

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Беркаев Дмитрий Евгеньевич

Новосибирск — 2023

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Описание накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5	15
Глава 2. Теоретическое описание изучаемых процессов и используемых методов	19
2.1 <i>Wake</i> -поля и импедансы связи	19
2.2 Удлинение сгустка за счет искажения потенциальной ВЧ-ямы наведенными полями	24
2.3 Изменение формы пучка за счет искажения потенциальной ВЧ-ямы наведенными полями	26
2.4 Сингулярное разложение матриц (<i>SVD</i>) и коррекция положения пучка в ускорителе	29
2.5 Выводы к Главе 2	32
Глава 3. Изучение коллективных эффектов пучка на накопителе-охладителе ВЭПП-5	33
3.1 Устройство диссектора	33
3.2 Диссектор на накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5	35
3.3 Результаты измерений параметров пучка с помощью диссектора .	37
3.4 Исследования коллективных эффектов накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 с помощью стрик-камеры . .	41
3.4.1 Устройство стрик-камеры	41
3.4.2 Измерение параметров пучка накопителя-охладителя ИК ВЭПП-5 стрик-камерой	43
3.4.3 Удлинение пучка и искажение его формы	44
3.4.4 Инжекция пучка из линейного ускорителя в накопитель-охладитель	47
3.4.5 Моделирование поведения пучка при изменении модели импеданса связи накопителя-охладителя	50

3.4.6	Перегруппировка пучка накопителя-охладителя при отключении ВЧ системы накопителя-охладителя	53
3.5	Анализ ошибок измерений	54
3.6	Выводы к Главе 3	54
Глава 4. Создание системы диагностики и управления параметрами пучка накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5		
4.1	Описание устройства инструментов программного контроля и управления параметрами пучка	57
4.2	Описание инструментов программного контроля и управления параметрами пучка	60
4.2.1	Обработка данных с датчиков положения пучка	60
4.2.2	«Ручки»	66
4.3	Удержание положения пучка в заданном диапазоне значений. Коррекция положения пучка на всем периметре накопителя-охладителя	70
4.3.1	Накладываемые ограничения	71
4.3.2	Алгоритм удержания орбиты пучка	74
4.4	Выводы к Главе 4	75
Заключение		79
Список литературы		81
Приложение А. Параметры станций датчиков положения пучка накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5		
		89
Приложение Б. Значение коэффициентов a_{ij} и b_{ij} многочленов для вычисления координат пучка при измеренном напряжении с пластин датчиков положения пучка		
		91

Введение

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 ЛНС 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, сифонами, 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

¹*wake* – возмущение

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 крупнейших 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-ee. Аналогичные исследования импедансов затрагивает и будущую модификацию этого коллайдера – FCC-hh. Описание расчетов поперечной 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 соответствующих 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 рассчитывает 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 рассчитанным и существующим на ускорителе. Так, в работе [21] говорится о нахождении неучтенного

импеданса на высоких частотах, который обнаружили сравнения 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 моделирование 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-охлаждителя 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-охлаждитель (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 гармонике (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 эквивалентной 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 разработанное 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 инъекции 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 [23–28], 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [23–25], 2 — в тезисах докладов [26; 27].

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 [23;26]. Кроме того, автором был объяснен феномен 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 [24].

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 поворотных измерений положения пучка, получены значения частот поперечных колебаний пучка [25], а также выявлены более оптимальные значения этих частот для большего темпа накопления позитронов в накопителе [27]. Программный код инструментов для контроля и управления параметрами пучка был целиком разработан непосредственно автором [28].

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 [23] 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 [23] является основополагающим.

В работе [26], которая является продолжением исследований, изложенных в [23], 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 [26] является основополагающим.

Публикация [24] 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 [24] является основополагающим.

В работе [25] 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 [25] является основополагающим.

В публикации [27] 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 [27] является основополагающим.

Программный код, реализующий описанный в [28] функционал, был создан лично автором в полном объеме. Соавторы осуществляли научное руководство. Вклад автора в публикации [28] 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.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 91 страницу, включая 50 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 43 наименования.

Глава 1. Описание накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 является частью ускорительного комплекса ИЯФ СО РАН и выполняет роль источника частиц, снабжая высокоэнергетическими электронами и позитронами действующие коллайдеры ВЭПП-4 и ВЭПП-2000. Схема ускорительного комплекса представлена на рисунке 1.1.

