

*На правах рукописи*

КОЗАК Виктор Романович

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ  
УСКОРИТЕЛЬНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ ИЯФ СО РАН

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

НОВОСИБИРСК – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

## ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

- |                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Алексеев<br>Николай Николаевич   | – доктор физико-математических наук, ГНЦ РФ «Институт теоретической и экспериментальной физики», г. Москва, директор ускорительного центра ГНЦ РФ «ИТЭФ».  |
| Вострецов<br>Алексей Геннадьевич | – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, проректор по научной работе. |
| Немытов<br>Петр Иванович         | – доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, ведущий научный сотрудник.                                |
| ВЕДУЩАЯ<br>ОРГАНИЗАЦИЯ           | Объединённый институт ядерных исследований,<br>г. Дубна.   |

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г. в «\_\_\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,  
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

А.В. Бурдаков

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## **Актуальность темы**

Нормальное функционирование современных экспериментальных физических установок невозможно без автоматизированных систем управления и контроля. Это относится как к небольшим лабораторным стендам, так и к большим экспериментальным комплексам в области «mega-science». Система управления и контроля включает в себя устройства сбора информации с первичных устройств, устройства воздействия на элементы физической установки и аппаратно-программную цифровую вычислительную среду, которая реализует алгоритмы управления и контроля установкой.

Ускорительно-накопительный комплекс является ярким примером современной физической установки, будь это экспериментальная установка (как, например, ЛНС, ВЭПП-2000 и другие) либо технологический комплекс (источники синхротронного излучения и пр.). Такие комплексы содержат тысячи управляемых компонентов, параметры которых должны взаимосогласованно перестраиваться по определенным алгоритмам во времени. Без автоматизированной системы это просто невозможно осуществить.

Система управления и контроля является очень сложным аппаратно-программным комплексом, объединяющим многие тысячи компонентов в единую установку, и в значительной мере определяет эффективность работы всего комплекса. Она является еще и довольно дорогостоящей системой. Соответственно, высока и цена принимаемых решений при ее проектировании и реализации.

Опыт создания и эксплуатации физических установок в ИЯФ СО РАН свидетельствует о правильности основных принципов заложенных в основу систем управления и о высоком качестве разработанных аппаратных и программных средств. Вместе с тем, строительство новых и модернизация старых установок, всё возрастающие требования к системе управления, несомненно, делают актуальным продолжение разработок аппаратных и программных средств для систем автоматизации физических исследований.

## **Цели работы**

Диссертация посвящена исследованию и решению широкого круга проблем, возникающих при создании распределенных систем управления и контроля экспериментальными физическими установками. Основные направления работ:

- Анализ задач, решаемых системами управления экспериментальных физических установок. Формирование принципов построения, разработка архитектуры, аппаратной и программной

инфраструктуры, ориентированных на поддержку распределенных систем управления экспериментальных физических установок.

- Разработка и организация серийного производства аппаратных средств для систем автоматизации экспериментальных физических установок.
- Создание унифицированных подсистем для электрофизических установок, интегрированных с программно совместимыми средствами управления и контроля.
- Разработка типовых программно-аппаратных решений для создания распределенных систем управления экспериментальными физическими установками.

### **Личный вклад автора**

Личное участие автора в работах, составляющих основу диссертации, является определяющим. Им лично выполнены исследования структурных решений аппаратных и программных компонентов распределенных систем управления ускорительных комплексов. Автор принял непосредственное участие в разработке и создании таких систем и лично разработал унифицированные линейки приборов с параметрами, не уступающими мировым образцам.

### **Научная новизна работы**

На основе анализа и практических исследований архитектурных решений систем управления физическими установками впервые предложена и реализована распределенная система управления ускорительно-накопительными комплексами на основе сети микроЭВМ в стандарте КАМАК. Предложенные решения стали основой автоматизации электрофизических установок ИЯФ в 90-х годах.

Сформулированы принципы построения, разработаны системные и прикладные аппаратные и программные средства, позволившие впервые создать на основе КАМАК микроЭВМ многоцелевой аппаратно-программный комплекс. Разработанный комплекс обеспечил как потребности систем управления ускорительных установок, так и решение многих других задач по автоматизации небольших экспериментальных установок, технологических стендов, рабочих станций инженера-схемотехника и т.п.

Предложены и реализованы сетевые структуры нижнего уровня, протоколы обмена и алгоритмы взаимодействия с управляющими ЭВМ распределенных систем управления на базе интеллектуальных контроллеров, встраиваемых в оконечное оборудование, отличающиеся ориентацией на специфические требования современных ускорительных комплексов.

На основе анализа требований к аппаратным ресурсам, функциональным возможностям и программным особенностям встраиваемых интеллектуальных контроллеров впервые в отечественной практике

разработана унифицированная линейка этих устройств с характеристиками, не уступающим мировым образцам.

Впервые предложен и реализован оптимальный по целому ряду параметров способ построения типовых функционально завершенных подсистем автоматизации современных ускорительных установок.

### **Научная и практическая ценность работы**

Предложенные принципы построения и найденные решения обеспечили серийное производство всей гаммы разработанной аппаратуры и оснащение этой электроникой экспериментальных установок ИЯФ, а также установок, сооружаемых институтом в рамках контрактных работ.

Построение систем управления на базе распределенной сети микроЭВМ Одренок стало основой систем автоматизации электрофизических установок в институте в 80-х и 90-х годах. Найденные решения оказались настолько удачны, что используются на ряде установок и в наши дни (ВЭПП-3,4 и комплекс СИБИРЬ-2 в НИЦ «Курчатовский Институт»).

Современные интеллектуальные контроллеры, встраиваемые в оконечную аппаратуру, используются не только во всех лабораториях института, но и во многих научно-исследовательских и производственных организациях страны, а также работают в составе ряда установок за рубежом (Корея, Китай, Германия). Начиная с 2001 г. общее количество выпущенных контроллеров составило около 1000 единиц, а в пересчете на «прецизионные каналы управления и измерения» – свыше 20 тысяч.

Интеллектуальные контроллеры, встраиваемые в оконечную аппаратуру, охватывают большую часть потребностей систем управления экспериментальных физических установок и являются аппаратной основой их построения.

Интеграция интеллектуальных контроллеров с оконечным оборудованием позволила создать ряд функционально завершенных подсистем, использующихся не только в системах управления электрофизических установок, но и в составе различных измерительных и технологических стендов.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

Предложена и реализована распределенная система управления ускорительно-накопительными комплексами на основе сети микроЭВМ в стандарте КАМАК. Найденные решения стали основой автоматизации электрофизических установок ИЯФ в 90-х годах.

Принципы построения, на основе которых разработаны системные и прикладные аппаратные и программные средства, позволившие впервые создать на основе КАМАК микроЭВМ многоцелевой аппаратно-программный комплекс. Разработанный комплекс обеспечил как потребности систем управления ускорительных установок, так и решение многих других

задач по автоматизации небольших экспериментальных установок, технологических стендов, рабочих станций инженера-схемотехника и т.п.

Предложенные и реализованные сетевые структуры нижнего уровня, принципы построения протоколов обмена и алгоритмы взаимодействия с управляющими ЭВМ распределенных систем управления на базе интеллектуальных контроллеров, встраиваемых в оконечное оборудование, отличающиеся ориентацией на специфические требования современных ускорительных комплексов.

Анализ требований к аппаратным ресурсам, функциональным возможностям и программным особенностям встраиваемых интеллектуальных контроллеров, и предложенные принципы построения таких устройств, позволившие разработать унифицированную линейку контроллеров для распределенных систем управления с характеристиками, не уступающим мировым образцам.

Предложенные и реализованные оптимальные по целому ряду параметров способы построения типовых функционально завершенных подсистем автоматизации современных ускорительных установок.

### **Апробация диссертации**

Основные результаты работы докладывались на многих Всесоюзных, Всероссийских и международных конференциях, симпозиумах и совещаниях. Из выступлений последнего десятилетия можно отметить доклады на Международных конференциях по ускорителям заряженных частиц ICALEPCS-2001, EPAC-2004, EPAC-2008, ICALEPCS-2009, ICALEPCS-2011, Международных конференциях по аппаратуре для исследований с синхротронным излучением SRI-2000, Российских совещаниях и конференциях по ускорителям заряженных частиц RuPAC-2002, RuPAC-2004, RuPAC-2006, RuPAC-2008, RuPAC-2010, Международных конференциях IASTED «Автоматизация, контроль и информационные технологии» (2002 г., 2005 г.), Российских и Международных конференциях по синхротронному излучению и лазерам на свободных электронах FEL-2003, SOLS-2003, SR-2008, SR-2012, Международной конференции по электронному охлаждению COOL-2005, на семинарах в ИЯФ СО РАН.

