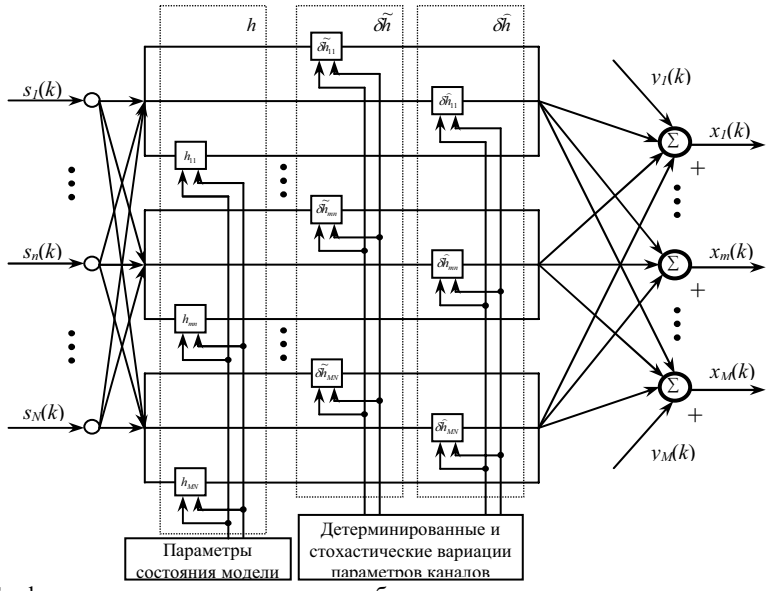


Рисунок 1 – Графическое представление модели образования сигналов с возможностью задания вариаций параметров для анализа устойчивости разделения сигналов

Динамические характеристики каналов $h_{mn}(g,l)$ являются квазистационарными, т.е. изменяются в зависимости от некоторого параметра l (времени, температуры, местоположения и т.д.).

В частотной области систему уравнений (1) можно записать, в виде

$$(2)\quad \mathbf{X}(\omega)=(\mathbf{H}(\omega,l)+\delta\tilde{\mathbf{H}}(\omega,l)+\delta\hat{\mathbf{H}}(\omega,l))\cdot\mathbf{S}(\omega)+\mathbf{Y}(\omega),$$

где $\mathbf{X}(\omega)=\left[X_1(\omega),X_2(\omega),\ldots,X_M(\omega)\right]^T$, $\mathbf{S}(\omega)=\left[S_1(\omega),S_2(\omega),\ldots,S_N(\omega)\right]^T$, $\mathbf{Y}(\omega)=\left[Y_1(\omega),Y_2(\omega),\ldots,Y_M(\omega)\right]^T$ - векторы, состоящие из Фурье-образов сигналов приемников, источников и шума соответственно, а $\mathbf{H}(\omega,l)$, $\delta\tilde{\mathbf{H}}(\omega,l)$ и $\delta\hat{\mathbf{H}}(\omega,l)$ - $M\times N$ матрицы, элементами которых являются Фурье-образы импульсных характеристик каналов и сингулярных вариаций. Сигналы источников $\mathbf{S}(\omega)$ и шума $\mathbf{Y}(\omega)$ считаются независимыми.

В модели (1) предлагается использовать наиболее часто встречающиеся в инженерной практике абсолютные, относительные и критические детерминированные вариации параметров каналов и дисперсию для задания стохастических вариаций параметров каналов. Эти вариации и их сочетания моделируют большинство видов реальных возмущений параметров объектов (другими словами, моделируют различные виды априорной неопределенности возмущений)[1,2]. В данной работе, учитывая, что стохастические вариации задаются дисперсией, т.е. детерминированной величиной, включим их как составную часть в абсолютные, относительные и критические детерминированные вариации, т.е. сведем задачу анализа к чисто детерминированной задаче.

Под критическими вариациями понимают такие, которые приводят исходную модель (1)-(2) образования сигналов к вырожденной, при минимальной спектральной норме вариаций $\left\|\delta\widetilde{\mathbf{H}}(\omega,l)\right\|_2$ и $\left\|\delta\widehat{\mathbf{H}}(\omega,l)\right\|_2$. Относительные вариации имеют значение, пропорциональное значению элемента смешивающей матрицы. Абсолютные вариации могут иметь любую величину, не связанную со значением элемента смешивающей матрицы $\mathbf{H}(\omega)$.