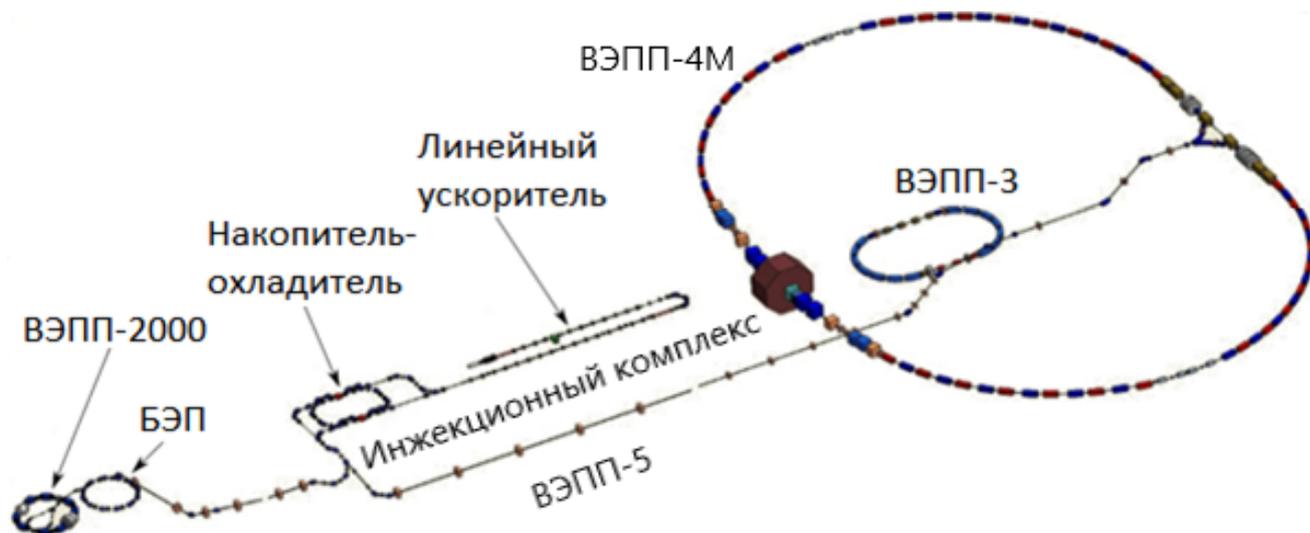


Рисунок 1.1 — Схема инжекционного комплекса ВЭПП-5 и коллайдеров

Сам инжекционный комплекс (рисунок 1.2) состоит из электронной пушки (источника электронов), двух линейных ускорителей (ЛУ), в которых происходит ускорение полученных частиц), конверсионной системы ("источника" антиматерии - позитронов), накопителя-охладителя (НО, синхротрона, в котором происходит накопление пучков частиц и их "охлаждение" - уменьшение поперечных размеров пучка) и транспортных каналов К-500. Основные параметры накопителя-охладителя, а также параметры пучка на входе и выходе из него приведены в таблице 1.

Ключевыми аспектами работы накопителя-охладителя является высокая частота инъекции частиц в него из линейного ускорителя, малое время перехода с одного сорта частиц на другой и частое переключение между потребителями, что делает нежелательным использование схемы переполусовывания накопителя и использования импульсных септум магнитов (рисунок 1.3). Для накопителя выбрана однооборотная схема инъекции с предударом уже



Рисунок 1.2 — Схема инжекционного комплекса ВЭПП-5 (без каналов К-500)

накопленного пучка. Инжекция происходит по вертикали относительно плоскости накопителя посредством септум-магнита с постоянным горизонтальным магнитным полем с дальнейшей компенсацией избыточного угла пучка горизонтальным ударом импульсного инфлектора. Система инжекции (и выпуска) частиц в накопителе-охладителе разбита на 2 части: электронную и позитронную, что обуславливается отказом от схемы переполюсовывания накопителя и последующей необходимостью движения электронов и позитронов в противоположных направлениях в вакуумной камере НО.

