

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 681.8:62/529

### СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОТРОННОЙ СТАНЦИЕЙ И ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТА НА СТАНЦИИ “ЛЕНГМЮР” ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РНЦ “КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ”

© 2011 г. В. Г. Карайченцев, С. И. Желудева, М. В. Ковальчук\*,\*\*, М. Г. Кузнецов,  
А. А. Мозгин, А. Ю. Серегин\*, Е. Ю. Терещенко\*, В. Ф. Чистюнин, С. Н. Якунин\*\*

ООО НПЦ “Систал”

Россия, 124460, Зеленоград Московской обл., 3-й Западный пр., 17, стр. 4

\* Институт кристаллографии РАН

Россия, 119333, Москва, Ленинский просп., 59

\*\* Курчатowskiй центр синхротронного излучения и нанотехнологий,  
РНЦ “Курчатowskiй институт”

Россия, 123182, Москва, пл. Курчатова, 1

Поступила в редакцию 01.11.2010 г.

Разработана универсальная программно-аппаратная архитектура системы автоматизированного управления (с.а.у.) рентгеновским экспериментом для синхротронных станций. Разработанная с.а.у. обеспечивает надежное долговременное управление оборудованием станции с удаленных терминалов, расположенных в зонах безопасности. При реализации аппаратной части выбрана иерархическая трехуровневая архитектура системы управления на базе персональных промышленных компьютеров и специализированных микроконтроллеров. Информационные каналы выполнены на интерфейсах Ethernet, RS-485 и RS-232. Программное обеспечение с.а.у. выполнено по функционально-модульному принципу и содержит: мониторные модули с параметрической настройкой, модули группового управления функциональными блоками станции, модули индивидуального управления механизмами. Обмен информацией между модулями поддерживается стандартными протоколами связи TCP/IP, DCON и др. При разработке системы управления в обязательном порядке учитывалась возможность расширения системы путем встраивания покупных изделий ведущих производителей. Разработанная система позволяет встраивать ее в автоматизированные системы управления экспериментом. В работе представлены детали реализации разработанной с.а.у. на многоцелевом исследовательско-технологическом комплексе “Ленгмюр” источника синхротронного излучения РНЦ “Курчатowskiй институт” – российской синхротронной станции, предназначенной для исследований границ раздела различной природы с помощью широкого спектра прецизионных поверхностно-чувствительных и спектрально-селективных рентгеновских методик, в частности, для изучения органических и биоорганических наносистем на поверхности жидкости и различных планарных наноструктур на твердых подложках. Специфика станции “Ленгмюр” потребовала разработки уникального аппаратно-программного модуля для управления оптическими элементами, отклоняющими пучок от горизонтали (блок управления пучком), и создания специального программного узла для интеграции в с.а.у. тракта регистрации флуоресцентного сигнала и синхронизации работы рентгеновского и флуоресцентного трактов.

#### ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие нанотехнологий, наблюдаемое в последнее время во всем мире, потребовало создания и развития адекватных методов нанодиагностики, благодаря которым будет возможно получать информацию о структуре и составе нанообъектов и систем на их основе. Существующие и разрабатываемые на настоящий момент нанообъекты крайне разнообразны. В частности, к ним относятся различные полупроводниковые и металлические многослойные и поверхностные структуры (используемые, например, как основа твердотельной наноэлек-

троники – сверхрешетки, гетероструктуры); органические и биоорганические слоистые наноструктуры (являющиеся основой молекулярной органической наноэлектроники, применяемые для создания различных газовых, хемо- и биосенсоров, используемые для конструирования моделей клеточных биомембран – молекулярная архитектура) и т.п. При разработке таких систем возникает необходимость исследования поверхности, приповерхностных слоев и внутренних границ раздела: изучение структуры поверхности, интердиффузии элементов, процессов самоорганизации и пр.

Исследования белково-липидных пленок на поверхности жидкой субфазы, когда не нарушается нативная конформация белковых молекул, а, следовательно, сохраняются их биологические функции, приобретают особую актуальность для фундаментальных и прикладных исследований в области биологии и медицины. Это дает принципиальную возможность моделировать различные биофизические и биохимические процессы, протекающие в биологически активных функционирующих мембранах. Кроме того, дополнительные преимущества исследования белково-липидных слоев на жидкой субфазе связаны с возможностью моделировать различные условия функционирования биомембран в живых клетках.

Для получения структурной информации о слоистых наносистемах возможно использование различных поверхностно-чувствительных рентгеновских методов (рефлектометрия, малоугловое рассеяние, двумерная поверхностная дифракция и др.), вместе с тем, для диагностики многокомпонентных наноструктур целесообразно привлечение методов, дающих спектрально-селективную информацию.

Проведение такого рода исследований возможно только на специализированных экспериментальных станциях с использованием высокоинтенсивного синхротронного излучения (с.и.). Уникальность синхротронной станции “Ленгмюр” в том, что разработанная конструкция позволяет проводить исследования различных планарных слоистых наноструктур (неорганических, органических и биоорганических) как на поверхности жидкости, так и на твердых подложках с помощью широкого спектра поверхностно-чувствительных и спектрально-селективных рентгеновских методик (рентгено-флуоресцентный анализ, метод стоячих рентгеновских волн в области полного внешнего отражения, рефлектометрия, малоугловое рассеяние, двумерная поверхностная дифракция). В мире существует всего несколько станций, на которых возможно проведение исследований органических слоев на поверхности жидкости. В России исследовательско-технологический комплекс “Ленгмюр” источника синхротронного излучения РНЦ “Курчатовский институт” является первой российской синхротронной станцией, предназначенной для проведения таких уникальных исследований [1, 2].

На станции разработан и применен метод управления пучком синхротронного излучения, который предусматривает наклон пучка излучения к горизонтальной поверхности, позволяющий сохранить неподвижность ленгмюровской ванны в процессе эксперимента.

Станция “Ленгмюр” включает в себя несколько функциональных модулей (рис. 1): систему вывода и транспортировки пучка, блок монохроматизации, блоки щелей, блок управления пучком, блоки фильтров, блок образца и блок регистрации. В состав станции входят прецизионные электромеханические узлы, датчики и контрольно-измерительное исследовательское оборудование.

Система автоматизированного управления “Систал–Ленгмюр” разрабатывалась для оперативного дистанционного управления отдельными элементами станции в режиме настройки и обеспечения комплексного управления функциональными модулями станции в режиме управления экспериментом.

#### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ С.А.У. “СИСТАЛ–ЛЕНГМЮР”

Архитектура универсальной с.а.у. – двухуровневая. Аппаратная часть системы управления выполнена на платах (контроллерах) персонального компьютера с операционной системой Windows XP в промышленном исполнении. Контроллеры, изготовленные ведущими мировыми производителями компьютерного оборудования, удовлетворяют требованиям международного промышленного стандарта ISO 9001. При реализации аппаратной части выбрана иерархическая трехуровневая архитектура системы управления на базе персональных, промышленных компьютеров и специализированных микроконтроллеров [3]. Программное обеспечение с.а.у. является модульным, выполнено в виде многооконного Windows XP приложения и использует технологию “клиент–сервер”. Для некоторых элементов станции, закупленных у стороннего производителя (например, контроллер уровня вакуума Eyesys Convec Torr фирмы Varian), проведен процесс интеграции в систему управления. Для удобства экспериментатора разработан интерфейс с формами управления исполнительными механизмами, устройствами регистрации и программы проведения измерений и настройки станции.

Для эффективного проведения настройки станции и проведения экспериментов в рамках компьютерной программы системы управления разработана таблица параметров, в которой формализованы все исполнительные механизмы. Это позволяет проводить достаточно гибкую настройку линейных и угловых осей станции в процессе юстировки исполнительных механизмов.

Основные технические характеристики с.а.у. “Систал–Ленгмюр” приведены в таблице. Кроме заявленных характеристик, с.а.у. интегрирует в своем составе устройства сторонних производителей:

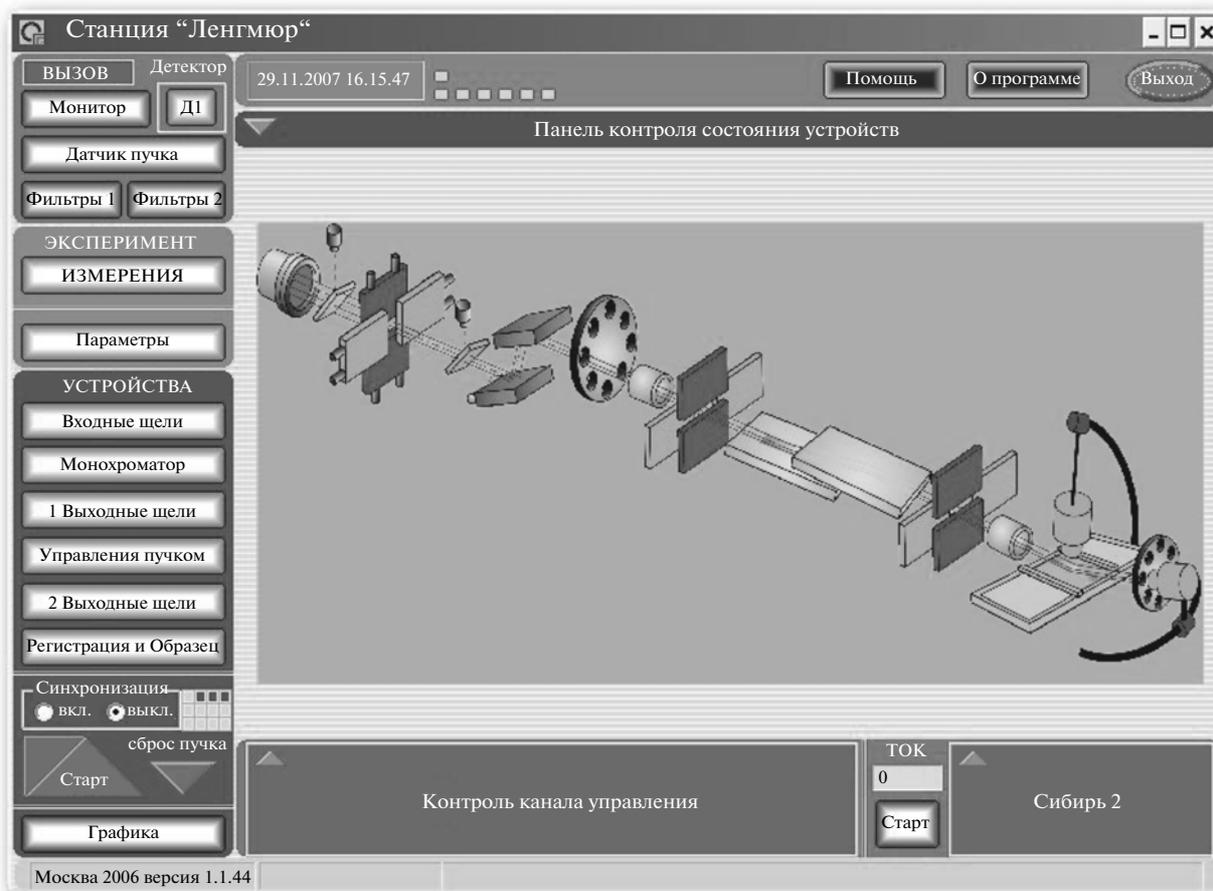


Рис. 1. Рентгенооптическая схема станции “Ленгмюр”.

- контроллер датчика вакуума Eyesys Convectorr (фирмы Varian),
- спектрометрическое оборудование фирмы Canberra.

#### БЛОК-СХЕМА С.А.У.

В станции “Ленгмюр” аппаратная часть с.а.у. “Систал–Ленгмюр” распределяется на три уровня управления: верхний, первый нижний и второй нижний. Территориально верхний уровень располагается вне станции и аппаратно состоит из компьютерного блока с системой удаленного управления и компьютера, обеспечивающего информацией о токе в кольце синхротрона (с.и.) для с.а.у. из базы данных информационной системы источника синхротронного излучения РИЦ “Курчатовский институт”. Нижние уровни системы управления аппаратно размещаются в защитном домике (“хатче”) станции. Блок-схема с.а.у. приведена на рис. 2.

Система управления нижнего уровня, расположенная в “хатче”, обеспечивает полное управление станцией и определяет надежность и точность работы станции. Компьютерный блок имеет в своем составе полноразмерный вычислитель – персональный компьютер в промышленном исполнении, связанный по каналам RS-485 с интеллектуальными контроллерами “Систал PIC-9ШД2” для управления перемещениями по осям координат. Каждый интеллектуальный контроллер имеет собственный микропроцессор, который обслуживает шаговые двигатели, датчики температуры. В составе системы управления 37 интеллектуальных контроллеров.

Почти половина шаговых электроприводов и пьезопривод работают в условиях глубокого вакуума. Электронное оборудование системы управления работает при повышенном уровне озона в воздухе. Поэтому система управления изготовлена из блоков и устройств, выполненных в промышленном исполнении, т.е. защищенных от неблагоприятных условий внешней среды.