В дальнейшем матрицы интервалов параметров от исходного $\mathbf{H}(\omega)$ до вырожденного (сингулярного) состояния $\widetilde{\mathbf{H}}(\omega)$ назовем матрицами сингулярных интервалов параметров и обозначим как $\Delta\widetilde{\mathbf{H}}_{абс}(\omega)$, $\Delta\widetilde{\mathbf{h}}_{абс}(g)$ для абсолютного, $\Delta\widetilde{\mathbf{H}}_{отн}(\omega)$, $\Delta\widetilde{\mathbf{h}}_{отн}(g)$ относительного и $\Delta\widetilde{\mathbf{H}}_{крит}(\omega)$, $\Delta\widetilde{\mathbf{h}}_{крит}(g)$ критического видов вариации соответственно.

Анализ устойчивости производится путем определения сингулярных интервалов при вариации параметров модели в направлении, максимально ухудшающем устойчивость решения задачи разделения сигналов [1].

На этапе контроля устойчивости производится сравнение вычисленных сингулярных интервалов с заданными интервалами устойчивого разделения.

Для определения сингулярных интервалов параметров для различных видов вариации разработан обобщенный алгоритм, в котором можно выделить три этапа: определение сингулярного направления вариации параметров, определение сингулярной матрицы $\widetilde{\mathbf{H}}$ и определение матрицы $\Delta\widetilde{\mathbf{H}}$ сингулярных интервалов.

Сингулярные направления для абсолютных, относительных и критических вариаций определяются матрицами $\widetilde{\mathbf{Z}}$ направлений, аналитические выражения для которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Аналитические выражения для вычисления матриц $\widetilde{\mathbf{Z}}_{крит}$, $\widetilde{\mathbf{Z}}_{абс}$ и $\widetilde{\mathbf{Z}}_{отн}$ направлений

Метод расчета	Вид вариации		
	Критический	Абсолютный	Относительный
На основе обратной матрицы	$-\dfrac{\mathbf{H}^{-*}}{\left\|\mathbf{H}^{-1}\right\|_2}$	$-\dfrac{\lvert\mathbf{A}\rvert\otimes\mathbf{sign}(\mathbf{H}^{-*})}{\left\|\lvert\mathbf{A}\rvert\otimes\mathbf{sign}(\mathbf{H}^{-*)}\right\|_1}$	$-\dfrac{\lvert\mathbf{H}\rvert\otimes\mathbf{sign}(\mathbf{H}^{-*})}{\left\|\lvert\mathbf{H}\rvert\otimes\mathbf{sign}(\mathbf{H}^{-*})\right\|_1}$
На основе SVD	$-u_N v_N^*$	$-\dfrac{\lvert\mathbf{A}\rvert\otimes\mathbf{sign}(u_N v_N^*)}{\left\|\lvert\mathbf{A}\rvert\otimes\mathbf{sign}(u_N v_N^*)\right\|_2}$	$-\dfrac{\lvert\mathbf{H}\rvert\otimes\mathbf{sign}(u_N v_N^*)}{\left\|\lvert\mathbf{H}\rvert\otimes\mathbf{sign}(u_N v_N^*)\right\|_2}$

Матрицы направлений могут вычисляться как на основе сингулярного разложения (SVD), так и на основе обратной матрицы. Определение сингулярных направлений на основе предложенных матриц $\widetilde{\mathbf{Z}}$ имеет меньшую вычислительную сложность по сравнению с известными алгоритмами, причем предложенные матрицы $\widetilde{\mathbf{Z}}$ могут быть использованы для определения

сингулярных интервалов параметров не только для действительных (как в известных алгоритмах), но и для комплексных (частотнозависимых) элементов смешивающей матрицы $\mathbf{H}$.

В таблице 1 обозначены: $|\mathbf{A}|$ - матрица, составленная из модулей элементов матрицы $\mathbf{A}$ и задающая абсолютные вариации параметров; **sign(A)** - операция над матрицей, элементы которой вычисляются как $sign(A_{mn}) = A_{mn} / |A_{mn}|$; $\otimes$ - операция поэлементного умножения матриц $\mathbf{C} = \mathbf{A} \otimes \mathbf{B}$, где $C_{mn} = A_{mn} \cdot B_{mn}$; v_n и u_n - правые и левые сингулярные векторы SVD разложения $H = U\Sigma\mathbf{V}^* = \sum_{n=1}^{N} \sigma_n u_n v_n^*$; $\| \|_1$ - максимально столбцовая норма.

