

На правах рукописи

КАРНАЕВ Сергей Евгеньевич

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
УСКОРИТЕЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ ВЭПП-4
И БУСТЕРНЫМ СИНХРОТРОНОМ
ИСТОЧНИКА СИ NSLS-II**

**01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

НОВОСИБИРСК – 2017

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

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Серов Анатолий Федорович – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, главный научный сотрудник.

Жабицкий Вячеслав Михайлович – доктор физико-математических наук, Международная межправительственная организация Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, ведущий научный сотрудник.

Корчуганов Владимир Николаевич – доктор физико-математических наук, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Научный комплекс по перспективным ускорительным технологиям, г. Москва, заместитель руководителя.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва.

Защита диссертации состоится « 22 » декабря 2017 г. в « 14:30 » 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 « 19 » сентября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.В. Бурдаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Тема диссертации касается разработки систем управления крупными ускорительными комплексами. Успешное функционирование системы управления является одним из важнейших факторов эффективной работы ускорительной установки, которая представляет собой сложный объект управления, характеризующийся большими размерами, разнообразными режимами работы, большим числом управляемых и измеряемых параметров. Всё возрастающие современные требования, предъявляемые к точности и согласованности управления, к обработке больших объемов данных, ведут к необходимости разработки и постоянной модернизации систем управления с использованием самых передовых достижений электроники и IT-технологий.

В ИЯФ СО РАН работает ускорительно-накопительный комплекс ВЭПП-4, на котором с использованием электронных и позитронных пучков проводятся эксперименты по физике высоких энергий, ядерной физике, а также исследования с использованием СИ. В процессе эксплуатации установок комплекса постоянно ставятся новые задачи, требующие исследования и разработки новых методов управления и электроники, что, в свою очередь, стимулирует постановку новых экспериментальных задач. Накопленный на ВЭПП-4 опыт был использован для создания системы управления бустерным синхротроном NSLS-II (бустером), что способствовало быстрому запуску и успешной эксплуатации ускорителя. Нарботанные при этом методики управления используются для дальнейшей модернизации управления комплекса ВЭПП-4, а также будут востребованы при разработке систем управления новыми ускорительными установками как в ИЯФ СО РАН, так и в других научно-технологических центрах.

Цель и задачи

Целью диссертационной работы является создание систем управления ускорительно-накопительным комплексом ВЭПП-4 в ИЯФ СО РАН и бустером источника СИ NSLS-II в Брукхейвенской национальной лаборатории США. Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие **задачи**:

1. Разработать и создать структуру программно-аппаратного комплекса системы управления ВЭПП-4, включая компоновку контрольно-измерительной аппаратуры и программное обеспечение.
2. Разработать и реализовать методы управления ускорительными установками комплекса ВЭПП-4 для обеспечения проведения экспериментов по физике высоких энергий и ядерной физике с использованием пучков электронов и позитронов, а также экспериментов с использованием СИ.

3. Спроектировать и реализовать схему системы управления бустера NSLS-II с использованием устройств, специально разработанных для управления и диагностики комплекса NSLS-II, а также с применением средств промышленной автоматизации.
4. Создать программное обеспечение системы управления бустера, включая необходимые базовые программные средства, а также набор инженерных и операторских приложений.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Автором лично сформулированы требования к системам управления, разработана архитектура, многие программные и аппаратные подсистемы, методики управления, а также написана значительная, во многих случаях – определяющая, часть программного кода. При определяющем участии автора проведены многие исследования и внедрения, связанные с модернизацией системы управления ускорительного комплекса ВЭПП-4, а также проводятся эксперименты, связанные с использованием электрон-позитронных пучков. Личное участие автора позволило в кратчайшие сроки разработать структуру системы управления бустера NSLS-II, реализовать новые методики управления, а также создать комплекс программного обеспечения для управления установкой.

Научная новизна

Создана система управления уникальным научно-исследовательским ускорительным комплексом ВЭПП-4. При этом были применены новые методики управления, разработанные и опробованные в ходе создания системы управления и дальнейшей эксплуатации установок в целях обеспечения проведения экспериментов с электрон-позитронными пучками. Методики управления охватывают решение широкого круга вопросов, связанных с управлением крупной ускорительной установкой:

- межпроцессорное взаимодействия в системах с различными операционными системами,
- взаимодействие приложений с аппаратурой,
- синхронизации приложений, работающих в различных компьютерах,
- синхронизация измерений сигналов и обработки данных,
- мониторинг отклонений параметров установок и устройств,
- графическая визуализация состояния устройств и систем,
- управление сложными разнородными магнитными системами циклических ускорителей для обеспечения накопления и ускорения пучков заряженных частиц¹,

¹ В диссертации под словом “пучок” понимается пучок электронов или позитронов.

- автоматизация сложных многопараметрических процессов, выполняемых с целью достижения максимальных значений параметров пучков, а также с оптимизацией работы систем.

На основе опыта разработки и эксплуатации системы управления ВЭПП-4 создана система управления бустером NSLS-II на энергию ускоренных частиц 3 ГэВ, обладающим рекордной производительностью среди установок такого класса. Для системы управления бустера были впервые использованы:

- контроллер источника питания, обеспечивающий непрерывное управление и измерение всех параметров в течение всего цикла работы установки,
- программно-аппаратный комплекс диагностики и коррекции положения пучка, позволяющий контролировать положение орбиты пучка в течение всего процесса ускорения,
- система измерений бетатронных частот, обеспечивающая измерения с шагом 1 мс, что позволило точно скорректировать бетатронные частоты при настройке процесса ускорения.

Впервые создана система полного непрерывного мониторинга в течение цикла работы бустера, автоматически выявляющая отклонения любых параметров и обеспечивающая визуализацию отклонений с возможностью детализации значений параметров.

Для сохранения, восстановления и сравнения значений параметров бустера впервые разработана гибкая универсальная система, позволяющая запоминать, а затем использовать для загрузки в аппаратуру или для взаимного сравнения значения любых управляющих и измеренных сигналов по заданным правилам в заранее описанной конфигурации. Система оперирует как со скалярными значениями, так и массивами значений сигналов, соответствующих выполнению всего цикла работы установки.

Научная и практическая ценность

Система управления ВЭПП-4 обеспечивает успешную эксплуатацию ускорительно-накопительного комплекса с целью проведения экспериментов по физике высоких энергий, ядерной и ускорительной физике, а также исследований с использованием СИ. Методики управления, наработанные в процессе создания, модернизации и эксплуатации системы управления ВЭПП-4 применимы для управления любой крупной электрофизической установкой или комплексом установок. При создании системы управления бустера NSLS-II методики были применены и развиты с использованием современной компьютерной базы и электроники. Разработанная система управления обеспечила быстрый ввод в эксплуатацию и продолжает обеспечивать надежную стабильную работу синхротрона, что крайне важно для успешного проведения экспериментов с использованием СИ.

Разработанные схемы управления источниками питания бустера и схема мониторинга содержат алгоритмы, которые могут быть применены для управления системами, требующими в процессе работы непрерывного точного контроля сложных быстро протекающих процессов. Принципы и алгоритмы, разработанные для приложений автоматической настройки параметров бустера, могут быть использованы в системах автоматизации сложных установок, где требуется стабилизация многопараметрических систем.

В свою очередь, новые наработки, полученные в процессе создания системы управления бустера, нашли свое применение в системе управления ВЭПП-4 и заложены в основу дальнейших планов по ее модернизации, а также планов по созданию систем управления для будущих ускорительных комплексов и установок: чарм-гау фабрики и источника СИ в ИЯФ СО РАН, ускорительных комплексов для протонной терапии.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработана и реализована уникальная структура программно-аппаратного комплекса системы управления ВЭПП-4, включая компоновку контрольно-измерительной аппаратуры и создание программного обеспечения (ПО).
2. Впервые предложены и реализованы способы управления ускорительными установками комплекса ВЭПП-4, обеспечивающие эффективное проведение экспериментов по физике высоких энергий и ядерной физике с использованием пучков электронов и позитронов, а также экспериментов с использованием СИ.
3. Исходя из практических результатов работ по созданию и эксплуатации системы управления комплекса ВЭПП-4, сформулированы общие требования и принципы построения системы управления сложным ускорительным комплексом.
4. На основе анализа технических возможностей электроники и вычислительной техники, а также следуя сформулированным принципам построения, предложена и реализована схема распределенной системы управления бустера NSLS-II, включающая в себя как специально разработанные устройства для управления и диагностики, так и средства промышленной автоматизации.
5. В соответствии со сформулированными принципами создано ПО системы управления бустера, включающее необходимые базовые программные средства, а также набор инженерных и операторских приложений.
6. Исходя из анализа возможностей аппаратных и программных ресурсов, а также сформулированных требований на управление бустером, впервые предложены и реализованы алгоритмы для управления источниками питания, для измерения и получения из аппаратуры диагностических данных и их on-line обработки.

7. Впервые создана система полного непрерывного мониторинга в течение цикла работы бустера, автоматически выявляющая отклонения любых параметров и обеспечивающая визуализацию процесса.
8. Впервые создана гибкая универсальная система сохранения, восстановления и сравнения значений параметров бустера. Система оперирует как со скалярными значениями, так и массивами значений сигналов, описывающими поведение параметров в течение выполнения всего цикла работы бустера.

Апробация диссертации и публикации

Материалы, на которых основана диссертация, докладывались на международных ускорительных конференциях и конференциях по системам управления: ICALEPCS'97, EPAC'98, ICALEPCS'99, PAC'2001, APAC'01, ICALEPCS'01, EPAC'02, PCaPAC'02, WAO2003, Hadron2003, IWCPA2005, PCaPAC'05, ICALEPCS'05, NEP2005, EPAC'2006, RuPAC2006, PCaPAC'06, PCaPAC'08, PAC'09, RHIPSI09, ACIT'2010, Charm 2010, ICHEP 2010, TAU2010, PAC'11, IWCPA2011, ICALEPCS'11, MESON2012, RuPAC2012, IPAC2013, IBIC2013, PAC2013, ICALEPCS'13, IPAC2014, IPAC2015, SFR-2016.