Наименование параметра	С.а.у.
Число управляемых электроприводов	37
из них:	
– шаговых электроприводов	36
– следящих по положению пьезопри- водов	1
Число управляемых координат пере- мещений	36
из них одновременно:	
– при линейной интерполяции	5
– при круговой интерполяции	5
Число дискретных сигналов	32
из них:	
– число дискретных входов	16
– число дискретных выходов	16
Число аналоговых входных сигналов	8
Число обслуживаемых датчиков:	
– температуры	5
– пучка	2
– ионизационных камер	3
– реперные (аварийные ограничители перемещений)	70
– вакуума	2
– БДС (сцинтилляционный детектор рентгеновских квантов)	1
Параметры первичной электросети	220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность от электро- сети, Вт	1500
Температура окружающей среды, °С	+5 ... +45
Степень защиты	IP00
Масса, кг	
– компьютерный блок	14
– блок управления 1	18
– блок управления 2а	12

Компьютер верхнего уровня (э.в.м.-в.у.) не ведет непосредственного управления станцией. Он является устройством отображения информации и задания режимов работы системе управления и не содержит в своем составе модулей управления станцией. Выбранная программа управления экспериментом загружается из э.в.м.-в.у. в компьютерный блок системы управления нижнего уровня и выполняется компьютерным блоком автономно от э.в.м.-в.у. Условия эксплуатации э.в.м.-в.у. — лабораторные. Поэтому в качестве э.в.м.-в.у. применен типовой персональный компьютер.

В результате мы имеем трехуровневую систему управления. На верхнем уровне — персональный компьютер. На первом нижнем уровне — полно-размерные промышленные компьютеры с набором периферийных модулей, необходимых для управления станцией. На втором нижнем уровне — интеллектуальные контроллеры, управляющие шаговыми электродвигателями, датчиками температуры, а также силовыми и согласующими устройствами.

#### СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И СОСТАВ С.А.У.

В состав системы управления входит ряд взаимосвязанных общим управлением подсистем, каждая из которых выполняет определенную законченную часть общей задачи [3]. Многозадачный режим работы в реальном времени компьютеров с.а.у. позволяет управлять и контролировать одновременно все механизмы и устройства станции “Ленгмюр”. Структурная схема с.а.у. “Систал-Ленгмюр” представлена на рис. 3.

Компьютерный блок состоит из полноразмерного вычислителя NuPRO-760, контроллера PCL-711, контроллера CI-134, контроллера CP-114. Полноразмерный вычислитель NuPRO-760, контроллер PCL-711, контроллер CI-134, контроллер CP-114 размещены на системной магистрали вычислителя. Контроллер PCL-711 представляет собой многофункциональное устройство, имеющее в своем составе восемь а.ц.п., один ц.а.п., 16 дискретных т.т.л.-входов и 16 дискретных т.т.л.-выходов. Контроллер PCL-711 производит прием и обработку аналоговой информации от ионизационных камер, управляет работой пьезопривода монохроматора, а также (через порты ввода/вывода дискретной информации) управляет работой электромагнитов датчиков пучка с помощью силового устройства УС. Устройство “ПП1, 3-ИК” вырабатывает высоковольтное питание для ионизационных камер и пьезодвигателя. Устройство PIS-Термо обеспечивает прием и обработку аналоговой информации от датчиков температуры и подключено по каналу RS-485 к

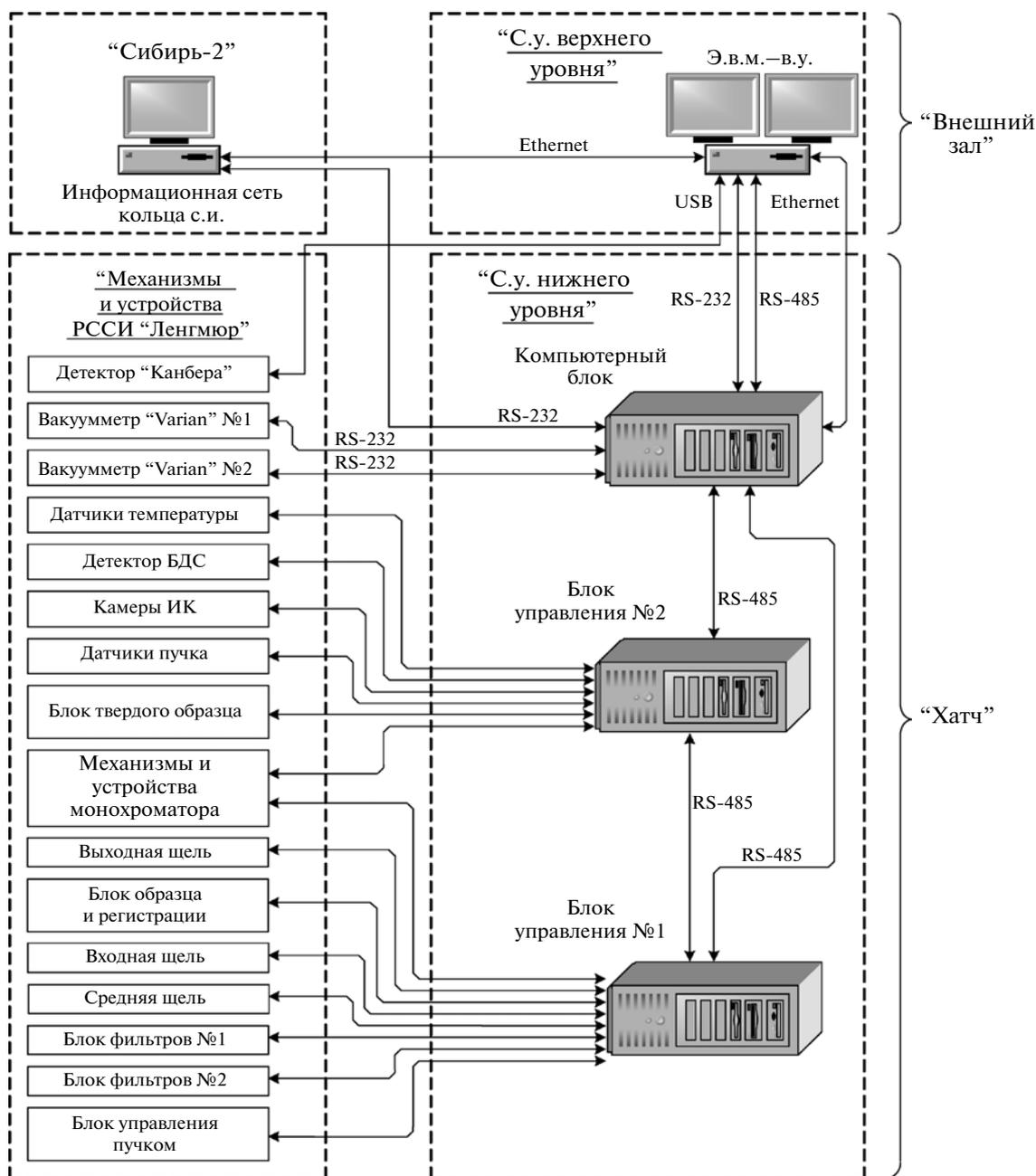


Рис. 2. Блок-схема с.а.у. "Систал-Ленгмюр".