Сингулярную матрицу $\widetilde{\mathbf{H}}$ предлагается вычислять путем нахождения корней уравнения $f(\mathbf{H}_j + \delta h \cdot \widetilde{\mathbf{Z}}) = \det(\mathbf{H}_j + \delta h \cdot \widetilde{\mathbf{Z}}) = 0$ в условиях ограничений, задаваемых видами вариаций параметров.

Численный алгоритм (таблица 2), определения сингулярных матриц $\widetilde{\mathbf{H}}$ для абсолютных, относительных и критических вариаций разработан на основе метода Ньютона, в котором, в отличие от классического, производная $f'_{\widetilde{Z}_j}(\mathbf{H}_j)$ рассчитывается на основе матрицы направлений $\widetilde{\mathbf{Z}}$ и уточняется на каждом шаге. Это позволяет повысить точность и уменьшить вычислительную сложность этого алгоритма по сравнению с известными.

Таблица 2 – Алгоритм определения сингулярной матрицы $\widetilde{\mathbf{H}}$ на основе метода Ньютона

Шаг	Действие	Комментарий
1	Задается параметр $\gamma > 0$, определяющий погрешность, величину шага δh, начальное значение итерации $j = 1$	Производится инициализация
2	Определяется $\widetilde{\mathbf{Z}}_j$ в зависимости от вида вариации параметров (таблица 1) для матрицы $\mathbf{H}_j$	Вычисляется матрица направления
3	$f'_{\widetilde{\mathbf{Z}}_j}(\mathbf{H}_j) = \dfrac{df(\mathbf{H}_j)}{d\widetilde{\mathbf{Z}}_j} = \dfrac{f(\mathbf{H}_j + \delta h \cdot \widetilde{\mathbf{Z}}_j) - f(\mathbf{H}_j)}{\delta h}$	Вычисляется производная по направлению $\widetilde{\mathbf{Z}}_j$
4	$\delta\widetilde{\mathbf{H}}_j = -\dfrac{\widetilde{\mathbf{Z}}_j \cdot f(\mathbf{H}_j)}{f'_{\widetilde{\mathbf{Z}}_j}(\mathbf{H}_j)}$	Вычисляется матрица сингулярных вариаций параметров $\delta\widetilde{\mathbf{H}}_j$
5	$\mathbf{H}_{j+1} = \mathbf{H}_j + \delta\widetilde{\mathbf{H}}_j$	Вычисляется новое приближение
6	Если $\left|f(\mathbf{H}_{j+1}) - f(\mathbf{H}_j)\right| < \gamma$, то конец алгоритма $\widetilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H}_j$, иначе $j = j+1$, переход к шагу 2	Проверяется условие завершения алгоритма

На третьем этапе вычисление матрицы $\Delta\widetilde{\mathbf{H}}$ сингулярных интервалов производится следующим образом: $\Delta\widetilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H} - \widetilde{\mathbf{H}}$. В предложенном алгоритме функция $f(\mathbf{H}_j + \delta h \cdot \widetilde{\mathbf{Z}})$ должна удовлетворять условиям теорем сходимости метода Ньютона, в том числе условию Липшица.

Для абсолютных, относительных и критических вариаций параметров построены зависимости (рисунок 2) относительной погрешности $\xi_{\Delta\widetilde{H}}$ определения сингулярных интервалов $\Delta\widetilde{\mathbf{H}}$ от приведенной погрешности параметров смешивающей матрицы $\mathbf{H}$ (определяемой числом двоич-

ных разрядов АЦП) и ее числа обусловленности $cond\mathbf{H}$. Эти зависимости подтверждают возможность использования разработанных алгоритмов в инженерных приложениях.

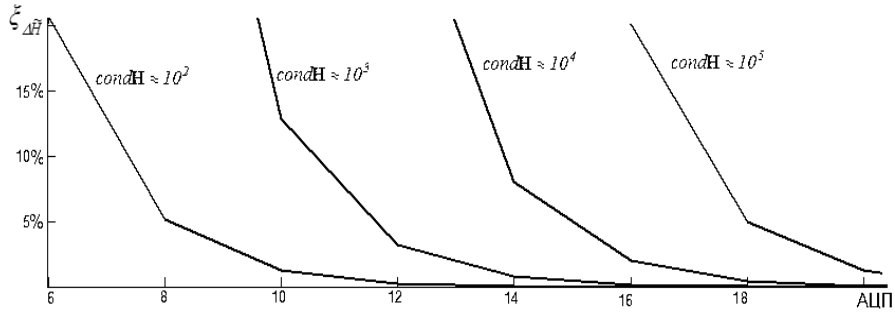


Рисунок 2 – Зависимость относительной погрешности $\xi_{\Delta\tilde{H}}$ определения сингулярных интервалов от приведенной погрешности параметров матрицы $\mathbf{H}$ (задаваемой разрядностью АЦП) при критических вариациях параметров)