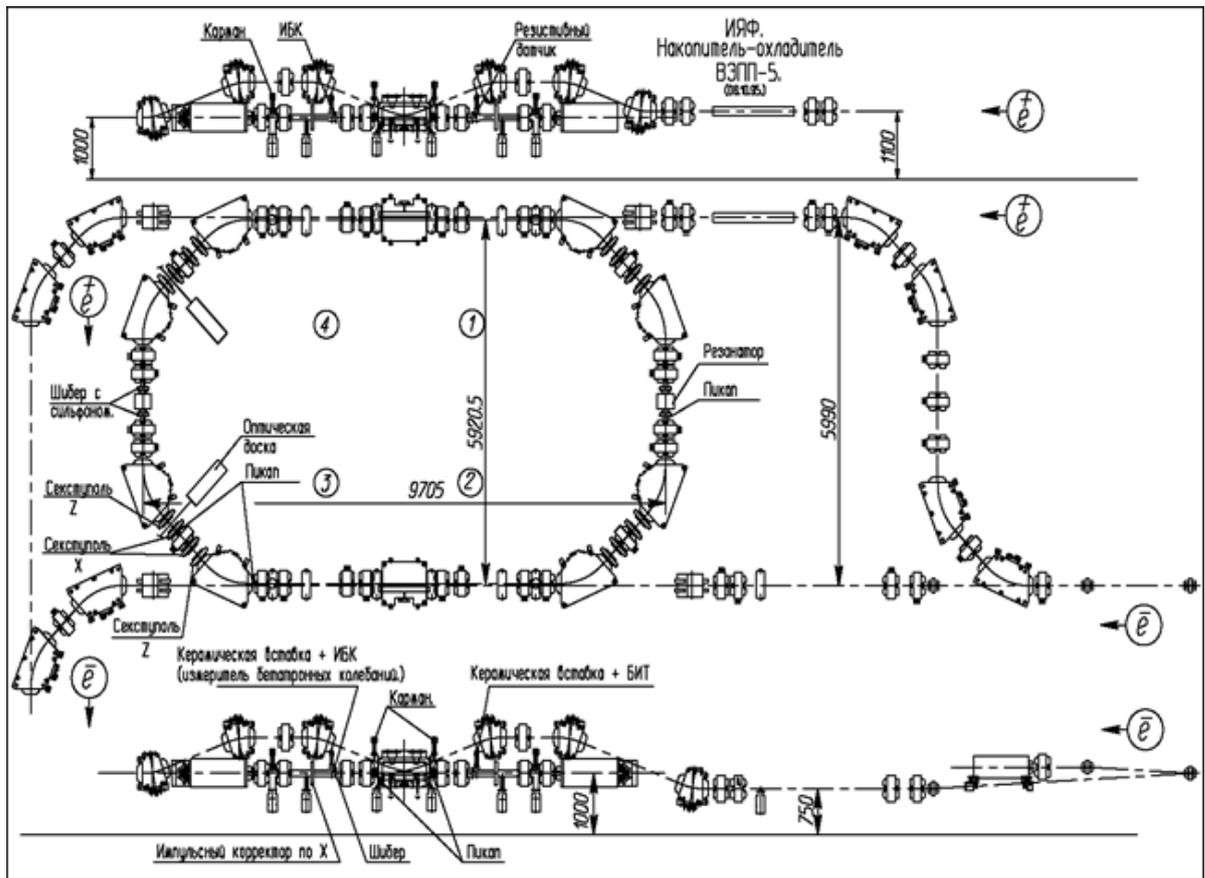


Рисунок 1.3 — Схема накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5

Таблица 1 — Параметры накопителя-охлаждителя инжекционного комплекса ВЭПП-5

Энергия	МэВ	430
Периметр	см	2740.11
Скорость накопления электронов	1/с	$2 * 10^{10}$
Скорость накопления позитронов	1/с	$2 * 10^9$
Максимальный ток пучка	мА	200
Число частиц		$1.2 * 10^{11}$
Частота обращения	МГц	10.94
Гармоника ВЧ		1
Напряжение ВЧ	кВ	9.4
Потеря энергии за оборот	кВ	2.75
Коэффициент расширения орбит		0.026
Горизонтальный адмиттанс	мрад*см	10
Вертикальный адмиттанс	мрад*см	4
Относительная ширина сепаратрисы		0.0336
Частота синхротронных колебаний		0.00032
Времена радиационного затухания:	мс	
по горизонтали		42
по вертикали		37.7
продольное движение		18
Входные параметры пучка:		
энергетический разброс	%	1.0
эмиттансы	мрад*см	1.5
среднеквадратичный длина сгустка	см	120
Выходные параметры пучка:		
энергетический разброс	%	0.07
эмиттансы (x, z)	мрад*см	$2.3 * 10^{-3}, 0.5 * 10^{-3}$
среднеквадратичный длина сгустка (при токе 40 мА)	см	22