По теме диссертации опубликовано более 25 работ в периодических изданиях, входящих в рекомендуемый перечень ВАК.

Результаты диссертационной работы служили основанием получения поддержки на проведение исследований со стороны Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 01-02-17477-а, 02-07-90108-в), работа также входила в программу исследований, поддержанную грантом 00-07-90334-в.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и трех приложений, изложена на 264 страницах, включает 91 иллюстрацию, 10 таблиц и содержит 152 наименования библиографии.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описана важность роли системы управления в работе ускорительного комплекса, проанализированы факторы, влияющие на качество ее разработки и функционирования. Далее в привязке к структуре диссертации по главам кратко изложены основные задачи и результаты проделанной работы. В конце введения приведены положения, вынесенные автором на защиту.

Первая глава содержит обзор задач и анализ требований, предъявляемых к современной системе управления ускорительным комплексом.

В разделе 1.1 перечислены обстоятельства и факторы, с которыми приходится иметь дело при управлении крупным ускорителем:

- работа со многими распределенными точками контроля и процессами;
- работа аппаратуры и ПО в реальном времени: в определенные моменты времени и с привязкой к конкретным событиям;
- синхронизация процессов и данных: обеспечение меток времени, индикация циклов;
- обмен большими объемами данных с периферийными электронными устройствами;
- сетевой трафик: большой объем, множество протоколов, возможность расширения системы,
- необходимость автоматизации взаимодействия многих процессов;
- необходимость использования обратных связей;
- использование централизованных сервисов: для сохранения/восстановления состояния систем, архивирования данных и логов, сигнализации неисправностей, распознавания имен;
- запись текущих данных для восстановления ситуации в случае аварии (post-mortem data), отключения питания;
- использование баз данных для конфигурирования системы управления, для хранения данных о состоянии установки;
- необходимость статистической обработки данных: контрольно-измерительных данных, данных о действиях, совершенных приложениями и оператором;
- организация доступа (кто, что и откуда может делать).

Затем в разделе 1.1 проанализированы основные общие принципы, по которым должна строиться система управления: иерархичность, унификация, интегрируемость и открытость.

Далее в первой главе описаны современные требования к основным подсистемам, которые определяют функциональные возможности системы управления в целом: системе синхронизации, системе управления источниками питания и системе диагностики пучка. В разделе 1.2, описывающем систему синхронизации, проанализированы задачи, которые выполняет эта система. В разделе 1.3 рассмотрены различные аспекты управления источниками питания: связь динамики и точности управления, особенности современного цифрового способа управления. В разделе 1.4 с точки зрения управления рассмотрены основные требования к устройствам и системам диагностики пучка. Согласование работы систем диагностики пучка с управлением элементами ускорителя является важнейшей задачей для обеспечения достижения расчетных параметров пучка. В разделе перечислены основные измеряемые параметры пучка и методы их диагностики для лептонных ускорителей, и сделан анализ их применения для современной системы управления.

По важности и трудозатратам на создание ПО является наиболее объемной частью системы управления. В разделе 1.5 рассмотрены общий подход к разработке и критерии, по которым проектируется и создается ПО для современной системы управления.

При создании комплекса программных приложений необходимо четко определить задачи, которые должно решать то или иное пользовательское приложение. В подразделе 1.5.2 проанализирован спектр задач управления и в соответствии со структуризацией задач введена систематизация переменных, с которыми работают приложения: это физические параметры установки, физические сигналы, характеризующие работу оборудования (напряжения и токи источников питания) и входные/выходные сигналы электроники. Рассмотрены и систематизированы задачи приложений автоматизации, выполняющих действия по заданному сценарию без вмешательства оператора: автоматизация сбора данных, автоматизация настройки работы устройств и отдельных систем, а также автоматизация взаимодействия установок комплекса.

Далее в разделе 1.5 дана характеристика трехуровневой структуры программного обеспечения: нижний уровень, реализующий логику работы электроники; средний уровень (базовое ПО), выполняющий взаимодействие с аппаратурой, предоставляющий доступ к данным для операторских приложений и поддерживающий совместное функционирование всего комплекса ПО; и верхний (операторский) уровень.

Операторские приложения можно разделить на несколько групп:

- инженерные приложения для настройки оборудования и систем;
- приложения для сохранения/восстановления параметров установки, архивирования и задания режимов работы;
- приложения визуализации и мониторинга состояния установки и ее систем;
- приложения управления элементами и параметрами ускорителя, влияющими на пучок ускоряемых частиц (задание функции изменения тока в магнитах, согласованное изменение заданий в группах элементов и т.д.);
- приложения для диагностики пучка;
- приложения для автоматического управления.

В разделе 1.5 также рассмотрен вопрос систематизации работы с множеством приложений, входящих в систему управления: разработка специальных программ-меню, которые предоставляют пользователям возможность простой и наглядной навигации по структуре ПО системы управления.

В заключительном разделе 1.6 в качестве итога сформулированы требования к системе управления, включая все ее аспекты, рассмотренные в первой главе. Основные компоненты системы управления, к которым

относятся система синхронизации, система источников питания и система диагностики пучка, должны обеспечивать следующие функции:

система синхронизации

- задание последовательности событий (старты циклов и сценариев работы, моменты инжекции и выпуска пучков и т.п.), которые должны появляться в системе в виде сигналов и прерываний,
- синхронизацию с заданной точностью обработки всех устройств и систем в процессе перепуска и ускорения пучков, синхронизацию и тактирование контрольно-измерительной электроники и устройств диагностики пучка (генерация стартовых и тактирующих импульсов),
- синхронизацию работы приложений (генерация прерываний),
- синхронизацию данных (метки времени обновления данных и привязка к циклам работы установок);

система управления источниками питания

- задание опорного напряжения для стационарного режима работы основных источников питания дипольных и квадрупольных магнитов, определяющих структуру ускорителя или системы транспортировки пучка, с относительной точностью не хуже 10^{-4} , а для особо критичных устройств - 10^{-5} ,
- задание формы управляющего сигнала для обеспечения ускорения пучка, удовлетворяющей требованиям источника питания (гладкость, согласование на “краях”, точность обработки),
- синхронную согласованную обработку управления источниками питания в течение всего процесса ускорения для основных источников питания с относительной точностью лучше, чем 10^{-3} , а для источников питания корректоров – с точностью 10^{-2} ,
- измерение параметров источников питания при ускорении с частотой не ниже частоты задания управляющего сигнала,
- автоподстройку обработки источника питания по измеренной величине тока или поля в магните,
- оперативное управление: включение/выключение, переключение режимов работы, а также мониторинг и сброс сработавших блокировок;

система диагностики пучка

- обеспечение необходимой чувствительности и временного разрешения аппаратуры для детектирования пучков и оцифровки сигналов,
- синхронизация работы диагностического оборудования и оборудования для управления,
- выполнение обработки сигналов (усиление, оцифровка, анализ) на уровне электроники, подключенной к датчикам пучка; предоставление в систему управления уже обработанных данных.

Вторая глава диссертации содержит изложение и обобщение результатов работы, выполненной автором в процессе разработки, создания, эксплуатации и модернизации системы управления ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-4 ИЯФ СО РАН. Комплекс ВЭПП-4 включает в себя инжектор, поставляющий электронные и позитронные пучки, накопитель-ускоритель ВЭПП-3 и электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М, и предназначен для проведения экспериментов по физике высоких энергий, ядерной физике с использованием электронных и позитронных пучков, а также экспериментов с использованием синхротронного излучения (СИ). В разделе 2.1 приводится описание параметров установок комплекса и кратко перечисляются физические эксперименты, выполненные и выполняемые на нем с использованием пучков электронов и позитронов.

Раздел 2.2 содержит описание структуры системы и реализованных методов управления. В ходе многолетней работы на комплексе было выполнено большое число разнообразных экспериментов, потребовавших использования уникального оборудования и обеспечения сложного взаимодействия ускорительных установок. Для управления установками и процессами проведения экспериментов автором было разработано множество новых и уникальных методик, решающих различные задачи:

- обеспечение межпроцессорного обмена данными,
- взаимодействие программ с аппаратурой, синхронизация запросов на взаимодействие,
- синхронизация обмена данными между компьютерами системы управления,
- синхронизация работы импульсных устройств,
- измерение параметров импульсных источников питания,
- мониторинг отклонений параметров устройств и систем от заданных значений,
- автоматическая настройка импульсных систем,
- подстройка элементов канала транспортировки для перепуска пучка из ВЭПП-3 в ВЭПП-4М,
- перестройка магнитной системы с помощью заранее настроенных режимов с целью ускорения пучка,
- динамическая коррекция магнитной системы при ускорении пучка,
- выполнение циклов перемагничивания для обеспечения стабильного состояния магнитной системы для инжекции пучка.

В разделе 2.3 содержится описание ПО комплекса ВЭПП-4. ПО делится на две группы: серверные программы, реализующие взаимодействие с аппаратурой и синхронизацию работы установок; и пользовательские программы, с помощью которых выполняется управление комплексом.

Методика вынесения взаимодействия с электроникой в отдельную специализированную программу исключает конфликты при работе с

аппаратурой и разгружает пользовательские программы от дублирования функций, обеспечивающих доступ к устройствам. Кроме того, поскольку работать с аппаратурой нужно, как правило, в реальном времени синхронно с функционированием установки, то использование такой методики позволяет реализовать механизмы синхронизации в каждом компьютере только в одной программе. Исторически в системе управления ВЭПП-4 такая специальная программа для работы с аппаратурой называется BANK, т.к. при работе в действительности содержит в своих массивах банк данных о конфигурации и состоянии всех устройств. Все данные (значения параметров, идентификаторы аппаратуры, коэффициенты и т.п.) в программе BANK размещаются в виде соответствующих друг другу массивов. При этом, каждое значение, относящееся к одному параметру, во всех массивах занимает одно и то же положение, которое является одной из характеристик параметра, описанной в его конфигурации. В подразделе 2.3.1 описаны способы, реализованные автором для обеспечения работы с аппаратурой при управлении различными установками комплекса.