На основе методики вычисления сингулярных интервалов разработаны алгоритмы контроля устойчивости разделения сигналов при известной, представленной в таблице 3, и неизвестной, представленной в таблице 4, закономерностях изменения параметров.

Таблица 3 – Алгоритм контроля устойчивости при известной закономерности изменения параметров

Шаг	Действие	Комментарий
1	Задается индекс частоты $\mathrm{g}=0$ спектральной матрицы $\mathbf{H}(\omega_g, l)$	Инициализация
2	Вычисляется матрица $\Delta\tilde{\mathbf{H}}(\omega_g, l) = \mathbf{H}(\omega_g, l) - \tilde{\mathbf{H}}(\omega_g, l)$ сингулярных интервалов	Для частоты ω_{g}
3	Определяется пороговая матрица $\mathbf{H}_{\Pi}(\omega_g, l)$	Для частоты ω_{g}
4	Определяются матрицы интервалов параметров устойчивого $\Delta\tilde{\mathbf{H}}_R(\omega_g, l) = \mathbf{H}(\omega_g, l) - \mathbf{H}_{\Pi}(\omega_g, l)$ и неустойчивого $\Delta\tilde{\mathbf{H}}_S(\omega_g, l) = \tilde{\mathbf{H}}(\omega_g, l) - \mathbf{H}_{\Pi}(\omega_g, l)$ разделения	Для частоты ω_{g}
5	Если $\left\|\Delta\mathbf{H}_{\max}(\omega_g, l)\right\| \le \left\|\Delta\tilde{\mathbf{H}}_R(\omega_g, l)\right\|$, то решение устойчиво, в противном случае выдается сообщение, что устойчивое разделение сигналов в объекте для частоты ω_{g} невозможно	Проверяются условия устойчивости разделения на частоте ω_{g}
6	Если $\left\|\Delta\mathbf{H}_{возм}(\omega_g, l)\right\| \le \left\|\Delta\tilde{\mathbf{H}}_R(\omega_g, l)\right\|$, то решение устойчиво, в противном случае выдается сообщение, что устойчивое разделение сигналов в объекте для частоты ω_{g} не гарантируется	Проверяются условия устойчивого разделения на частоте ω_{g}
7	$\mathrm{g} = \mathrm{g}+1$. Если $g > G-1$, то конец алгоритма и вывод итогового сообщения по результатам контроля устойчивости, иначе переход к шагу 2	Переход к следующей спектральной матрице

Введенная на шаге 5 матрица $\Delta\mathbf{H}_{\max}(\omega_g, l)$ максимально допустимых интервалов изменения параметров задается из теоретических и практических сведений о моделируемом объекте. Матричные неравенства типа $|\mathbf{A}| \le |\mathbf{B}|$ следует понимать как системы покомпонентных неравенств $|A_{mn}| \le |B_{mn}|$.

Таблица 4 – Алгоритм контроля устойчивости при неизвестной закономерности изменения параметров

№	Действие	Комментарий
1	Задается номер спектральной матрицы $g = 0$	Инициализация
2	Вычисляется матрица $\Delta\widetilde{\mathbf{H}}(\omega_g, l) = \mathbf{H}(\omega_g, l) - \widetilde{\mathbf{H}}(\omega_g, l)$ сингулярных интервалов	для частоты ω_g
3	Если $\left\|\Delta\mathbf{H}_{\max}(\omega_g, l)\right\| \le \left\|\eta \cdot \Delta\widetilde{\mathbf{H}}(\omega_g, l)\right\|$, то решение устойчиво, в противном случае выдается сообщение, что устойчивое разделение сигналов в объекте для частоты ω_g не гарантируется	$0 < \eta < 1$ - коэффициент запаса устойчивости
4	g = g +1 . Если $g > G - 1$, то конец алгоритма и вывод итогового сообщения по результатам контроля устойчивости, иначе переход к шагу 2	Проверяется условие завершения алгоритма

