

На правах рукописи

БОЛХОВИТЯНОВ ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ
ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5**

**01.04.01 — приборы и методы экспериментальной
физики**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НОВОСИБИРСК — 2007

Научный руководитель:

Логачев Павел Владимирович – кандидат физико-математических наук,
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера,
СО РАН, г.Новосибирск.

Официальные оппоненты:

Аульченко Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера,
СО РАН, г.Новосибирск.

Зюбин Владимир Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент,
Институт автоматики и электрометрии,
СО РАН, г.Новосибирск.

Ведущая организация: ГНЦ РФ «Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И.Алиханова», г.Москва.

Защита диссертации состоится «__» ____ 2007 года в «__» часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.01 Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ СО РАН.

Автореферат разослан «__» ____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

А.А.Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Проведение экспериментов по физике высоких энергий на ускорительных комплексах на встречных электрон-позитронных пучках требует высокой светимости. Для этого необходим интенсивный источник позитронов с производительностью не менее 10^{10} позитронов в секунду. В то же время, максимальная производительность позитронных источников на действовавших в ИЯФ СО РАН комплексах ВЭПП-2М, ВЭПП-3 и ВЭПП-4 не превышала $1.8 \cdot 10^8$ позитронов в секунду. Поэтому в 1990г. начались работы по созданию современного Инжекционного комплекса с источником позитронов производительностью более 10^{10} позитронов в секунду на основе линейных ускорителей S-диапазона (2856МГц). Инжекционный комплекс ВЭПП-5 с запасом обеспечит все потребности работающих (ВЭПП-3 и ВЭПП-4) и строящейся (ВЭПП-2000) в ИЯФ СО РАН установок на встречных электрон-позитронных пучках.

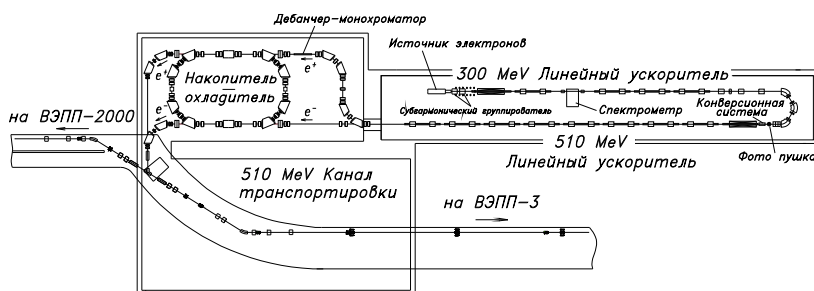


Рис. 1: Схема Инжекционного комплекса ВЭПП-5.

Инжекционный комплекс (рис.1) состоит из линейного ускорителя (ли-нака) электронов на 300МэВ, линейного ускорителя позитронов на 510МэВ, а также накопителя-охлаждителя с каналами впуска и выпуска пучков.

Одним из ключевых компонентов любой современной установки, в особенности столь крупной, является централизованная компьютерная система управления.

Готовой доступной системы управления на момент начала работ по комплексу ВЭПП-5 просто не существовало. Системы управления, применяемые на существовавших к тому времени в ИЯФ установках, бы-

ли слишком привязаны к используемой аппаратуре (как к управляющей электронике, так и к компьютерам), и потому не подходили для ВЭПП-5, поскольку он изначально проектировался под использование иной аппаратуры. Использувавшиеся то время в зарубежных центрах по физике высоких энергий системы управления были недоступны либо вследствие закрытости для России (EPICS), либо вследствие дороговизны (Vsystem).

Поэтому для комплекса ВЭПП-5 потребовалась разработка собственной централизованной компьютерной системы управления.

Цель проведения работы

Целью работы являлось создание централизованной компьютерной системы управления для Инжекционного комплекса ВЭПП-5. Это включало в себя:

1. Разработку архитектуры системы управления на основе трехуровневой модели.
2. Создание ядра системы управления как самостоятельного программного продукта, работающего под POSIX-совместимыми ОС (в частности, Linux).
3. Реализацию набора управляющих программ для Инжекционного комплекса ВЭПП-5.