контроллеру CP-114. Контроллер CI-134 — это коммуникационный адаптер на четыре канала интерфейса RS-485. По каналам RS-485 производится управление всеми интеллектуальными контроллерами. Контроллер CP-114 имеет в своем составе два канала интерфейса RS-485 и два канала интерфейса RS-232. По каналам RS-232 обеспечивается связь с датчиками вакуума, а по каналу RS-485 — с датчиками температуры. Компьютерный блок по одному из каналов RS-232 связан с информационной сетью кольца с.и. с помощью компьютера "Сибирь-2".

В состав блока управления № 1 входят четыре устройства PIC-9ШД и десять устройств ПШД-3. Устройство PIC-9ШД является 9-канальным интеллектуальным контроллером, имеющим девять микропроцессоров и управляющий девятью шаговыми электроприводами. Устройство ПШД-3 — силовой преобразователь управления шаговым электродвигателем на три канала. Блок управления № 1 обеспечивает управление тридцатью координатами станции "Ленгмюр" и связан с компьютерным блоком по трем каналам RS-485. В состав блока управления № 2 входят: устрой-

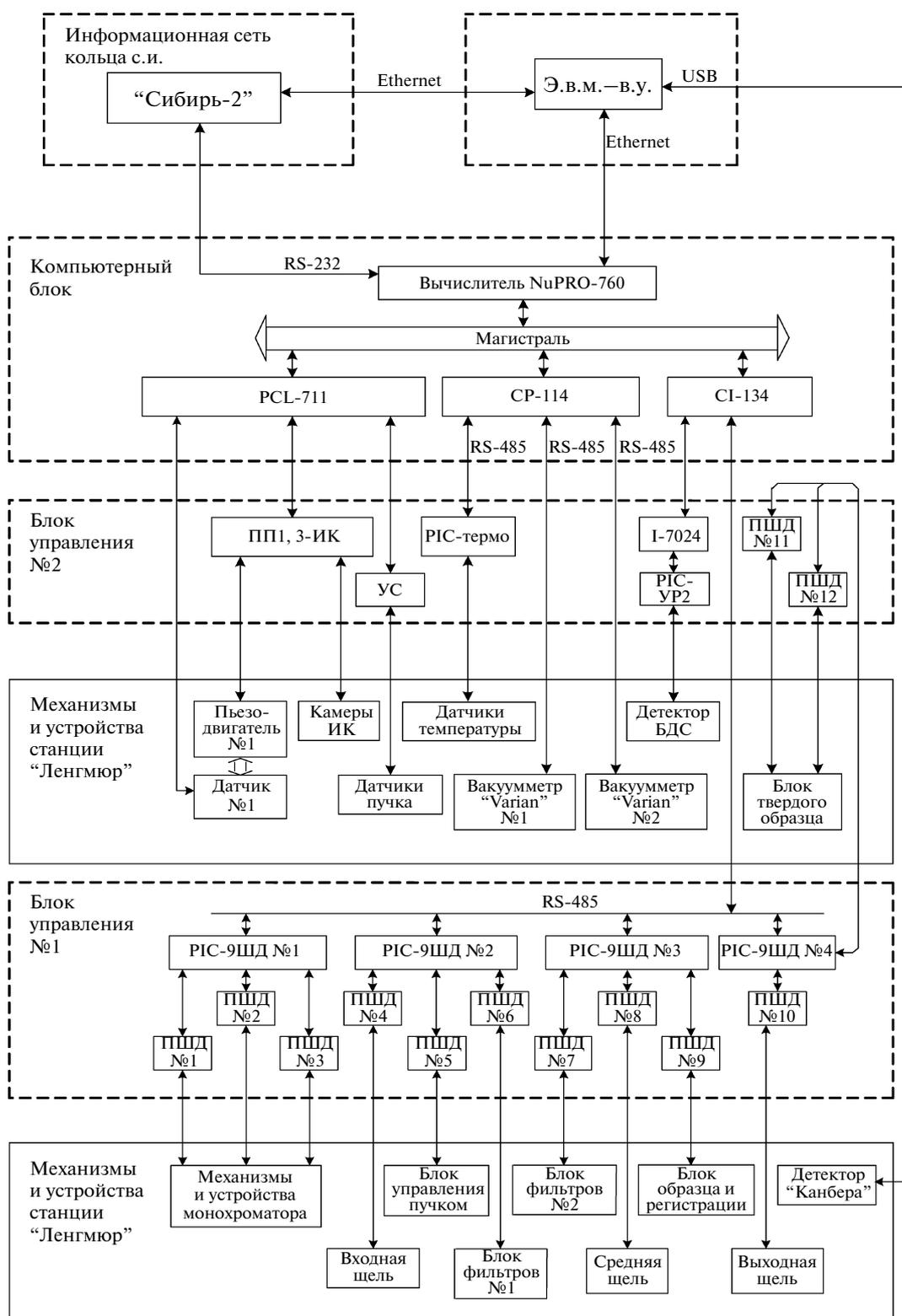


Рис. 3. Структурная схема и состав с.а.у. "Систал-Ленгмюр".

ство PIC-Термо, устройство “ПП1, 3-ИК”, устройство УС, устройство I-7024, устройство PIC-УР2 и два устройства ПШД-3. Устройство PIC-Термо является 5-канальным интеллектуальным контроллером, обслуживающим пять датчиков температуры. Устройство УС управляет работой электромагнитов датчиков пучка с помощью силовых устройств, входящих в его состав. Устройство “ПП1, 3-ИК” является преобразователем низковольтного напряжения, получаемого от контроллера PCL-711, в высоковольтное напряжение питания пьезодвигателя, а также генератором высоковольтного питания для ионизационных камер. Устройство I-7024 является интеллектуальным контроллером, имеющим в своем составе четыре канала ц.а.п., обеспечивающих управление устройством PIC-УР2. Устройство PIC-УР2 предназначено для обработки сигналов от детектора рентгеновских квантов и выполняет функцию амплитудного анализатора.

#### ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С.А.У. “СИСТАЛ–ЛЕНГМЮР”

Программное обеспечение выполнено по функционально-модульному принципу и содержит:

- мониторные модули с параметрической настройкой;
- модули группового управления функциональными блоками станции;
- модули индивидуального управления механизмами.

Обмен информацией между модулями поддерживается стандартными протоколами связи TCP/IP, DCON и др.

