

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук Корчуганова Владимира Николаевича

на диссертацию **Карнаева Сергея Евгеньевича**

«Системы управления ускорительным комплексом ВЭПП-4 и бустерным синхротроном источника СИ NSLS-II», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника в диссертационный совет Д 003.016.01 на базе
ФГБУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

Актуальность темы

Диссертационная работа С.Е. Карнаева *касается* разработки систем управления крупными комплексами ускорителей заряженных частиц. Ускорительный комплекс представляет собой совокупность сложных электрофизических устройств и технических систем, управление которыми осуществляется с помощью высокоточной чувствительной электроники и мощных компьютеров. Задачей системы управления является согласование временной последовательности и обеспечение точной работы систем оборудования и всего комплекса в целом с целью получения требуемых параметров пучков частиц. Новые научные задачи в физике высоких энергий, в областях с применением синхротронного излучения и др. требуют постоянного совершенствования существующих и разработки новых ускорительных комплексов на основе передовых ускорительных технологий. Наиболее актуальным является развитие новейших систем управления, включающие разработку и применение новой электроники, использование новых IT-технологий. Они направлены на увеличение точности управления и измерения критических параметров до величины порядка 10^{-5} , быстрое накопление и обработку больших объемов данных для получения нужного качества контроля многопараметрическими системами, сохранение и возможность точного воспроизведения режимов работы сложного оборудования комплекса. В диссертации, на примерах успешно работающих в настоящее время ускорительных установок (комплексов), изучены и отражены все основные вышеперечисленные проблемы. Несомненно, новые разработки, представленные в диссертации, которые уже применены и будут применяться в будущем для построения систем управления новыми комплексами ускорителей, являются актуальными.

Научная новизна работы

Создан уникальный комплекс электроники и компьютерной техники, включая разработку контрольно-измерительной аппаратуры, обеспечивающий управление крупным электрон-позитронным ускорительным комплексом ВЭПП-4 ИЯФ СО РАН. Предложены и реализованы методы управления оборудованием и установками комплекса ВЭПП-4, обеспечивающие получение пучков частиц с требуемыми параметрами и проведение экспериментов с их использованием.

Результаты и наработки, полученные в ходе работы над системой управления ВЭПП-4, были использованы для создания системы управления бустерным синхротроном источника СИ NSLS-II в Брукхейвенской лаборатории, США. Для бустерного синхротрона были также разработаны новые методы управления, включая гибкое синхронное изменение управляемых параметров в течение всего цикла работы синхротрона и непрерывный мониторинг необходимых параметров и систем. Реализация

разработанных методов позволила в кратчайшие сроки осуществить успешный запуск синхротрона и вывести его на надежный уровень эксплуатации.

Достоверность полученных результатов и правильность сформулированных в диссертации принципов подтверждаются успешным функционированием разработанных систем управления. Пожалуй, в России эта диссертация является первым наиболее полным изложением проблем систем управления современных ускорительных комплексов и их решений.

Практическая значимость и полнота проведенных исследований не вызывает сомнений.

Личный вклад. Необходимо отметить личный вклад С.Е. Карнаева в работу по созданию систем, описанных в диссертации. Им лично были предложены и в значительной степени реализованы многие ключевые решения по управления комплексом ВЭПП-4: архитектура системы, управление импульсными системами комплекса и магнитной системой коллайдера ВЭПП-4М, способы визуализации данных, система архивирования данных. Под его непосредственным руководством была создана система управления бустерным синхротроном, для которой он лично спроектировал все компоненты и принимал участие в их реализации. О точности и достаточности разработки системы управления говорит факт очень быстрого запуска и выведения на проектные параметры Бустера источника СИ NSLS-II.

Диссертация С.Е. Карнаева состоит из введения, шести глав, заключения и трех приложений. Работа изложена на 267 страницах и содержит 152 наименования библиографии.

Общая характеристика и содержание работы. Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертации, определена значимость роли системы управления для успешной работы ускорительного комплекса, сделано краткое изложение содержания работы и сформулированы положения, вынесенные на защиту.

В первой главе содержится обзор задач и сформулированы общие требования к современной системе управления. Сформулированные требования касаются ключевых подсистем, которые определяют возможности и эффективность системы управления в целом: систем синхронизации, управления источниками питания и диагностики пучка. Первая глава также включает систематизацию (или классификацию программного обеспечения) программного обеспечения системы управления по уровням и составу, которая дает возможность четко разделять задачи и структурировать программы при построении систем управления.