Магнитная система накопителя-охлаждителя состоит из 8 дипольных магнитов с градиентом и углом поворота 45 градусов, 28 магнитных квадрупольных линз, 16 секступольных и 64 слаботочных корректоров, выполненных в виде витков дипольной коррекции в поворотных и квадрупольных магнитах и

витков квадрупольной коррекции в квадрупольных линзах. Расположение элементов магнитной системы выбрано таким, чтобы структура накопителя была зеркально-симметричной относительно двух взаимно-перпендикулярных осей, разбиваясь на 4 квадранта. Проектные оптические функции одного квадранта показаны на рисунок 1.4.

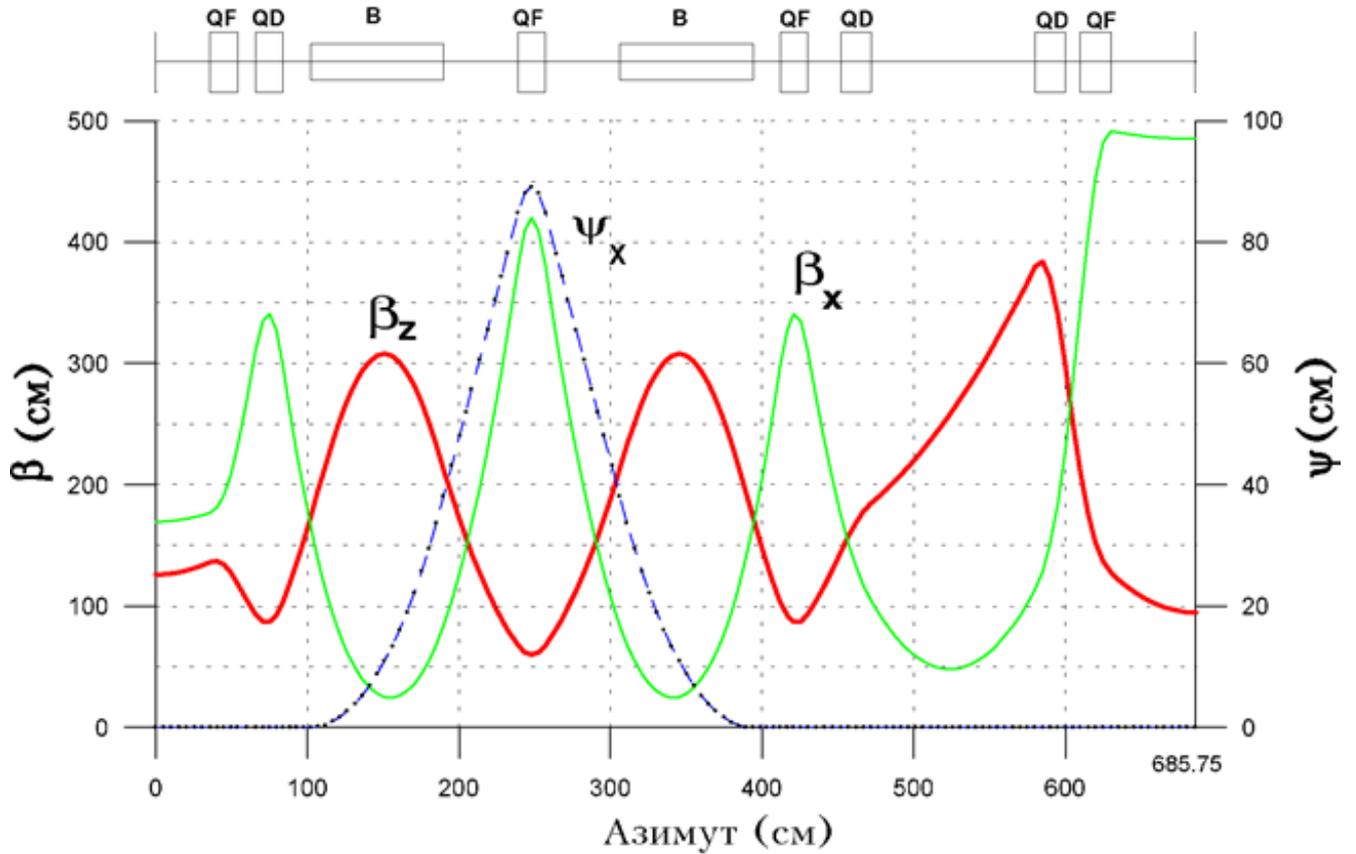


Рисунок 1.4 — Электронно-оптические функции одного квадранта накопителя-охлаждителя

Глава 2. Теоретическое описание изучаемых процессов и используемых методов

2.1 *Wake*-поля и импедансы связи

Определение *wake*-поля и импеданса связи

Картина распределения электромагнитных полей, созданных движущейся в свободном пространстве заряженной частицей, будет отличаться от распределения электромагнитных полей, источником которых является частица, движущаяся в вакуумной камере ускорителя. Разница заключается в необходимости выполнения граничных условий, которые появляются при рассмотрении решения уравнений Максвелла (2.1) вблизи металлической стенки вакуумной камеры.

$$\begin{aligned}
 \operatorname{div} \vec{E} &= 4\pi\rho, \\
 \operatorname{div} \vec{B} &= 0, \\
 \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\
 \operatorname{rot} \vec{B} &= \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}.
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Особый интерес представляет действие этих индуцированных полей на частицы, следующие за возбудителем. Для определенности будем рассматривать случай действия полей заряженного сгустка на пробную частицу, движущуюся вдоль оси цилиндрической вакуумной камеры, где нет других источников полей, кроме самого заряженного короткого кольцевого сгустка с радиусом a .

Действующая на пробную частицу, движущуюся со скоростью света c и имеющую заряд e , сила Лоренца покомпонентно будет выражаться следующим образом (2.2):