### **Публикации**

Общее количество сообщений и публикаций по теме диссертации – 125. Список научных работ, представляющих основные результаты диссертации, включает 40 публикаций.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации составляет 218 страниц, содержащие 69 рисунков, 21 таблицу. Список цитируемой литературы содержит 139 работ.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** кратко перечисляются основные задачи, решаемые системами управления и контроля физическими установками, обсуждается актуальность, формулируются цели диссертационной работы и приводятся положения, выносимые на защиту.

В первом разделе главы 1 системы управления и контроля установками ИЯФ СО РАН рассматриваются в историческом аспекте. Отмечено, что первые системы управления классического типа в нашем институте были созданы в начале 70-х годов. Архитектурные решения, заложенные в этих первых системах, оказались довольно удачными и в заметной мере предопределили эволюцию систем управления в нашем институте.

В развитии систем автоматизации в ИЯФ СО РАН можно выделить четыре этапа.

1. 70-е годы. Основным управляющим компьютером являлись миниЭВМ. Каждая физическая установка управлялась, как правило, одной ЭВМ. Аппаратура управления и контроля выполнялась в отечественном механическом конструктиве «Вишня». Были разработаны первые многоканальные аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, различные цифровые и аналоговые устройства. Связь аппаратуры с управляющим компьютером осуществлялась посредством последовательной иерархической связи. В институте была разработана операционная система, ориентированная на потребности систем управления физических установок. Эта триада (управляющая миниЭВМ, аппаратура в конструктиве «Вишня» и операционная система) позволила осуществить массовую автоматизацию физических установок в ИЯФ.

2. 80-е годы. На этом этапе аппаратура управления и контроля разрабатывалась в стандарте КАМАК. Стандартизация, переход на унифицированную аппаратуру и новая элементная база стимулировали резкое увеличение номенклатуры и улучшение характеристик измерительных и управляющих устройств нового поколения. К сожалению, подключение КАМАК аппаратуры непосредственно к миниЭВМ и микроЭВМ по ряду технических причин характеризовалось крайне низким быстродействием, что инициировало разработку крейт-контроллеров со встроенной микроЭВМ. Одна из таких разработок- микроЭВМ «Одренок» оказалась наиболее удачной. За несколько лет этот контроллер полностью заменил миниЭВМ в институте. Это время можно назвать «золотым веком» автоматизации в институте. В частности, разработанная в тот период аппаратура, базирующаяся на стандарте КАМАК, длительное время оставалась основной построения систем автоматизации физических установок ИЯФ.

3. 90-е годы. В этот период изменения в автоматизационном сегменте деятельности института, как, впрочем, и в других научных организациях, были не столь значительными как предшествующее десятилетие. Основные

изменения в системах автоматизации на этом этапе происходили, по преимуществу, в инфраструктуре и в системных компонентах.

4. 2000-е годы. Появившиеся проекты по созданию новых физических установок (лазер на свободных электронах NovoFEL, инжекционный комплекс и др.), а также по модернизации существующих (ВЭПП-2000, ТНК и пр.), инициировали разработку нового поколения аппаратных и программных средств автоматизации. Аппаратной основой нижнего уровня систем автоматизации сейчас являются встраиваемые в оконечные устройства интеллектуальные контроллеры с сетевым интерфейсом CANbus. Системы с высоким информационным потоком имеют соединение с управляющими ЭВМ посредством интерфейса Ethernet.

Первыми законченными системами нового поколения для управления и контроля физическими установками в ИЯФ являются системы управления комплекса ВЭПП-2000 и лазера на свободных электронах NovoFEL, которые рассматриваются более подробно в следующих главах.

Система управления и контроля физических установок обеспечивается разнообразными аппаратными средствами и пакетами программного обеспечения. Номенклатура устройств, их функциональные возможности и необходимые характеристики определяются исходя из анализа решаемых задач и особенностей эксплуатации. Рассмотрение задач, решаемых аппаратурой в системах автоматизации различных физических установок, позволяет сформулировать требования к разным классам аппаратуры. Этим вопросам посвящён второй раздел главы 1.

В начале раздела обсуждается измерительная аппаратура ускорительно-накопительных комплексов. Электронное оборудование этих комплексов состоит из нескольких основных подсистем: мощного постоянного электропитания магнитов и линз, импульсных систем, мощных высокочастотных генераторов, как непрерывных (в накопителях), так и импульсных (в линейных ускорителях, инжекторах), систем диагностики пучков, технологического оборудования.

Описаны требования к перечисленным подсистемам, включающие допустимые погрешности, амплитудные диапазоны сигналов, быстродействие и широкополосность, количество каналов, необходимость гальванической изоляции, помехозащищённость.

Далее в главе 1 рассматривается аппаратура, применяемая и на других физических установках на примере лазера на свободных электронах NovoFEL. Отмечается, что хотя каждая такая установка является уникальной и имеет свою специфику, системы управления и контроля экспериментальных физических установок различного назначения имеют много схожих подсистем. Автоматизация аналогичных подсистем может реализовываться практически идентичными решениями.

Важным и необходимым направлением деятельности ИЯФ СО РАН в последние десятилетия является выполнение контрактов по разработке и



изготовлению в промышленных масштабах элементов экспериментальных установок и физического оборудования. Эта деятельность требует создания различных опытно-производственных установок и стендов, многие из которых оснащаются компьютеризированными системами контроля и управления. В диссертации приводятся примеры таких работ.

**В главе 2** рассматриваются эволюция систем управления на примере экспериментальных установок ИЯФ СО РАН, характерные системные и прикладные решения на каждом этапе и соответствующие работы автора в этом направлении.

В первом разделе главы формулируются основные принципы построения систем управления электрофизическими установками, выработанные в ИЯФ в 70-х годах, которые в значительной мере наследуются и современными системами управления. Система управления должна базироваться на многомашинной структуре, используя достаточно мощные ЭВМ, операционная система которых должна обеспечивать многозадачность и реальное время.

Из моделей доступных в то время наиболее привлекательными оказались миниЭВМ серии ОДРА-1300, производившиеся польской фирмой Mega-Elvgo. Существенным фактором, обусловившим доминирование этих ЭВМ в институте, стало создание специализированной операционной системы, ориентированной на потребности управления физическими установками и системы подготовки программ, достаточно простой для освоения ее не программистами, а конечными потребителями- физиками, управляющими установками, радиоинженерами, разрабатывающими электронные системы для установки.

Для подключения аппаратуры управления и контроля использовалась разработанная в институте последовательная иерархическая линия связи. Такая конфигурация позволила осуществить первый этап автоматизации физических установок в институте. Все крупные физические установки автоматизировались по однотипной схеме из стандартных «кубиков».

Во втором разделе главы рассматривается развитие систем управления и контроля в эпоху массовой автоматизации. Основными, системообразующими факторами этого этапа, являлись широкое распространение микроЭВМ и внедрение магистрально-модульной системы КАМАК. На предыдущем этапе стоимость полного комплекта средств автоматизации (ЭВМ, система связи, аппаратура) оказывалась для небольших установок и стендов сопоставима по стоимости с самой установкой. МикроЭВМ и промышленное производство унифицированной аппаратуры в едином стандарте сделали автоматизацию доступной для массового пользователя.

Значительное влияние на развитие систем управления физическими установками оказало создание микроЭВМ, совмещенной с крейт-

контроллером, которая эмулировала систему команд ЭВМ ОДРА. По всем параметрам эта микроЭВМ не уступала ЭВМ ОДРА-1325.

Для этой микроЭВМ в институте была разработана операционная система ODOS, которая поддерживала не только стандарт КАМАК, но и практически все сервисы операционной системы, реализованные на миниЭВМ ОДРА. Если сервис отсутствовал в составе микроЭВМ Одренок, как, например, принтер или устройство в системе связи, ODOS транслировала соответствующий запрос в host-компьютер, где программа-монитор его исполняла. Таким образом, можно было легко переносить в Одренок имеющееся программное обеспечение, зачастую даже без изменения кода, или писать новые программы на привычном языке TRAN.

