На правах рукописи

Балакин Виталий Витальевич

Создание системы диагностики и управления параметрами пучка и изучение коллективных эффектов в накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2023

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ	–	кандидат физико-математических наук Беркаев Дмитрий Евгеньевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Полозов Сергей Маркович	–	доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)
Корчуганов Владимир Николаевич	–	доктор физико-математических наук, Национальный Исследовательский Центр “Курчатовский институт”, Курчатовский комплекс синхротронно-нейтронных исследований (ККСНИ)
ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ	–	Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований

Защита диссертации состоится «17» октября 2023 года в «14:00» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте https://www.inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety24-1-162-02

Автореферат разослан «16» августа 2023 года.

Ученый секретарь диссертационного совета доктор физико-математических наук, профессор РАН

Лотов Константин Владимирович

Общая характеристика работы

Инжекционный комплекс (ИК) ВЭПП-5 [1; 2] с 2015 года является источником высокоэнергетических электронов и позитронов для проведения фундаментальных экспериментов по физике высоких энергий двумя коллайдерами Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН): ВЭПП-2000 [3] и ВЭПП-4М [4]. На данный момент инжекционный комплекс полностью соответствует потребности данных потребителей в пучках электронов и позитронов, тем не менее, задача повышения эффективности работы инжекционного комплекса является актуальной, в том числе и при дальнейшем развитии ускорительных программ ИЯФ СО РАН.

Степень разработанности темы исследования. Один из важнейших факторов, обеспечивающий достижение проектных, или даже их превышающих, параметров ускорительного комплекса - это его настройка, для которой необходимо иметь программные и аппаратные средства для диагностики и управления параметрами пучка. Чаще всего их функционал определяется уже на стадии проектирования ускорителя и его системы управления, как, например, было сделано для NSLS-II [5] (Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, USA), где сразу закладывались требования на наличие пользовательских приложений, отображающих наиболее полную информацию о параметрах пучка ускорителя, включая пооборотные измерения координат пучка с датчиков положения пучка, а также контроль положения пучка внутри камеры на всем периметре ускорителя. Средства управления параметрами пучка должны были включать в себя оптимизацию положения пучка, измерение и коррекцию частот поперечных колебаний пучка, измерение матриц отклика для частот поперечных колебаний, значения этих частот в зависимости от энергии (хроматизм) и положения пучка.

Другой пример реализации подобного инструментария можно найти в работе [6], где описанный пакет инструментов является интерфейсом для определения параметров LHC (Large Hadron Collider, CERNs) и его моделирования на MAD-X [7]. Пакет построен так, что работать с MAD-X можно напрямую, без использования непосредственно синтаксиса MAD-X и создания его входных файлов, необходимых для расчета. Также в нем существует менеджер оптики и "ручек" (комбинации элементов системы управления ускорителем, выполняющих смещение одного выбранного параметра пучка), который представляет из себя GUI-приложение для генерации новых параметров магнитной системы коллайдера и расчета изменений в магнитной системе для перехода к ней. Конфигурация "ручек" выполняется непосредственно MAD-X для изменения ключевых параметров ускорителя: частот бетатронных колебаний пучка и хроматизма, либо

создания локальных искажений положения пучка. Верификация заданных настроек LHC или "сжатие" бета-функций пучка в месте встречи (уменьшение величины бета-функции) проводится "сканером" параметров пучка.

В конечном итоге настройка ускорителя (каким бы образом она не выполнялась - вручную, полуавтоматически с использованием программных инструментов или полностью автоматически) сводится к увеличению его эффективности, что в случае инжекционного комплекса означает увеличение числа частиц в пучке без потери стабильности и повторяемости работы комплекса. Здесь выходит на первый план другой важный аспект ускорителей с интенсивными пучками заряженных частиц - коллективные эффекты.

В циклических ускорителях, работающих с пучками большой интенсивности, электромагнитные поля, созданные непосредственно пучком, а также появившиеся в результате взаимодействия пучка с ближайшим окружением (вакуумной камерой ускорителя, сильфонами, пластинами инфлекторов, датчиков положения пучка и т.д.) будут приводить к возмущению уже существующих полей (например, от резонатора ВЧ-системы). При достаточно большой величине возмущения пучок становится неустойчивым как в продольном, так и поперечных направлениях движения, что может приводить к ограничению максимального возможного накопленного тока пучка и к уменьшению темпа его накопления в накопителе. Другими словами, взаимодействуя с окружением электромагнитно, пучок создает новые электромагнитные *wake*[1]-поля. Они действуют на сам пучок, приводя, при неблагоприятных обстоятельствах, к возникновению коллективных неустойчивостей, которые могут приводить к последующей потере частиц.

Работы по изучению импеданса связи ускорителей и его влияния на динамику пучка активно велись с начала работы электронных машин с интенсивным пучком [8] и [9]. В них анализировались феномен удлинения сгустка в зависимости от накопленного тока (в накопителе или коллайдере) при различных его энергиях, формировалась картина возникновения неустойчивостей, влияющих на параметры пучка.

Для современных ускорителей данный вопрос приобретает все большую актуальность. Работа [10] посвящена изучению модели импеданса основного кольца J-PARC и его возможному влиянию на когерентный сдвиг бетатронной частоты.

Хорошим тоном становится построение модели импеданса связи на этапе проектирования ускорителя и проработка одного из крупнейший коллайдеров будущего – Future Circular Collider (FCC) не обходит стороной этой вопрос. В статье [11] представлены результаты изучения основных источников *wake*-полей, их импеданса и влияния на динамику пучка для FCC-ее. Аналогичные исследования импедансов затрагивает и будущую модификацию этого коллайдера – FCC-hh. Описание расчетов поперечной

[1] *wake* – возмущение

компоненты импеданса связи различных элементов на энергии инжекции и эксперимента приведены в работе [12].

Как видно из вышеописанных примеров, анализ влияния импеданса на пучок, а в особенности на интенсивный, является важным аспектом проектирования накопительных колец и коллайдеров, потому как коллективные эффекты являются одним из факторов, ограничивающих максимальную интенсивность пучка в ускорителях [13].

Современное состояние дел в исследовании импеданса связи и его влияния на динамику пучка наилучшим образом демонстрирует команда Елены Шапошниковой, изучающая коллективные эффекты пучка на SPS (Super Proton Synchrotron, CERN), являющимся инжектором для LHC. Начинали они с измерений структуры импеданса [14] и наблюдения возникновения микроволновой неустойчивости пучка [15], которая для SPS является главным фактором, ограничивающим работу с интенсивным пучком частиц.