Примененный метод

Система управления базируется на распределенной трехуровневой модели (именуемой также *стандартной*). В этой модели используется комбинация технологий *клиент-сервер* и *publish/subscribe*.

Научная новизна работы

- На базе трехуровневой модели создана схема представления управляющей аппаратуры в виде скалярных и массивовых каналов, и разработаны формализованные правила функционирования таких каналов. Разработанная модель является простой, и может использоваться и в других системах управления.
- Разработан модульный подход к построению унифицированных программ управления на основе древовидных описателей и plugin-архитектуры, позволяющий значительно упростить создание управляющих программ и повысить гибкость системы управления.

- Разработаны принципы построения пользовательского интерфейса программ управления физическими установками.
- Произведена оценка достоинств и недостатков использования технологии многопоточности в системах управления ускорительными комплексами.

Практическая значимость работы

Созданная система управления, получившая название СХ, используется на Инжекционном комплексе ВЭПП-5. Под ее управлением был запущен линейный ускоритель, достигнут проектный темп ускорения и осуществлено получение позитронов.

Эта система управления также применялась и будет применяться для автоматизации проводимых ИЯФ СО РАН проектов среднего и малого масштаба — таких, как испытания прототипа вращающейся нейтронной мишени (проект МНТЦ №2257), управление системой электронно-лучевой сварки (предполагается поставка на Чкаловский завод в 2007—2008гг.) и система контроля пучкового датчика (предполагается поставка в SNS (Окридж, США) в 2007г.).

Кроме того, созданная система управления может применяться на других ускорительных комплексах как в ИЯФ СО РАН, так и за его пределами.

Положения, выносимые на защиту

1. Распределенная система управления с трехуровневой клиент-серверной структурой является наиболее адекватной для больших физических установок. Она обеспечивает гибкость, необходимую при изменениях, вносимых по мере создания ускорительного комплекса.
2. Разработанная схема представления измерительной и управляющей аппаратуры в виде скалярных и массивовых каналов (с формализованными правилами работы с такими каналами) хорошо подходит для большей части используемой в ИЯФ аппаратуры.
3. Система управления реализована в виде двух частей: ядра системы управления, представляющего собой самостоятельный продукт, и набора управляющих программ для Инжекционного комплекса ВЭПП-5.
4. Ядро системы управления СХ подходит для автоматизации других физических установок, как ускорительных комплексов, так и иных

экспериментов среднего и малого масштаба.

5. Разработанный и примененный модульный подход к построению унифицированных программ управления с использованием древовидных описателей и plugin-архитектуры хорошо подходит как для простых, так и для сложных разветвленных программ.

Апробация работы и публикации

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на следующих рабочих совещаниях и конференциях:

6th International Conference on Accelerator and Experimental Physics Control Systems (ICALPCS'97, Пекин, Китай), 8th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALPCS 2001, Сан-Хосе, США), 4th International Workshop on Personal Computers and Particle Accelerator Controls (PCaPAC-2002, Фраскати, Италия), The 5th International Workshop on Personal Computers and Particle Accelerator Controls (PCaPAC-2005, Хаяма, Япония), The 10th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALPCS 2005, Женева, Швейцария), XXth Russian Conference on Charged Particle Accelerators (RuPAC'2006, Новосибирск, Россия), The 6th International Workshop on Personal Computers and Particle Accelerator Controls (PCaPAC-2006, Ньюпорт Ньюс, США)

и опубликованы в 11 работах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и трех приложений. Общий объем диссертации составляет 133 страницы и включает 38 рисунков, 1 таблицу и список литературы из 67 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дается общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, сформулированы цели работы, научная новизна и практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту, и приводится краткий обзор содержания диссертации.