Для передачи и обработки запросов на чтение/запись из/в аппаратуру разработано два способа.

Первый способ применяется для управления накопителем ВЭПП-3 и коллайдером ВЭПП-4М. В нем используется единая индикаторная ячейка (“семафор”). Клиентская программа записывает уставки в определенные ячейки специального массива в памяти программы BANK и устанавливает значение семафора, которое соответствует времени, за которое новые уставки должны быть занесены в устройство. BANK, обнаружив установленный семафор, производит сравнение двух массивов: массива, куда записаны новые уставки, и массива, в котором содержатся значения, занесенные в аппаратуру. Если значения соответствующих ячеек отличаются, то новые уставки после проверки на соответствие допустимому диапазону заносятся в аппаратуру.

Во втором способе задействован флаговый механизм, когда для заказа на обновление (запись/чтение) каждого значения используется отдельный флаг. Этот способ применяется в случае управления импульсными устройствами и в случае запросов на чтение интегрирующих АЦП². Программы BANK, работая синхронно с установкой по заданному циклу, в определенные моменты выполняют проверку флагов и в случае установленного флага заносят значение в аппаратуру или выполняют чтение.

Инжектор “Позитрон” работает в циклическом режиме с частотой 1 Гц. За время цикла нужно выполнить два сеанса измерений параметров установки (до и после “выстрела” пучком), а сразу после выстрела задать

² АЦП, выполняющее преобразование входного сигнала сравнительно продолжительное время (несколько мс – десятки мс), для получения результата использует методику интегрирования входного сигнала.

новые значения, поступившие от других программ, в устройства, чтобы устройства успели отработать новые задания до начала следующего цикла. Привязка работы программ к внешним событиям осуществляется при помощи специального механизма прерываний, реализованного в операционной системе. Механизм запускается от внешних импульсов, поступающих от системы синхронизации на вход специального блока, обслуживаемого операционной системой. По приходу импульса в течение нескольких десятков микросекунд в операционной системе генерируется прерывание, по которому управление может быть передано какой-либо программе.

Пользовательские программы системы управления делятся на три группы: программы для оперативного управления, сервисные программы для работы с данными и для конфигурирования системы, а также программы автоматизации.

Программы для оперативного управления, описанные в подразделе 2.3.2, предоставляют пользователю интерфейс для управления параметрами установки. Кроме того, операторские программы в наглядном виде обеспечивают отображение текущих значений и статус параметров элементов установок и пучка, а также предоставляют возможность сохранять и восстанавливать состояние устройств. Было разработано две группы программ: для управления системами, работающими в циклическом режиме (инжектор и канал ВЭПП-3 – ВЭПП-4М), и для управления “статическими” системами - кольцами ВЭПП-3 и ВЭПП-4М. При управлении системами, работающими в циклическом режиме, для удобства и наглядности используется группировка параметров в элементы, т.е. в конфигурации системы определяется элемент управления (например, импульсный магнит), и к нему относятся все контрольно-измерительные параметры, характеризующие его состояние: уставки напряжения и задержки запуска, измерения напряжения и тока, состояния реле включения и блокировок. При работе с программой управления на дисплей в соответствии с режимом работы циклически выводятся значения всех измерений для управляемого элемента.

Все подсистемы комплекса ВЭПП-4 состоят из множества элементов, за состоянием которых осуществляется непрерывное наблюдение. Состояние определяется путем сравнения измеренных отработанных значений с опорными значениями, т.е. осуществляется мониторинг значений параметров. В качестве опорных значений используются либо соответствующие уставки, либо измерения, запомненные для правильного настраивания состояния устройства. Первый способ используется для мониторинга состояния колец ВЭПП-3 и ВЭПП-4М. Второй способ применяется для мониторинга импульсных систем, у которых значение параметра, влияющего на движение частиц пучка, определяется двумя или большим числом задаваемых параметров, а также существенно зависит еще

от других факторов, например, температуры различных элементов системы. В этом случае эффективным оказывается сравнение измеряемого и запомненного значений поля в импульсном магните. Был реализован графический способ отображения состояния параметров при помощи закраски прямоугольников, обозначающих элементы, цветом, соответствующим величине отклонения. Этот способ позволяет в компактном виде в одном окне программы наглядно идентифицировать отклонения сотен параметров элементов ускорителей.

Сервисные программы сохранения/восстановления состояния и конфигурирования системы, описанные в подразделе 2.3.3, не используются непосредственно в управлении установками, но играют важную роль в формировании процессов управления, обеспечивают работу с данными. Для комплекса ВЭПП-4 были разработаны программы, обеспечивающие сохранение текущего состояния установки (режима работы) с возможностью его последующего восстановления, а также программы для конфигурирования аппаратуры и элементов управления. Эти программы формируют массивы данных, которые используются для инициализации программ управления и для установления режимов работы установок.

В подразделе 2.3.4 описано развитие системы управления ВЭПП-4 на базе операционной системы Linux. Были разработаны и внедрены следующие компоненты системы, функционирующие в РС:

- файловый сервер, обеспечивающий загрузку одрят³, предоставляющий им доступ к жесткому диску, а также поддерживающий систему межпроцессорного обмена *stap*;
- *kadrserver*, обеспечивающий прием данных из одрят и их запись в специальные текстовые файлы для последующего использования приложениями, работающими в РС;
- база данных PostgreSQL параметров установок и систем комплекса ВЭПП-4, сохраняющая все значения контрольно-измерительных каналов, статусы установок по мере обновления данных.

В разделе 2.4 второй главы описана реализация алгоритмов автоматизации управления для обеспечения проведения экспериментов с электронными и позитронными пучками. Автором данной диссертации лично или при его непосредственном участии была обеспечена автоматизация работы ускорителей комплекса ВЭПП-4 для всех экспериментов, проводившихся на комплексе, начиная с запуска ВЭПП-3, восстановленного в 1986 году после аварии. В подразделе 2.4.1 описаны процедуры, автоматизированные на инжекторе “Позитрон”, обеспечивающем установки комплекса пучками: отключение/включение мощных устройств и их

³ Одренок - интеллектуальный КАМАК-контроллер, реализующий систему команд машин Одра-1300; в системе управления ВЭПП-4 используется в качестве управляющей ЭВМ.

подстройка после включения, а также настройка линейного ускорителя после смены полярности частиц.

Далее в подразделах 2.4.2 – 2.4.6 описана автоматизация экспериментов на ВЭПП-4М. Для проведения экспериментов с электрон-позитронными пучками в кольце коллайдера ВЭПП-4М необходимо обеспечить согласованное взаимодействие всех установок комплекса: инжектора, накопителя ВЭПП-3, канала транспортировки частиц и собственно коллайдера. Процессы накопления, ускорения, перепуска частиц состоят из множества операций, которые выполняются в заданной последовательности в зависимости от результата выполнения предыдущих действий. В разделе 2.4 описана автоматизация следующих процессов: перепуска пучков из ВЭПП-3 в ВЭПП-4М (подраздел 2.4.2), экспериментов с выведенными пучками (подраздел 2.4.3), экспериментов со сканированием по энергии при наборе статистики на детекторе “КЕДР” (подраздел 2.4.4), стабилизации энергии коллайдера (подраздел 2.4.5), а также подстройки параметров коллайдера при наборе светимости (подраздел 2.4.6).

Третья глава диссертации содержит описание структуры системы управления бустера NSLS-II и изложение основных принципов и методик, использованных для ее построения.

В разделе 3.1 приведены краткая характеристика параметров бустера и детализация требований на управление. Главными особенностями работы бустера являются:

- длительность цикла работы, равная 0.5 или 1 секунде,
- в режиме работы с циклом в 1 секунду – возможность двойного впуска частиц через 100 мс на энергии инжекции 200 МэВ,
- время ускорения до 3 ГэВ: 300 мс в режиме с циклом длительностью 0.5 с и 370 мс в режиме с циклом длительностью 1 с.

В разделе описана структура синхротрона и сформулированы конкретные требования на точность управления элементами магнитной системы, системой ВЧ, элементами системы впуска/выпуска пучка.

На начальном этапе работы над системой управления бустера был проделан анализ систем управления аналогичными синхротронами, работающими на других современных источниках СИ: PSI (Швейцария), Soleil (Франция), Diamond (Англия) и ALBA (Испания). В результате анализа опыта запуска и эксплуатации этих установок, приведенного в разделе 3.2, сформирован список задач к управлению бустером NSLS-II, не имеющих решения в существующих системах:

- обеспечение оперативной записи вэйвформы⁴ обрабатываемого сигнала в управляющие контроллеры без остановки обработки и со

⁴ Waveform: в тексте диссертации – численный массив уставок (заданий) или измерений, записанный в или прочитанный из электронного устройства.

сглаживанием перехода от обрабатываемой вэйвформы к вновь загружаемой;

- непрерывное измерение значений всех параметров источников питания в процессе выполнения цикла и on-line предоставление данных для операторских программ;
- on-line мониторинг правильности работы источников питания, в том числе, импульсных источников системы впуска/выпуска; возможность автоподстройки к заданным значениям;
- обеспечение многократного измерения замкнутой орбиты пучка и бетатронных частот в процессе ускорения.

Успешное решение этих задач в процессе создания системы управления впоследствии обеспечило быстрый запуск, а затем надежный и стабильный управляемый режим работы синхротрона.