Так проекту HL-LHC (High Luminosity LHC) требуется, чтобы SPS работал с 288 пучками с 2.3×10^{11} протонами в сгустке либо со 144 пучками и интенсивностью 3.6×10^{11} частиц. На данном этапе достичь таких параметров не позволял 200 МГц резонатор на бегущей волне, который при достижении $\approx 1.75 \times 10^{11}$ протонов в сгустке приводил к возникновению неустойчивости продольного движения и значительному удлинению сгустка [16].

Технически, суть проводимых работ по изучению импеданса сводится к нахождению участков вакуумной камеры, которые дают основной вклад в возникновение неустойчивости и устранение этих источников (например, влияние откачных портов вакуумных насосов можно устранить экранировками соотвествующих участков вакуумной камеры).

Пример идентификации источников импеданса, приводящих к микроволновой неустойчивости описан в работе [17]. Инжекция в SPS гораздо более длинного пучка (характерной длины 25-30 нс, вместо рабочего 1-3 нс) позволила, по изменению продольного распределения частиц внутри сгустка, наблюдать процесс возникновения неустойчивости и определить характерные частоты приводящих к неустойчивости. В дальнейшем, определялись элементы вакуумной системы, которые способны генерировать *wake*-поля соответствующих частот. Для чего выбирается наиболее подходящий по геометрии элемент и строится его 3D модель с использованием программного обеспечения CST MICROWAVE STUDIO [18], в которой и расчитывает его импеданс. При совпадении найденных в моделировании и эксперименте данных можно сделать вывод о правильном обнаружении источника импеданса, который приводит к возникновению неустойчивостей продольного и поперечного движения пучка.

Знание характерных частот, на которых возбуждаются *wake*-поля, не является достаточным для определения зон устойчивого движения пучка.

Для расчетов и моделирования порогов неустойчивости необходимо уметь определять параметры импеданса связи.

Следующий этап в изучении влияния коллективных полей пучка - численный анализ его динамики по результатам измеренных параметров импеданса. Для этого командой Е. Шапошниковой был разработан программный пакет Beam Longitudinal Dynamic code “BLonD” [19], который является основным инструментом для проведения различного рода изучений продольной динамики пучка на всех синхротронах CERN (The European Organization for Nuclear Research). Также позволяет решать широкий спектр задач, начиная от влияния изменений параметров ВЧ-системы ускорителя на продольную динамику пучка, заканчивая взаимодействием пучка с вакуумной камерой ускорителя и петлями обратной связи ВЧ-систем [20].

Регулярное сравнение данных эксперимента и моделирований BLonD помогает находить несоответствия между импедансом расчитанным и существующим на ускорителе. Так, в работе [21] говорится о нахождении неучтенного импеданса на высоких частотах, который обнаружили сравнивания экспериментальные измерения мнимой части эффективного продольного импеданса в зависимости от длины пучка и результаты аналогичного моделирования BLonD.

Разработанный программный пакет можно также использовать для расчета продольной динамики пучка как для будущих улучшений ускорителей, так и при создании новых проектов. Диссертация [22] обращает внимание на моделирования в BLonD, которые были выполнены для оценки порога неустойчивости и будущих параметров пучка SPS после модернизации.

В то время как в мире идет работа с ВЧ-системами с высокими гармониками (4620 для SPS, 222 для ВЭПП-4М, 14 для ВЭПП-2000, 5210 для SuperKEKB, 35640 для LHC) отличительной особенностью накопителя-охладителя инжекционного комплекса является работа с резонатором первой гармоники частоты обращения. Вследствие этого, постановка задачи изучения импеданса связи изменяется. Теперь необходимо исследовать динамику пучка, состоящего из 16 сгустков, ускоренных в линейном ускорителе S-диапазона при инжекции и группировке в один длинный сгусток, соответствующий единственной сепаратрисе накопителя.

Актуальность избранной темы. Приведенные примеры демонстрируют необходимость создания подобных программных инструментов и на инжекционном комплексе ВЭПП-5, реализованных под необходимости источника частиц коллайдеров ИЯФ СО РАН: стабильности различных режимов, повторяемости после переключения от одного потребителя к другому и между различными сортами частиц.

Кроме того, становится актуальной для практических применений и задача исследования продольного движения пучка при инжекции в накопитель-охладитель (НО), плотности продольного распределения и длины пучка при накоплении и его параметров на выпуске, покрывая малоизученную область применения.

Данная работа не только показывает степень влияния коллективных неустойчивостей на движение частиц пучка в накопителе, но и прогнозирует их динамику при внесении изменений в конструкцию вакуумной камеры НО. Последнее является необходимостью ввиду перспективы работы инжекционного комплекса с накопителями и бустерами с высокой гармоникой. Из-за резонатора 1 гармоники (10.94 МГц) перепуск пучка в в такие машины может сопровождаться значительными потерями частиц в момент захвата пучка из-за большой длины инжектируемого сгустка.

Цели и задачи. Целью данной работы является исследование влияния коллективных эффектов на пучок при инжекции, затухании, перегруппировке и накоплении пучка в накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5 и выявление ограничений, накладываемых этими эффектами на темпы накопления частиц и стабильность работы комплекса и разработка программных инструментов контроля и управления параметрами пучка для решения задач по оптимизации параметров магнитной системы накопителя и положения пучка, хроматизма, частот бетатронных колебаний.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать процесс инжекции пучка из линейного ускорителя в накопитель-охладитель.
2. Изучить изменение продольного профиля и длины сгустка при увеличении накопленного в нем тока.
3. Анализируя результаты предыдущих двух пунктов выявить характерные особенности проявления коллективных эффектов.
4. Построить аналитическую модель импеданса связи накопителя-охладителя, представив импеданс связи через эквивалентную RLC-цепь, сравнивая параметры аналитической модели и экспериментальные измерения параметров пучка определить параметры эквивалетной цепи.
5. Провести моделирование инжекции, затухания и перегруппировки пучка при добавлении к построенной модели импеданса связи еще одного импеданса, отвечающего за вставку в вакуумную систему накопителя дополнительного резонатора.
6. Разработать программные инструменты контроля параметров пучка накопителя-охладителя инжекционного комплекса.

7. Разработать программные инструменты управления параметрами пучка накопителя-охладителя инжекционного комплекса.
8. Внедрить разрабратанное программное обеспечение в систему управления комплекса, продемонстрировать его применимость и полезность.

