

## ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук Жабицкого Вячеслава Михайловича

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

Ускорители заряженных частиц являются эффективным, надежным и достаточно безопасным прибором для получения новых знаний об окружающем нас мире. Новые научно-технические разработки в области физики и техники ускорителей востребованы научным сообществом, занятым поисками путей решения проблемы об устройстве микромира. В диссертации Карнаева С.Е. на основе результатов проведенных им научных исследований описываются системы управления крупными ускорительными установками, для создания которых были использованы новейшие достижения в области электроники и информатики. Им были разработаны методы управления сложным электрофизическим оборудованием, которые позволили существенно повысить эффективность ускорителей и стали основой для проведения на них высокорейтинговых научных экспериментов. Поэтому **актуальность** темы исследования диссертации не вызывает сомнений.

Системы управления ускорителями имеют уникальную особенность, обусловленную ультрарелятивистскими скоростями частиц. Например, в системах отрицательной обратной связи для демпфирования импульса частицы, когда управляющий сигнал на корректор направляется по хорде вдогонку частицам,двигающимся по круговой орбите в синхротроне, возникает необходимость учёта состояний корректируемой частицы на нескольких предшествующих оборотах. В результате используются алгоритмы управления, основанные на данных о предшествующем состоянии пучка, а предсказания имеют модельный характер. Данная особенность присутствует в алгоритмах, разработанных соискателем. Поэтому результаты эффективного применения цифровых систем управления ускорителями, обладающих новизной технологических решений и расширяющих представления об изучаемом явлении, имеют **теоретическую и практическую значимость**.

**Научная новизна:** предложенные соискателем решения аргументированы и оценены в тексте диссертации в достаточной мере по сравнению с другими известными решениями, оригинальны по использованным подходам и методологии.

**Достоверность** полученных результатов и **правильность** сформулированных в диссертации принципов подтверждаются успешным функционированием созданных систем управления в составе действующих ускорителей, а также данными экспериментальных тестов, верифицирующих корректность примененных алгоритмов.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Использованные соискателем подходы и методы полностью соответствуют заявленной цели и задачам диссертации, их применение обосновано и свидетельствует о достоверности и надежности полученных результатов.

#### **Общая характеристика и содержание работы**

Диссертация С.Е. Карнаева, изложенная на 264 страницах, состоит из введения, шести глав, заключения, списков сокращений и терминов, 152 наименований библиографии, трех приложений.

Во **введении** сформулирована цель работы, обоснованы актуальность и практическая значимость проблемы создания системы управления. Проведено краткое аннотационное изложение содержания всех глав диссертации. Сформулированы положения, выносимые соискателем на защиту. Приведены основные статистические и наукометрические сведения о диссертационной работе.

**Первая глава** содержит анализ и формулировку требований, предъявляемых к системам управления крупной ускорительной установкой, включая требования к программному обеспечению. Сформулированные положения базируются как на личном опыте соискателя (указаны 4 публикации), так и на опыте его коллег, полученном при создании и развитии систем управления ускорительно-накопительным комплексом ВЭПП-4 в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

**Вторая и третья главы** содержат информацию о современном состоянии систем управления синхротронами, ускоряющими электронные или позитронные пучки. Соискатель продемонстрировал хорошее знание многочисленных работ, имеющих отношение к исследуемой проблеме. Приветствуются сделанный акцент на достижениях специалистов ИЯФ, полученных при создании системы управления ускорительным комплексом в Новосибирске, и отмеченный соискателем накопленный опыт создания введённых в строй в последние годы бустерных синхротронов на Европейских источниках синхротронного излучения SLS (PSI, Швейцария), ESRF (Гренобль, Франция), ELETTRA (Италия), CELLS-ALBA (Испания), на синхротроне ASP (Мельбурн, Австралия). Соискателем перечислены задачи, предъявляемые пользователями к системе управления. Сформулированы общие требования к основным подсистемам: синхронизации, управления источниками

питания и диагностики пучка. Описаны методы управления установками крупного ускорительного комплекса с учетом проведения на них физических экспериментов. Достаточно подробно описаны уникальные работы по стабилизации энергии коллайдера ВЭПП-4М, по автоматизации светимости коллайдера в соответствии с изменением ситуации с токами электрон-позитронных сгустков.

Начиная с раздела 2.2.2 рассматриваются решения, реализованные Карнаевым С.Е. в ходе совершенствования системы управления ВЭПП-4 и использованные при проектировании систем управления бустером в составе комплекса NSLS-II (National Synchrotron Light Source, BNL). Соискателем применены и развиты в новом качестве (с использованием современной электроники) методики, наработанные на ускорителях ИЯФ в Новосибирске. Заслуживает высокой оценки методика управления источниками питания, описанная в разделе 3.5.1. Успешность описанной методики с применением кусочно-заданных функций в системах управления была подтверждена и может стать основой для разработки более сложных алгоритмов при создании компьютерной модели ускорителя.