В разделе 3.3 приведено обоснование выбора и описана компоновка оборудования для системы управления. Система управления бустером является составной частью системы управления комплекса NSLS-II, поэтому на выбор оборудования для управления бустером накладывались условия, определяемые общим подходом, выработанным для всего NSLS-II:

- компьютеры должны работать под управлением операционных систем Linux или RTEMS и должны быть тех типов, которые используются на других установках комплекса NSLS-II;
- все оборудование должно быть подключено к компьютеру через Ethernet или через последовательную связь с использованием преобразователя последовательного интерфейса в Ethernet;
- контрольно-измерительная электроника должна быть в формате VME или cPCI;
- вся используемая электроника должна иметь поддержку в EPICS;
- для управления источниками питания должны использоваться двухуровневые контроллеры, специально разработанные в BNL для проекта NSLS-II;
- промышленные контроллеры и электроника должны быть производства фирмы Allen Bradley;
- в системе диагностики пучка для обработки сигналов с пикап-электродов должны использоваться контроллеры, специально разработанные в BNL для проекта NSLS-II.

С функциональной точки зрения и по методике управления были выделены следующие подсистемы:

- система управления магнитными элементами и ВЧ бустера, обеспечивающая синхронное изменение заданий в элементах с целью ускорения пучка;
- система управления впуском/выпуском (импульсные элементы), обеспечивающая впуск пучка в бустер и выпуск ускоренного пучка в канал транспортировки в основное кольцо;

- система управления вакуумным оборудованием, обеспечивающая мониторинг вакуума в камере бустера;
- система блокировок, обеспечивающая безопасную работу всех элементов и систем бустера;
- система диагностики пучка, обеспечивающая наблюдение и измерение параметров пучка в бустере в процессе инжекции, ускорения и выпуска.

Далее в разделе 3.3 приведено описание схемы компьютеров и электроники, включающее детализацию распределения компьютеров по функциональному назначению.

Раздел 3.4 содержит описание системы синхронизации, построенной на принципе технологии синхронных событий с использованием аппаратуры фирмы Micro-Research Finland Oy. Главные особенности разработки системы для бустера следующие:

- использование для синхронизации кратных частот, получаемых делением частоты ускоряющего ВЧ 500 МГц: 1.89 МГц – частота обращения в бустере, 379 кГц – частота обращения в основном кольце, 10 кГц – частота клоков, тактирующих работу электроники, 1 Гц – частота циклов бустера;
- использование при управлении задержками срабатывания устройств шкал времени с разным масштабом: 1 секунда – шкала цикла бустера, 2 миллисекунды – шкала регулировки задержки срабатывания впускного и выпускного магитов-септумов, 2 микросекунды – шкалы регулировки задержки срабатывания впускного и выпускного магнитов-кикеров.

Шкалы задержки септумов и кикеров запускаются от событий старта впуска и старта выпуска в шкале цикла бустера.

В подразделе 3.4.3 описано формирование цикла бустера с помощью событий, генерируемых в специальном модуле генератора событий – секвенсере. В подразделе 3.4.4 приведено описание синхронизации данных. Впервые в практике сбора данных реализован механизм привязки измерений параметров бустера к событиям цикла его работы и взаимной привязки данных, полученных в ходе выполнения цикла бустера, к соответствующему циклу (текущему или предыдущему) в зависимости от времени получения данных их аппаратуры.

Раздел 3.5 включает краткую характеристику источников питания бустера, описание методов и электроники управления. Основной задачей управления элементами магнитной системы, влияющими на процесс ускорения пучка, является формирование управляющих функций (вэйвформ), которые затем заносятся в управляющие контроллеры и задают поведение источников питания в течение цикла работы бустера.

Для определения функции управления предусмотрено два способа:

- задание узловых точек с линейной интерполяцией между ними;

- задание коэффициентов для построения кусочно-полиномиальной кривой 4-го порядка, описывающей весь цикл работы бустера.

Способ задания узловых точек, например, применяется при формировании управляющих вейвформ для магнитов-корректоров, когда не требуется обеспечивать плавные переходы между линиями соседних участков изменения тока в управляющем сигнале, и число узловых точек сравнительно невелико (порядка десяти). Второй способ, использующий кусочно-полиномиальную аппроксимацию, применяется для управления мощными источниками питания магнитной системы, когда важно обеспечивать плавное изменение управляющего сигнала с целью избежать недопустимых перенапряжений в силовых питающих цепях с большими индуктивностями, вызываемых резкими изменениями управляющего сигнала ЦАП. В предложенном для бустера методе аппроксимации управляющая функция разбивается на 9 участков, часть из которых представляет собой прямые линии, а часть – полиномы 4-го порядка с нулевым квадратичным членом.

Несмотря на существенно отличающиеся функции и параметры, все типы источников питания управляются одинаково: при помощи системы контроллеров, специально разработанной в BNL для проекта NSLS-II. Система состоит из двух взаимодействующих друг с другом контроллеров: контроллера цифровых интерфейсов PSC (Power Supply Controller), который подключается к компьютеру по Ethernet; и контроллера аналоговых интерфейсов PSI (Power Supply Interface), располагающегося рядом с источником питания и соединенного с PSC через оптический линк с пропускной способностью 50 Мб/с. Такая компоновка контрольно-измерительной электроники имеет следующие преимущества:

- близкое расположение аналоговой части с потребителем и источником аналоговых сигналов сокращает длину аналоговых трасс и, тем самым, уменьшает наводки на сигналы;
- выделение цифровой части в виде отдельного модуля позволяет, во-первых, разместить модули в месте, удаленном от силовых цепей и связанных с ними наводок, во-вторых, организовать размещение контроллеров в едином каркасе, что упрощает синхронизацию, подачу питания и подключение к сети.

Чтобы обеспечить управление источниками питания в циклическом режиме для PSC была разработана специальная микропрограмма, учитывающая особенности работы бустера:

- необходимость использовать массивы значений (уставок), задающих форму сигнала ЦАП;
- возможность циклического получения массивов измеренных сигналов, отражающих поведение системы;
- возможность взаимной синхронизации отработки всех контроллеров.

Микропрограмма в PSC, разработанная для бустера, выполняет следующие функции:

- принимает от компьютера команды управления, массивы уставок для отработки и бинарные значения, записываемые в выходной регистр;
- по приходу стартового импульса начинает отработку цикла: с тактовой частотой 10 кГц высылает в PSI для занесения в ЦАП значения из вэйвформы, выбранной для отработки;
- заносит измененные значения в регистр цифрового вывода PSI;
- принимает от PSI данные измерений АЦП, поступающие с тактовой частотой, и записывает их в память PSC;
- принимает от PSI изменившиеся значения входного цифрового регистра;
- по приходу стартового импульса очередного цикла, высылает в компьютер данные измерений АЦП и значения входного цифрового регистра, полученные в процессе выполнения предыдущего цикла.

С помощью вэйвформы, синхронно обрабатываемой во всех PSC, решены как задачи согласованной отработки источниками питания магнитной системы правильных зависимостей в процессе цикла, так и обеспечение управления импульсными источниками системы впуска/выпуска пучка, в том числе и в режиме двойного впуска, когда требуется за 100 мс изменить и стабилизировать напряжения на накопителях энергии источников питания впускных магнитов: септума и кикеров.

В разделе 3.6 приведено описание управления вакуумной системой и системой защитных блокировок. Для управления насосами и вакуумными лампами применяются промышленные контроллеры, а для управления вакуумными шиберами и для организации системы защитных блокировок используются PLC. На базе PLC разработана автономная система выполняющая следующие функции:

- управление вакуумными шиберами;
- защиту вакуума в кольце и каналах транспортировки;
- измерение температуры критичных мест (участки вакуумной камеры, импульсные магниты);
- термозащиту магнитов (диполей и квадруполей);
- защиту оборудования от нежелательных сбросов пучка;
- защиту керамической камеры в магнитах-кикерах от возможных пробоев.

Раздел 3.7 содержит описание оборудования и электроники для диагностики пучка. Измерение параметров пучка в ускорителе является важнейшей функцией системы управления. Поскольку ускоритель предназначен для получения пучка с заданными параметрами, то только измерение этих параметров полноценно характеризует качество работы установки. Для диагностики пучка на бустере используется несколько способов:

- 6 люминофорных флагов для измерения положения и размеров пучка на первом обороте в бустере;
- токовый датчик DCCT для измерения суммарного тока циркулирующего пучка;
- токовый датчик FCT для измерения распределения частиц пучка по отдельным сгусткам;
- 36 пикап-электродов для определения пооборотной и усредненной координаты положения пучка;
- 2 системы наблюдения синхротронного излучения, позволяющие в течение всего ускорения следить за координатой и определять поперечные размеры пучка;
- система измерения бетатронных частот, позволяющая измерять частоты с интервалом 1 мс в течение всего ускорения.

В процессе работы постоянно измеряются и анализируются следующие параметры пучка:

- ток пучка в течение всего цикла ускорения;
- распределение частиц по отдельным сгусткам в многосгустковом режиме работы; этот параметр определяет возможность равномерного заполнения электронными сгустками основного кольца;
- энергия частиц пучка (вычисляется по значениям токов в диполях);
- орбита пучка в процессе инжекции, ускорения и выпуска; особенно важно измерять орбиту перед выпуском электронов, т.к. этот параметр является одним из существенных факторов, определяющих стабильность инжекции в основное кольцо;
- поперечные размеры пучка.

Четвёртая глава включает описание методов управления, реализованных на уровне базового⁵ ПО: сбор и синхронизация измеренных данных, подготовка и загрузка в аппаратуру управляющих массивов, обеспечение непрерывного мониторинга параметров и др.

В разделе 4.1 описаны особенности реализации ПО. Главная особенность заключается в том, что ПО разработано на базе программной платформы EPICS и, соответственно, следует архитектуре EPICS и использует его основные базовые компоненты: IOC⁶ и Channel Access⁷. Основным объектом для операций в системе управления является

⁵ средний уровень ПО, выполняющий взаимодействие с аппаратурой, предоставляющий доступ к данным для операторских приложений и поддерживающий совместное функционирование всего комплекса ПО.

⁶ Input/Output Controller - программный контроллер (сервер) ввода/вывода; обеспечивает ввод/вывод данных в/из устройств, обработку данных и предоставляет сетевой доступ к значениям параметров системы (PV) через протокол Channel Access (CA).