Пороговая матрица $\mathbf{H}_{П}(\omega_g, l)$, определяемая на шаге 3 алгоритма, - это смешивающая матрица $\mathbf{H}_j(\omega_g, l)$, для которой $cond\mathbf{H}_j(\omega_g, l)$ превышает некоторую заданную пороговую величину $cond_{П}$. Для определения матрицы $\mathbf{H}_{П}(\omega_g, l)$ смешивающая матрица $\mathbf{H}_j(\omega_g, l)$ изменяется согласно выражению $\mathbf{H}_j(\omega_g, l) = \mathbf{H}(\omega_g, l) + j \cdot \delta\widetilde{\mathbf{H}}(\omega_g, l)$, и на каждом шаге $j = 1, \ldots, J$ ее число обусловленности $cond\mathbf{H}_j(\omega_g, l)$ сравнивается с пороговой величиной $cond_{П}$.

Используемая на шаге 6 матрица $\Delta\mathbf{H}_{возм}(\omega_g, l)$ интервалов возмущения параметров определяется как $\Delta\mathbf{H}_{возм}(\omega_g, l) = \mathbf{H}_{изм}(\omega_g, l) - \mathbf{H}(\omega_g, l)$, где $\mathbf{H}_{изм}(\omega_g, l)$ и $\mathbf{H}(\omega_g, l)$ соответствуют матрицам параметров объекта и модели на частоте ω_g при значении вектора 1.

Разработанные алгоритмы реализованы программном комплексе для моделирование разделения и восстановления сигналов (ПКМ РВС). На рисунке 3 приведены примеры моделирования и исследования устойчивости разделения сигналов на ПКМ РВС тестовых сигналов и сигналов автоматической локомотивной сигнализации (АЛСН), передающих в кабину локомотива по рельсам сигналы, кодирующие виды огней светофоров.

На рисунках 3-а(1) и 3-а(2) приведены соответственно исходные тестовые треугольные сигналы и их смеси, а на 3-а(3) и 3-а(4) соответственно примеры неустойчивого и устойчивого решения задачи разделения тестовых сигналов. В окне «Информация» отображается факт неустойчивого разделения: сингулярные интервалы на частоте 400 Гц близки к нулю, а число обусловленности резко возрастает.

На рисунках 3-б(1), 3-б(2) приведены соответственно примеры амплитудно модулированных сигналов АЛСН, на которые воздействуют помехи: флуктуационная помеха от тягового тока, гармоническая помеха 50 Гц от ЛЭП, низкочастотная помеха 4 Гц из-за колебаний приемных катушек относительно рельсов. На рисунках 3-б(3), 3-б(4) приведены примеры неустойчивого и устойчивого разделения сигналов АЛСН и вышеуказанных помех соответственно. Факт устойчивости и неустойчивости решения отображается в окне «Информация».