В **четвертой главе** описана структура программного обеспечения бустерного синхротрона. Отмечу широчайший диапазон самых современных подходов к созданию требуемых программных процедур: C++, Python, Jython, PyQt. В тексте главы убедительно продемонстрированы взаимосогласованные решения по сбору и синхронизации необходимых экспериментальных данных, по подготовке и загрузке в аппаратуру управляющих массивов, по обеспечению непрерывного мониторинга многих параметров.

В **пятой и шестой** главах в концентрированном виде приводятся классификация инженерных и операторских программ для управления синхротроном и описание сервисных приложений. Большое внимание уделено методам наглядного отображения в реальном времени состояния параметров с привязкой к конкретным событиям, связанным с особенностями функционирования ускорительного комплекса. Учтена существенная особенность ускорителя как совокупности стандартных и уникальных устройств, обеспечение устойчивого функционирования которых требует создания новых специализированных методов управления и тотального мониторинга параметров ускорительного комплекса. Хотел бы особо отметить успешное внедрение новаторского программного обеспечения для автоматической коррекции орбиты при ускорении. Чрезвычайно полезными и эффективными оказались принятые решения для сохранения, восстановления и конфигурирования режимов работы нескольких ускорителей в составе единого комплекса. Приведенные экспериментальные результаты, подтверждающие успешное функционирование бустера в составе ускорительного комплекса NSLS-II, вышедшего на проектные параметры в очень

короткие сроки, свидетельствуют о практической ценности выработанных подходов к проектированию системы управления.

Текст пятой и шестой глав, я считаю, уже можно считать методическим пособием для разработчиков систем управления ускорителями заряженных частиц.

В **заключении** перечислены основные результаты диссертации, выносимые на защиту. В **списках сокращений** и **терминов**, в трех **приложениях** содержатся сведения, которые способствуют лучшему восприятию и целостности текста, изложенного в предшествующих шести главах диссертации.

### **Личный вклад**

В шести главах диссертации Карнаев С.Е. ссылается на 35 публикаций, в которых он соавтор. Проанализировав основные положения совместных публикаций, соискатель сформулировал новые научно обоснованные технические решения, вошедшие в его диссертацию – законченную научную работу. На стр. 7 автореферата отмечено, что исследования систем управления ускорителями в ИЯФ были поддержаны РФФИ. Руководителем одного из грантов («Разработка базы данных для систем управления ускорительно-накопительными комплексами ИЯФ СО РАН», 2002 г.) был С.Е. Карнаев. Положительная оценка экспертов РФФИ является прямым указанием на личный вклад соискателя как исследователя и руководителя работ. Также отмечу, что среди публикаций соискателя имеются научные работы, имеющие высокий уровень цитирования. Среди них, например, публикация в *Physics Letters B* (v.573, 30 October 2003, pp.63-79) “New precision measurement of the  $J/\Psi$ - and  $\Psi'$ -meson masses”, уже имеющая 55 цитирований (см. “Web of Science” и “Scopus”). Это можно расценивать как факт признания коллегами-экспериментаторами значимости выполненных соискателем работ на ВЭПП-4М.

### **Замечания и недостатки**

1. В текстах диссертации и автореферата встречаются досадные ошибки. Наиболее часто – ошибки пунктуации. Например, в автореферате на стр.19 пропущена запятая перед словом «выполняющая» в абзаце, начинающемся словами «В разделе 3.6». В диссертации в первом абзаце на стр. 92 присутствует лишняя запятая. Встречаются недочеты смыслового характера. Например, на стр. 53 (цитирую): «При каждом перепуске нового пучка в ВЭПП-4М приводит к выбиванию соответствующего циркулирующего пучка». На стр. 97: «управление вакуумом». Есть опечатки: например, пропущен коэффициент  $d_i$  в формуле (3.1) на стр. 110, использовано неправильное сокращение для пикосекунд на стр. 158.

Не привожу других примеров, поскольку процедура правки досадных ошибок в текстах автореферата и диссертации в нормативных документах ВАК не оговорена.