Программное обеспечение работает в операционной системе Windows XP professional SP2. Интерфейс представляет собой многооконный интерфейс и работает в следующих режимах: настройка (юстировка) элементов станции и проведение экспериментов. Программное обеспечение системы управления содержит четыре программных модуля:

- основной модуль;
- модуль следящей системы пьезопривода монохроматора;
- модуль контроля температуры в системе охлаждения монохроматора и блока управления пучком;
- модуль контроля уровня вакуума.

Основной программный модуль с.а.у. “Систал–Ленгмюр” обеспечивает управление и контроль всех механизмов, датчиков на станции, кроме модуля управления следящим пьезоприво-

дом второго кристалла. Модуль следящего пьезопривода выполнен как клиентское приложение, обмен информацией осуществляется по IP-порту по протоколу TCP/IP. Контроль уровня вакуума и температуры осуществляется в режиме “клиент–сервер”. Серверная программа (модуль) находится в блоке управления станцией, клиентская часть на компьютере верхнего уровня. Связь осуществляется по протоколам RS-485 для канала контроля температуры и RS-232 для канала контроля вакуума.

Программно с.а.у. поддерживает контроль за десятью разнотипными каналами управления:

- 1-й канал RS-232 – контроль данных по току в кольце синхротрона;
- 2-й канал RS-232 – используется под контроль следящего пьезопривода;
- 3-й–5-й каналы RS-485 – управление контроллерами шаговых приводов “Систал PIC-9ШД”;
- 6-й канал RS-485 – управление контроллером детектора БДС типа “Систал PIC-УР2” и ц.а.п. I7024 ICP CON;
- 7-й канал платы PCL-711B – следящая система пьезопривода, контроль ионизационных камер и цифровые входы/выходы для синхронизации с внешними устройствами;
- 8-й канал RS-485 – управление контроллером температуры “Систал PIC-Термо”;
- 9-й и 10-й каналы RS-232 – контроллеры уровня вакуума Eyesys Convec Torr Varian.

Опрос каналов происходит по протоколу с тактом 10 мс. Для корректности работы каждого канала имеется своя временная диаграмма опроса. Интерфейс предоставляет пользователю контролировать передачу информации и команд по всем каналам.

Для гибкой настройки оптической системы станции “Ленгмюр” используется параметризация большинства основных и вспомогательных исполнительных механизмов и устройств контроля. Это позволяет экспериментатору привязать каждую ось к необходимой системе координат, определить направления движения, координаты реперных точек и ограничителей. С.а.у. имеет два типа ограничителей: физический (электронный) и математический. Параметры всех контролируемых блоков сохраняются, их можно сохранять для различных экспериментальных конфигураций под разными именами. Кроме того, параметризация позволяет формализовать некоторые операции, например, вводить комплексные (составные, сложные) координатные оси или использовать каналы управления, подключая другие устройства с идентичными приводами. Каждая координатная ось может иметь в рамках параметризации только од-

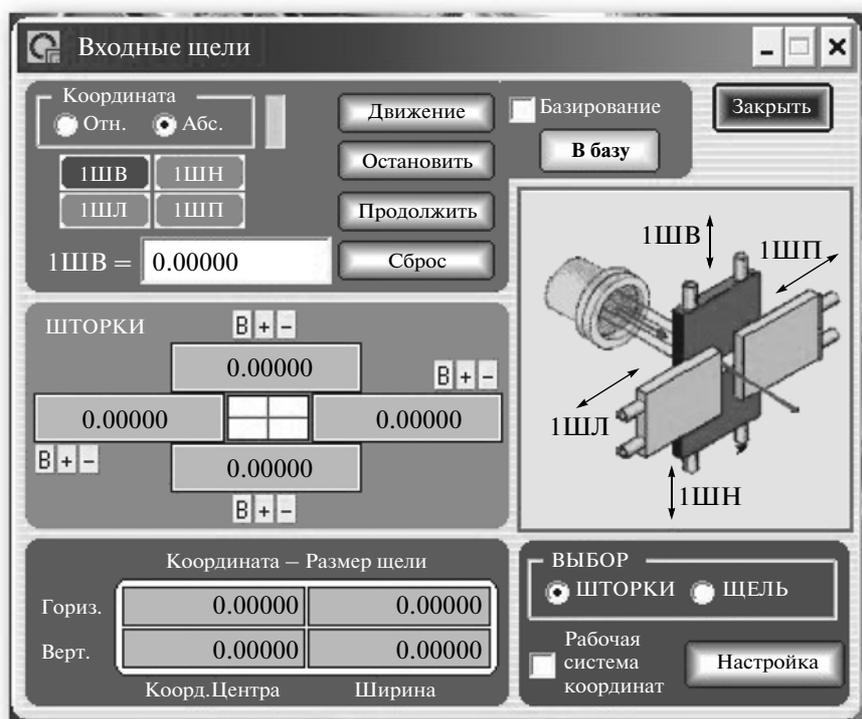


Рис. 4. Форма настройки и управления заслонками блока щелей.

ну из двух единиц измерения: миллиметр и угловая секунда. Эти значения сохраняются в настроечной таблице, которую можно определять для различной конфигурации настройки эксперимента. Все текущие значения координат осей также сохраняются в этой таблице. Для комплексных координат по желанию экспериментатора программируются другие единицы измерения.

В основной программе для каждого блока станции имеется свой интерфейс, который выполнен в виде отдельного окна. Например, на рис. 4 представлено изображение формы для настройки и управления заслонками блока щелей. На станции "Ленгмюр" имеется три блока щелей (см. рис. 1), идентичных по исполнению, поэтому и формы управления идентичны. Аналогично имеются формы для управления и настройки монохроматора, ионизационной камеры, блока зеркала и т.д. Управление блоком щелей осуществляется в двух режимах: независимое движение отдельных шторок и режим перемещения щелей – парное движение вертикальных и горизонтальных шторок. Во втором случае вводятся комплексные координатные оси: координата центра щели (вертикальной и горизонтальной) и ширина щели. С.а.у. программно одновременно выполняет парное движение этих координат в абсолютной и относительной системах координат. Точность позиционирования определяется пере-

счетом количества шагов на передаточное число исполнительного механизма, которое вводится как параметр. Погрешность перемещения зависит от механики.

Наиболее сложные объекты управления станции "Ленгмюр" – монохроматор и блок управления пучком. Монохроматор содержит девять шаговых двигателей ШД и следящий пьезопривод (см. рис. 5). При работе с монохроматором вводятся две комплексные координаты  $\lambda$  и  $\omega$ , связанные между собой как функция от трех координат  $M1\omega$ ,  $M2\omega$  и  $M2L$ . При перестройке монохроматора на определенную длину волны производится расчет положения этих трех координат и выдается команда одновременного движения ШД приводов этих осей. Система управления на уровне интеллектуальных микроконтроллеров обеспечивает контроль позиционирования. По окончании движения каждый двигатель самостоятельно отключается от канала управления. Для удержания на объекте исследования необходимой интенсивности рентгеновского пучка в процессе измерения используется тонкая подстройка по угловой координате  $M2\omega$  с точностью  $0.02''$ . Такое удержание обеспечивает следящий пьезопривод под управлением контроллера, разработанного на основе платы PCL-711B.