$$\begin{aligned}
 F_{\parallel} &= eE_s, \\
 F_{\theta} &= e(E_{\theta} + B_r), \\
 F_r &= e(E_r - B_{\theta}).
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Покомпонентно, в цилиндрической системе координат, уравнения Максвелла (2.1) принимают вид (2.3):

$$\begin{aligned}
\frac{1}{r} \frac{\partial(rE_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial E_s}{\partial s} &= 4\pi\rho, \\
\frac{1}{r} \frac{\partial B_s}{\partial \theta} - \frac{\partial B_\theta}{\partial s} - \frac{1}{c} \frac{\partial E_r}{\partial t} &= \frac{4\pi}{c} j_r, \\
\frac{\partial B_r}{\partial s} - \frac{\partial B_s}{\partial r} - \frac{1}{c} \frac{\partial E_\theta}{\partial t} &= \frac{4\pi}{c} j_\theta, \\
\frac{1}{r} \frac{\partial(rB_\theta)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial B_r}{\partial \theta} - \frac{1}{c} \frac{\partial E_s}{\partial t} &= \frac{4\pi}{c} j_s, \\
\frac{1}{r} \frac{\partial(rB_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial B_s}{\partial s} &= 0, \\
\frac{1}{r} \frac{\partial E_s}{\partial \theta} - \frac{\partial E_\theta}{\partial s} + \frac{1}{c} \frac{\partial B_r}{\partial t} &= 0, \\
\frac{\partial E_r}{\partial s} - \frac{\partial E_s}{\partial r} + \frac{1}{c} \frac{\partial B_\theta}{\partial t} &= 0, \\
\frac{1}{r} \frac{\partial(rE_\theta)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \theta} + \frac{1}{c} \frac{\partial B_s}{\partial t} &= 0.
\end{aligned} \tag{2.3}$$

При условии $j_r = j_\theta = 0$ и $j_s = c\rho$ можно получить из (2.2) и (2.3) следующее соотношение для проекций силы Лоренца в области внутри вакуумной камеры:

$$\begin{aligned}
-\frac{e}{r} \frac{\partial B_s}{\partial \theta} &= \frac{\partial F_r}{\partial s} = \frac{\partial F_\parallel}{\partial r}, \\
e \frac{\partial B_s}{\partial r} &= \frac{\partial F_\theta}{\partial s} = \frac{1}{c} \frac{\partial F_\parallel}{\partial \theta}, \\
\frac{1}{r} \frac{\partial(rE_r)}{\partial r} &= -\frac{\partial F_\theta}{\partial \theta}, \\
\frac{1}{r} \frac{\partial(rE_\theta)}{\partial r} &= \frac{\partial F_r}{\partial \theta}.
\end{aligned} \tag{2.4}$$