Научная новизна

1. Проведено изучение перегруппировки и захвата интенсивного пучка частиц из линейного ускорителя S-диапазона в резонатор 1-й гармоники накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5.
2. На базе проведенных экспериментов по измерению продольного профиля пучка построена модель импеданса связи данного накопителя-охладителя в виде эквивалентной RLC-цепи, проведено моделирование инжекции пучка и его перегруппировки при модификации эквивалентного импеданса, вызванного добавлением дополнительного резонатора.
3. Для инжекционного комплекса ВЭПП-5 были разработаны программные инструменты контроля и управления параметрами пучка на языке Python, которые, при необходимости, можно внедрить и на другие ускорительные установки.

Теоретическая и практическая значимость работы. Исследование влияния коллективных эффектов позволило определить механизм искажения формы и удлинения сгустка при накоплении тока в нем и объяснить гораздо более быструю перегруппировку 16 сгустков, полученных из линейного ускорителя, в один длинный, соответствующий потенциальной яме резонатора первой гармоники накопителя-охладителя (пучок теряет свою структуру из 16 сгустков примерно за 3 000 оборотов, вместо ожидаемых 160 000, определяемых временем радиационного затухания).

Построенная модель импеданса связи в виде эквивалентной RLC-цепи позволяет проводить моделирование инжекции и перегруппировки пучка при добавлении в вакуумную камеру накопителя новых элементов, имеющих значительный импеданс и влияющих на динамику пучка, что помогает заранее понять, будут ли эти элементы приводить к возникновению нежелательных неустойчивостей, приводящих к гибели пучка или уменьшению темпов накопления частиц.

Разработанные инструменты контроля и управления параметрами пучка позволяют отслеживать положение пучка внутри вакуумной камеры накопителя-охладителя и следить за частотами его бетатронных колебаний, измерять матрицу отклика положения пучка и его бетатронных частот, бета-функции и хроматизм, определять оптимальные бетатронные частоты для наибольшего темпа накопления частиц в накопителе,

создавать комбинации элементов системы управления ускорителем, выполняющих изолированное смещение одного выбранного параметра (т.н. "ручки").

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационного исследования являются экспериментальные методы исследования, включая методы статистической обработки данных.

Положения, выносимые на защиту

1. Искажение потенциальной ямы ВЧ-системы накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 приводит к искажению продольного распределения частиц пучка.
2. Эффект "быстрой" перегруппировки пучка, обнаруженный при исследовании инжекции в накопитель-охладитель инжекционного комплекса ВЭПП-5, связан с появлением микроволновой неустойчивости.
3. Мнимая часть продольного импеданса связи накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5, согласно измерениям удлинения пучка, составляет 5.71 ± 0.50 Ом (диссектор) и 6.15 ± 0.18 Ом (стрик-камера).
4. Активная часть импеданса связи накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 на низких частотах, согласно проделанным измерениям, составляет 247 ± 7 Ом (диссектор).
5. Разработанные программные инструменты позволяют измерять параметры пучка накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 и управлять ими для достижения заданных параметров.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях [A1–A6], 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [A1–A3], 2 — в тезисах докладов [A4; A5].

Автор принимал активное участие в проведении экспериментальных измерений продольного профиля сгустка частиц на накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5, проводил обработку полученных данных и, из изменения длины сгустка и положения его центра масс в зависимости от тока сгустка, получил значения мнимой импеданса связи накопителя-охладителя и значение активного сопротивления импеданса на низких частотах [A1; A4]. Кроме того, автором был объяснен феномент быстрой перегруппировки пучка, инжектированного из линейного ускорителя, и построена модель эквивалентного импеданса связи накопителя в виде RLC-цепи, что позволило автору провести моделирование поведения

инжектированного пучка при возможном изменении импеданса связи накопителя [A2].

Вклад автора также явился определяющим в разработке программных инструментов контроля и управления параметрами пучка накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5. Им был создан программный код для обработки пооборотных измерений положения пучка, получены значения частот поперечных колебаний пучка [A3], а также выявлены более оптимальные значения этих частот для большего темпа накопления позитронов в накопителе [A5]. Программный код инструментов для контроля и управлениями параметров пучка был целиком разработан непосредственно автором [A6].

Вклад автора по всех упомянутых публикациях является основополагающим.

Результаты работы докладывались на XXV всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц (RuPAC-2016, Санкт-Петербург, Россия), XII международном семинаре по проблемам ускорителей заряженных частиц, посвященному памяти В.П. Саранцева (2017, Алушта, Россия), XXVI всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц (RUPAC-2018, Протвино, Россия), XXVII всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц (RUPAC-2020, Алушта, Россия), VI всероссийском форуме и IV Международной научной конференции "Наука молодых - наука будущего" (2021, Москва, Россия).

Личный вклад соискателя. Все основные результаты исследования были получены непосредственно автором.

В публикации [A1] автор принимал участие в проведении экспериментальных измерений продольного профиля сгустка частиц на накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5, проводил обработку полученных данных и, из изменения длины сгустка и положения его центра масс в зависимости от тока сгустка, получил значения мнимой импеданса связи накопителя-охладителя и значение активного сопротивления импеданса на низких частотах. Другие соавторы принимали участие в измерении, обсуждении полученных результатов и научном руководстве. Вклад автора в публикации [A1] является основополагающим.

В работе [A4], которая является продолжением исследований, изложенных в [A1], автором также были определены параметры эквивалентного импеданса связи в виде RLC-цепи, путем сравнения измеренных продольных профилей пучка, инжектированного из линейного ускорителя, на разных оборотах и аналогичных результатов моделирования. Вклад автора в публикации [A4] является основополагающим.

Публикация [A2] является завершающей в этом цикле работ, и, помимо всего вышеописанного, в ней автором был объяснен феномент быстрой перегруппировки пучка, инжектированного из линейного ускорителя, а

построенная ранее модель эквивалентного импеданса позволила автору провести моделирование поведения инжектированного пучка при возможном изменении импеданса связи накопителя. Вклад автора в публикации [A2] является основополагающим.

В работе [A3] автором был создан программный код для обработки пооборотных измерений положения пучка, получены значения частот поперечных колебаний пучка. Эти результаты позволили соавторам публикации измерить значение дисперсионной функции. Также соавторы принимали участие в научном руководстве. Вклад автора в публикации [A3] является основополагающим.

В публикации [A5] автором был создан программный код для обработки пооборотных измерений положения пучка, получены значения частот поперечных колебаний пучка, также им были измерены значения бета функций накопителя-охладителя и выявлены более оптимальные значения бетатронных частот для большего темпа накопления позитронов в накопителе. Соавторы осуществляли научное руководство. Вклад автора в публикации [A5] является основополагающим.