На рис. 6 представлена форма блока управления пучком. Форма обеспечивает реализацию ал-

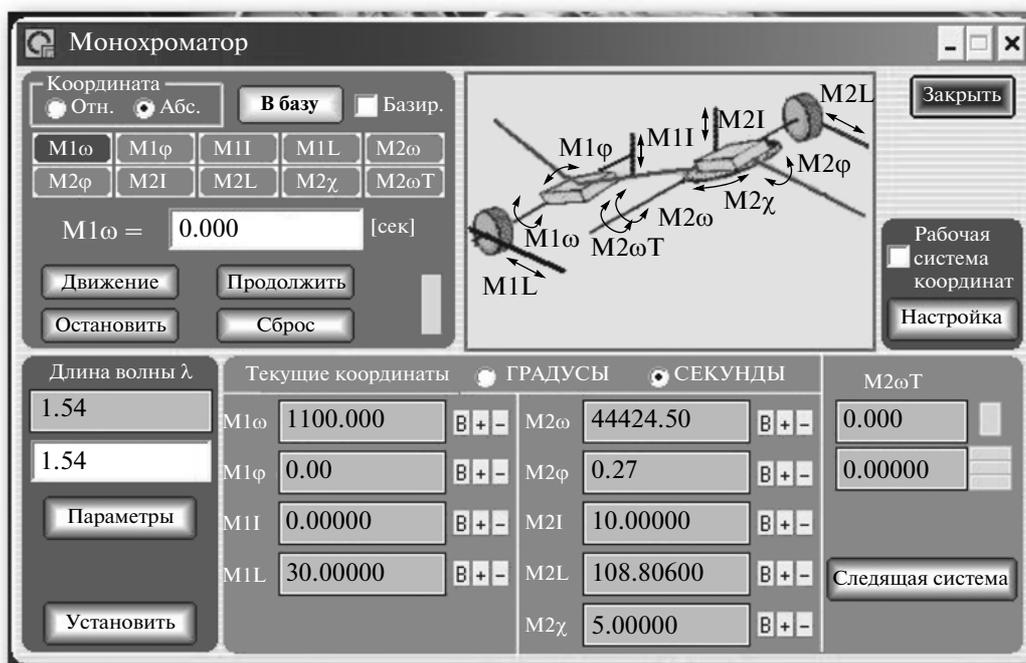


Рис. 5. Форма настройки и управления блока монохроматора.

горитма управления пучком [1, 2], в котором производится перемещение четырех координат, образующих комплексную координату  $\alpha$  (угол падения пучка на поверхность образца в ванночке) как функцию от осей  $B\gamma 1$ ,  $B\gamma 2$ ,  $B2L$ ,  $B2Z$ .

Контроль излучения и настройка рентгеновского канала в рамках оптической схемы обеспечивается датчиками пучка, ионизационной камерой, сцинтилляционным детектором и фильтрами. Данные по интенсивности оцифровываются с точностью  $\sim 3$  мВ с помощью 5-диапазонного 3-канального устройства регистрации, построенного на плате PCL-711В. Для экспериментатора на станции "Ленгмюр" в состав программного обеспечения встроен программный модуль контроля интенсивности рентгеновского пучка, который имеет цифровую и графическую индикацию.

Для удобства проведения эксперимента в систему управления включен программный модуль формирования задач для любой координатной оси, включая комплексные. Для исполнения пакета задач имеется редактор задания job-редактор, все задания формируются на основе шаблонов, которые сохраняются в задачи и job-листы под своими названиями. В настоящей версии имеются следующие шаблоны задач:

- одномерные;
- двумерные;

- тета 2 тета;
- детекторные.

Каждый шаблон содержит опцию выбора вспомогательного устройства регистрации, по результатам измерения которого определяется точка положения максимума. На станции имеются две ионизационные камеры и БДС для контроля рентгеновского пучка при юстировке оптического тракта. Результаты измерения ионизационной камерой интенсивности излучения, с привязкой к оси, сохраняются в файлы, которые вводятся в шаблоны задач.

Для решения задачи синхронизации с а.у. и измерительного оборудования других производителей в системе имеются два вида синхронизации: первый — электронный через т.т.л.-входы/выходы, второй — между программой управления с а.у. "Систал—Ленгмюр" и программами управления экспериментальным оборудованием посредством системы файловой синхронизации "Систал—Синхро". Причем, система синхронизации позволяет комбинировать типы синхронизации для нескольких устройств и назначать их последовательность.

Для предварительного анализа и обработки результатов измерения или настройки в программу управления введен модуль графического анализа.

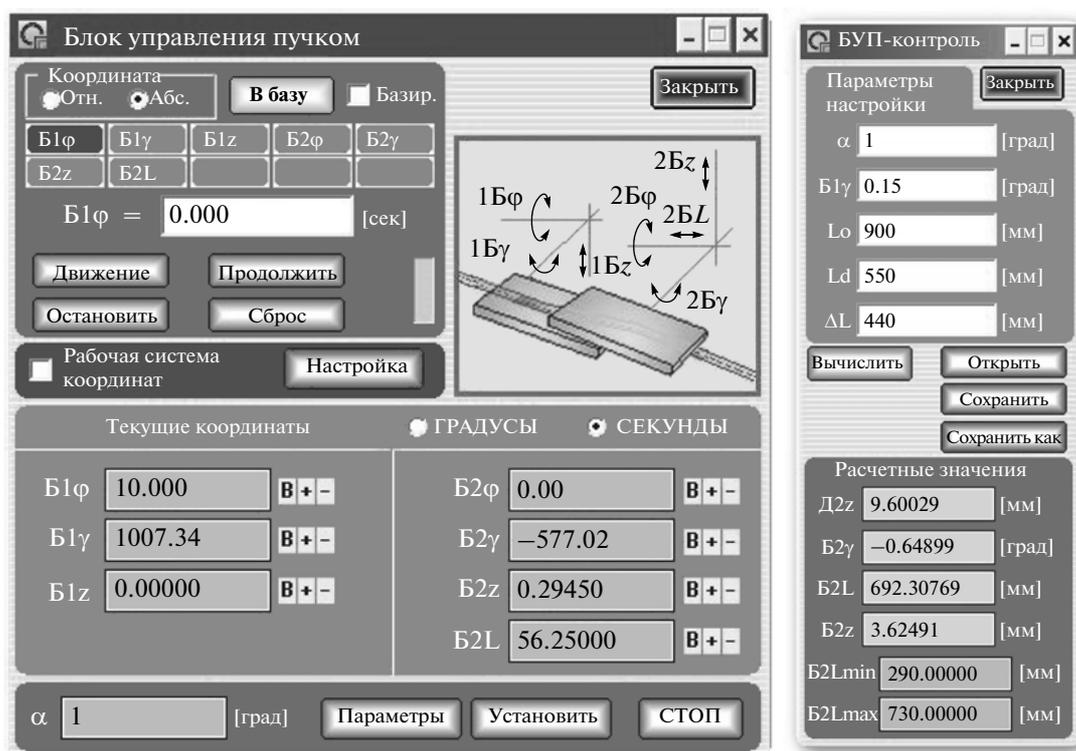


Рис. 6. Форма настройки и управления блока управления пучком.