С учетом аксиальной симметрией задачи, плотность заряда ρ и тока \vec{j} пучка может быть представлена через разложение по формуле мультипольных моментов,

$$\begin{aligned}
\rho &= \sum_{m=0}^{\infty} \rho_m, \\
\vec{j} &= \sum_{m=0}^{\infty} \vec{j}_m,
\end{aligned} \tag{2.5}$$

где распределение m -го момента задается выражениями:

$$\begin{aligned}
\rho_m &= \frac{I_m}{\pi a^{m+1}(1+\delta_{m0})} \delta(s-ct) \delta(r-a) \cos m\theta, \\
\vec{j} &= c\rho_m \hat{s},
\end{aligned} \tag{2.6}$$

в которых $\delta_{m0} = 1$ при $m = 0$, $\delta_{m0} = 0$ если $m \neq 0$. В уравнении (2.6) заряд представлен в виде бесконечного тонкого кольца радиуса a с угловым распределением плотности частиц, подчиняющихся закону $\cos m\theta$. Величина

I_m представляет из себя m -й мультипольный момент в распределении частиц пучка, I_0 - суть заряд пучка q . Отсюда получается, что F_{\parallel} и F_r пропорциональны $\cos m\theta$, а F_{θ} и B_s - $\sin m\theta$.

Тогда суммарный эффект влияния наведенных пучком полей на пробную частицу можно определить интегрируя действующую силу по расстоянию (L), большому, чем характерные размеры структур вакуумной камеры. Учитывая уравнения (2.4), итоговый ответ принимает вид:

$$\begin{aligned} \int_{-L/2}^{L/2} F_{\perp} ds &= -eI_m W_m(s) m r^{m-1} (\hat{r} \cos m\theta - \hat{\theta} \sin m\theta), \\ \int_{-L/2}^{L/2} F_{\parallel} ds &= -eI_m W'_m(s) r^m \cos m\theta, \\ \int_{-L/2}^{L/2} B_s ds &= -eI_m W'_m(s) r^m \sin m\theta. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Как было сказано выше, наличие вакуумной камеры требует выполнения граничных условий электромагнитных полей, индуцированных пучком. Итоговый вид функции $W(z)$ может быть определен только после постановки граничных условий решаемой задачи, которые, в свою очередь, зависят от реальной геометрии вакуумной камеры ускорителя. Функцию $W(z)$ называют *wake*-функцией. Она обеспечивает выполнение граничных условий, описывает отклик вакуумной камеры на возбуждение, оказываемое пучком, имеющим распределение плотности в виде δ -функции и содержащим в себе m -ый мультипольный момент. Иногда, для удобства, $W(z)$ называют поперечной *wake*-функцией, а $W'_m(z)$ - продольной *wake*-функцией. В общем случае, *wake*-функция определяется исключительно свойствами вакуумной камеры и не зависит от параметров самого пучка заряженных частиц. По аналогии с потенциалом электрического поля, левые части первых двух уравнений в (2.7) называются *wake*-потенциалами. Также уравнения из (2.7) можно скомбинировать и получить выражение, которое иногда называют теоремой Паннофского-Венцеля "поперечный градиент продольного *wake*-потенциала равен продольному градиенту поперечного *wake*-потенциала":

$$\nabla_{\perp} \int_{-L/2}^{L/2} F_{\parallel} ds = \frac{\partial}{\partial z} \int_{-L/2}^{L/2} F_{\perp} ds. \quad (2.8)$$

Более полное описание *wake*-функции и ее свойств можно найти в [29].