Логичным казался следующий шаг- превратить Одренок в полноценную ЭВМ. В рамках этой программы в 1983-1985 годах был разработан набор интерфейсов периферийных устройств и программное обеспечение, позволяющих Одренку оказаться независимым от прародительницы ОДРЫ, сохранив все ее достоинства и отбросив недостатки. Структура «ОДРА-периферийные микроЭВМ Одренок» была превращена в структуру «Центральный Одренок- периферийные ЭВМ Одренок».

Центральная ЭВМ концентрировала ресурсы либо относительно дорогие, либо требующие более квалифицированного обслуживания (накопители на дисках, магнитофоны, коммунальный принтер, связь с другими системами) и предоставляла их периферийным ЭВМ, которые, собственно, и занимались управлением и контролем физической установки.

Для Центральной ЭВМ автором было разработано программное обеспечение позволяющее провести диагностику системных средств в случае каких-либо неполадок, произвести загрузку операционной системы микроЭВМ с диска, загрузить программу поддержки кластера Одрят (до 16-ти микроЭВМ), обеспечить загрузку и поддержку файловой системы периферийных микроЭВМ, предоставить межмашинный обмен и многое другое. После всех этих усовершенствований миниЭВМ перестали быть нужны. На рис. 1 приводится структура системных средств, которые использовались в системах автоматизации физических установок, начиная с 1985 года, показан состав устройств Центральной ЭВМ и управляющей ЭВМ.

Для функционирования периферийной микроЭВМ достаточно было трех модулей- самого Одренка, интерфейса к системе связи, по которой осуществлялось обслуживание сети микроЭВМ и интерфейса терминала. Эта микроЭВМ могла обслуживать 4 терминала, т.е. четырех пользователей. Решение оказалось очень экономичным и, как следствие, это привело к взрывному расширению круга пользователей микроЭВМ Одренок в нашем Институте. Если первая такая конфигурация была запущена в 1985 году, то на конец 1987 года в Институте функционировали уже 9 центров, которые обслуживали 110 микроЭВМ со 155-ю терминалами. Эти микроЭВМ использовались не только для автоматизации физического эксперимента, но

и для автоматизации рабочих мест разработчиков, небольших стандов, в качестве персонального компьютера и даже в качестве классической вычислительной ЭВМ в теоретическом отделе, чему способствовало портирование на микроЭВМ компилятора ФОРТРАН-1900 фирмы ICL.

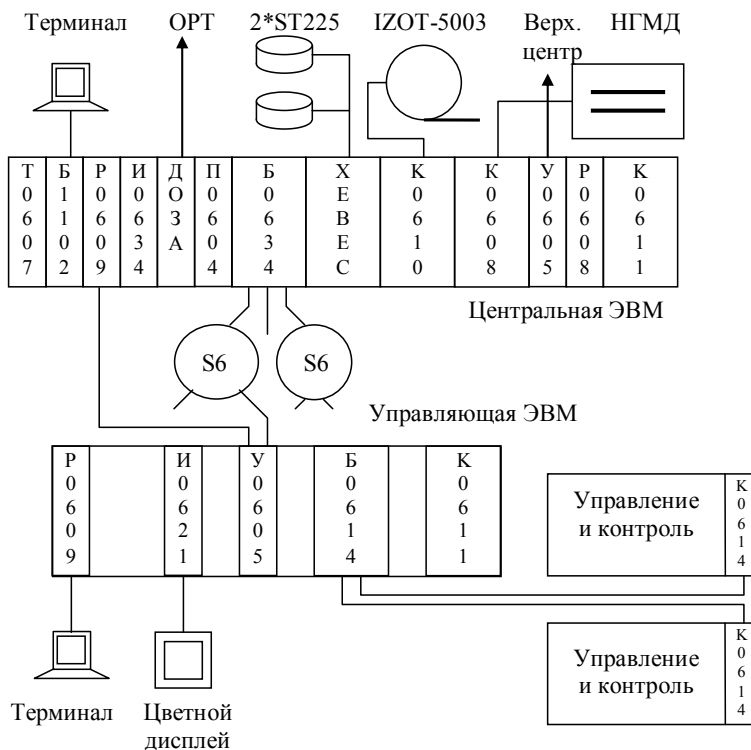


Рис.1. Структура системных средств сети микроЭВМ Одренок.

Причинами такой популярности являлись следующие причины:

- достаточно высокие характеристики микроЭВМ (сопоставимые с параметрами СМ-3/4 или ОДРА-1325/1305);
- доступность;
- простота освоения;
- дешевизна эксплуатации;
- богатое и дружественное программное обеспечение, созданное коллективом пользователей.

До появления микроЭВМ Одренок внедрение КАМАК аппаратуры сдерживалось недостаточно высокой скоростью обмена с КАМАК

аппаратурой. Если пропускная способность КАМАК магистрали составляла до 3-х Мбайт/сек, то реальная скорость обмена массивами однородных данных не превышала 10 Кбайт/сек, при обмене разнородной информацией она была и того меньше. Это имело место как на миниЭВМ ОДРА и СМ-3/4, так и на микроЭВМ «Электроника-60» и Одренок с контроллером К0601. Вызвано это было как необходимостью работы через операционную систему в случае миниЭВМ, так и программным оформлением обмена в случае микроЭВМ. В то же время обмен с КАМАК модулями в крейте Одренка мог производиться со скоростями до 1 Мбайт/сек.

Автором была разработана специальная пара устройств- драйвер и контроллер, которые максимально учитывали специфику стандарта КАМАК, микроЭВМ в этом стандарте и проектировались одновременно с созданием соответствующего программного пакета. Благодаря этому удалось достичь скорости обмена с дополнительными КАМАК крейтами, подключаемыми к микроЭВМ, до 150 Кбайт/сек. К каждому драйверу могло быть подключено до 4-х крейтов, удаленных на расстояние до 200 м. В реальных схемах автоматизации к микроЭВМ подключалось от 2-х до 8-ми дополнительных периферийных КАМАК крейтов.

В качестве иллюстрации к сказанному, ниже приводится сводка управляющих микроЭВМ, КАМАК крейтов, модулей и каналов управления и контроля комплекса ВЭПП-3/4 по состоянию на 1995 год. Эта таблица до сегодняшнего дня изменилась весьма незначительно.

№	ЭВМ	Крейтов	Модулей	Выходов	Входов
1	MSV4	12	70	370	950
2	BEAMV4	9	50		280
3	MSV3	5	49	125	290
4	RFV3	2	21	30	15
5	BEAMV3	4	32		100
6	UPO	9	75	135	30
7	IPO	4	47	10	110
8	CHAN	8	65	135	110
9	CONTROL	3	24		150
10	LUMINOS	2	10		40
11	RADIAC	3	24		36
	Всего	61	467	805	2111

Автоматизационный бум потребовал интенсивных усилий по поддержке производственных возможностей института, о чем излагается в следующем разделе. Автоматизация нуждалась в поддержке, как с аппаратной стороны, так и с программной. Ускоряющиеся темпы мирового прогресса наряду с успехами мировой электроники требовали ускорения как проектирования и производства новых устройств, так и их наладки. Это заставило провести сплошную компьютеризацию рабочих мест разработчиков, разработать специальные аппаратные и программные средства для повышения производительности труда.

Была создана унифицированная рабочая станция, которая включала в себя персональный компьютер на основе микроЭВМ Одренок и набор аппаратных и программных средств. Аппаратные средства включали в себя графический дисплей, средства для подключения дополнительных (настроечных) КАМАК крейтов, устройства для программирования различных логических матриц и постоянных запоминающих устройств. Кроме этого, рабочая станция включала в себя ряд стандартных устройств, таких как ЦАП, АЦП, генератор, составляющих стенд для настройки сложных блоков.

Программные средства для рабочих станций были настолько обширны, что даже краткое перечисление займет много места. Можно упомянуть, к примеру, пакет для проектирования печатных плат, пакет поддержки программирования микросхем программируемой логики, текстовые и графические процессоры. Ну и, конечно, различные тесты для аппаратуры, как ориентированные на специализированные стенды для наладки устройств, так и более общие, которые могли применяться непосредственно на установках.