Программный код, реализующий описанный в [A6] функционал, был создан лично автором в полном объеме. Соавторы осуществляли научное руководство. Вклад автора в публикации [A6] является основополагающим.

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором, либо при активном его участии.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, а также представлены выносимые на защиту положения.

В **первой главе** дано краткое описание инжекционного комплекса ВЭПП-5 и приведены основные параметры накопителя-охладителя.

Вторая глава посвящена теоретическому описанию изучаемых процессов. Дано определение *wake*-функции $W_m(z)$, которая обеспечивает выполнение граничных условий для полей, наведенных самим пучком, описывая отклик вакуумной камеры на возбуждение пучком, имеющее распределение плотности в виде δ-функции и содержащим в себе m-ый мультипольный момент. *Wake*-функция определяется исключительно свойствами вакуумной камеры и не зависит от параметров самого пучка заряженных частиц. В то время как *wake*-функция дает описание отклика

вакуумной структуры в пространстве-времени, становится важно исследовать также и частотную составляющую *wake*-полей, выполнив их Фурье преобразование. Получившаяся в итоге величина (1) называется импедансом связи. Эта величина демонстрирует меру "сопротивления" вакуумной системы прохождению через нее заряженных частиц:

$$\begin{aligned} Z_m^{\parallel}(\omega) &= \int\limits_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega z/c} W'_m(z) \tfrac{dz}{c} \\ Z_m^{\perp}(\omega) &= i \int\limits_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega z/c} W_m(z) \tfrac{dz}{c}. \end{aligned} \tag{1}$$

Продольный импеданс связи $Z_m^{\parallel}(\omega)$ можно представить в виде эквивалентного RLC-контура, характеристики сосредоточенных элементов которого связаны формулой:

$$\frac{1}{Z_m^{\parallel}(\omega)} = \frac{1}{R_s} + \frac{i}{\omega L} - i\omega C, \tag{2}$$

что в итоге приводит к следующему виду импеданса (3):

$$Z_m^{\parallel}(\omega) = \frac{R_s}{1 + iQ\left(\frac{\omega_R}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_R}\right)}, \tag{3}$$

где $Q = R_s\sqrt{C/L}$ - добротность контура, и $\omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ - его резонансная частота. Обратное же преобразование Фурье дает значение продольной *wake*-функции $W'_m(z)$:

$$W'_m(z) = \begin{cases} 0 & \text{если } z > 0, \\ \alpha R_s & \text{если } z = 0, \\ 2\alpha R_s e^{\alpha z/c}\left(\cos\frac{\overline{\omega} z}{c} + \frac{\alpha}{\overline{\omega}}\sin\frac{\overline{\omega} z}{c}\right) & \text{если } z < 0, \end{cases} \tag{4}$$

где $\alpha = \omega_R/2Q$ и $\overline{\omega} = \sqrt{\omega_R^2 - \alpha^2}$.

Показано, что наличие импеданса связи приводит к коллективным эффектам пучка – взаимодействию частиц пучка с полями, наведенными другими частицами пучка. В случае накопителя-охладителя это проявляется в удлинении пучка, смещении фазы синхротронных колебаний, а также изменению формы пучка. Вывод этих соотношений целиком приведен в **Главе 2**, окончательный результат задается формулами (5), (6) и (7) соответственно.

$$\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{s0}}\right)^3 - \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{s0}}\right) - \frac{e}{\sqrt{2\pi}}\frac{\alpha_p I_b}{E Q_{s0}^2}\Im\left(\frac{Z_{||}}{n}\right)\left(\frac{R}{\sigma_{s0}}\right)^3 = 0, \tag{5}$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi I_b}{V_0 cos\phi_s}\frac{\sqrt{2\pi}}{\omega_0\sigma_{s0}}\Re\left(\frac{Z_{||}}{n}\right), \tag{6}$$

$$\rho(x) = \frac{exp(-x^2/2)}{\sqrt{2\pi}\zeta\sigma_{s0}(\coth(\zeta) + \Upsilon(x/\sqrt{2}))}, \tag{7}$$

где σ_z - продольный размер пучка, σ_{s0} - длина пучка при нулевом токе, α_p - коэффициент пространственного уплотнения орбит ($\alpha_p = \frac{1}{C_0}\oint \frac{D_x}{r_0} ds$, C_0 - периметр, D_x - дисперсионная функция: $x_p = D_x \frac{\delta p}{p}$), Q_{s0} - невозмущенная синхротронная частота, E - энергия пучка, e - заряд электрона, I_b - ток пучка, $\Im\left(\frac{Z_{||}}{n}\right)$ - мнимая часть нормированного на гармонику продольного импеданса связи, ω_0 - частота обращения пучка, V_0 - ускоряющее напряжение ВЧ-системы, ϕ_s - синхронная фаза, $\Re\left(\frac{Z_{||}}{n}\right)$ - реальная часть нормированного на гармонику продольного импеданса связи, $\zeta = \frac{Ne^2\omega_0\pi Z_0\alpha_p}{Q_{s0}^2 pv}$, N - число частиц, Z_0 - величина активного импеданса, $\Upsilon(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int\limits_0^x e^{-t^2}dt$ - интеграл вероятности (функция ошибки).

Кроме того, в **Главе 2** изложен способ коррекции положения пучка в накопителе-охладителе через нахождение псевдообратной матрицы к матрице отклика с помощью ее SVD-разложения. Экспериментально матрицу отклика M можно измерить отслеживая изменение координаты пучка на каждом из датчиков положения при варьировании токов дипольных корректоров ускорителя. Имея же псевдообратную, можно найти то изменение токов корректоров, при котором произойдет необходимое смещение положения пучка в вакуумной камере.

Третья глава посвящена изучению коллективных эффектов на накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5. В ней описаны устройство и принцип работы диссектроа и стрик-камеры – устройств для измерения продольного профиля пучка, а также результаты измерений продольного профиля пучка. Так, например, была измерена зависимость длины пучка от его тока (рисунок 1), что позволило определить мнимую часть импеданса связи накопителя-охладителя – $\Im\left(\frac{Z_{||}}{n}\right) = 5.71 \pm 0.5$ Ом. Измерение же зависимости сдвига синхронной фазы пучка от его тока (рисунок 2) позволило выявить значение действительной части импеданса – $\Re\left(\frac{Z_{||}}{n}\right) = 15.68 \pm 0.47$ Ом.

С помощью стрик-камеры отчетливо наблюдалось и искажение продольного профиля пучка, вызванное искажением потенциальной ямы, наведенными пучком *wake*-полями. Измерения также находятся в согласовании с моделью, предложенной в ранее (7). Демонстрация этого эффекта показана на рисунке 3.