Первая глава описывает Инжекционный комплекс ВЭПП-5 как объект автоматизации. В ней приводится список подсистем, подлежащих автоматизации и требуемые характеристики системы управления. Затем

обосновывается выбор аппаратной платформы — стандартных ПК офисного класса, и используемой ОС — Linux. Далее кратко описывается ситуация с выбором системы управления на момент начала работы — в то время готовой доступной системы управления просто не существовало, что и обусловило создание собственной системы управления непосредственно под потребности комплекса ВЭПП-5.

Вторая глава посвящена разработке архитектуры системы управления. К тому моменту в мире стало общепризнано, что наиболее адекватной для крупных систем с сотнями и тысячами точек управления и контроля является т.н. *трехуровневая* архитектура, именуемая также *стандартной моделью* (см. рис.2). В этой модели ПО четко разбивается на 3 уровня: верхний — уровень прикладных программ; нижний — уровень аппаратуры, состоящий из устройств и их драйверов; средний уровень — связующий, обеспечивает передачу данных между прикладными программами и аппаратурой, решая также большое количество служебных задач, таких, как мультиплексирование данных, разрешение конфликтов, управление доступом, и т.д.

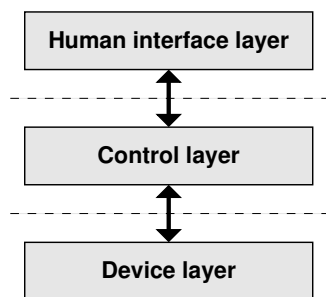


Рис. 2: Схема трехуровневой архитектуры.

Выбор трехуровневой архитектуры оставляет, однако, вопрос — *какими* данными она должна оперировать, и *как*? Для ответа на этот вопрос был проведен анализ и классификация аппаратуры, используемой в ИЯФ, и в результате выбрана модель представления аппаратуры в виде т.н. *каналов* — скалярных («простая» аппаратура, такая, как ЦАП и АЦП) и массивовых (быстрые осциллографы, видеокамеры, и т.п.). Были разработаны принципы функционирования каналов, реализуемые СХ-сервером.

Хотя получившая в последнее десятилетие популярность технология

многopotочности выглядит привлекательно для системы управления, после анализа ее достоинств и недостатков для CX была выбрана однопоточная модель, что полностью себя оправдало.

В этой главе приводится также общая архитектура системы CX (см. рис.3), детальному описанию реализации которой посвящена следующая глава.

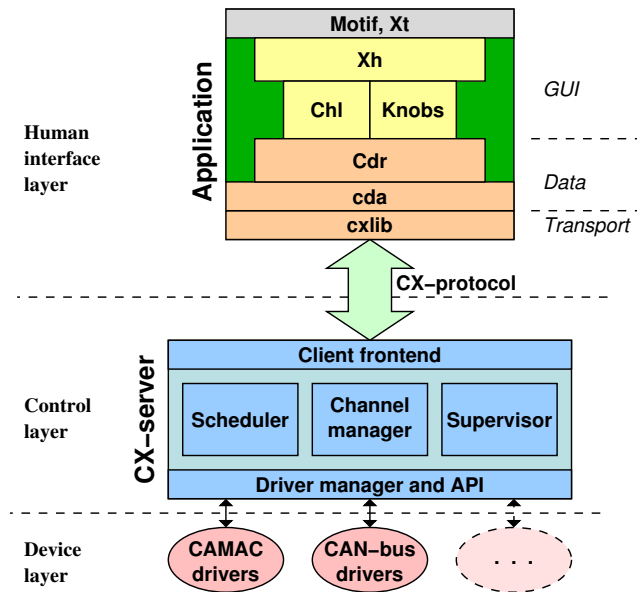


Рис. 3: Общая архитектура системы управления CX

Заканчивается глава сравнением CX с другими системами управления физическими установками, в первую очередь — с EPICS, который наиболее распространен и наиболее идеологически близок к CX, а также с Vsystem, TANGO, TINE и COACK.

Третья глава посвящена реализации ключевых компонентов системы управления.