⁷ Протокол сетевого взаимодействия для обмена и синхронизации данных в EPICS между клиентскими программами и серверами на базе IOC.

переменная PV (Process Variable), которая содержит в себе текущее значение, а также различные характеризующие ее признаки (поля).

В разделе 4.2 приведено подробное описание схемы распределения ИОС для управления бустером.

Далее в разделах 4.3 - 4.9 описаны функции управления, реализованные на базовом уровне (в ИОС).

В разделе 4.3 приводится описание функций, выполняемых в ИОС при взаимодействии с PSC. Прежде всего – это контроль формы и амплитуды функции управления:

- проверка правильности амплитуды и формы задаваемого физического сигнала;
- вычисление актуального значения управляющего сигнала напряжения ЦАП с учетом пересчетного коэффициента и смещения, измеренных для данного источника питания;
- пересчет в значение для загрузки в ЦАП с учетом калибровочного коэффициента и смещения, измеренных для данного ЦАП;
- проверка амплитуды и формы управляющего сигнала напряжения, предназначенного для загрузки в ЦАП.

Кроме того, ИОС обеспечивает формирование переходной функции, которая обрабатывается один раз при замене одной вэйвформы на другую, обеспечивая гладкий переход от определенного по времени значения обрабатываемой зависимости к первому значению новой вэйвформы. В ИОС также реализован механизм автоматического размагничивания корректоров, использующий колебательную функцию с затуханием, которая замещает вторую половину управляющей вэйвформы.

В разделе 4.4 описан механизм, обеспечивающий подготовку для мониторинга параметров источников питания. Механизм выполняет сравнение текущего значения каждого параметра с опорным. В зависимости от режима работы установки (штатная работа или настройка) предусмотрено два режима сравнения и два способа определения опорного значения. В первом случае подразумевается, что установка работает в штатном настроенном состоянии, не требующем какого-либо вмешательства со стороны оператора. Опорные значения как для параметров управления, так и для измерений, записываются в соответствующие опорные PV приложением восстановления режима работы бустера в процессе выполнения процедуры загрузки в устройства управления значений, запомненных в виде набора уставок и соответствующих им измерений, отвечающих определенному состоянию установки. Во втором случае, когда выполняется настройка работы бустера, изменяемые при этом уставки уже нет смысла сравнивать с какими-то определенными значениями, т.е. опорные значения для них отсутствуют, и сами уставки становятся опорными значениями для соответствующих измерений. По результатам сравнения в ИОС для каждого

параметра вычисляется его индикатор состояния, который используется в системе мониторинга.

В разделе 4.5 содержится описание способа, обеспечивающего сокращение объема архивируемых данных. Архивирование текущих значений в системах управления необходимо для последующего анализа состояния установки, восстановления истории и режимов ее работы. В идеальном случае для сложных систем с множеством зависимых параметров нужно сохранять все имеющиеся измерения и уставки по мере их обновления. Но такой подход приводит к огромному объему сохраняемых данных: для бустера оценка дает примерно 100 ГБ за сутки. В реализованном способе ИОС в каждом цикле вычисляет разность обновленного текущего значения (измерения или уставки) и последнего значения, сохраненного системой архивирования, находящегося в специальном PV (archived PV). В случае превышения разностью допустимого значения в archived PV заносится текущее значение, и изменившееся значение archived PV автоматически сохраняется в архиве. Способ позволяет сохранять только существенные изменения параметра. Величина допустимого отклонения для каждого параметра определяется значением, содержащемся в специальном PV.

Для наблюдения значений параметров, представленных в системе управления в виде вэйвформ, разработан механизм выборки сигналов, описанный в разделе 4.6. Механизм позволяет выбирать из вэйвформы значения, относящиеся к определенным моментам цикла и представлять их в виде отдельных скалярных величин. Это дает возможность организовать долговременные наблюдения за выбранными значениями параметров.

Раздел 4.7 содержит описание способа, который обеспечивает измерение значений импульсных параметров устройств впуска/выпуска: импульсных полей в магнитах-септумах и токов в магнитах-кикерах. Рабочий цикл ИОС позволяет выполнять измерения в двух режимах работы бустера: с одинарным и двойным впуском пучка. Во втором случае данные, прочитанные из аппаратуры, распределяются по двум комплектам PV, соответствующим первому и второму впуску. Для случая измерения сигналов токов в магнитах-кикерах значение имеют не только амплитуда и форма сигнала, но и его положение относительно движения пучка в кольце бустера. Чтобы обеспечить привязку момента измерения сигнала к пролету пучка для тактирования АЦП используется тактовая частота системы синхронизации 125 МГц.

В разделе 4.8 описана система обработки измерений пикап-станций. Для взаимодействия с каждой из 36-ти пикап-станций бустера используются индивидуальные ИОС, распределенные по двум серверным компьютерам. Кроме этих ИОС для обработки данных используются еще три SoftIOС⁸, в

⁸ ИОС, не связанный с контрольно-измерительным оборудованием, а выполняющий только обработку данных.

которых выполняется on-line вычисления орбиты пучка и бетатронных частот. Данная система в течение 200 мс после окончания ускорения пучка формирует массивы для сорока орбит, измеренных в определенные моменты ускорения.

В разделе 4.9 описаны подробности работы с промышленными контроллерами, использующимися для управления бустером: PLC и контроллерами для работы с вакуумным оборудованием.

Пятая глава содержит описание комплекса инженерных и операторских приложений системы управления бустером. Для разработки ПО прикладного уровня были использованы инструменты, интегрированные с EPICS: пакет CSS⁹ - как основа для создания операторских приложений, требующих преимущественно простого ввода/вывода данных, и язык программирования Python - для создания приложений, использующих математическую обработку, и графическая библиотека PyQT.

Число приложений, с которыми нужно работать операторам и инженерно-техническому персоналу, в крупных системах управления составляет многие десятки. В разделе 5.1 рассмотрен подход, систематизирующий приложения и предоставляющий персоналу возможность простой и наглядной навигации по большому числу приложений с помощью кнопок, выпадающих списков и подгружаемых меню.

В разделе 5.2 описан набор приложений, разработанный для диагностики электронных устройств, применяющихся для управления бустером. С помощью этих приложений обеспечивается возможность оперативного доступа (чтения/записи) до всех регистров и адресов электронных устройств, а также возможность задания и отображения значений всех параметров контролируемого оборудования. Тестовые приложения разрабатываются даже в том случае, если поставщик электроники или оборудования предоставляет свои аналогичные приложения. Таким способом электроника и оборудование полностью интегрируются в инфраструктуру системы управления.

В случае, когда управляемое оборудование и модули контрольно-измерительной электроники составляют единую систему и работают во взаимосвязи друг с другом для целей проверки и настройки необходимы приложения, работающие со всей системой в целом, которые позволяют не только контролировать настройки отдельных устройств, но предоставляют возможность управлять физическими параметрами системы. Эти приложения позволяют настраивать системы в рабочий режим, который затем может быть сохранен и использован для работы с пучком. Подобная система может

⁹ Control System Studio – программный графический пакет для разработки и запуска пользовательских приложений для систем управления, базирующихся на EPICS, TANGO, TINE. Пакет разработан на базе Eclipse.

представлять собой комплекс оборудования, способный выполнять свою функцию вне связи с другими системами установки (например, ВЧ система бустера, система блокировок), либо состоять из набора однотипных элементов, выполняющих одинаковые функции (например, набор VME-крейтов, у которых нужно контролировать питание, или набор однотипных ИОС, у которых контролируется их работоспособность). Приложения для тестирования систем разрабатываются таким образом, чтобы структура окна приложения по возможности отражала структуру тестируемой системы.

В разделе 5.3 описан комплекс приложений для работы с источниками питания. В процессе создания ПО инженерным приложениям для работы с источниками питания было уделено особое внимание, т.к. изначально предполагалось, что они будут востребованы уже на этапе разработки источников, и в дальнейшем будут использоваться как для инженерной поддержки, так и для работы операторов. При разработке этих приложений в полной мере были использованы принципы унификации и модульности. Благодаря одинаковому способу управления всеми типами источников питания удалось создать интерфейсный экран универсального вида, на котором для всех типов источников питания единым образом размещены поля ввода/вывода, индикаторы, окна графиков и кнопки для запуска дочерних приложений, выполняющих определенные функции: настройку параметров управления, долговременное наблюдение за отдельными параметрами и т.д.

Для поддержки эффективной среды разработки и использования приложений, для обработки данных, а также для обеспечения правильного алгоритма работы с источниками питания в приложениях используются следующие модули и механизмы:

- макросы для конфигурирования загружаемых приложений,
- вызываемые Python-модули для выполнения определенных функций (сохранение данных, статистическая обработка, управление выводом графиков),
- встроенный Jython-модуль для управления свойствами виджетов,
- правила (rules) и операции (actions) CSS,
- вспомогательные “внутренние” PV,
- внешнее приложение для загрузки управляющих вэйвформ.

Для запуска приложений, работающих с отдельными источниками, разработан экран-селектор, на котором все источники питания бустера сгруппированы по типам и упорядочены по местоположению на кольце бустера.

Кроме главного приложения разработаны дочерние окна, запускаемые из окна главного приложения: для загрузки управляющей вэйвформы, для долговременного наблюдения за выбранными значениями измеренных вэйвформ, для отображения осциллограммы вэйвформ выбранных сигналов, измеренных с частотой 10 кГц, и окно для изменения настроек измерений

всех сигналов. Предусмотрена функциональность для обработки и сохранения данных: статистическая обработка измеренных сигналов и экспорт графических данных в текстовый файл.