Компьютеризация рабочих мест кроме очевидных выигрышей, дала и дополнительные, первоначально не предполагавшиеся. Во-первых, наличие идентичной аппаратно-программной среды с объектами управления дало возможность сопровождать сложные устройства программными пакетами, написанными самими разработчиками аппаратуры, такими как пакет обслуживания графического дисплея, пакет связанных подпрограмм для работы с удаленными КАМАК крейтами. Во-вторых, в процессе написания тестов, разработчики осознали важность не только качества аппаратуры и высоких параметров, но и удобства работы с ней.

В качестве примера можно привести линейку «S» цифровых осциллографов. Это была первая линейка программно-совместимых, стандартизованных устройств. Впервые в институте еще до начала разработки первого блока серии, сначала был сформирован стандарт-стандартный набор измеряемых сигналов, стандартная сетка частот, единый набор команд и стандарт слов данных. Регистр, определяющий все основные режимы устройств, был специфицирован побитово, и четко детерминировалось взаимодействие различных режимов. И только после

этого стали разрабатываться сами устройства. Такая стандартизация значительно ускорила освоение блоков в системах управления установками, упростила программы и, самое главное, подала пример остальным разработчикам аппаратуры, что описывается в разделах 2.3 «концепция встраиваемых контроллеров» и 3.3 «стандартизация и виртуализация устройств».

До 2000 года автоматизация электрофизических комплексов в нашем институте развивалась преимущественно инерционным образом, основываясь в основном на старых разработках в стандарте КАМАК. Единственное заметное изменение- переход на большинстве установок на IBM PC в качестве управляющей ЭВМ. Но к 2000-му году появились новые проекты (строительство лазера на свободных электронах, модернизация комплекса ВЭПП-2), автоматизация которых с помощью старых разработок не представлялась целесообразной. Отказ от совместимости с историческими наслонениями в системах автоматизации давал возможность ограничиться сравнительно небольшим набором разрабатываемых устройств. Применение современной элементной базы позволяло многократно уменьшить трудоемкость, как изготовления, так и наладки даже прецизионной аппаратуры. Безусловно, в этом случае модернизация функционирующих комплексов, особенно на начальном этапе, будет весьма болезненным процессом. Автоматизация же строящихся установок (Инжекционный комплекс, ЛСЭ) или перестраиваемых (ВЭПП-2000) может сэкономить массу сил и средств.

Основой архитектуры систем управления нового поколения стала концепция встраиваемых контроллеров. Надо заметить, что эта концепция обсуждалась еще в 80-х годах и еще тогда разработчики признавали за этой концепцией, будущее автоматизации сложных систем. Однако, возможности электронной промышленности того времени препятствовали изящным структурным решениям, которые стали доступными сегодня. Сегодня однокристалльный микропроцессор стоимостью пару десятков долларов имеет большие ресурсы, чем мини- и микроЭВМ эпохи массовой автоматизации и одновременно имеет несколько распространенных сетевых интерфейсов. Практически любая функция имеет однокристалльное решение: прецизионные АЦП, ЦАПы, преобразователи время-код и т.д.

Далее в работе рассматриваются инфраструктурные элементы систем управления, сложившиеся к 2000-му году- типы управляющих ЭВМ, используемые операционные системы, среды программирования. Отмечается, что для подключения к аппаратуре управления и контроля в последнее время внутренние интерфейсы ЭВМ постепенно вытесняются внешними интерфейсами, прежде всего сетью Ethernet. Эта сеть присутствует практически во всех системах, содержащих компьютеры, на рынке присутствуют различные конверторы в любой другой интерфейс.

Стандарты реализации аппаратуры, создаваемой в наше время, можно разделить на две группы. Первая группа- это магистрально-модульные системы, которые определяют как электрические и логические спецификации аппаратуры, так и конструктив. Вторая группа- это аппаратура с каким-либо сетевым интерфейсом, как правило, встраиваемая в оконечное оборудование. Естественно, конструктив при этом никак не определен.

Магистрально-модульные системы по-прежнему находят свое применение в современных системах управления. В нашем институте, как и в других научных центрах, используются КАМАК, VME, сPCI. Однако, с каждым годом области использования магистрально-модульных систем становятся все меньше.

Контроллеры с сетевым интерфейсом, встраиваемые в управляемое оборудование, являются сегодня доминантой развития аппаратного аспекта автоматизации. Это относится практически ко всей сегодняшней электронике. Интеллектуальный контроллер сегодня управляет фотоаппаратом, телефоном, телевизором и другими простыми устройствами. Используемые в ускорительно-накопительных комплексах источники питания, ВЧ-станции, измерители положения пучка и другое оборудование тоже вполне адекватный объект управления интеллектуальным контроллером.

Для связи с управляющей сетью контроллер нуждается, естественно, в каком-то сетевом интерфейсе. Для электроники управления и контроля с невысоким информационным потоком в качестве такого интерфейса был выбран CANbus. В течение 2000-х годов в нашем институте автором и при его непосредственном участии был разработан набор контроллеров, встраиваемых в оконечное оборудование, и имеющих интерфейс CANbus. На основе этого набора устройств были построены системы управления лазера на свободных электронах NovoFEL, инжекционного комплекса, ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2000 и ряда других установок масштабом поменьше.

Известные достоинства этого стандарта

- высокая надежность;
- гарантированное время доставки пакета с высоким приоритетом (реальное время);
- широкая поддержка производителей элементной базы (пожалуй уже не осталось микроконтроллерных семейств без моделей с CANbus интерфейсом);
- возможность гальванической развязки между устройством и средой передачи данных;
- относительно невысокая нагрузка на процессор оконечного устройства;

компенсируют невысокую по современным меркам пропускную способность, тем более что использование процессора в устройстве уменьшает требования к трафику.

Опыт эксплуатации первых систем, базирующихся на новой аппаратуре, подтвердил все предполагаемые достоинства нового подхода:

- высокую надежность аппаратуры и связи;
- удобства эксплуатации (существенно уменьшено количество длинных сигнальных трасс, промежуточных разъемов и клеммников);
- экономичность (создание любой подсистемы обходится существенно дешевле, чем при использовании магистрально-модульных систем);
- удобство программирования;
- возможность дальнейшей эволюции простым перепрограммированием;
- меры, принятые для аппаратной и программной совместимости различных устройств, также существенно сокращают затраты на программирование и сборку систем.

Далее перечисленные тезисы иллюстрируются конкретными примерами применения.

В конце раздела описываются способы подключения аппаратуры с интерфейсом CANbus к управляющим компьютерам. Если в начале 2000-х годов соединение осуществлялось посредством интерфейсных плат (EISA-CANbus, PCI-CANbus), то в последующие годы подключение стало осуществляться посредством моста EtherNet-CANbus. В системах автоматизации выделяется некоторый объем оборудования по географическому признаку (например, на установке ТНК), либо по логическому (Cooler COSY), объединенный линией CANbus, которая через посредство промежуточного моста EtherNet-CANbus подключается к сети установки.

**В главе 3** описывается аппаратура для систем управления и контроля физическими установками с интерфейсом CANbus, разработанная в 2000-е годы. Приводится список устройств, разработанных для систем управления нового поколения, и объясняется факторы, повлиявшие на формирование номенклатуры изделий.

Типичным устройством (и самым массовым) является аналого-цифровой контроллер общего назначения. Примером может являться модель SAC208/CEAC208, которая предоставляет пользователю следующие ресурсы:

- 20 дифференциальных входов прецизионного (разрешение около 20 бит) аналого-цифрового преобразователя;



- 8 выходов качественного 16-разрядного цифроаналогового преобразователя;
- 8 входов дискретного ввода с гальванической изоляцией;
- 8 выходов дискретного вывода с гальванической изоляцией.

Очень показательной для описываемых работ является таблица поставки разработанных устройств по годам.

Устройство	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Сумма
CANDAC16	28	23	7	9	6	20	4	0	0	3	103
CANADC40	33	28	8	13	10	21	8	0	0	4	128
CDAC20	14	11	28	22	27	23	15	6	39	5	190
CEDAC20	0	2	0	10	0	0	9	7	5	0	33
CAC208	0	0	0	4	17	22	9	42	6	4	104
CEAC124	0	0	0	0	0	1	11	69	10	50	141
CEAC51	0	0	0	0	0	7	1	0	16	2	26
CEAC208	0	0	0	0	0	1	2	2	8	22	35
CEAD20	0	0	0	0	0	0	0	16	6	8	30
CGVI8	0	2	8	5	8	3	3	2	2	0	33
CPKS8	0	2	8	4	9	0	0	0	0	0	23
CURVV	0	0	4	0	2	2	0	0	0	0	8
CKVCH	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	6
CIR8	0	0	0	0	0	4	2	1	0	0	7
CEDIO	0	0	0	0	0	0	0	2	6	10	18
SLIO24	5	3	5	0	0	4	4	4	0	0	25
Сумма	80	71	74	67	79	108	68	151	98	108	929

Из таблицы можно увидеть различные явления. Во-первых, видно, что потребность института в таких устройствах примерно равномерна во времени. Это естественно, институт сооружает столько физических установок, сколько позволяют производственные и финансовые возможности. Видно, что с 2008 года производство электроники в стандарте «ВИШНЯ» сменяется производством в евромеханике, соответственно и устройства управления и контроля тоже изменяют свой конструктив.