CX-сервер является центральным компонентом системы. Он решает триединую задачу: реализует CX-протокол с серверной стороны; поддерживает существование каналов в соответствии с правилами, сформулированными во второй главе; предоставляет «среду жизнедеятельности»

для драйверов. Сервер имеет модульную структуру: драйверы являются отдельными модулями, и динамически загружаются лишь те из них, которые требуются для работы конкретного экземпляра сервера.

подавляющая часть электроники, используемой на комплексе ВЭПП-5, выполнена в стандартах SAMAC и CAN-bus, и драйверы для этих устройств входят непосредственно в состав СХ. Для управления SAMAC используются интеллектуальные контроллеры CM5307 и CM5307-PPC, работающие под управлением Linux. Для связи с сетью CAN-bus применяются PCI-адаптеры, которые постепенно вытесняются интеллектуальными адаптерами CANGW, архитектурно идентичными CM5307-PPC. Таким образом, на всех уровнях системы используется единая ОС.

Взаимодействие клиентов и сервера производится посредством сетевого протокола СХ, работающего поверх TCP/IP. Протокол является асинхронным и организован по контейнерному принципу, что сделало его достаточно мощным и универсальным — за почти десятилетие никаких изменений в базовую структуру протокола вносить не потребовалось.

Транспортная библиотека `sxlib` является реализацией протокола СХ с клиентской стороны и позволяет устанавливать несколько независимых соединений с разными серверами одновременно. Она поддерживает как синхронный режим работы, требуемый в основном диагностическими утилитами, так и асинхронный, использующийся для графических управляющих программ.

Библиотека `sda` обеспечивает прикладным программам удобный доступ к данным. Она поддерживает соединение с сервером, автоматически восстанавливая его при обрыве, и производит преобразование данных между инженерными величинами (коды блоков, вольты, и прочие целочисленные значения) и физическими величинами, которые и имеют смысл для прикладных программ. Кроме того, она поддерживает также т.н. *формулы* — систему команд специализированной виртуальной машины, позволяющую получать значение экранного канала на основе нескольких физических, уставлять значения нескольких физических каналов на основе одного логического (т.н. «умные ручки»), и выполнять множество других действий, включая простейшую обратную связь и протяженные по времени операции управления.

Создание графического пользовательского интерфейса управляющих программ также полностью поддерживается библиотеками: `Chl` реализует стандартную функциональность прикладного уровня; `Knobs` предоставляет стандартные компоненты управления (экранные «ручки»); `Xh` обеспе-

чивает упрощенный доступ к функциональности X11/Xt/Motif и стандартизованный пользовательский интерфейс. Это позволило дать всем управляющим программам одинаково богатую функциональность и обеспечить унифицированный внешний вид и интерфейс пользователя (см. рис.4).

В этой главе также рассматривается организация пользовательского интерфейса программ контроля и управления, система запуска и контроля состояния подсистем, облегчающая работу с большим количеством управляющих программ одновременно и предоставляющая сводную информацию по текущему состоянию всех подсистем. Завершается глава описанием средств отладки и диагностики системы управления.

Четвертая глава посвящена применению системы СХ на Инжекционном комплексе ВЭПП-5 — в ней описываются прикладные программы, используемые для управления различными подсистемами комплекса: магнитной системой линака, субгармоническим группирователем, системой контроля вакуума, системой термостабилизации, системой диагностики пучка.

Магнитная система форинжектора служит для поперечной фокусировки пучка при ускорении в электронном линаке, транспортировке в 180°-изохронном повороте, и при дальнейшем ускорении в позитронном линаке. Она содержит кольцевые катушки группирователя, соленоиды, квадрупольные линзы, поворотные магниты, фокусирующий триплет и корректоры. Программа управления магнитной системой (рис.4.1) предоставляет доступ ко всем этим компонентам одновременно, в рамках одного окна (что делает ее в настоящий момент самой большой как по количеству каналов, так и по занимаемой экранной площади). Уставки и измеренные контрольные значения отображаются в текстовом виде; при отклонении контрольного значения от уставки оно подсвечивается, в зависимости от отклонения, желтым либо красным.