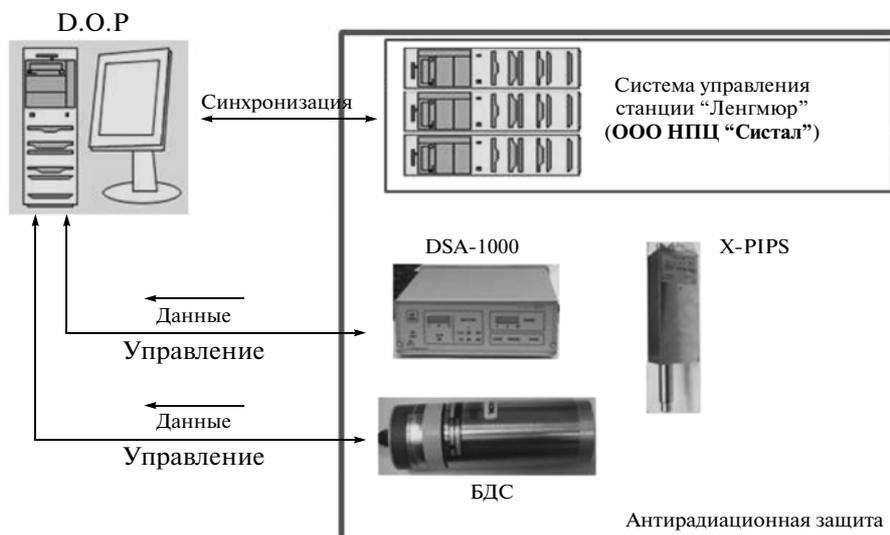


Рис. 7. Схема организации системы автоматизации управления рентгенофлуоресцентными экспериментами.

### АВТОМАТИЗАЦИЯ ЮСТИРОВКИ СТАНЦИИ. ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Одно из основных назначений станции "Ленгмюр" – исследования самоорганизации органических и биоорганических наносистем на поверхности

жидкой субфазы [1, 2]. На станции планируется применение ряда поверхностно-чувствительных рентгеновских методик, в том числе метод стоячих рентгеновских волн в области полного внешнего отражения [4, 5], предполагающий одновременную регистрацию угловых зависимостей интенсивности

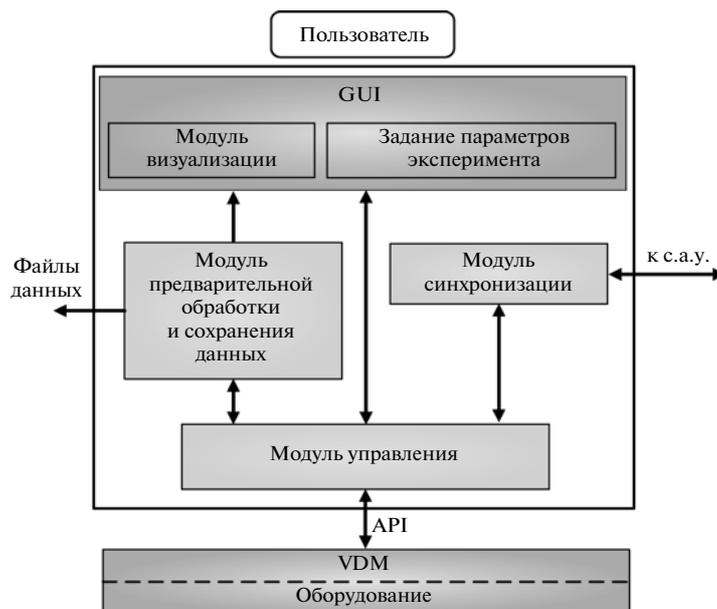


Рис. 8. Структура программы управления рентгенофлуоресцентными измерениями.

зеркально отраженного рентгеновского излучения и интенсивности выхода рентгеновской флуоресценции.

Для обеспечения синхронной регистрации интенсивности рентгеновского отражения и выхода флуоресценции для с.а.у. “Систал–Ленгмюр” создан дополнительный программный узел – программа управления детекторами (D.O.P), управляющая рентгеновским и флуоресцентными трактами регистрации, построенными на базе спектрометрического оборудования фирмы Canberra. Системы регистрации включают в себя энергодисперсионный детектор X-PIPS, многоканальный анализатор DSA-1000, сцинтилляционный детектор Vicron с встроенным многоканальным анализатором uniSpec. Детекторы комплектуются базовой спектрометрической средой Genie 2000, построенной по принципу “клиент–сервер”, что позволяет создавать собственные клиентские приложения, управляющие оборудованием посредством APIs (интерфейсов прикладного программирования), предоставленных серверной частью Genie 2000–VDM (виртуальным диспетчером данных).

Для регистрации угловых зависимостей экспериментальных данных в D.O.P реализована синхронизация с работой шаговых двигателей и узлов станций, обеспечивающих изменение угла падения на образец, управляемых основной с.а.у. “Систал–Ленгмюр”. На рис. 7 представлена схема организации системы автоматизации управления рентгенофлуоресцентными экспериментами.

Функционально программа состоит из следующих модулей (рис. 8).

#### Графический интерфейс пользователя:

- Предоставляет пользователям формы и диалоговые окна для настройки и управления детекторами.
- Выбор времени экспозиции.
- Возможность задания предустановок по набору данных.
- Выбор диапазонов по каналам спектров, по которым будет произведено интегрирование (“зоны интереса”).
- Включает в себя подсистему визуализации эксперимента и для отображения информации о текущем состоянии детекторов, для визуализации процесса набора спектров, построения графиков угловых зависимостей интенсивности зеркально отраженного рентгеновского излучения и интенсивности выхода рентгеновской флуоресценции в процессе эксперимента.