Раздел 5.4 содержит описание приложения для управления элементами бустера. Приложение решает задачу формирования и редактирования управляющих вэйвформ для всех элементов магнитной системы, систем впуска/выпуска и ВЧ, а также выполнение операций по загрузке вэйвформ в PV и отображение текущего состояния управляемых элементов. Для разработки приложения были определены следующие общие требования:

- обеспечение универсального интерфейса для всех типов устройств;
- группировка элементов по функциональному назначению;
- отображение всех управляемых и измеряемых параметров, связанных с выбранным элементом;
- одновременное отображение управляемых параметров группы элементов;
- возможность групповой работы с элементами по формированию функции управления и занесению ее в устройства: копирование, масштабирование;
- учет ограничений на задаваемую функцию: ограничения величины значения параметра, его первой и второй производных;
- возможность журналирования и возврата по цепочке выполненных операций;
- возможность сохранения и восстановления всех конфигурационных параметров и параметров управления.

Кроме требований, перечисленных выше, были реализованы следующие возможности, определяемые спецификой работы бустера:

- задание функции управления как в виде параметризованных гладких функций, так и в виде таблицы узловых значений с линейной интерполяцией;
- добавление специальных программных модулей для управления отдельными элементами бустера без нарушения общности интерфейса.

В разделах 5.5 и 5.6 описаны приложения, разработанные для управления элементами и параметрами бустера в процессе его настройки: приложение для масштабирования управляющих вэйвформ нескольких элементов в заданной конфигурации, а также приложение для настройки энергии бустера на впуске и выпуске пучка. Приложение для масштабирования управляющих вэйвформ позволяет составлять комбинации параметров элементов с целью управления параметрами ускорителя, такими, как бетатронные частоты, хроматизм.

В разделе 5.7 содержится описание приложений автоматизации процессов настройки бустера: приложения для коррекции орбиты пучка в течение ускорения и приложения для стабилизации параметров импульсных элементов к заданным значениям. Для коррекции орбиты в бустере

разработано приложение, которое использует методику итераций для достижения конечного результата, отлаженную и проверенную на комплексе ВЭПП-4. Зная измеренное текущее положение пучка в нескольких моментах ускорения (до сорока моментов) и используя матрицу откликов корректоров, приложение вычисляет добавки для значений токов всех или некоторой выбранной части корректоров в эти моменты и задает в источники питания новые эйвфформы для управления в следующем цикле работы бустера.

Для импульсных элементов выходным управляемым параметром является величина импульсного магнитного поля в нагрузке в заданный момент времени, а источник питания стабилизирует отработку уровня напряжения на накопителе энергии, который связан, но напрямую не обеспечивает заданную величину тока в нагрузке и, тем более, величину магнитного поля. В случае изменения температуры нагрузки или момента запуска ключа, коммутирующего ток в нагрузку, происходит изменение величины поля в нужный момент времени, и это изменение никак не может быть скорректировано системой стабилизации самого источника питания. Приложение стабилизации параметров импульсных элементов решает эту задачу путем занесения поправленной уставки, компенсирующей отклонение значения поля от опорного значения.

Шестая глава описывает сервисные операторские приложения различного назначения для работы с установкой в целом.

В разделе 6.1 описана система приложений для работы с фиксированными состояниями параметров элементов, устройств и систем бустера. Каждое такое состояние определяет режим работы установки. Значения параметров могут быть сохранены, что соответствует сохранению режима работы, и восстановлены в PV (т.е. в устройствах), что соответствует восстановлению сохраненного режима работы. Система обеспечивает удобный просмотр и сравнения как сохраненных значений, так и значений, прочитанных из аппаратуры, что предоставляет гибкие возможности для оперативной диагностики и анализа режимов работы бустера.

Основной принцип системы сохранения/восстановления параметров бустера заключается в том, что она должна обеспечивать сбор и сохранение согласованных данных, т.е. данных, относящихся к одному циклу ускорения пучка в синхротроне. Другим важным свойством, заложенным в систему сохранения/восстановления данных бустера, является возможность восстановления не только значений управляемых, но и измеренных параметров. Кроме восстановления значений параметров управления, управляемые и измеренные значения восстанавливаются еще в так называемые переменные опорных значений, которые используются для работы системы мониторинга. Третий принцип - обеспечение гибкости конфигурации сохраняемых и восстанавливаемых параметров. Выполнение этого свойства реализовано с помощью списков имен PV и правил, по которым выполняется восстановление.

В разделе 6.2 содержится описание операторских экранов, предназначенных для отображения состояния бустера и его систем. В начале раздела изложены принципы разработки экранов для визуализации: сбалансированное численно-графическое представление, схемо-ориентированный подход и иерархическая интеграция отображаемых значений параметров в элементы и системы. Далее в разделе приведены несколько примеров экранов для отображения общего состояния бустера, состояния блокировок, вакуумной системы, разработанных под руководством и при участии автора диссертации.

Раздел 6.3 содержит описание приложения для визуализации и сравнения значений произвольных параметров бустера. Приложение создавалось как инструмент для выполнения работ, связанных с отладкой источников питания, и для проведения наладки режимов работы бустера. Оно также оказалось эффективным и для детальной проверки различных систем электроники. Приложение позволяет по списку выбирать имена параметров и предоставляет графические и численные средства для их сравнения.

В разделе 6.4 описана система мониторинга параметров элементов бустера. Методика измерений параметров источников питания, разработанная для бустера NSLS-II, позволяет получать измерения всех параметров с частотой 1 кГц в ходе выполнения цикла бустера, что дало возможность разработать тотальную систему мониторинга параметров. В данной системе впервые в практике управления подобными ускорительными установками был реализован механизм непрерывного согласованного измерения множества параметров с on-line предоставлением всех данных на уровень, доступный пользовательским приложениям.

Система мониторинга включает несколько механизмов и процессов, работающих как в ИОС (вычисление индикатора состояния параметра), так и в приложениях верхнего уровня. В ней задействовано приложение восстановления режимов работы бустера, которое обеспечивает задание опорных значений для вычисления индикаторов состояния.

В некоторых случаях логика работы системы заставляет изменить алгоритм работы с вычисленным значением индикатора состояния: например, вообще не учитывать его значение. Для правильной обработки таких случаев на уровне ИОС разработан механизм модификации индикаторов состояния и применяются дополнительные модифицированные индикаторы, значения которых в штатной ситуации дублируют значения самих индикаторов состояния, но могут быть изменены в соответствии с текущей ситуацией в системе управления. Значения модифицированных индикаторов состояния используются приложениями верхнего уровня для визуализации состояния параметров установки.

Разработанная система включает три способа модификации индикаторов состояния, учитывающих различные факторы и особенности работы приложений. Первый способ предназначен для учета отклонений

значений параметров, возникающих при работе приложений автоматической настройки. Второй способ используется для принудительной задержки отображения неправильного значения параметра, например, в случае нестабильных или сбойных измерений. Третий способ позволяет отключить мониторинг параметра в случае, когда отслеживать значение этого параметра по какой-то причине не нужно.

Для визуализации состояния бустера разработано приложение, которое в схематической форме с помощью цветовой индикации отображает состояние всех элементов бустера, а также выводит информацию об энергии и токе пучка во время выполнения цикла. Основное окно приложения содержит условную схему размещения элементов магнитной системы и системы впуска/выпуска на кольце бустера, на которой цветом обозначается интегральное соответствие заданному режиму работы для каждого элемента. Интегральное состояние каждого элемента складывается из состояния всех его контролируемых и измеряемых параметров. При нажатии на элемент открывается статусное окно, содержащее списки управляемых, измерительных и бинарных параметров этого элемента, где также цветом обозначено состояние каждого параметра. При нажатии в статусном окне на любой из параметров запускается окно детализации, отображающее графики текущего сигнала в сравнении с опорным значением, а также разности сигнала и опорного значения в сравнении с допустимым отклонением.

В разделе 6.5 описан комплекс приложений для диагностики пучка.

Для измерения тока пучка, циркулирующего в бустере в процессе ускорения, используются два устройства: ДССТ для измерения величины тока и FCT для наблюдения распределения пучка по сепаратрисам. С этими устройствами работает многоуровневое приложение, которое обеспечивает задание всех параметров, необходимых для правильной работы электроники, взаимодействие с АЦП, обработку массивов данных, а также вывод результатов в цифровом и графическом виде.

Для наблюдения положения и профиля пучка в поперечных координатах на бустере применяются две системы: люминофорные флаги и мониторы СИ. Работа с этими системами осуществляется с помощью приложений, обеспечивающих вывод изображения профиля пучка, вычисление его размеров и поперечных координат. Система, регистрирующая изображение пучка по СИ, позволяет делать кадры с интервалом 30 мс и отображать профили пучка в отдельном окне. Приложения также обеспечивают настройку параметров камер для съемки изображения и управление подвижкой механических частей: вводом/выводом флагов, поворотом зеркал, выводящих СИ.

Для отображения орбиты пучка и оперативного переключения режима работы пикап-станций разработано приложение, позволяющее выводить на график орбиты или однооборотные треки пучка для любых моментов ускорения. Для каждого момента времени с помощью флаговых кнопок

можно выбрать текущую или запомненную орбиты, а также предусмотрена возможность вывода разности орбит. Часть экрана отведена для управления приложением коррекции замкнутой орбиты, а также для задания моментов ускорения, для которых на уровне ИОС формируются орбиты, и индексов вэйвформы пооборотных измерений, для которых треки можно вывести на график в окне приложения.