Представляет интерес и распределение новых устройств с интерфейсом CANbus по различным проектам.

Существует четыре явно выделенных лидера. Установки NovoFEL и Инжекционный Комплекс по масштабам поменьше, а ВЭПП-2000 и ТНК являются ускорительно-накопительными комплексами и, как объекты управления, являются более сложными установками. Небольшие проекты сведены в группу «разное». При детальном подсчете около половины устройств работает вне института.

Установка	Блоков	
ТНК, Зеленоград	190	20,45%
ВЭПП-2000	176	18,95%
Разное	142	15,29%
ЛСЭ NovoFEL	99	10,66%
Инжекционный комплекс	86	9,26%
КАЕРИ	58	6,24%
COSY Cooler	48	5,17%
ИМР, Ланчжоу	36	3,88%
ВЭПП-3/4	40	4,31%
СИБИРЬ, КЦСИиНТ	19	2,05%
Сварка	18	1,94%
ОИЯИ	17	1,83%

Судя по статистике, программа создания контроллеров, встраиваемых в оконечное оборудование, оказалась успешной. Представляется целесообразным рассмотреть факторы, предопределившие успешность этой программы. Это в первую очередь следующее:

- четкая формулировка функциональных возможностей базовых устройств, требуемых аппаратных ресурсов;
- удобный протокол обмена высокого уровня, ставший фактически стандартом предприятия;
- грамотная схемотехника, которая минимизирует количество подстроечных элементов и оптимизирует аналоговые тракты устройств;
- независимо от схемотехники и применяемых микросхем, для программиста существует виртуальный прибор, не зависящий от аппаратной реализации;
- стандартизация системы команд, диапазонов сигналов, выводов соединительных разъемов;
- кроме совершенно прозрачных базовых функций, устройства поддерживают возможности, которые специфичны именно для ускорительно-накопительных комплексов.

В заключение отмечается, что если раньше аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи для нужд физической установки проектировались нескольких классов- «подешевле» и «покачественнее», то сегодня даже для нетребовательных приложений разумно использовать прецизионные модели. Сокращение номенклатуры разрабатываемых и производимых устройств, при небольших сериях, делает это экономически целесообразным.

В разделе 3.2 рассматриваются основные схемотехнические особенности построения аналоговой части разработанного набора устройств, типичные параметры и характеристические кривые. Отмечается, что все устройства независимо от назначения (АЦП, генераторы и т.п.) построены по стандартной блок-схеме (рис.2).

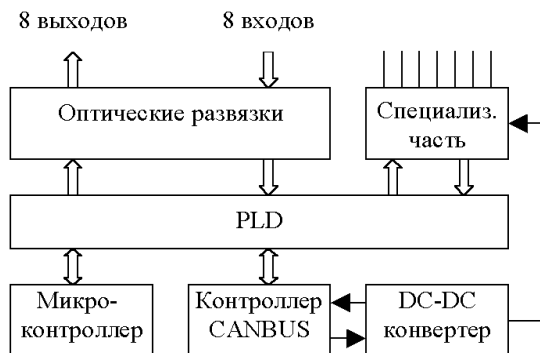


Рис. 2. Блок-схема устройств.

Модульность построения позволила использовать одинаковые аппаратные и программные компоненты в различных устройствах, что значительно ускорило разработку и освоение устройств.

Приводятся архитектурные и схемотехнические приемы, позволяющие минимизировать количество подстроек в аналоговых трактах. В частности, схемы многоканальных цифроаналоговых преобразователей построены по принципу раздачи напряжений от одной микросхемы ЦАП на несколько запоминающих устройств (рис.3), что позволяет минимизировать число подстроек в этом тракте.

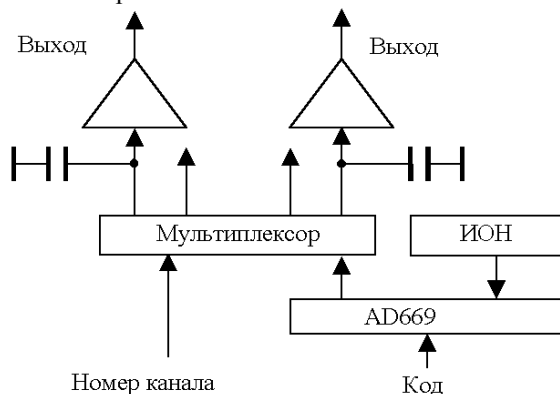


Рис .3. Схема многоканального ЦАП.

В прецизионном цифроаналоговом преобразователе используется механизм цифровой коррекции, который позволяет улучшить метрологические характеристики устройства цифровыми методами (рис.4).

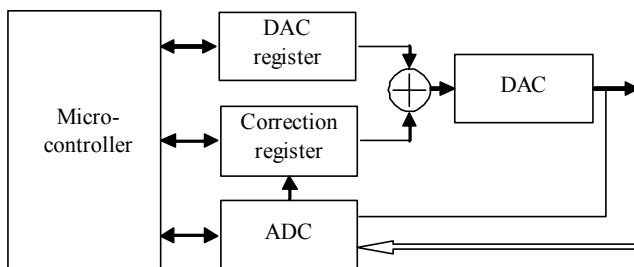


Рис. 4. Схема организации цифровой коррекции ЦАПа.

Аналого-цифровые преобразователи устройств периодически подключаются к «земле» и эталонному источнику опорному напряжению и калибруют аналоговый тракт измерителя. Качество аналого-цифрового преобразователя позволяет корректировать выходное напряжение цифроаналогового преобразователя. Периодически микропроцессор измеряет фактическое выходное напряжение ЦАПа, вычисляет ошибку, которая затем суммируется с исходным кодом и пересылается в микросхему ЦАПа. Это позволяет устранить ошибки, как самой микросхемы, так и аналогового тракта ЦАПа.

Отмечается, что для всех моделей аналого-цифровых преобразователей разрешение, ограниченное шумами, не хуже 19 бит, абсолютная точность лучше 50 ppm. Погрешность всех моделей многоканальных цифроаналоговых преобразователей не превышает 0.05%, а прецизионных одноканальных моделей лучше 20 ppm.

В разделе 3.3 рассматриваются архитектурные аспекты построения набора устройств, как аппаратные, так и программные. Особое внимание уделяется стандартизации и унификации устройств, совместимости как программной, так и аппаратной. Стандартизация коснулась следующего:

- питание устройств;
- конструктивное оформление;
- типы соединительных разъемов и разводке сигналов на их контактах;
- диапазоны входных и выходных аналоговых и дискретных сигналов;
- частоты дискретизации времен интегрирования и генераторов функций;
- режимы функционирования;

- система команд;
- протокол обмена по интерфейсу CANbus.

Пункты стандартизации рассматриваются подробно, с иллюстрацией конкретными примерами.

Детально рассматриваются протокол обмена и алгоритмы взаимодействия контроллеров с управляющей сетью. На примере управления магнитной системой ускорительного комплекса показаны преимущества использованных приемов в разработанных контроллерах. Далее описываются особенности протокола высокого уровня и обосновывается их необходимость. Особо отмечается концепция «виртуализации» устройств. Во всех контроллерах пользователю предоставляются не физические устройства, а виртуальные. Управляющая программа работает с «абстрактными» АЦП и ЦАП, работа с которыми не зависит ни от типа примененных микросхем, ни от схемотехнических особенностей конкретных моделей.

И в заключение раздела приводится структура программного обеспечения, используемого в процессорах контроллеров. Отмечается модульность его построения и переносимость между моделями.