Субгармонический группирователь служит для предварительного сжатия пучка в продольном направлении. Программа управления (рис.4.2) предоставляет интерфейс, аналогичный панели ручного управления, которой оснащен субгармонический группирователь, включая экранные ручки «стрелочный индикатор».

Для контроля вакуума в линейном ускорителе и в накопителе-охладителе используются измерения токов и напряжений магниторазрядных насосов. Программы для этих двух подсистем полностью идентичны, отличаясь лишь набором используемых каналов, и имеют два режима работы. В графическом (рис.4.3), предназначенном для «крейсерской» работы, значения токов магниторазрядных насосов отображаются в виде

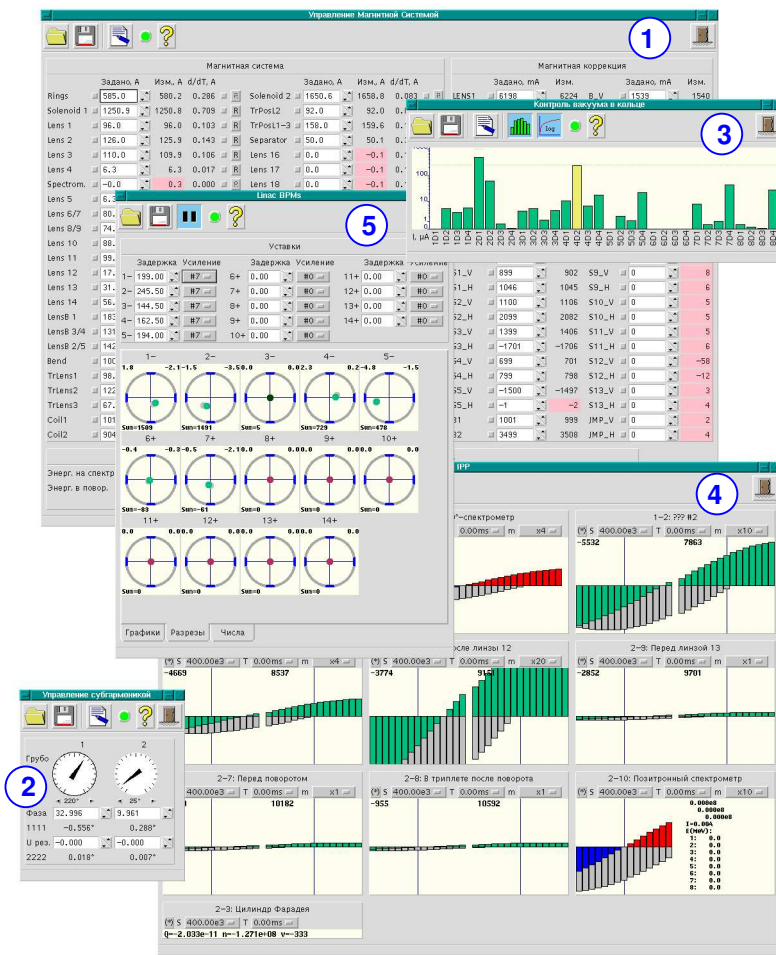


Рис. 4: Унифицированный внешний вид управляющих программ (1 — магнитная система, 2 — субгармонический группирователь, 3 — контроль вакуума, 4 — сеточные датчики, 5 — полосковые датчики).

гистограммы, что позволяет оценивать ситуацию буквально одним взглядом. Числовой режим используется для установки пределов; плюс, кроме

токов в нем также доступны и напряжения магниторазрядных насосов. При выходе значения за уставленный предел соответствующий столбец подсвечивается красным цветом и включается аудиовизуальная сигнализация: издается звуковой сигнал и гистограмма мерцает красным цветом.