Для изучения эффекта влияния импеданса связи на продольную перегруппировку пучка в течении первых тысяч оборотов после инжекции было выполнено моделирование данного процесса. Программный код был реализован на языке программирования Python 3. В данной модели

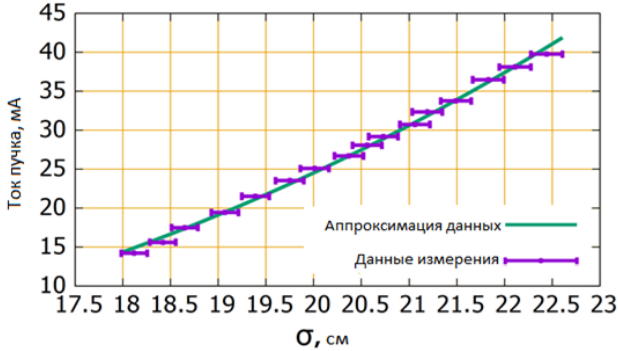

Рисунок 1 — Зависимость длины пучка от его тока, измеренные диссектором

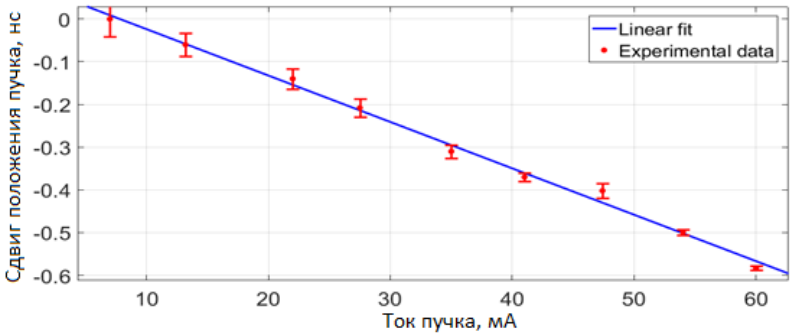

Рисунок 2 — Величина сдвига пучка по фазе относительно его тока, измеренные диссектором

продольный импеданс связи накопителя-охладителя задается как эквивалентная RLC-цепь, заданная в (3) с соответствующей ему *wake*-функцией (4). Для оценки параметров эквивалентной цепи проводилась минимизация целевой функции ϕ, задаваемой как:

$$\phi = \sum^{n} \left[I_{model}\left(N, R_s, Q, \omega_r\right) - I_{mes}\left(N\right) \right]^2, \tag{8}$$

где $I_{model}\left(N, R_s, Q, \omega_r\right)$ – смоделированное распределение тока пучка, зависящее от номера оборота и параметров эквивалентного импеданса связи, $I_{mes}\left(N\right)$ – измеренный стрик-камерой продольный профиль пучка на N-том обороте. Составив такую модельную функцию (8) и найдя ее минимум, можно оценить эквивалентные параметры RLC-цепи: $R_s = 39$ кОм, $Q = 4.2$ и $\omega_r = 2.6$ ГГц. Рисунок 4 иллюстрирует качественное соответствие

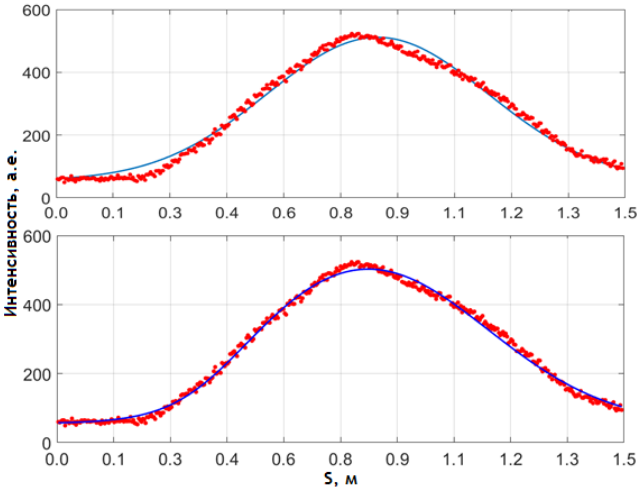

Рисунок 3 — Искажение продольной формы пучка накопителя-охладителя при токе 150 мА. Сверху приведен пример аппроксимации профиля нормальным распределением, снизу - модельной функцией (7)

измеренного стрик-камерой профиля пучка и результата моделирования при наличии импеданса связи.

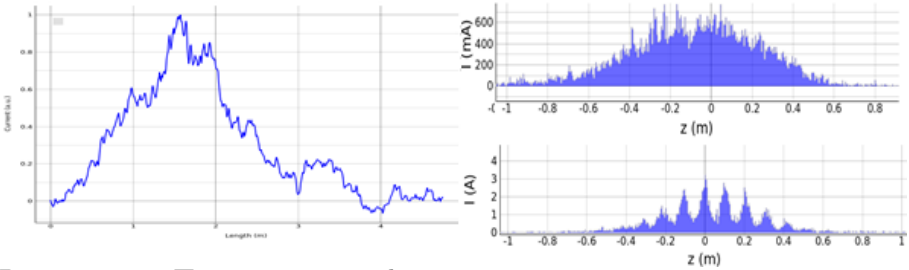

Рисунок 4 — Продольный профиль пучка накопителя-охладителя через 3200 оборотов после инжекции. Слева – измеренный стрик-камерой, справа – результаты моделирования (снизу без учета импеданса связи, сверху – с учетом)

Также **Глава 3** объясняет эффект быстрой перегруппировки пучка при инжекции, которая определяется возникновением микроволновой неустойчивости. Однако, стоит отметить, что накопленный в НО пучок слишком длинный, для того чтобы в нем происходило ее возбуждение, приводящее к потерям частиц.

В конце **Главы 3** приведены результаты моделирования поведения пучка при изменении модели импеданса связи накопителя-охладителя. Для исследования влияния дополнительного импеданса на динамику пучка при инжекции были использованы параметры резонатора сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ), которые были добавлены в уже построенную модель (Глава 3) продольного импеданса связи.

Было показано, что дополнительный резонатор практически не изменяет динамику пучка при инжекции и охлаждении – на ранних оборотах все также возникает микроволновая неустойчивость, которая перегруппировывает пучок из 16 коротких сгустков в 1 длинный, а за время, соответствующего характерному времени радиационного затухания пучка, происходит его группировка в имеющейся сепаратрисе.