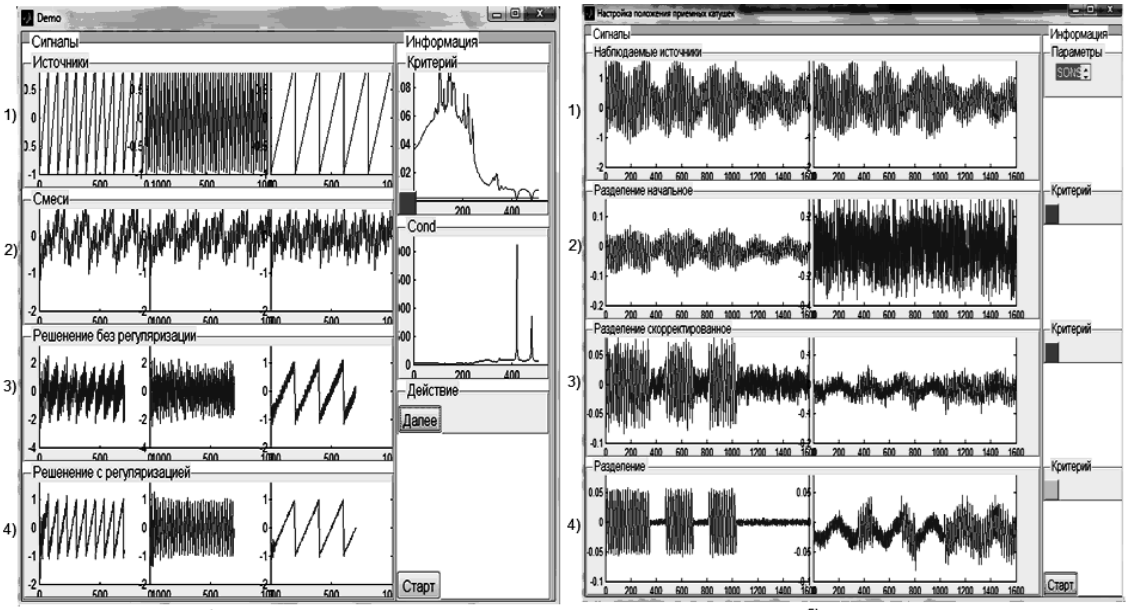


Рисунок 3 – Результаты анализа устойчивости решения задачи разделения сигналов:
а) тестовые сигналы, б) измеренные сигналы АЛСН

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

Предложен алгоритм моделирования разделения сигналов, позволяющий исследовать устойчивость решения задачи разделения сигналов при управляемых в модели образования сигналов вариациях (возмущениях) параметров, наиболее существенно влияющих на устойчивость решения.

Разработан алгоритм анализа устойчивости путем определения сингулярных интервалов параметров модели образования сигналов для детерминированных и стохастических вариаций параметров.

Предложен алгоритм контроля, позволяющий на основе вычисленных сингулярных интервалов контролировать устойчивость решения задачи разделения сигналов.

Разработанные алгоритмы нашли применение для обработки сигналов в системах контроля железнодорожной автоматики и телемеханики, используемых для обеспечения безопасности движения поездов.

Список литературы

[1] Засов В.А. Алгоритмы и вычислительные устройства разделения и восстановления сигналов в многомерных динамических системах: монография. – Самара: СамГУПС, 2012. – 233 с.; ил.

[2] Засов В.А., Никоноров Е.Н., Тарабардин М.А. Алгоритмы и устройства для идентификации входных сигналов в задачах контроля и диагностики динамических объектов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королева. – 2009. – №2 (18). – С. 115-123.