В разделе 3.4 обсуждается специфика управления магнитной системой ускорительных комплексов в процессе ускорения пучка частиц. Описывается способ автономной синхронной перестройки всех или части источников питания. Для минимизации трафика используется метод кусочно-линейной интерполяции. Анализируются возможные погрешности реальных приборов, как для типичных кривых ускорительного цикла, так и для более сложных. Показано, что в случае эмуляции синусоидального сигнала, ошибка выходного сигнала имеет две составляющие. Первая составляющая порождена временем дискретизации (частотой изменения кода в ЦАПе) имеет максимальную величину в зоне около нулевого напряжения и не превышает величины  $\sin(2\pi \cdot T_q/T_c)$ , где  $T_q$ - время дискретизации (квант времени), а  $T_c$ - время периода синусоиды. Вторая составляющая вызвана ошибкой интерполяции и имеет максимальную величину в области минимума и максимума синусоиды. Для рассматриваемого примера (10 Гц и интерполяция по 40 равноотстоящих точек) эта ошибка не превышает величины  $1-\cos(2\pi/80)$ . Далее рассматриваются способы уменьшения этой ошибки при сохранении длины файла-описателя кривой выходного напряжения ЦАПа.

Описывается прототип контроллера, ориентированный на новые проекты ускорителей с быстрым рабочим циклом, и приводятся его характеристики. Приводится осциллограмма выходного сигнала ЦАПа в режиме эмуляции синусоидального сигнала.

Отдельно рассматривается вопрос измерений тока источников питания в случае ускорителей с коротким рабочим циклом. Если обычно в таких случаях используется АЦП поразрядного уравнивания, то автор рассмотрел возможность использования для этой цели классического АЦП

сигма-дельта технологии. Этот вариант дает возможность обеспечить измерения на «полочке» процесса с высокой точностью. Была проанализирована возможность измерять изменяющийся ток в процессе ускорения, проведены эксперименты и показана приемлемость разработанных структур для устройств нового поколения.

В разделе 3.5 описывается ряд работ автора, которые хотя и относятся к автоматизации ускорительно- накопительных комплексов, но, тем не менее, несколько выпадают из стройного и логичного набора, описанного выше. Речь идет о таких работах как:

- системы контроля положения пучка заряженных частиц в каналах транспортировки;
- системы измерения магнитного поля на основе датчиков Холла;
- системы контроля положения пучка на основе ионизационных камер;
- модернизация системы управления магнитной системой комплекса ВЭПП-4.

В разделе описываются эти работы, приводятся достигнутые параметры. Несколько более подробно рассматривается система магнитных измерений, построенная на основе прецизионного АЦП в стандарте VME. Отмечается, что несмотря на принципиальное различие между магистрально модульным стандартом VME и полевой шиной CANbus, аналого-цифровые преобразователи в обоих стандартах, тем не менее, имеют не только схемотехническое родство, но и общие функциональные возможности, алгоритмы работы. Это значительно облегчило как освоение новых устройств, так и тиражирование систем на их основе.

В разделе 3.6 описываются аппаратные и программные средства поддержки систем автоматизации, разработанные автором. В работе отмечается, что изготовление, наладка и тестирование оборудования (источники питания, ВЧ-станции, измерители температуры и пр.) производителем не требуют особого внимания системных архитекторов и интеграторов. В этом случае производитель оборудования сам создает набор специальных стендов и соответствующего программного обеспечения. Установка оборудования на физическом комплексе, тестирование законченных подсистем, а также запуск и верификация управляющего программного обеспечения сталкиваются со значительными трудностями. Эта проблема особенно актуальна при запуске установок вне института.

Поскольку ядро современных систем управления установками, сооружаемыми Институтом Ядерной Физики, образуется набором модулей с интерфейсом CANbus, описываемых в работе, автор разработал программный пакет, значительно облегчающий как запуск аппаратных средств системы управления, так и отладку управляющего программного обеспечения.

В работе описываются исходные посылки, определившие функции пакета, и объясняются причины выбора их на примере систем автоматизации запускаемых установок.

После краткого описания функционала разработанного программного пакета, приводятся примеры использования его как для тестирования аппаратной части оборудования, так и для отладки управляющего программного обеспечения.

**В 4-й главе** рассматриваются типичные применения разработанных контроллеров в составе различных подсистем, ориентированных на применение в ускорительно накопительных комплексах.

В первом разделе описывается управление источниками питания для магнитных систем. Это, пожалуй, самое массовое применение разработанных контроллеров.

Источники питания для корректирующих магнитов выполняются, как правило, в виде многоканальных систем. Одной из последних моделей источников такого типа является 8-канальный источник тока MPS-6, управление и контроль которого осуществляется с помощью контроллера CEAC208. В этом приложении использованы все ресурсы, предоставляемые контроллером. Такие источники питания используются в самых современных проектах института, таких как COSY-Cooler и комплекс в KAERI.

В более мощных источниках (одноканальном MPS-25 и двухканальном SHUNT-20) используется контроллер CEAC124. Эти источники также выполнены в евромеханическом конструктиве. Для всех описываемых источников питания приводятся достигнутые параметры.

К более мощным источникам предъявляются более высокие метрологические требования. Одна из моделей ВЧ-300-8 используется для питания сверхпроводящих соленоидов на комплексе ВЭПП-2000. В ней для управления используется контроллер с прецизионным ЦАПом CEAC51. Этот комплект обеспечивает стабильность выходного тока до 2 ppm/°C.

В качестве примера использования контроллера CEDAC20 приводится мощный тиристорный источник тока типа ИСТ2-1000М.

В разделе 4.2 рассматривается применение разработанных контроллеров для управления и контроля импульсными источниками питания. Как правило, на большинстве электрофизических установок проектировщики стараются минимизировать количество импульсных источников тока вследствие их сложности. Однако, на комплексе ВЭПП-2000 из-за ограниченного пространства, большая часть элементов каналов транспортировки пучка заряженных частиц спроектирована для питания импульсным током. Соответственно, несколько десятков импульсных источников управляются от разработанных контроллеров с интерфейсом CANbus.

Для транспортировки пучков частиц от Инжекционного Комплекса к ВЭПП-2000 и ВЭПП-3/4 сейчас сооружаются соответствующие каналы (К-500). Кроме магнитных линз и корректоров постоянного тока в этих каналах запроектированы и несколько десятков импульсных линз и корректоров. Для их питания разработан современный многоканальный источник импульсного тока типа ГИД-25. Эти генераторы выполнены в евромеханическом конструктиве и используют, соответственно, последние модели управляющих контроллеров.

В разделе 4.3 рассматриваются системы термоконтроля, созданные в институте в последнее десятилетие. В предшествующие десятилетия системы термоконтроля на установках Института Ядерной Физики базировались на транзисторных датчиках и измерителях в стандарте КАМАК. При строительстве ЛСЭ был использован другой подход. Поскольку в зале ускорителя возможен высокий уровень радиации (до 100 рентген/час), было решено использовать резистивные датчики, а в качестве измерителя применить АЦП CANADC40. Разрешение системы составляло десятые доли градуса, что вполне удовлетворяло потребностям установки.

Далее описывается эволюция описанной конструкции. Появление в семействе контроллеров модели CEAD20 инициировало создание следующих версий измерителей температуры. Свойства контроллера CEAD20 (значительно более высокие метрологические характеристики, переключатель 20 дифференциальных входов или 40 однопроводных) стимулировали создание двух вариантов измерителей температуры. Для систем массового термоконтроля производились 32-канальные «шкафчики» с разрешением около 0.05 градуса, а для систем термостабилизации или измерительных систем были созданы 16-канальные системы с разрешающей способностью 5 миллиградусов. В качестве датчиков температуры используются платиновые термометры сопротивления.

Новые модели нашли применение на установках ТНК (г. Зеленоград), ЛСЭ, ВЭПП-4.

В предыдущих разделах описывались различные области применения разработанных контроллеров. Достаточно общий и универсальный набор ресурсов и гибкая система команд дали возможность использования одной и той же модели контроллера в самых различных приложениях. В разделе 4.4 описывается разнообразие применений одной из моделей- CEAC124.

Ранее уже было описано применение этого контроллера в качестве устройства управления источников постоянного тока MPS-20 и SHUNT-20, а также импульсных источников ГИД-25. Этот же контроллер нашел себе и другие области применения.

На ускорительных комплексах используются многие десятки, а иногда и сотни магниторазрядных насосов. На установках последних лет для их питания используются источники ВИП-27, разработанные ООО «КБСТ» (г. Выборг). В нашем институте для управления и контроля такими



источниками используется контроллер SEAC124. Сейчас около 200 каналов таких управляемых источников используется на установке ТНК (г. Зеленоград), десятки каналов установлены на Накопителе-Охладителе Инжекционного Комплекса, канале К-500, установке в КАЕРИ.