В заключении диссертационной работы перечислены основные результаты:

1. Разработана и реализована система управления ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-4. Разработка включает компоновку контрольно-измерительной аппаратуры и создание ПО, в котором автором написана определяющая часть кода. Созданная система успешно эксплуатируется на протяжении многих лет, обеспечивая эффективную согласованную работу установок комплекса, направленную, прежде всего, на проведение экспериментов.
2. Впервые предложены и реализованы методы управления ускорительными установками комплекса ВЭПП-4. Достигнутый уровень автоматизации управления ускорительным комплексом ВЭПП-4 обеспечил возможность для успешного проведения экспериментов по физике высоких энергий с детектором КЕДР, экспериментов по ядерной физике и исследований с использованием СИ. При создании и продолжительной эксплуатации системы управления ВЭПП-4 автором данной диссертации и при его участии были разработаны методики по организации управления оборудованием, обработке и визуализации данных, применимые и для управления современными ускорительными установками, подтверждением чему является успешное создание системы для управления бустером NSLS-II.
3. Создано программное обеспечение, реализующее выполнение всех функций и операций, связанных с управлением установками комплекса ВЭПП-4.
4. Сформулированы требования к современной системе управления ускорительным комплексом. Сформулированные требования касаются основных компонентов системы управления, определяющих эффективность ее работы: системы синхронизации, системы управления источниками питания и системы диагностики пучка. Рассмотрены принципы построения программного обеспечения современной системы управления.
5. На основе анализа технических возможностей электроники и вычислительной техники предложена и реализована схема распределенной системы управления бустера NSLS-II, включающая в себя как специфические, специально разработанные устройства для управления и диагностики, так и средства промышленной автоматизации. Создана

полнофункциональная, открытая для расширения и модернизации система управления.

6. Создано ПО системы управления бустера, включая необходимые базовые программные средства, а также набор инженерных и операторских приложений. Программные решения по взаимодействию с оборудованием реализованы на основе модульного и функционального подходов построения ПО. Разработанный комплекс приложений не только удовлетворяет всем потребностям управления бустером, но и обеспечивает дальнейшее расширение и развитие инженерного и физического ПО для решения новых задач по эксплуатации установки. Пакет инженерных и операторских приложений, разработанный для бустера, содержит решения по конфигурации и визуализации данных, которые были успешно применены в программном обеспечении для управления другими системами комплекса NSLS-II. Принципы и алгоритмы, разработанные для приложений автоматической настройки параметров бустера, обеспечивших его эффективный запуск и поддерживающие стабильную работу, могут быть использованы в любых системах автоматизации сложных установок.
7. Исходя из анализа возможностей аппаратных и программных ресурсов, а также требований и особенностей управления бустером NSLS-II, предложены и реализованы алгоритмы для работы специализированного оборудования и обработки данных. Схема управления источниками питания синхротрона содержит методы, которые могут быть применены для любых систем, требующих в процессе работы непрерывного точного контроля сложных быстро протекающих процессов.
8. Впервые создана система полного непрерывного мониторинга в течение цикла работы бустера, автоматически выявляющая отклонения любых параметров и обеспечивающая визуализацию процесса. Разработанная схема мониторинга может быть применена для контроля любых сложных многопараметрических систем.
9. Разработана гибкая универсальная система сохранения, восстановления и сравнения состояния параметров бустера, позволяющая запоминать, а затем использовать для загрузки в аппаратуру или для взаимного сравнения значения любых управляющих и измеренных сигналов по заданным правилам в заранее описанной конфигурации. Система оперирует как со скалярными значениями, так и массивами значений сигналов, описывающими поведение параметров в течение выполнения всего цикла работы бустера. Решения и ПО для сохранения/восстановления режимов работы синхротрона и для оптимизации архивирования могут быть использованы как универсальная и гибкая система, обеспечивающая стабильную воспроизводимость работы крупных установок и систем.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Aulchenko, et al., Study of the BELLE CsI calorimeter prototype with the BINP tagged photon beam // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, v. 379 (1996), pp. 491-494.
2. S.Belomesnikh, et al., The VEPP-4 Timing System // ICALEPCS'97, Proceedings, p.234-236.
3. A.Aleshaev, et al., VEPP-4 Control System Upgrade // ICALEPCS'97, Proceedings, p.34-36.
4. H.S.Ahn, et al., Study of characteristics of the BELLE CsI calorimeter prototype with a BINP tagged photon beam // Nucl. Instr. and Meth., 1998, Vol. A 410, p.179-194.
5. V.V.Anashin, et al., VEPP-4M Collider: Status and Plans // Proceedings of EPAC'98, 1998, V.1, p.400-402.
6. Aleshaev A., et al., Data Base and Data Flow on VEPP-4 Control System // Proceedings of ICALEPCS'99, Trieste, Italy.
7. А.Н.Алешаев и др., Сетевое обеспечение системы управления ВЭПП-4 // XVII совещание по ускорителям заряженных частиц, октябрь 2000, Протвино.
8. V.E. Blinov, et al., Development of Resonance Depolarization Method at VEPP-4 for High Precision Measurement of Tau Lepton Mass // Proceedings of PAC'2001, Chicago, IL.
9. M.G.Fedotov, S.E.Karanev, V.A.Kiselev, N.Y.Muchnoi, A.N.Selivanov, E.I.Zinin, Optical Measurements of the Beam Parameters of the VEPP-4M Storage Ring // Proceedings of PAC'2001, Chicago, IL.
10. M. G. Fedotov, et al., Optical measurements of beam parameters at VEPP-4 collider // Proceedings of APAC'01, 17-21 September 2001, Beijing, China
11. Vladimir Blinov, et al., Polarization measurement system on the VEPP-4 collider at low energy range // Proceedings of APAC'01, 17-21 September 2001, Beijing, China.
12. S. Karneev, et al., Low energy luminosity at VEPP-4M collider//Proceedings of APAC'01, 17-21 September 2001, Beijing, China.
13. V. Blinov, et al., Linux-based Toolkit in the VEPP-4 Control System // Proceedings of ICALEPCS'01, San-Jose, Ca., USA.
14. D. Filimonov, et al., Database and Channel Access on the VEPP-4 Control System // Proceedings of ICALEPCS'01, San-Jose, Ca., USA.
15. M.G. Fedotov, D.S. Filimonov, S.E. Karneev, et al., Transverse Beam Profile Measurement at the VEPP-4M Collider // Proceedings of EPAC'02, Paris, France.
16. V.E. Blinov, et al., High-efficiency polarimeter based on intra-beam scattering // Proceedings of EPAC'02, Paris, France.
17. A.V. Bogomyagkov, S.E. Karneev, et al., Study of the energy stability in the VEPP-4M storage ring // Proceedings of EPAC'02, Paris, France.

18. V.E. Blinov, et al., New experiments with polarized beams at VEPP-4M // Proceedings of EPAC'02, Paris, France.
19. В.Е. Блинов и др., Начало эксперимента по абсолютной калибровке энергии частиц на ВЭПП-4М вблизи порога рождения тау-лептона // XVIII Конференция по Ускорителям Заряженных Частиц, 2002, Обнинск, Россия.
20. А.В.Веклов, и др., База данных для систем управления ускорительно-накопительными комплексами ИЯФ СО РАН // XVIII Конференция по Ускорителям Заряженных Частиц, 2002, Обнинск, Россия.
21. A. Bogomyagkov, et al., Data acquisition and handling in the VEPP-4 Control System // Proceedings of PCaPAC'02, 2002, Frascati, Italy.
22. D. Filimonov, et al., Data base Server on the VEPP-4 Control System // Proceedings of PCaPAC'02, 2002, Frascati, Italy.
23. Blinov, VE; et al., Start of the experiment on the absolute calibration of particle energy in VEPP-4M near the tau-lepton production threshold// RuPAC'02, 2002, Obninsk, Russia // Atomic Energy, V.: 93, Iss.: 6, p.: 945-949.
24. V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, S.E. Karnaev, et al., Absolute calibration of particle energy at VEPP-4M // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002, 494(1-3), pp. 81-85.
25. A. Bogomyagkov, et al., Machine operations and statistics on the VEPP-4 complex // Proceedings of WAO2003, 2003, GUAS (Hayama), KEK (Tsukuba), Japan.
26. V.M.Aulchenko, et al., New precision measurements of the J/Ψ and Ψ' meson masses // Physics Letters B, 2003, v. B573, p.63-79.
27. A. Aleshaev, et al., Integration of PCs into the VEPP-4 Control System // Proceedings of PCaPAC'05, 2005, GUAS (Hayama), Japan.
28. V.Blinov, et al., Status of VEPP-4M collider: current activity and plans // Proceedings of IWCPA2005, 2005, Alushta, Crimea.
29. A. Bogomyagkov, S. Karnaev, S. Mishnev, I. Nikolaev, D. Shatilov, E. Simonov, V. Smaluk, Automation of operations on the VEPP-4 Control System // Proceedings of ICALEPCS'05, 2005, Geneva, Switzerland.
30. V.V. Anashin, et al., Precision measurements of masses of charmonium states // Proc. of HEP2005, 2005, Lisboa, Portugal.
31. A. Bogomyagkov, et al., Beam Energy Calibration in Experiment on Precise Tau Lepton Mass Measurement at VEPP-4M with KEDR Detector // EPAC'2006, Edinburgh, Scotland.
32. V.Kaplin, S.Karnaev, A. Kvashnin, I.Morozov, O.Plotnikova, The precise temperature measuring system of the VEPP-4M electron-positron collider // Proc. of RuPAC 2006, Novosibirsk, Russia.
33. V. Kaplin, S. Karnaev, et al., PC-based innovations in the VEPP-4 obsolete control system // PCaPAC'06, 2006, Newport News, Virginia, USA.
34. Anashin V.V., et al., Measurement of the tau lepton mass at KEDR detector // JETP Letters, Vol. 85, No. 8, 2007, p. 347.