Author index

Индекс авторов

А

Анохин А.М., 596

Апанович З.В., 439

Асанов А.З., 193, 483, 571

Б

Батищев В.И., 615

Баранович А.Е., 327

Басин П., 455

Безмен Г.В., 603

Беленький Л.Б., 642, 655, 663

Белоконь С.А., 506

Белопухов В.Н., 646, 650, 655, 663

Белоусов А.А., 391

Болодурина И.П., 84

Боргест Н.М., 363

Боровик С.Ю., 646, 650, 655, 663

В

Валеев Д.Х., 483

Валитов Р.Р., 179

Ванин А.В., 217

Васенин В.А., 91

Виноградов И.Д., 350

Виттих В.А., 9, 267

Владимирова И.П., 339

Волков И.И., 615

Вольман С.И., 415

Волынская А.В., 577

Воронов Е.М., 208,217

Воропаева Н.В., 131

Вохминцев А.В., 446

Г

Галямов А.Ф., 142

Гарасев И.В., 489

Гвоздев В.Е., 200

Герасимова И.Б., 147

Граничин О.Н., 24

Губанков А.С., 423, 582

Гусев В.Б., 596

Гучук В.В., 676

Д

Давыдов А.Н., 112

Данилушкин И.А., 98

Дегтярева И.В., 179

Деришев С.Г., 515

Дилигенский Н.В., 112

Е

Ефремов В.А., 208

Ё

Ёлкин Д.А., 415

Ж

Жиляев А.А., 383

Жирабок А.Н., 590

З

Заплаткин Ю.Ю., 476

Засов В.А., 682

Зеленцов В.А., 233, 403

Золин А.Г., 615

Золотухин Ю.Н., 506, 515

Зуев А.В., 423

И

Иванов Ю.М., 670

Игнатьев М.В., 287

Ильясов Б.Г., 147, 179

К

Каляев А.И., 409

Карамова О.В., 309

Каримов В.С., 571

Карпунин А.А., 217

Ковалёв А.П., 233

Колесов Н.В., 603

Колоденкова А.Е., 433

Коплярова Н.В., 136

Корнев А.А., 91

Короченцев В.И., 489

Корсун О.Н., 239, 471

Коршиков С.Е., 72

Котов К.Ю., 506, 515

Кошелева М.С., 523

Кравцов С.В., 609

Кретов С.И., 298

Кромин О.А., 397

Кузнецов П.К., 245

Кулешов А.В., 84

Кутейникова М.М., 627, 636, 655, 663

Л

Лапицкая М.Х., 78

Лисицын С.О., 391

Логвинов А.В., 642

Ломакин В.Б., 455

Лопота А.В., 251

Любавский К., 208

М

Макарова Е.А., 179

Малахова А.И., 343

Мальцев А.С., 506

Мартемьянов Б.В., 245

Матюшин М.М., 274

Медникова В.А., 66
Мелентьев В.С., 670
Мельников А.В., 446
Меньшиков В.Ф., 36
Меркулов В.И., 533
Миляков Д.А., 533
Минаков И.А., 415
Митрошин В.Н., 104
Морозова М.В., 224
Мухамедрахимова Л.Н., 147
Мышкина И.Ю., 193

Н

Назаркина И.М., 367
Нестеров А.А., 506, 515
Нестеров А.Ю., 264
Нечаев А.С., 104

О

Офицеров В.П., 291
Охтилев М.Ю., 403

П

Павлов О.В., 173
Переверзев М.О., 455
Плешивцева Ю.Э., 46
Половко С.А., 251
Полукаров Д.Ю., 429
Пономаренко А.В., 464
Попов В.Ю., 543
Потрясаев С.А., 403

Р

Райков Б.К., 655, 663
Рапопорт Э.Я., 46
Рассадин Ю.М., 565
Ровнейко Н.И., 200
Роганов В.А., 91
Розенбаум А.Н., 489
Романов В.Е., 367
Ромкин М.В., 682
Рудаков Д.В., 670
Румянцев К.Е., 609

С

Савинков А.С., 483
Саушев А.В., 125
Салухов В.И., 233
Секисов Ю.Н., 627, 636, 655, 663
Сергеев С.Ф., 476
Сергеева Н.А., 136, 166
Симонова Е.В., 383
Скобелев О.П., 627, 636, 642, 655, 663

Скобелев П.О., 374, 383, 391
Смирнов С.В., 291, 363
Соболев М.А., 506, 515
Соколов Б.В., 403
Соллогуб А.В., 383
Сохи Н.П., 515
Степанов Д.Н., 251
Степанов М.Е., 383
Степановская И.А., 355
Стуликова К.А., 429
Суворов А.Ю., 590
Сузанский Д.Н., 543
Сычев С.И., 208

Т

Тарасов А.Д., 153
Тархов С.В., 142
Тихонов В.М., 239
Тихонов М., 208
Ткачев И.А., 72
Торубаров А.А., 251

У

Уткин А.В., 548

Ф

Федосеева Л.С., 367
Федорова Н.И., 339
Филаретов В.Ф., 423, 582
Филимонов А.Б., 397, 500
Филимонов В.А., 313
Филимонов Н.Б., 496, 500
Филиппов М.Н., 506, 515
Финаев И.М., 471

Х

Ханковский Д.Б., 327
Хименко В.И., 233

Ц

Цапенко М.В., 112
Царев А.В., 383, 391

Ч

Чекалов Л.Л., 317
Ченцов А.Г., 523
Чернов В.С., 533
Черняховская Л.Р., 339, 343
Чжан Е.А., 166

Ш

Шелехов В.И., 554

Я

Ян А.П., 506

B

Baake E., 55

I

Inden U., 4

J

Jakovics A., 55

P

Poznyak I., 619

R

Rzevski G., 3

Rudnev V., 17

S

Spitants S., 55

V

Votava P., 619

Научное издание

Труды XV Международной конференции

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

25-28 июня 2013, Самара, Россия

Редакторы:

академик Е.А. Федосов

академик Н.А. Кузнецов

профессор В.А. Виттих

Proceedings of the XV International Conference

COMPLEX SYSTEMS: CONTROL AND MODELING PROBLEMS

June 25-28, 2013, Samara, Russia

Editors:

academician E.A. Fedosov

academician N.A. Kuznetsov

professor V.A. Vittikh

Подписано в печать 05.06.2013.
Формат 70x100/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Объем 57,52 усл. печ. л. Тираж 500 экз. Заказ № 919.

Отпечатано в типографии ООО «Офорт».
443080, г. Самара, ул. Революционная, 70, литера П.
Тел.: 372-00-56, 372-00-57, 932-00-50.
E-mail: ofort-samara@mail.ru.