Моделирование перегруппировки пучка из основного резонатора накопителя-охладителя в дополнительный также было проведено, и показано, что при медленном снижении ВЧ-напряжения на одном резонаторе и увелитечения другом удается провести медленную перегруппировку пучка без возникновения каких-либо существенных потерь, связанных с резким исчезновением потенциальной ямы, удерживающей накопленный пучок и появлением новой. Процесс такой перегруппировки пучка проиллюстрирован на рисунке 5.

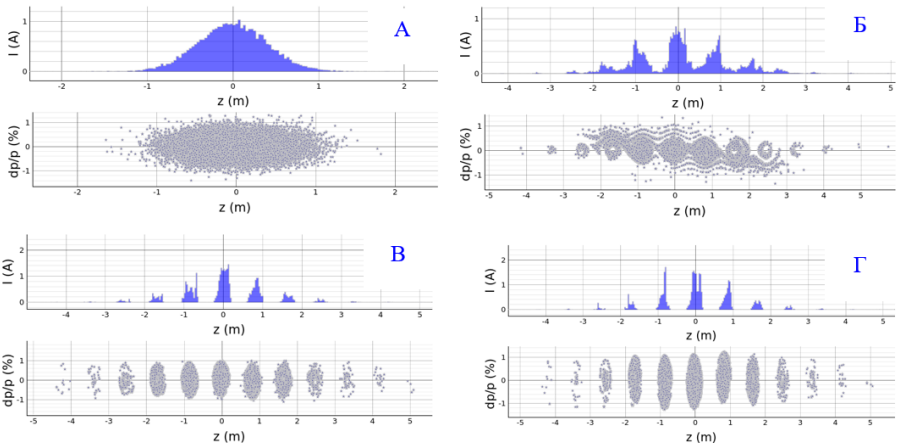

Рисунок 5 — Продольный профиль пучка накопителя-охладителя на 1 (А) и 2000 (Б), 13 500 (В) и 20 000 (Г) оборотах при постепенном включении дополнительного резонатора и последующем отключении основного

Четвертая глава посвящена созданным инструментам диагностики и управления параметрами пучка накопителя-охладителя и результатам их

применения. Описано разработаное программное обеспечение (ПО), позволяющее проводить сбор, обработку, отображение и хранение данных, полученных после пооборотных измерений положения пучка:

1. Службы:
   - orbitd – предобработка данных, полученных со станций датчиков положения пучка.
   - knobd – обслуживание «ручек» («ручка» - это изолированное изменение одного выбранного параметра системы).
2. Графические приложения для оператора ускорительного комплекса:
   - orbit – отображение и хранение координат пучка накопителя-охладителя в разных режимах работы инжекционного комплекса. Вторая функция этого приложения - удержание положения пучка в вакуумной камере накопителя в заданном диапазоне значений.
   - turns – отображение измерения тока и координат (а также их Фурье преобразования) с выбранного датчика.
   - tunes – отображение и хранение дробных частей бетатронных частот накопителя-охладителя.
3. Административные графические приложения:
   - rmc – измерение матрицы отклика накопителя-охладителя.
   - magn – намагничивание элементов магнитной системы накопителя-охладителя.
   - knob – пользовательское приложение для создания «ручек» и управления с их помощью подсистемами комплекса.
   - inj_resp – измерение зависимости числа захваченных накопителем-охладителем частиц от частот бетатронных колебаний пучка.
   - rmc_proc – обработка измеренной матрицы отклика, создание «ручек» по результатам обработки.

Принципиальная схема программного обеспечения представлена на рисунке 6.

Наиболее значимыми результатами использования программных инструментов является измерение зависимости захваченных накопителем-охладителем позитронов от бетатронных частот накопителя-охладителя и реализация автоматической коррекции положения пучка частиц в вакуумной камере по псевдообратной матрице к матрице отклика. Измерение зависимости захваченных накопителем-охладителем позитронов помогло найти в непосредственной близости от текущих бетатронных частот другую точку, с большей величиной захвата частиц - с 15 мА до 18 мА накопленного тока пучка за цикл инжекции – рисунок 7.

Алгоритм автоматической коррекции положения пучка частиц реализован так, что он самостоятельно вычислит необходимое искажение

координат пучка, с помощью матрицы рассчитает смещение токов корректоров накопителя и передаст новые значения токов системе управления. Данный процесс будет повторяться до тех пор, пока среднеквадратичное отклонение орбиты не станет меньше 0.2 мм. В противном случае, если по истечении определенного числа шагов алгоритму не удастся привести значения в заданный диапазон значений, то он остановит свою работу и известит об этом. Граница для начала коррекции в 1 мм выбрана таким образом, чтобы искажения орбиты были недостаточно велики для существенного снижения коэффициента перепуска частиц потребителям, а 0.2 мм - это среднеквадратичное отклонение для измерения координат пучка на некоторых датчиках положения пучка, потому ставить задачу скорректировать орбиту точнее не имеет физического смысла.

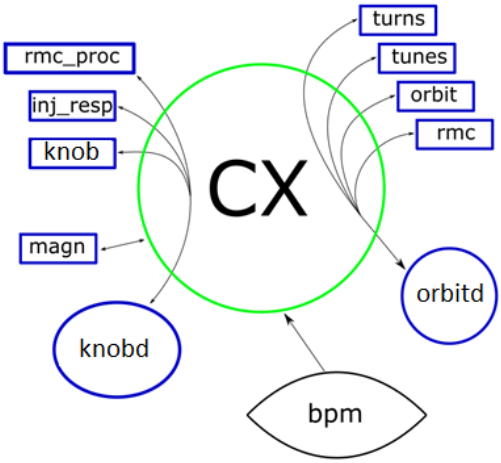

Рисунок 6 — Блок-схема инструментов программного контроля и управления параметрами пучка

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. Проведено изучение коллективных эффектов пучка накопителя-охладителя ВЭПП-5: изучен феномен удлинения пучка и искажения его формы, показано, что причиной этого является искажения потенциальной ямы ВЧ-системы накопителя-охладителя.
2. Определены мнимая и действительная части импеданса связи накопителя-охладителя.
3. Объяснен эффект "быстрой" перегруппировки пучка, связанный с появлением микроволновой неустойчивости в сгустках пучка при его инжекции из линейного ускорителя в накопитель-охладитель.