35. V.V. Anashin, et al., New precise determination of the tau lepton mass at KEDR detector // Nucl.Phys. B Proc.Suppl.169, 2007, 125-131.
36. В.В. Анашин и др., Изучение процесса $J/\Psi \rightarrow e^+e^-$ на детекторе КЕДР // ЯФ 71, № 12 (2008).
37. E.Goman, S. Karnaev, O. Plotnikova, E. Simonov, The Database of the VEPP-4 Accelerating Facility Parameters // Proceedings of PCaPAC'08, 2008, Ljubljana, Slovenia.
38. V. Kaplin, S. Karnaev, A. Kvashnin, O. Plotnikova, S. Vasichev, The Total-Temperature Measurements and Interlock System at the VEPP-4M Collider // Proceedings of PCaPAC'08, 2008, Ljubljana, Slovenia.
39. V.V. Anashin, et al., Tau mass measurement at KEDR // Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), V. 181-182 (2008) pp. 311-313.
40. V. Anashin, et al., Results on J/ψ , $\psi(2S)$, $\psi(3770)$ from KEDR // Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), 2008, 353-357.
41. V. Blinov, et al, Accelerator physics activity at the VEPP-4M collider // Proc. of PAC09, Vancouver, Canada.
42. Anchugov O.V., et al, Experiments on the Physics of Charged Particle Beams at the VEPP-4M Electron-Positron Collider // Journal of Experimental and Theoretical Physics, Vol. 109, No. 4, 2009, p. 590-601.
43. Kurkin G.Ya., et al., Commissioning of the VEPP-4M Longitudinal Feedback System // ICFA Beam Dynamics Newsletter, No. 48, 2009, p. 191-195.
44. В.В.Анашин и др., Изучение процесса $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ на детекторе КЕДР// Ядерная физика 72, N 3, p. 531-536 (2009).
45. V.V.Anashin, et al., Tau mass measurement at KEDR // Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), 189 (2009), 21-23.
46. Anchugov, O. V.; et al., Use of the methods of accelerator physics in precision measurements of particle masses at the VEPP-4 complex with the KEDR detector // Instruments and Experimental Techniques (ИТЭ), v. 53, iss.1, 2010, p.15-28.
47. P. Cheblakov, et al., Device server of the distributed control system // Proceedings of ACIT'2010, 2010, Novosibirsk, Russia.
48. D. Bolkhovityanov, et al., Unified configuration system for physical equipment and software // Proceedings of ACIT'2010, 2010, Novosibirsk, Russia.
49. V.V. Anashin, et al., Measurement of D_0 and D^+ meson masses with the KEDR Detector // Physics Letters B, 686 (2010), 84-90.
50. V.V. Anashin, et al., Measurement of $\Gamma(ee)(J/\psi) \cdot \text{Beta}(J/\psi \rightarrow e^+ e^-)$ and $\Gamma(ee)(J/\psi) \cdot \text{Beta}(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ // Phys.Lett. B, 685 (2010), 134-140.
51. V.V. Anashin, et al., Recent Results from the KEDR Detector // China Physics C, 34 (2010), 650-655.
52. V.V. Anashin, ..., S.E. Karnaev, et al., Measurement of $B(J/\psi \rightarrow \eta_c \gamma)$ at KEDR // Proceedings of Charm 2010, Beijing, China // Int.J.Mod.Phys.Conf.Ser. 02 (2011), 188-192.

53. V.V. Anashin, et al., Measurement of J/ψ to $\eta_c \gamma$ at KEDR // Chin.Phys. C34 (2010), 831-835.
54. V.V. Anashin, et al., Measurement of J/ψ leptonic width with the KEDR detector // Chin.Phys. C34 (2010), 836-841.
55. O.V. Anchugov, et al., Measurements of Particle Masses on the VEPP-4 Complex with the KEDR Detector // Nuclear Experimental Technique, v.53, No.1, pp.15-28, 2010.
56. V.V. Anashin, et al., Measurement of $\psi(3770)$ parameters with KEDR detector at VEPP-4M // Proceedings of ICHEP 2010, Paris, France.
57. Dement'ev, E.N., et al., Commissioning feedback systems at VEPP-4M electron-positron collider // Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol. 7, No. 7, 2010, pp. 466–472.
58. S. Gurov, A. Akimov, et al., Status of NSLS-II booster // Proceedings of PAC'2011, New York, NY, USA.
59. V.V. Anashin, et al., Tau lepton mass determination at KEDR // Nuclear Physics B Proceedings Supplements, 2011, 218:155-159.
60. V.V. Anashin, et al., Search for narrow resonances in $e^+ e^-$ annihilation between 1.85 and 3.1 GeV with the KEDR Detector // Physics Letters B, 703 (2011), 543-546.
61. Gurov S.M., et al., Status of NSLS-II Booster // Proceedings of IWCPA2011, 2011, Alushta, Ukraine.
62. P.B. Cheblakov, S.E. Karnaev [BINP SB RAS, Novosibirsk, Russia] J.H. De Long [BNL, Upton, Long Island, New York, USA], NSLS-II booster timing system // Proceedings of ICALEPCS'11, 2011, Grenoble, France.
63. P. Cheblakov, S. Karnaev, S. Serednyakov [BINP SB RAS, Novosibirsk, Russia], W. Louie, Y. Tian, [BNL, USA], NSLS-II booster power supplies control // Proceedings of ICALEPCS'11, 2011, Grenoble, France.
64. А.Н.Алешаев, ..., С.Е.Карнаев и др., Ускорительный комплекс ВЭПП-4 // Препринт ИЯФ 2011-20, Новосибирск, 2011, 136 стр.
65. V.V. Anashin, et al., Recent Results from the KEDR Detector // Proceedings of MESON 2012, Cracow, Poland // EPJ Web of Conferences v. 37, 09014 (2012) .
66. K.R. Yaminov, et al., Correcting magnet power supplies for the NSLS-II booster // Proceedings of RUPAC2012, Saint-Petersburg, Russia.
67. С.М. Гуров и др., Состояние работ по бустеру для NSLS-II Status of NSLS-II booster // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования», № 4, 2012, стр. 3-6.
68. V.V. Anashin, et al., Measurement of main parameters of the $\psi(2S)$ resonance // Physics Letters B, 711 (2012), 280-291.
69. V.V. Anashin, et al., Measurement of $\psi(3770)$ parameters // Physics Letters B, 711 (2012), 292-300.
70. S.M. Gurov, et al., Status of NSLS-II Booster // Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China.

71. P.B. Cheblakov, A.A. Derbenev, S.E. Karnaev, S.S. Serednyakov, Software for Power Supplies Control of the NSLS-II Booster Synchrotron // Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China.
72. T. Shaftan, ..., S. Karnaev, et al., NSLS II Injector Integrated Testing // Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China.
73. V. Smaluk, et al., Status of Beam Diagnostics for NSLS-II Booster // Proceedings of IBIC2013, Oxford, UK.
74. G.M. Wang, et al., NSLS II Commissioning Tools // Proceedings of PAC2013, Pasadena, CA, USA.
75. P. Cheblakov, D. Bolkhovityanov, S. Karnaev, A. Makeev, Configuration System of the NSLS-II Booster Control System Electronics // Proceedings of ICALEPCS'13, San-Francisco, CA, USA.
76. P. Cheblakov, A. Derbenev, R. Kadyrov, S. Karnaev, S. Serednyakov, E. Simonov, NSLS-II Booster Interlock System // Proceedings of ICALEPCS13, San-Francisco, CA, USA.
77. P. Cheblakov, A. Derbenev, R. Kadyrov, S. Karnaev, S. Serednyakov, E. Simonov, Status of the NSLS-II Booster Control System // Proceedings of ICALEPCS13, San-Francisco, CA, USA.
78. P. Cheblakov, A. Derbenev, R. Kadyrov, S. Karnaev, S. Serednyakov, E. Simonov, Monitoring and Archiving of NSLS-II Booster Synchrotron Parameters // Proceedings of ICALEPCS13, San-Francisco, CA, USA.
79. P. Cheblakov, A. Derbenev, R. Kadyrov, S. Karnaev, S. Serednyakov, E. Simonov, NSLS-II Booster Ramp Handling // Proceedings of ICALEPCS13, San-Francisco, CA, USA.
80. Aulchenko, et al., Measurement of the ratio of the lepton widths $\Gamma(ee)/\Gamma(\mu\mu)$ for the J/ψ meson // Physics Letters B, v. 731, 2014, pp. 227-231.
81. S. Gurov, et al., Commissioning of NSLS-II Booster // Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany.
82. Anashin V. V., et al., Measurement of $J/\psi \rightarrow \gamma \eta(c)$ decay rate and $\eta(c)$ parameters at KEDR // Physics Letters B, 2014, v. 738, pp. 391-396.
83. А.А. Дербенев, С.Е. Карнаев, А.В. Макеев, П.Б. Чеблаков, Базовое программное обеспечение для управления магнитной системой бустерного синхротрона NSLS-II // Вестник НГУ, Серия: Физика, 2014, Том 9, выпуск 3, стр. 88-98.
84. G.M. Wang, et al., NSLS II booster extended integration test // Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA.
85. Дербенев А.А., Карнаев С.Е., Симонов Е.А., Чеблаков П.Б., Методика мониторинга параметров бустера для источника синхротронного излучения NSLS-II // Автометрия, Т. 51, №1, 2015, стр. 106-114.
86. Anashin, V. V.; et al., Final analysis of KEDR data on J/ψ and $\psi(2S)$ masses // PHYSICS LETTERS B, 2015, V 749, pp. 50-56.

87. Piminov, P. A.; Baranov, G. N.; Bogomyagkov, A. V.; и др., Synchrotron radiation research and application at VEPP-// Proceedings of SFR-2016, Novosibirsk, Russia // Physics Procedia, Том: 84, Стр.: 19-26, 2016.
88. Gurov, S. M.; et al., NSLS-II Booster // Proceedings of SFR-2016, Novosibirsk, Russia // Physics Procedia, Том: 84, Стр.: 74-81, 2016.
89. Anashin, V. V.; et al., Measurement of R-uds and R between 3.12 and 3.72 GeV at the KEDR detector // PHYSICS LETTERS B, 2016, V 753, pp. 533-541.
90. Anashin, V. V.; et al., Measurement of R between 1.84 and 3.05 GeV at the KEDR detector // PHYSICS LETTERS B, 2017, V 770, pp. 174-181.

КАРНАЕВ Сергей Евгеньевич

**Системы управления
ускорительным комплексом ВЭПП-4
и бустерным синхротроном
источника СИ NSLS-II**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Сдано в набор 6.09.2017 г.

Подписано в печать 7.09.2017 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 2.3 усл. печ.л., 1.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 6

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11