Как правило, ПО системы управления разбивается на 3 уровня: нижний исполнительский и регулирующий, работающий с периферийными контроллерами; средний серверный уровень, реализующий логику взаимодействия с периферийной электроникой; верхний уровень приложений, использующий данные серверного уровня (обработка и визуализация данных, взаимодействие с оператором, реализация режимов работы установок и т.д.). Описаны взаимосвязанные и взаимодополняемые т.н. архитектурные и функциональные критерии качества, предъявляемые к Программному Обеспечению системы управления.

Вторая глава диссертации касается развития системы управления комплекса ВЭПП-4. В начале главы кратко описано современное состояние комплекса и перечислены проводимые на нем эксперименты (физика высоких энергий, исследования с использованием СИ, ускорительная физика). Далее приведено краткое описание структуры системы и основных методов, которые используются для управления

установками комплекса ВЭПП-4 и проведения на нем физических экспериментов. Автор описывает различные решения, разработанные им для построения структуры компьютеров и программ, а также подходы, реализованные для обработки, межпроцессорного обмена и визуализации данных. Последняя часть главы касается автоматизации различных процессов управления: от настройки импульсного инжектора «Позитрон», управления накопителем ВЭПП-3 и каналом перепуска ВЭПП-3-ВЭПП-4М, до подстройки (оптимизации) светимости в коллайдере ВЭПП-4 при проведении экспериментов по физике высоких энергий.

В третьей главе диссертации автор приводит описание оборудования и систем, использующихся для управления бустерным синхротроном NSLS-II. В начале главы приводятся параметры бустера и сделан краткий анализ задач управления бустером, рассмотрены методы, использованные для управления другими подобными ускорителями, введенными в строй в мире за последние годы. В результате анализа был сформирован список требований к управлению бустером NSLS-II, не имеющих решения в существующих системах:

- обеспечение оперативной записи формы отрабатываемого тока в управляющие контроллеры без остановки отработки и со сглаживанием перехода от отрабатываемой вэйвформы к вновь загружаемой;

- непрерывное измерение значений всех параметров источников питания в процессе выполнения быстрого 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.

Далее в Главе 3 рассмотрены оригинальные решения, разработанные автором для построения ключевых подсистем: синхронизации, управления источниками питания, контролем состояния вакуумной системы и диагностики пучка. Успешная реализация этих требований в процессе создания системы управления впоследствии обеспечила быстрый запуск, а затем надежный и стабильный управляемый режим работы синхротрона.

Четвертая глава содержит описание программного обеспечения. В ней обоснован подход к разработке структуры программного обеспечения бустерного синхротрона и описаны функции управления, реализованные на уровне базового программного обеспечения платформы EPICS. EPICS предоставляет возможность использовать много готовых программных инструментов операторского уровня, ранее разработанных для управления другими установками. Использование базового уровня программного обеспечения для реализации различных ресурсоемких операций управления, сопровождающихся многочисленными вычислениями и операциями по сохранению данных, позволило создать оперативные инструменты для решения таких задач, как гибкое управление работой элементов синхротрона (обеспечение возможности удобного просмотра и сравнения сохраненных значений и значений, прочитанных из аппаратуры), тотальный (необходимый и достаточный как в стационарных, так и в импульсных режимах) мониторинг параметров, визуализация состояния, архивирование и сохранение режимов работы.

Для внедрения в стандартную базовую инфраструктуру EPICS новых устройств, разработанных специально для проекта NSLS-II, автору потребовалось создание подпрограмм сервиса Device Support (включая драйверы устройств) и наборов рекордов, содержащих все необходимые данные. Была добавлена поддержка для электроники, разработанной в ИЯФ: модулей измерения импульсных параметров устройств впуска/выпуска пучка, выполненных в формате VME, и контроллера системы измерения

бетатронных частот. Для бустера также была модифицирована поддержка для аппаратуры разработки BNL.

Пятая глава описывает инженерные и операторские программы, с помощью которых выполняется управление синхротроном. Автор, в соответствии с классификацией 3-уровневого программного обеспечения, приведенной в **первой Главе**, рассматривает задачи и функции различных групп программ и методы реализации этих функций. Глава разбита на несколько частей, описывающих: программы диагностики состояния оборудования и систем, комплекс программ для работы с источниками питания, программу для управления элементами синхротрона, а также программы для управления физическими параметрами установки, в частности, энергией частиц пучка.

В последней части приводится описание автоматизации различных процедур, выполняемых при настройке режимов впуска, ускорения и выпуска частиц: коррекции орбиты пучка и стабилизации работы импульсных элементов.