Небольшие габариты печатной платы и достаточно сбалансированный набор ресурсов с качественными параметрами инициировали применение этого устройства еще в одном сегменте автоматизации – управление электронными пушками. Ранее для таких приложений разрабатывался специализированный контроллер. Появление SEAC124 инициировало переход таких систем на стандартное унифицированное устройство, а специфику приложения перенести в сопутствующие специализированные платы, которые практически для каждой пушки приходилось разрабатывать специально.

Такая конфигурация была опробована на устройстве электронного охлаждения в Институте Современной Физики (г. Ланчжоу), затем применена для управления электронной пушкой тандемного ускорителя, пушкой Новосибирского ЛСЭ. В особо сложных приложениях, таких как управление высоковольтным терминалом COSY-Cooler, когда каналов управления и контроля очень много, устанавливаются два таких контроллера.

**В 5-й главе** рассматриваются системы автоматизации физических установок, базирующихся на разработанных устройствах.

В первом разделе главы рассматривается система автоматизации лазера на свободных электронах для Сибирского Центра Фотохимических исследований- NovoFEL. Этот проект, с точки зрения специалиста по системам управления, представляет интерес как первая в нашем институте большая установка, в которой большая часть системы автоматизации базировалась на контроллерах с сетевым интерфейсом. Вторая особенность этой установки- поэтапность сооружения. Если первая очередь ЛСЭ была запущена в 2002 году, то запуск третьей очереди происходит в настоящее время. Установка должна совмещать сооружение очередного компонента ЛСЭ с работой на пользователей терагерцового излучения.

Система автоматизации первой очереди ЛСЭ на основе встраиваемых контроллеров с сетевым интерфейсом включала в себя:

- систему питания магнитных элементов;
- систему термоконтроля;
- систему контроля источников питания ВЧ-генераторов.

Позже, с введением в эксплуатацию следующих дорожек ЛСЭ, эти системы были значительно расширены и добавлены новые системы. Сейчас разработанные контроллеры используются для управления электронной пушкой, для измерения вакуума, мониторингования питающей сети, в оборудовании пользовательских станций и т.д.

Далее в разделе описывается более подробно инфраструктура построения системы автоматизации, приводятся данные оборудования,

управляемого контроллерами. Отмечается, что если алгоритмы управления установкой не отличаются особыми хитростями, большой объем оборудования и требования высокой надежности работы побудили к созданию специальных программных средств для постоянного контроля исправности всех компонентов установки.

В заключение приводится сводная таблица каналов и информационных потоков в различных подсистемах.

Во втором разделе главы описывается система автоматизации ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2000, запущенного в 2006 году. Хотя она и не создавалась «с чистого листа» (ряд систем сохранился от комплекса ВЭПП-2М), тем не менее, здесь встраиваемые контроллеры с интерфейсом CANbus используются в большинстве подсистем, занимая во многих из них монопольное положение.

Система управления имеет свыше 500 каналов управления и свыше 1000 каналов контроля. С точки зрения управления ее можно разделить на следующие системы:

- импульсный линейный ускоритель (ИЛУ) и каналы транспортировки пучка к синхротрону Б-3М;
- Б-3М и каналы транспортировки к накопителю БЭП;
- накопительное кольцо БЭП;
- каналы транспортировки пучка частиц от БЭП к кольцу ВЭПП-2000;
- кольцо ВЭПП-2000;
- технологические подсистемы (вакуум, температура, криогеника).

Далее в разделе приводится схема системы управления комплекса ВЭПП-2000, сводка каналов по системам, объясняются особенности архитектуры. Отмечается, что в ряде систем используется старая аппаратура в стандарте КАМАК, а в системе диагностики пучка используются устройства с интерфейсом Ethernet, вследствие высоких информационных потоков.

Далее основные подсистемы комплекса описываются более подробно. Указывается, что к стабильности источника питания основного поля предъявляются высокие требования, кратковременная стабильность должна быть не хуже  $10^{-5}$ . Источники питания накопителя БЭП и коллайдера ВЭПП-2000, управляемые набором контроллеров CEDAC20, такую стабильность обеспечивают.

Отмечается, что в системе управления комплекса ВЭПП-2000 используется практически весь функционал разработанных устройств. При изменении магнитного поля кольца ВЭПП-2000 с сохранением тока пучка частиц, будь то процесс ускорения, либо переход в режим инъекции, все элементы магнитной системы должны перестраиваться синхронно с достаточно хорошей дискретностью. Пропускной способности коммуникационных линий явно недостаточно для обеспечения

непосредственного управления цифроаналоговыми преобразователями от управляющих ЭВМ. Поэтому практически все изменения магнитного поля производятся контроллерами источников питания в автономном режиме. Управляющие программы формируют нужную кривую изменения токов источников питания, вычисляют управляющие файлы для контроллеров, загружают их и затем инициируют процесс групповой командой. По завершении процесса все контроллеры сообщают об этом управляющим программам специальным сообщением.

Далее описываются импульсные системы, проблемы и способы их решения, планы модернизации этих систем на ближайшее время.

Отдельно рассматриваются некоторые подсистемы пучковых измерений-с помощью вторично-эмиссионных датчиков и датчиков токов изображений.

В конце раздела приводится статистика использования контроллеров, разработанных автором, на комплексе ВЭПП-2000. Далее кратко характеризуются области применения каждого из этих устройств на комплексе.

**В заключении** формулируются научные результаты работы, состоящие в следующем:

Предложена и реализована распределенная структура микроЭВМ в стандарте КАМАК в качестве основы системы управления ускорительно-накопительных комплексов.

Разработан ряд аппаратных и программных средств для распределенных систем микроЭВМ, позволяющих на их основе создавать системы автоматизации, как больших физических установок, так и небольших установок, стендов в различных областях науки. Универсальность разработанных средств позволила долгое время использовать микроЭВМ в качестве рабочей станции, персональной ЭВМ и даже как универсальной вычислительной машины для расчетных задач.

На основе разработанной структуры, архитектурных решений, аппаратных и программных средств созданы десятки систем автоматизации электрофизических установок, некоторые из которых успешно работают третий десяток лет, в том числе комплекс ВЭПП-3/4 и Курчатовский источник синхротронного излучения.

Предложена и реализована архитектура систем управления на основе сетевых структур повышенной надежности.

Проведен анализ основных процессов в системах управления электрофизических комплексов и на его основе сформулирована концепция интеллектуальных контроллеров, встраиваемых в оконечную

аппаратуру, и реализующих функции, адекватные потребностям систем управления ускорительно-накопительными комплексами.

Создан набор унифицированных устройств в рамках разработанных структур и архитектурных решений, удовлетворяющий основные потребности систем управления электрофизическими комплексами.

Проведен анализ и практические исследования аналого-цифровых, цифроаналоговых и цифровых структур и сформированы схемотехнические решения, позволившие обеспечить высокие метрологические характеристики разработанной аппаратуры и минимизировать объем настроечных операций и, как следствие, себестоимость производства соответствующего оборудования.

На основе разработанной структуры, архитектурных решений, аппаратных и программных средств, созданы системы автоматизации нового поколения таких электрофизических установок как ускорительно-накопительный комплекс ВЭПП-2000, лазер на свободных электронах NovoFEL и ряда других установок и стендов. Разработанные устройства применяются не только на установках Института Ядерной Физики, но и в других научных центрах как в нашей стране (НИЦ «Курчатовский Институт», ОИЯИ, ТНК), так и за рубежом (IMP в г. Ланчжоу, Китай, ускоритель в KAERI, Корея, COSY, Германия).

## **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. В.Р. Козак. Разработка аппаратных и программных средств для распределенных систем автоматизации электрофизических установок. // Дисс...канд. техн. наук. Ин-т ядерной физики СО АН СССР. Новосибирск, 1991.
2. А.М. Батраков, В.Р. Козак. АЦП для цифровой регистрации однократных импульсных сигналов. // Автотметрия №4, 1978, с.59-63.
3. Аульченко В.М., Батраков А.М., Козак В.Р. и др. Система автоматизации эксперимента на термоядерной установке ГОЛ-1: В сб.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. Тезисы докладов Всесоюзной конференции. Новосибирск, 1979, с.37-39.
4. А.М. Батраков, В.Р. Козак, В.И.Нифонтов. Регистратор однократных импульсных сигналов АЦП-101: Препринт ИЯФ 79-36. Новосибирск, 1979.