4. Оценены параметры эквивалентной RLC-цепи для представления импеданса связи накопителя-охладителя.
5. Построенная модель импеданса в виде RLC-цепи была использована для исследования поведения пучка во время инжекции при модификации вакуумной камеры накопителя, путем вставки дополнительного резонатора. Было показано, что дополнительный элемент вакуумной системы не приводит к возникновению неустойчивостей, приводящих к гибели пучка, при инжекции и его охлаждении.
6. Реализовано программное обеспечение по контролю параметров пучка для инжекционного комплекса ВЭПП-5 и созданы службы, позволяющие автоматизировать работу с ускорителем.
7. Проведено измерение зависимость захваченных накопителем-охладителем позитронов в режиме работы на коллайдер ВЭПП-2000 и обнаружены более оптимальные значения бетатронных частот, соотвествующих большему числу инжектированных частиц (увеличен ток пучка накопителя с 15 мА до 18 мА за цикл инжекции).
8. Подготовлен и протестирован на накопителе-охладителе алгоритм по автоматической коррекции положения пучка.

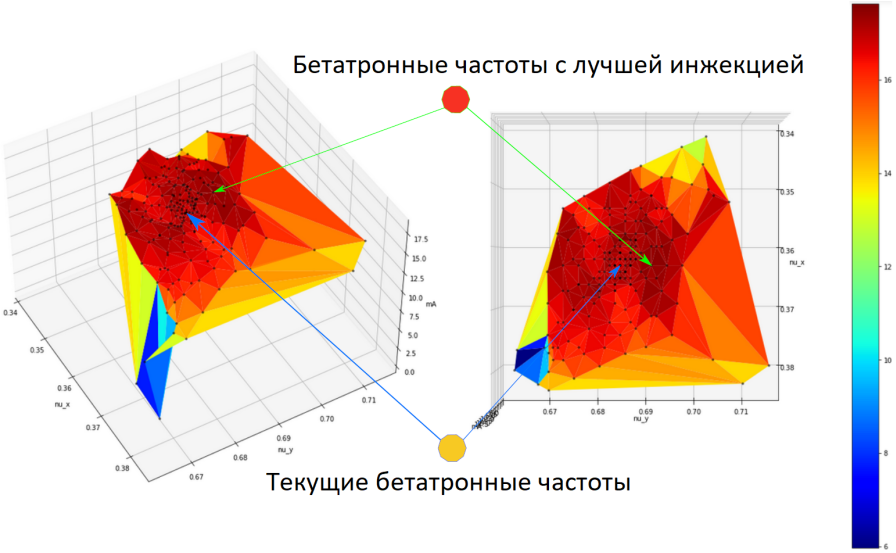

Рисунок 7 — Зависимость захваченных накопителем-охладителем позитронов от бетатронных частот накопителя-охладителя

Публикации автора по теме диссертации

A1. Probing Beam Collective Effects in the Damping Ring of the VEPP-5 Injection Complex. / V. Balakin, K. Astrelina, A. Petrenko [et al.]. — Текст : электронный // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2020. — Vol. 17, nr 4. — P. 415–418. — URL: https://link.springer.com/article/10.1134/S1547477120040068. — Дата публикации: 27.07.2020.

A2. Balakin, V.V. A Study of the Collective Beam Instabilities in the Damping Ring of the VEPP-5 Injection Complex. / V. V. Balakin, D. E. Berkaev, F. A. Emanov. — Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. — 2022. — nr. 65 — С. 878-886. — URL: https://link.springer.com/article/10.1134/S002044122206001X. — Дата публикации: 11.12.2022.

A3. Software for Monitoring and Controlling the VEPP-5 Damping-Ring Operation with Upgraded Electronics of Beam-Position Sensors. / V. Balakin, K. Astrelina, D. Berkaev [et al.]. — Текст : электронный // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2020. — Vol. 17, nr 4. — P. 557–560. — URL: https://link.springer.com/article/10.1134/S154747712004007X. — Дата публикации: 27.07.2020.

A4. Longitudinal Beam Measurements on Damping Ring BINP'S Injection Complex with New Resonator. / V. V. Balakin, F. A. Emanov, D. E. Berkaev. — Текст : электронный // Proceedings of the 26th Russian Particle Accelerator Conference (Protvino, Russia). — Protvino, 2018. — P. 453-455. — URL: https://accelconf.web.cern.ch/rupac2018/papers/thpsc22.pdf (дата обращения: 09.04.2023).

A5. Balakin, V. Beam parameters measurements and control system software tools for VEPP-5 injection complex damping ring. / V. V. Balakin, F. A. Emanov, D. E. Berkaev. — Текст : электронный // Proceedings of the 27th Russian Particle Accelerator Conference (Alushta, Russia). — Alushta, 2021. — P. 443-445. — URL: https://accelconf.web.cern.ch/rupac2021/papers/wepsc56.pdf (дата обращения: 09.04.2023).

A6. Балакин, В. Программные инструменты для контроля и управления параметров пучка накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5. / В. В. Балакин, Ф.А. Еманов, Д. Е. Беркаев. — Текст : электронный // Проблемы информатики. — 2022. — Vol. 55, nr 2. — С. 27-43. — URL: https://icmmg.nsc.ru/ru/content/articles/programmnye-instrumenty-

dlya-kontrolya-i-upravleniya-parametrov-puchka-nakopitelya. (дата обращения: 09.04.2023).

Список литературы

1. Production of intense positron beams at the VEPP-5 injection complex / K. V. Astrelina, M. F. Blinov, T. A. Vsevolozhskaya [et al.]. — Текст : электронный // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2008. — Vol. 106, nr 1. — P. 77-93. — URL: https://link.springer.com/article/10.1134/S1063776108010068. — Дата публикации: 05.02.2011.

2. VEPP-5 Injection Complex: New Possibilities for BINP Electron-Positron Colliders. / Yu. Maltseva, A. Andrianov, K. Astrelina [et al.]. — Текст : электронный // Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference (Vancouver, BC, Canada). — Vancouver, 2018. — P. 371-373. — URL: https://accelconf.web.cern.ch/ipac2018/papers/mopmk011.pdf (дата обращения: 09.04.2023).

3. High luminosity at VEPP-2000 collider with new injector. / P. Shatunov, O. Belikov, D. Berkaev [et al.]. — Текст : электронный // Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference (Copenhagen, Denmark). — Copenhagen, 2017. — P. 2989-2991. — URL: https://accelconf.web.cern.ch/ipac2017/papers/wepik029.pdf (дата обращения: 09.04.2023).

4. Current Status of the VEPP-4 Accelerator Facility / A. N. Zhuravlev, S. E. Karnaev, E. B. Levichev [et al.]. — Текст : электронный // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2020. — Vol. 17, nr 7. — P. 938–950. — URL: https://link.springer.com/article/10.1134/S1547477120070067. — Дата публикации: 24.12.2020.