Для решения задачи формирования управляющих функций (вэйвформ), которые затем согласованно заносятся в управляющие контроллеры и задают поведение управляемых элементов в течение цикла работы бустера, разработано специальное универсальное приложение *rampmanager*. Приложение обеспечивает формирование и редактирование управляющих функций для всех элементов магнитной системы, систем впуска/выпуска и ВЧ, выполнение операций по загрузке управляющих функций в PV, а также отображение текущего состояния управляемых элементов.

Шестая глава касается рассмотрения широкого спектра сервисных приложений, обеспечивающих управление установкой в целом. В первой части главы рассмотрены функции программы сохранения/восстановления режимов работы ускорителя и описана ее реализация. Эта программа выполняет не только *операции сохранения/восстановления*, но и обеспечивает *конфигурирование системы мониторинга параметров синхротрона*. Система мониторинга выполняет следующие функции: в процессе работы систем автоматической подстройки отслеживает отклонения значений всех параметров синхротрона от заданных, оптимизированных в процессе запуска систем значений, обеспечивает их оперативную диагностику и визуализацию (просмотр и сравнение треков на графиках). В шестой главе также описаны программы для отображения состояния синхротрона и его систем.

В **заключении** автор в общем виде перечисляет основные результаты работы.

Выводы и заключения

Разработка системы управления ускорителем всегда требует подробного знания всех его систем, параметров и режимов работы и с самого первого этапа тесно связана с разработкой самого ускорителя. Поэтому диссертация С.Е. Карнаева, в которой на высоком уровне продемонстрировано знание ускорительной физики и всех определяющих систем ускорительного комплекса, несомненно, относится к специальности 01.04.20 – физика пучков и ускорительная техника.

Автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК, написан четким языком, в достаточной мере отражает структуру диссертации и содержит краткое изложение всех ее ключевых моментов. Он дает ясное представление о сути и значимости проделанной работы, и о роли автора в ее выполнении.

В **качестве замечаний** к диссертационной работе необходимо отметить следующее:

1. На защиту выносятся:

Стр. 10, п. 1. «Разработана и реализована уникальная структура ... ». В тексте диссертации не приведен набор количественных характеристик, сравнивая который с аналогичным набором характеристик систем управления других центров СИ или коллайдеров, можно было бы оценить *уникальность* разработки и реализации обсуждаемых в работе ускорительных центров.

Стр.10, п. 2. «... обеспечивающие *возможность* для *эффективного* проведения экспериментов по физике высоких энергий ...». То же замечание – что конкретное в этом примере имеется в виду под словом «*эффективность*»?

Стр.11, п. 8. «Впервые создана гибкая универсальная система сохранения, восстановления и сравнения значений параметров бустера». Несомненно, что разработчики и авторы диссертаций на подобные темы также создавали «гибкие и универсальные» системы. Желательно было бы специально отразить в тексте данной диссертации именно «гибкость и универсальность».

Общее пожелание. В силу расплывчатости понятий, фразы и слова об уникальности, эффективности и т. п. в технических текстах лучше подтверждать конкретными цифрами, или стараться не употреблять.

2. Глава 1. «Анализ задач и формулировка требований к системе управления ускорительным комплексом» изобилует тонкими подробностями и, поэтому, изложение излишне затянато. На наш взгляд, нарушается последовательность изложения: например, в разделе 1.5 сначала идет описание - «Программное обеспечение (ПО) системы управления», а потом, в разделе 1.6 – «Требования к системе управления».

3. Описательные разделы Главы 5, кроме разделов, относящихся к представлению программы для управления элементами синхротрона и «окон» для оперативного управления, можно было бы оформить в виде Приложения 4.

Сделанные в отзыве замечания не снижают значимости и высокого уровня выполненной автором работы и не умаляют положений и выводов, вынесенных автором на защиту.

Представленная к защите работа прошла серьезную **апробацию**: результаты, полученные в ходе ее выполнения, много раз были опубликованы в статьях в реферируемых научных журналах и многократно докладывались на международных и российских конференциях. По теме диссертации опубликовано более 25 работ в периодических изданиях, входящих в рекомендуемый перечень ВАК.

Все, изложенное выше, позволяет утверждать, что диссертационная работа С.Е. Карнаева является законченным исследованием. Она полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям по техническим наукам по специальности 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника и критериям, установленным в п. 9 и п. 10 «Положения о присуждении учёных степеней». Автор диссертации С.Е. Карнаев заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук.

Официальный оппонент _____

Доктор физ.-мат. наук

Заместитель руководителя Научного комплекса
по перспективным ускорительным технологиям

НИЦ «Курчатовский институт»

Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Телефон: 84951967257

e-mail: vnkorchuganov@mail.ru

Корчуганов Владимир Николаевич

Подпись В.Н. Корчуганова заверяю

Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»

Дата: _____

Стремоухов С.Ю.

2017 г.