5. А.М.Батраков, В.Р. Козак, В.И. Нифонтов. Регистратор однократных импульсных сигналов АЦП-8100. // Препринт ИЯФ 79-40. Новосибирск, 1979.
6. В.Р. Козак, П.Л. Храпкин. Программное обеспечение системы сбора данных на термоядерной установке ПСП-02: В сб.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. // Тезисы докладов Всесоюзной конференции. Новосибирск, 1981, с.24.
7. Батраков А.М., Каргальцев В.В., Козак В.Р., Купер Э.А. Модули для измерения импульсных параметров: В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. // Тезисы докладов Всесоюзной конференции. Новосибирск. 1981. с.37-39. Н.: 1981.
8. А.М. Батраков, В.Р. Козак. Регистраторы формы импульсных сигналов серии «S». АЦП-850S. // Препринт ИЯФ 85-10. Новосибирск, 1985.
9. А.М. Батраков, В.Р. Козак. Регистраторы формы импульсных сигналов серии «S». АЦП-101S. // Препринт ИЯФ 85-9. Новосибирск, 1985.
10. А.М. Батраков, В.Р. Козак, Э.А. Купер, А.В. Нифонтов. Принципы построения и метрологическое обеспечение цифровых регистраторов формы импульсных сигналов. // Автометрия, 1986 г., №4, с.50-63.
11. В.Р. Козак. Матобеспечение для ЭВМ ОДРА и Одренок. Программы обработки текстовых файлов. // Препринт ИЯФ 88-23, Новосибирск, 1988.
12. В.Р. Козак. Драйвер и контроллер для ЭВМ Одренок. // Препринт ИЯФ 88-24, Новосибирск, 1988.
13. А.Н. Алешаев, В.Р. Козак. Программное обеспечение для микроЭВМ Одренок. Центральная ЭВМ. // Препринт ИЯФ 88-48, Новосибирск, 1988.
14. А.М. Батраков, В.Р. Козак. Регистраторы формы импульсных сигналов серии «S». АЦП-101SK, АЦП-850SK. // Препринт ИЯФ 88-98. Новосибирск, 1988.
15. В.Р. Козак, С.Н. Кузнецов, Н.П. Уваров, А.В. Шадрин. Модули в стандарте VME для систем управления электрофизическими установками. // Тезисы докладов XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 3 - 5 октября 1990г., с. 52.
16. A. Aleshaev, A. Batrakov, S. Belov, et al. The VEPP-4 control system. // Proc. of ICALEPCS-1995. October 29 - November 3, 1995. Chicago, USA.
17. А.Н. Алешаев, Р.В. Басалаев, И.В. Белоусов и др. Сетевое обеспечение системы управления ВЭПП-4. // 17-е Совещание по ускорителям заряженных частиц, ГИЦ РФ, Ин-т физики высоких энергий, Протвино, 17-20 октября 2000, Протвино, т.1, с.180-183.
18. В.А. Киселев, В.Р. Козак, Э.А. Купер, А.И. Науменков, В.В. Репков. Система мониторинга пучков заряженных частиц в каналах

- транспортировки. // 17-е Совещание по ускорителям заряженных частиц, ГНЦ РФ, Ин-т физики высоких энергий, Протвино, 17-20 октября 2000, Протвино, т.1, с.212-215.
19. A. Batrakov, I. Ilyin, G. Karpov, V. Kozak, et al. Control and data acquisition systems for high field superconducting wigglers// Nuclear Instruments and methods in Physics Research, A 467-468 (2001) 202-205.
  20. E.A. Antokhin, R.R. Akberdin, V.S. Arbutov, et al. First lasing at the high-power free electron laser at Siberian center for photochemical research. // Nuclear instruments and methods in physics research. Sec.A.-2004, Vol.A528, №1/2, pp.15-18.
  21. В.Р. Козак. Многоканальный прецизионный аналого-цифровой преобразователь в стандарте VME. // Препринт ИЯФ 2004-69. Новосибирск, 2004.
  22. V. Reva, E. Bekhtenev, V. Bocharov, et al. Commissioning of Electron Cooler EC-300. // Proc. of EPAC-2004, Lucerne.
  23. A.N. Fisenko, A.V. Kosov, V.R. Kozak, et al. Coordinate-sensitive ionization chamber with high spatial resolution. // Nuclear Instruments and methods in Physics Research, Sec.A, 2005, Vol.A543, No.1. p.361-364.
  24. В.Р. Козак. Прецизионный цифроаналоговый преобразователь в стандарте VME. // Препринт ИЯФ 2006-44. Новосибирск, 2006.
  25. O.V. Belikov, D.E. Berkaev, V.R. Kozak, A.S. Medvedko. Power supply system for corrector magnets of VEPP-2000 complex. // Proc. of RuPAC-2006. Novosibirsk, Russia.
  26. V. Kozak. Embedded Device Set for Control Systems. // Proc. of RuPAC-2006. Novosibirsk, Russia.
  27. E.N. Dementyev, V.R. Kozak, E.A. Kuper, et al. Architecture and main hardware components of the FEL control system. // Proc. of RuPAC-2006. September 10-14, 2006. Novosibirsk, Russia.
  28. B. Gudkov, A. Filipchenko, V. Kozak, et al. Revision of Zelenograd synchrotron radiation facility control system. // Proc. of RuPAC-2006. September 10-14, 2006. Novosibirsk, Russia.
  29. В.Р. Козак. Прецизионные аналого-цифровые преобразователи. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2006 г., №4, с.35-37.
  30. Batrakov, S. Zverev, I. Ilyin, et al. The new VME – based system for magnetic measurements with Hall sensors. // Preprint Budker INP 2007-32. Novosibirsk, 2007.
  31. В.Р. Козак. Тестовое обеспечение для устройств с интерфейсом CANbus. // Препринт ИЯФ 2008-16. Новосибирск, 2008.
  32. K.M. Gorchakov, S.S. Vasichev, V.F. Veremeenko, et al. Power supplies for bending magnets of the BEP and VEPP-2000 storage rings. // Proc. of RuPAC-2008. Dubna, Russia.

33. DE., Berkaev, P.B. Cheblakov, A.N. Kirpotin, et al. VEPP-2000 collider control system. // Proc. of ICALEPCS-2009. Kobe, Japan.
34. D. Berkaev, I. Ostanin, V. Kozak, V. Cherepanov, V. Repkov, E. Bykov. Beam measurement system of VEPP-2000 injection channels. // Proc. of ICALEPCS-2009. Kobe, Japan.
35. В.Р. Козак. Контроллер быстроперестраиваемых источников питания с интерфейсом CANbus. // Препринт ИЯФ 2009-20. Новосибирск, 2009.
36. O. Anchugov, V. Arbuzov, et al. Status of «Zelenograd» storage ring. // Nuclear Instruments and methods in Physics Research, Sec.A, 2009, Vol.A603, No.1/2. p.4-6.
37. О.В. Беликов, А.С. Медведко, В.Р. Козак. Источник подшунтирования электромагнитов для коррекции параметров пучка в ускорителях и накопителях заряженных частиц. // Вестник НГУ. Серия: Физика, 2009. Том 4. Вып.3. с.63-66.
38. O. Belikov, V. Kozak, A. Medvedko. A family of twenty-amperes power supplies for multipole correctors for accelerators and storage rings. // Proc. of RuPAC-2010. Protvino, Russia.
39. А.Н. Алешаев, В.В. Анашин, О.В. Анчугов и др. Ускорительный комплекс ВЭПП-4. Препринт ИЯФ 2011-20. Новосибирск, 2011.
40. В.Р. Козак, Э.А. Купер, Н.А. Винокуров и др. Система управления Новосибирским лазером на свободных электронах. // Вестник НГУ. Серия: Физика, 2012. Том 7. Вып.3. с.24-33.

КОЗАК Виктор Романович

**Распределенные системы управления и контроля  
ускорительными комплексами ИЯФ СО РАН**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

---

Сдано в набор 21.09.2012 г.

Подписано в печать 21.09.2012 г.

Формат 60x90 1/16. Объем 2.0 печ.л., 1.6 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 23

---

Обработано на РС и отпечатано  
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,  
*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*