2. В тексте много сокращений, что общепринято в статьях по проблемам физики и техники ускорителей заряженных частиц. Например, ВЭПП. В списке сокращений (стр. 230 – 232 диссертации) эта широко известная аббревиатура отсутствует, что можно было бы считать естественным. Однако на стр. 36 дается расшифровка. Тем самым нарушено правило ГОСТ о необходимости расшифровки при первом упоминании в тексте. Такое же несоответствие можно отметить и для NSLS-II (причем в списке сокращений на стр. 231 дается неэквивалентный русский перевод). Часто используется сокращение ИОС (замечу, что на стр. 140 и 141 для контроллера ИОС приводятся несовпадающие расшифровки). Чрезмерное использование сокращений притупляет бдительность. В результате возникают фразы (стр. 155): «ИОС в каждом цикле вычисляет разность...». К сожалению, используется «калька с английского», что нарушает смысл изложения или приводит к терминам, для которых в русском языке есть общепринятые определения (например, в таблице 3.1 используется термин «число гармоник ВЧ» вместо «кратность ускорения»).

3. Приведенные рисунки облегчают восприятие текста. Однако на рисунках или в тексте перед ними зачастую нет однозначных ссылок на источник цитирования (см., например, рис. 1.2, 2.7, 2.9). На стр. 189 указана ссылка на отсутствующий рисунок 6.17.

4. На стр. 234 начинается список из 152 наименований использованных в диссертации публикаций. Правило цитирования для научных публикаций (инициалы автора следуют после фамилии) соблюдается, например, в [24-26], [28], [29], ...[139], [140], [148]. Однако чаще, например, в [1-23], ...[75-138], ...[150], [152] – в обратном порядке (с отклонением от стандарта). В некоторых ссылках приведены неполные данные, например, отсутствуют URL и (или) номера страниц в трудах конференций в [23, 122, 130, 133]. Можно найти условные указания (например,  $\psi$  в [80]), характерные для LaTeX.

5. Обычно в текстах диссертации и автореферата по каждой главе формулируются краткие выводы соискателя. Целостность и структурированность материала можно было бы улучшить при наличии привязок выводов по каждой главе к публикациям соискателя. Такого подхода нет в представленной диссертации (35 публикаций) и в автореферате (90 публикаций). Отмечая этот факт, можно выразить лишь сожаление, что соискатель не всегда следует сложившимся правилам подготовки научных публикаций.

Полагаю, что Сергей Евгеньевич в своем выступлении при публичной защите приведет короткий список публикаций (примерно 12) в рецензируемых изданиях, в котором «отражаются наиболее существенные научные результаты, полученные лично соискателем ученой степени».

6. Главы 2 и 3 начинаются с разделов, в которых приводится обзор сведений о современном состоянии систем управления ускорителями. Текст этих разделов и приведён-

ные ссылки на опубликованные результаты дают достаточно полное представление об их состоянии на электронных синхротронах. Однако отсутствуют сведения о системах управления на протонных синхротронах, где в настоящее время успешно решаются аналогичные задачи (например, на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН). В автореферате на стр. 4 соискатель ограничивает применимость проведенного им исследования, оговаривая, что (цитирую) «под словом “пучок” понимается пучок электронов или позитронов». Аналогичное самоограничение можно найти в разделе 1.4 диссертации, где соискатель формулирует список методик диагностики пучка «для лептонных ускорителей» (стр. 21). Тем самым соискатель снижает практическую значимость диссертации.

7. На стр. 193 отмечено, что «важной характеристикой программного обеспечения системы управления является его совместимость с приложениями, разработанными для моделирования и управления различными процессами в других системах управления». Однако не обсуждается возможность использования некоторых данных, зафиксированных системой управления, для широкого и открытого доступа через Интернет. В то же время, например, на веб-сайтах ОИЯИ для нуклотрона и ЦЕРН для коллайдера можно увидеть некоторые данные о параметрах пучка и режимах функционирования ускорительного комплекса. Не ясно, почему подобное сервисное обслуживание в рамки созданной системы управления не упоминается в диссертации.

8. Система измерения бетатронных частот неоднократно обсуждается в тексте диссертации, приведены ссылки на публикации о методе измерений, разработанном в ИЯФ, и о реализации ВРМ-ресиверов в BNL. Ссылки на публикации, где соискатель является соавтором, позволяют оценить его личный вклад в разработку необходимого программного обеспечения, привязывающего известный метод к системе управления. Поэтому, естественно, справедливо обсуждение (например, на стр. 93, стр. 135-139) важности результатов по измерению числа бетатронных колебаний за оборот в течение цикла ускорения. Упомянута полезность использования процедуры коррекции бетатронных частот в процессе ускорения пучка (стр. 194): «после некоторых итераций было достигнуто ускорение 95 % электронов, инжектируемых в бустер». Действительно важный результат, проиллюстрированный на соответствующем рисунке в работе [147], в которой Карнаев С.Е. – соавтор. Рисунок из этой работы соискатель в диссертацию по какой-то причине не включил, однако на стр. 224 сформулировано: «В случае выбора режима пооборотных измерений на левом нижнем графике будут выводиться бетатронные частоты».