**Модуль управления** – обеспечивает непосредственно контроль и управление трактами регистрации и реализует:

- Синхронное и асинхронное управление и сбор данных с трактов регистрации рентгеновского флуоресцентного и рентгеновского отраженного/дифрагированного сигнала.
- Работу в режиме одиночных измерений, реализацию команд *Старт*, *Стоп*, *Пауза*, *Сохранить данные*, *Очистить память*.
- Работу в режиме синхронизации с с.а.у. станции “Ленгмюр”.

**Система синхронизации.** Система реализована на чтении и перезаписи двух “расшаренных” тек-

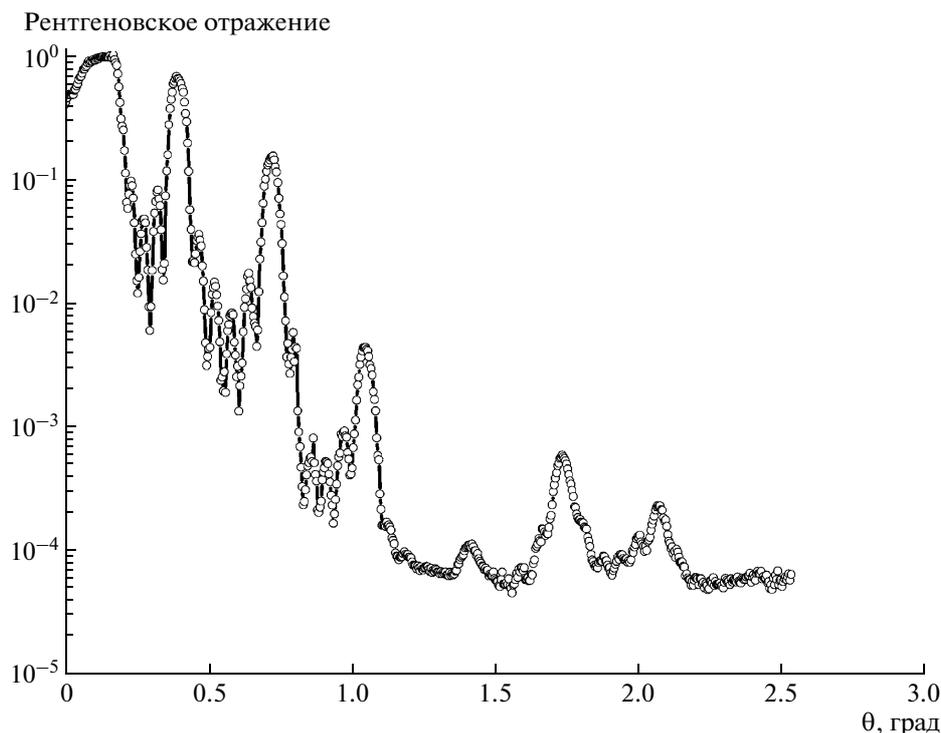


Рис. 9. Результаты измерения угловой зависимости интенсивности зеркальной компоненты рентгеновского отражения, полученные на станции “Ленгмюр” для многослойной синтетической структуры NiC.

стовых файлов, каждый из которых может содержать “0” или “1”. В зависимости от прочтенного значения одного из файлов, программа принимает решение о начале своей работы или ожидании окончания работы шаговых двигателей. В случае начала своей работы D.O.P пишет в файл символ ожидания для с.а.у. станции “Ленгмюр”, по окончании набора — пишет в файл символ разрешения работы для с.а.у.

**Система сохранения данных** — обеспечивает сбор данных, их предварительную обработку и реализует создание массивов и запись их в файлы для:

- Спектров энергодисперсионного и сцинтилляционного детектора в каждой экспериментальной точке как в виде текстовых файлов, так и в виде бинарных файлов во внутреннем формате Genie 2000.
- Текстового файла с угловыми зависимостями интенсивностей регистрируемых сигналов, проинтегрированных по заданным зонам интереса.
- Для создания и сохранения (для каждого из детекторов) текстового файла, содержащего двумерный массив, отображающий картину углового распределения спектров.
- Сохранения параметров эксперимента.

На рис. 9 представлены результаты измерения угловой зависимости интенсивности зеркальной компоненты рентгеновского отражения, полу-

ченные на станции “Ленгмюр” от многослойной синтетической структуры NiC.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ работы с.а.у. “Систал—Ленгмюр” на синхротронной станции показывает, что функционально-модульный принцип построения аппаратуры и программного обеспечения позволяет эффективно решать задачи по юстировке станции и автоматизации эксперимента. Параметризация объектов управления обеспечивает их формализацию, что в свою очередь облегчает встраивание модулей с.а.у. в системы автоматизации эксперимента. Применение интеллектуальных контроллеров управления на конечном звене экспериментального оборудования облегчает процесс программирования пользовательского интерфейса и значительно повышает надежность работы с.а.у. в целом. В своих новых разработках авторы активно применяют серверные функционально-модульные сервисы (приложения) и статические библиотеки для написания клиентских приложений, работающих с элементами управления, работу которых обеспечивают интеллектуальные контроллеры.

Другой положительный аспект, связанный с формализацией объектов управления, — сохранение и многократное использование параметров и настроек оборудования (конфигураций оборудования) под конкретные эксперименты.

Разработанный пользовательский многооконный интерфейс позволяет работать на станции различным пользователям. Экспериментатору для подготовки эксперимента не требуется изучать какие-либо команды для управления механизмами и устройствами, достаточно воспользоваться параметрами настройки, кнопками исполнения и библиотеками экспериментальных задач (одномерными, двумерными и т.д.) на основе ранее созданных и редактируемых job-листов. Встроенная в шаблоны задач система внешней синхронизации с.а.у. с исследовательским оборудованием позволяет программно реализовать очередность и синхронность выполнения эксперимента измерительным модулем с программным модулем управления рентгенооптическими элементами станции. Таким образом, с.а.у. “Систал–Ленгмюр” позволяет полно-

стью автоматизировать подготовку и проведение эксперимента на станции “Ленгмюр”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терещенко Е.Ю., Лидер В.В., Желудева С.И. и др. // Поверхность. 2004. № 7. С. 5.
2. Лидер В.В., Терещенко Е.Ю., Желудева С.И. и др. // Поверхность. 2004. № 7. С. 15.
3. Кузнецов М.Г., Карайченцев В.Г., Мозгин А.А., Чистюнин В.Ф. // Тез. докл. VII Нац. конф. “Рентгеновское, синхротронное излучения. Нейтроны и электроны для исследования наносистем и материалов. Нано-Био-Инфо-Когнитивные технологии. 16–21 ноября 2009. С. 590.
4. Zheludeva S.I., Novikova N.N., Kononov O.V. et al. // Materials Science and Engineering: C. 2003. V. 23. Is. 5. P. 567.
5. Bedzyk M.J., Bilderback D.H., Bonmmarino G.M. et al. // Science 241. 1988. P. 1788.