5. Shen, G. Prototype of Beam Commissioning Environment and its Application for NSLS-II. / G. Shen, L. Yang, M. Kraimer [et al.]. — Текст : электронный // Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference (Kyoto, Japan). — Kyoto, 2010. — P. 2740-2742. — URL: https://accelconf.web.cern.ch/IPAC10/papers/wepeb026.pdf (дата обращения: 09.04.2023).

6. Toolchain for Online Modeling of the LHC. / G.J. Muller, X. Buffat, K. Fuchsberger [et al.]. — Текст : электронный // Proceedings of the 13th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (Grenoble, France). — Grenoble, 2011. — P. 277-280. — URL: https://accelconf.web.cern.ch/icalepcs2011/papers/mopmn018.pdf (дата обращения: 09.04.2023).

7. MAD-X for Future Accelerators. / T. Persson, L. Deniau, A. Latina [et al.]. — Текст : электронный // Proceedings of the 12st International Particle Accelerator Conference (Campinas, SP, Brazil). — Campinas, 2021. — P. 2664-2667. — URL: https://cds.cern.ch/record/2804337/files/document.pdf (дата обращения: 09.04.2023).

8. Hofmann, A. Current dependent phenomena in LEP. / A. Hofmann, J.R. Maidment. — Текст : электронный. — // CERN Preprint. — 1979. — URL: https://cds.cern.ch/record/443340 (дата обращения 09.04.2023).

9. Clarke, J. A. Bunch lengthening thresholds on the Daresbury SRS. / J. A. Clarke. — Текст : электронный. // Proceedings of the 16th Particle Accelerator Conference and International Conference on High-Energy Accelerators (Dallas, USA). — Dallas,1995. — P. 3128-3130. — URL: https://accelconf.web.cern.ch/p95/ARTICLES/WAC/WAC23.PDF (дата обращения: 09.04.2023).

10. Updated model of the resistive wall impedance for the main ring of J-PARK. / B. Yee-Rendon, Y.H. Chin, H. Kuboki [et al.]. — Текст : электронный // Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference (Vancouver, BC, Canada). — Vancouver, 2018. — P. 3204-3206. — URL: http://cds.cern.ch/record/2672236/files/thpak002.pdf (дата обращения: 09.04.2023).

11. Coupling Impedances and Collective Effects for FCC-ee. / E. Belli, M. Migliorati, G. Castorina [et al.]. — Текст : электронный // Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference (Copenhagen, Denmark). — Copenhagen, 2017. — P. 3734-3737. — URL: https://accelconf.web.cern.ch/ipac2017/papers/thpab020.pdf (дата обращения: 09.04.2023).

12. Arsenyev, S. FCC-hh Transverse Impedance Budget. / S. Arsenyev, D. Schulte, O. Boine-Frankenheim. — Текст : электронный // Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference (Vancouver, BC, Canada). — Vancouver, 2018. — P. 149-152. — URL: https://accelconf.web.cern.ch/ipac2018/papers/mopmf029.pdf (дата обращения: 09.04.2023).

13. Intensity Limitations in Particle Beams. / W. Herr, M. Dohlus, R. Wanzenberg [et al.]. — Текст : электронный // Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School on Intensity Limitations in Particle Beams (Geneva, Switzerland). — Geneva, 2015. — Vol. 3. — P. 566. — URL: https://e-publishing.cern.ch/index.php/CYRSP/issue/view/37/10 (дата обращения: 09.04.2023).

14. Bohl, T. Measuring the Resonance Structure of Accelerator Impedance with Single Bunches. / T. Bohl, T. P. R. Linnecar, E. Shaposhnikova. — Текст : электронный // Physical Review Letters. — 1997. — Vol. 78, nr 16. — P. 3109-3112. — URL: https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.78.3109. — Дата публикации: 21.04.1997.

15. Shaposhnikova E. Methods of Observing the Microwave Instability Above and Below Transition. / E. Shaposhnikova. — Текст : электронный // Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference (Chicago, USA). — Chicago, 2001. — P. 385-389. — URL: https://accelconf.web.cern.ch/p01/PAPERS/WOPA002.PDF (дата обращения: 09.04.2023).

16. Identification and reduction of the CERN SPS impedance. / E. Shaposhnikova, T. Argyropoulos, T. Bohl [et al.]. — Текст : электронный // 57th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (Malmö, Sweden). — Malmö, 2016. — P. 260-265. — URL: https://accelconf.web.cern.ch/hb2016/papers/tuam3x01.pdf (дата обращения: 09.04.2023).

17. Beam measurement of the high frequency impedance sources with long bunches in the CERN Super Proton Synchrotron. / A. Lasheen, T. Argyropoulos, T. Bohl. — Текст : электронный // Phys. Rev. Accel. Beams. — 2018. — Vol. 21, nr. 034401. — P. 1-13. — URL: https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevAccelBeams.21.034401. — Дата публикации: 23.03.2018.

18. CST Studio Suite electromagnetic field simulation software : [сайт]. — URL: https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/ (дата обращения: 07.04.2023). — Яз. англ. — Текст : электронный.

19. CERN simulation suite for longitudinal particle tracking in synchrotrons : [сайт]. — URL: https://blond.web.cern.ch/ (дата обращения: 07.04.2023). — Яз. англ. — Текст : электронный.

20. Benchmarking the beam longitudinal dynamics code BLonD. — / H. Timko, J. Esteban Müller, A. Lasheen, D. Quartullo. — Текст : электронный // Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference (Busan, Korea). — Busan, 2016. — P. 3094-3097. — URL: https://accelconf.web.cern.ch/ipac2016/papers/wepoy045.pdf (дата обращения: 09.04.2023).

21. Lasheen, A. Synchrotron longitudinal impedance from measurements of the quadrupole frequency shift. / A. Lasheen, E. Shaposhnikova. — Текст : электронный // Phys. Rev. Accel. Beams. — 2017. — Vol. 20, nr 064401. — P. 1-15. — URL: https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/ PhysRevAccelBeams.20.064401 — Дата публикации: 13.06.2017.

22. Lasheen, A. BEAM MEASUREMENTS OF THE LONGITUDINAL IMPEDANCE OF THE CERN SUPER PROTON SYNCHROTRON : DOCTORAL SCHOOL N°576 Particules Hadrons Énergie et Noyau: Instrumentation, Image, Cosmos et Simulation (PHENIICS) Field: Accelerator physics : DOCTORAL THESIS; UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY. — Geneva, 2017. — P. 134. — Текст : электронный.

Балакин Виталий Витальевич

Создание системы диагностики и управления параметрами пучка и изучение коллективных эффектов в накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 13.07.2023.
Подписано в печать 17.07.2023.
Формат 60x90 1/16. Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч. изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 9

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринте ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11