9. Вывод в тексте об успешности примененного метода стабилизации температуры дистиллята, охлаждающего основные магниты коллайдера ВЭПП-4М, проиллюстрирован на рисунке 2.17. Однако не приводится обсуждение собственно метода стабилизации, ко-

торый, тем не менее, в тексте упомянут: «разработан целый комплекс решений, включающий стабилизацию температуры воды (дистиллята), охлаждающей магниты». Непонятно, что скрывается за словами «целый комплекс». И возникает вопрос: а можно ли обеспечить апериодическую зависимость (без затухающих осцилляций температуры)? К сожалению, отсутствуют примеры возможных моделей стабилизации, тестовых расчетов и экспериментов, верифицирующих корректность примененных алгоритмов.

10. Очень важен раздел 1.2 (на стр.14-17) «Синхронизация всех подсистем и данных». По постановке задачи в этом разделе и по сути сформулированных заключений становятся действительно понятными самоограничения соискателя в контексте выполненного исследования для электронных синхротронов как объекта исследования. При этом в приведенной постановке задачи не подчеркнута, что тактовая частота цифровых устройств наблюдения привязана к ускоряющей частоте синхротрона и почти постоянна вследствие ультрарелятивистских скоростей ускоряемых частиц. Поэтому, например, решения по привязке синхротрона-инжектора и основного синхротрона к фазе обращения частиц пучка с помощью методов, описанных в разделах 3.3 – 3.5, можно классифицировать как успешные для ультрарелятивистских энергий ускоряемых частиц. К сожалению, в диссертации цифровые методы управления обсуждаются вне связи с ограничениями, обусловленными теоремой Котельникова-Найквиста, отсутствуют математические модели, подтверждающие устойчивость используемых методов управления и, самое главное, позволяющие вырабатывать критерии, имеющие смысл прогноза (предсказания наиболее вероятного поведения пучка в контексте задачи о поиске глобального оптимума в многопараметрическом массиве данных большого объёма).

Следует подчеркнуть, что перечисленные выше замечания и недостатки не влекут за собой негативных последствий и не умаляют положительных сторон диссертации.

### **Выводы и заключение**

Тема выполненной диссертации актуальна. Подход соискателя к решаемой задаче прагматичен, последователен и систематичен. Текст диссертации лаконичен, содержит точные формулировки, четко отражающие мысли соискателя. Представленный в диссертации материал достаточно полно иллюстрирован. Диссертация оформлена аккуратно, материал изложен последовательно. Диссертация выполнена на высоком уровне, свидетельствующем о научной зрелости и высокой квалификации соискателя. В необходимой мере отражены и обоснованы научные положения соискателя, их новизна и значимость, рекомендации об их практическом использовании, а также существо опубликованных работ, на базе которых сформулированы новые научно обоснованные технические решения.

Основные научные результаты докторской диссертации Карнаева С.Е. опубликованы более чем в 30 статьях в рецензируемых научных журналах, в трудах российских и международных научных конференций.

Содержание диссертации достаточно точно отражено в автореферате. Автореферат в основном соответствует требованиям ВАК.

Диссертация обладает внутренним единством, содержит конкретные и обоснованные новые результаты и положения. Приводятся сведения о практическом использовании полученных соискателем научных результатов. Подчеркну, что разработка системы управления ускорителем базируется на согласовании физических процессов, происходящих с пучком, с функционированием технологических систем ускорительного комплекса. Поэтому диссертация С.Е. Карнаева соответствует специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Диссертация Карнаева С.Е. на соискание ученой степени доктора наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных соискателем исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых уже вносит значительный вклад в развитие науки и техники.

Таким образом, диссертационная работа С.Е. Карнаева является законченным научным исследованием и полностью удовлетворяет всем критериям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям по специальности 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, и критериям, установленным в п. 9 и п. 10 «Положения о порядке присуждения учёных степеней». Автор диссертации, С.Е. Карнаев, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук.

Доктор физико-математических наук

 /В.М. Жабицкий/

Ведущий научный сотрудник

Объединённого института ядерных исследований, г. Дубна

Телефон: +7-49621 64261

Электронный адрес: [V.Zhabitsky@jinr.ru](mailto:V.Zhabitsky@jinr.ru)

Подпись В.М. Жабицкого заверяю

Главный учёный секретарь ОИЯИ

Доктор физико-математических наук, профессор

Электронный адрес: [main@jinr.ru](mailto:main@jinr.ru)

[sorin@theor.jinr.ru](mailto:sorin@theor.jinr.ru)



/А.С. Сорин/

1 декабря 2017 г.