Потребность в системе термостабилизации СВЧ-элементов линака обусловлена тем, что даже небольшое изменение температуры элементов существенно меняет их параметры. Непосредственно управление термостабилизацией осуществляется специализированной аппаратурой, с которой компьютер взаимодействует через аппаратуру САМАС. Помимо предоставления интерфейса к управляющей аппаратуре, программа обеспечивает сигнализацию при отклонении температуры от указанной и при превышении максимально допустимой температуры воды на входе в систему.

Задачей системы диагностики пучка является оперативный контроль за параметрами пучка и быстрое выявление неисправностей при отклонении параметров от номинальных значений. В системе диагностики пучка используются 3 метода: вторичноэмиссионные сеточные датчики, исторически именуемые ИПП (Измеритель Положения Пучка); полосковые датчики, исторически именуемые ВРМ (Beam Position Monitor); люминофоры с видеокамерами.

Сеточные датчики (именуемые также вторичноэмиссионными профильными мониторами) применяются для измерения профиля пучка. Данные с них отображаются в виде гистограмм, отдельно по X и по Y (рис.4.4) .

Полосковые датчики (именуемые также *пикапами*) служат для определения положения центра тяжести и величины заряда сгустка. Эта система диагностики является неразрушающей, и потому может использоваться в штатном режиме работы. Программа может представлять данные в одном из трех вариантов: «графики» (развертка траектории пучка вдоль тракта форинжектора, отдельно по координатам X и Y); «разрезы» (отображаются положения центра масс пучка в поперечном сечении в местах расположения датчиков (рис.4.5)); числа (как обчисленные координаты пучка, так и «сырые» данные с пикапов выдаются в числовом виде).

Люминофорные датчики спроектированы на базе сеточных датчиков — сетка из проволочек заменена на люминофор, который светится под воздействием попадающего на него пучка. Изображение с люминофора при помощи видеокамеры передается в компьютер, где оно оцифровывается РСІ-платой видеозахвата и отображается на экране. Эти датчики, как и сеточные, являются разрушающей системой диагностики. Для выбора камер используется программа, позволяющая ввести в тракт пучка любой

люминофорный датчик, автоматически убирая все остальные, либо убрать все датчики, для свободного пролета пучка.

В конце этой главы приводится другой пример использования СХ, вне комплекса ВЭПП-5 — в проекте МНТЦ №2257, являющемся экспериментом малого масштаба.

Пятая глава посвящена анализу опыта создания и использования СХ, и в ней намечены пути дальнейшего развития.

Первоначально при разработке системы управления постулировалось, что все ее компоненты должны работать исключительно под Linux/POSIX. В реальности же очень часто возникает необходимость получить доступ к каналам контроля (реже — управления) из-под Windows. Поэтому одним из приоритетов дальнейшего развития СХ является добавление клиентским библиотекам совместимости с платформой Win32.

Кроме того, в этой главе детально рассматривается модульный подход к построению унифицированных программ управления на основе древовидных описателей и plugin-архитектуры. Описание любой программы представляется в виде дерева, узлами которого могут быть: скалярные каналы, массивовые каналы, подветви, либо специализированные пользовательские компоненты (т.н. *плагины* — plug-ins). Специфические для некоей программы действия реализуются плагинами, а древовидная иерархия может использоваться и *без* экранного отображения. Этот подход позволяет упростить разработку сложных разветвленных программ управления, повысить их гибкость и лучше интегрировать их в общую инфраструктуру системы управления.

В **заключении** приводятся основные результаты и выводы диссертации.

В **Приложении 1** описываются поддерживающие библиотеки, являющиеся как бы расширением окружения POSIX и имеющие самостоятельную ценность — они могут использоваться отдельно от СХ.

В **Приложении 2** рассматривается идеологическое и архитектурное сходство системы управления и графической системы X11, позволившее использовать в СХ многие из применяемых в X11 решений.

В **Приложении 3** приводятся статистические данные — объемы исходных текстов, параметры быстродействия системы управления, требования к памяти.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана архитектура системы управления на основе трехуровневой модели.
2. Создано ядро системы управления как самостоятельный продукт, включающий:
 - Сервер системы управления.
 - Набор драйверов для устройств САМАС и CAN-bus.
 - Реализацию сетевого протокола клиент-сервер для связи между сервером и прикладными управляющими программами.
 - Набор библиотек для прикладных программ, обеспечивающих обработку данных и стандартизованный интерфейс с пользователем.
 - Средства отладки и диагностики.
 - Систему запуска ПО и контроля состояния подсистем.
3. Создан набор управляющих программ для Инжекционного комплекса ВЭПП-5, а именно:
 - Программа управления магнитной системой форинжектора ВЭПП-5.
 - Программа управления субгармоническим группирователем.
 - ПО системы контроля вакуума в линейном ускорителе и в накопителе-охладителе.
 - Программа управления системой термостабилизации.
 - Набор программ для системы диагностики пучка в линейном ускорителе.

Разработанный комплекс программ используется для управления ВЭПП-5 с 2000г. В частности, с помощью данного комплекса был запущен линейный ускоритель, достигнут проектный темп ускорения и осуществлено получение позитронов.

4. Созданное ядро системы управления применимо для автоматизации других установок, в т.ч. экспериментов малого масштаба, что продемонстрировано на примере системы управления эксперимента МНТЦ №2257.
5. Разработан модульный подход к построению унифицированных программ управления, позволяющий значительно упростить создание этих программ и повысить гибкость системы управления.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. D.Yu.Bolkhovityanov, Yu.I.Eidelman, "Control System for VEPP-5 electron-positron complex", Proc. ICALEPCS'97, Beijing, China, November 1997.
2. D.Yu.Bolkhovityanov, R.G.Gromov, E.A.Gusev, K.V.Gubin, I.L.Pivovarov, O.Yu.Tokarev, "Present Status of VEPP-5 Control System", Proc. ICALEPCS2001, San Jose, California, USA, November 2001.
3. D.Bolkhovityanov, I.Pivovarov, O.Tokarev, "Evolution and Present Status of VEPP-5 Control System", Proc. PCaPAC'2002, Frascati (RM), Italy, October 2002.
4. D.Bolkhovityanov et al, "Experience of Using uClinux-based CAMAC Controllers in VEPP-5 Control System", Proc. PCaPAC'2002, Frascati (RM), Italy, October 2002.
5. D.Bolkhovityanov, O.Tokarev, "Usage of PC CANBUS Controllers in VEPP-5 Control System", Proc. PCaPAC'2002, Frascati (RM), Italy, October 2002.
6. М. С. Авиллов, ... Д. Ю. Болховитянов и др., «Состояние работ на инжекционном комплексе ВЭПП-5», Атомная энергия, т. 94, вып. 1, январь 2003, сс.84-87.
7. D.Bolkhovityanov et al, "PowerPC-based CAMAC and CAN-bus controllers in VEPP-5 Control System", Proc. PCaPAC'2005, Hayama, Japan, March 2005.
8. D.Bolkhovityanov, N.Lebedev, A.Starostenko, A.Tsyganov, "Design and Development of a Control System for Intense Source of Radioactive Ions prototype", Proc. ICALEPCS'2005, Geneva, Switzerland, October 2005.
9. O.Alyakrinskiy, M.Avilov, D.Bolkhovityanov et al, "High Power Neutron Converter for Low Energy Proton/Deuteron Beams", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 557 Issue 2, 15 February 2006, pp. 403-413.
10. D.Yu.Bolkhovityanov, E.A.Gusev, V.V.Oreshonok, O.V.Pirogov, D.P.Sukhanov, "The RF phase and amplitude monitoring system of the VEPP-5 preinjector", Proc. RuPAC 2006, Novosibirsk, Russia, September 2006.
11. D.Bolkhovityanov, "UI-oriented Approach for Building Modular Control Programs in VEPP-5 Control System", Proc. PCaPAC-2006, Newport News, VA USA, October 2006.