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 (2.9) называется импедансом связи (продольным и поперечным соответственно). Эта величина демонстрирует меру "сопротивления" вакуумной системы прохождению через нее заряженных частиц.

$$\begin{aligned} Z_m^{\parallel}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega z/c} W'_m(z) \frac{dz}{c} \\ Z_m^{\perp}(\omega) &= i \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega z/c} W_m(z) \frac{dz}{c} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Обратное преобразование Фурье позволяет получить форму *wake*-функции, если известен импеданс (2.10).

$$\begin{aligned} W'_m(z) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega z/c} Z_m^{\parallel}(\omega) d\omega \\ W_m(z) &= \frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega z/c} Z_m^{\perp}(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (2.10)$$

В формализме импедансов связи Теорема Панофского-Венцеля принимает вид:

$$Z_m^{\parallel}(\omega) = \frac{\omega}{c} Z_m^{\perp}(\omega). \quad (2.11)$$

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

$$\frac{1}{Z_m^{\parallel}(\omega)} = \frac{1}{R_s} + \frac{i}{\omega L} - i\omega C, \quad (2.12)$$

что в итоге приводит к следующему виду импеданса (2.13):

$$Z_m^{\parallel}(\omega) = \frac{R_s}{1 + iQ \left(\frac{\omega_R}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_R} \right)}, \quad (2.13)$$

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 $W'_m(z)$:

$$W'_m(z) = \begin{cases} 0 & \text{если } z > 0, \\ \alpha R_s & \text{если } z = 0, \\ 2\alpha R_s e^{\alpha z/c} \left(\cos \frac{\bar{\omega} z}{c} + \frac{\alpha}{\bar{\omega}} \sin \frac{\bar{\omega} z}{c} \right) & \text{если } z < 0, \end{cases} \quad (2.14)$$

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

Свойства импеданса связи

1) Ввиду того, что *wake*-функция вещественна $\Re(Z_m^{\parallel}(\omega))$ и $\Im(Z_m^{\perp}(\omega))$ - четные функции ω , а $\Im(Z_m^{\parallel}(\omega))$ и $\Re(Z_m^{\perp}(\omega))$ - нечетные:

$$\begin{aligned} Z_m^{\parallel*}(\omega) &= Z_m^{\parallel}(-\omega), \\ Z_m^{\perp*}(\omega) &= -Z_m^{\perp}(-\omega). \end{aligned} \quad (2.15)$$

2) В большинстве случаев $W_m(0) = 0$, а потому:

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} \Im(Z_m^{\perp}(\omega)) d\omega &= 0, \\ \int_0^{\infty} \frac{\Im(Z_m^{\parallel}(\omega))}{\omega} d\omega &= 0. \end{aligned} \quad (2.16)$$

3) Рассматривая пучок, чей m -ый момент имеет продольное распределение $\rho(s-ct)$, нормализованное так, что $\int \rho(z) dz = I_m$, где I_m - m -ый мультипольный момент распределения заряда пучка, можно записать его потери энергии:

$$\Delta\varepsilon = - \int_{-\infty}^{\infty} \rho(z') dz' \int_{z'}^{\infty} \rho(z) W'_m(z' - z) dz. \quad (2.17)$$

Используя преобразование Фурье получаем:

$$\Delta\varepsilon = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{\rho}(\omega)|^2 \Re(Z_m^{\parallel}(\omega)) d\omega, \quad (2.18)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \rho(z) e^{-i\omega z/c} dz, \\ \rho(z) &= \frac{1}{2\pi c} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\rho}(\omega) e^{i\omega z/c} d\omega. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Видно, что только реальная часть импеданса связи вносит вклад в потери пучком энергии.

Из-за того, что пучок не может набирать энергию при взаимодействии с вакуумной камерой ускорителя, можно сделать вывод, что для любой ρ и $\tilde{\rho}$ и любой ω верно утверждение:

$$\Re(Z_m^{\parallel}) \geq 0. \quad (2.20)$$

А из теоремы Панофского-Венцеля (2.11) следует, что

$$\Re(Z_m^{\perp}(\omega)) \begin{cases} \geq 0 & \text{если } \omega > 0, \\ \leq 0 & \text{если } \omega < 0. \end{cases} \quad (2.21)$$

2.2 Удлинение сгустка за счет искажения потенциальной ВЧ-ямы наведенными полями

Для нормального распределения плотности частиц внутри сгустка со стандартным отклонением σ_z связь амплитудного значения тока I_p и среднего тока I_b задается соотношением (выражение справедливо для одного сгустка в вакуумной камере синхротрона, либо коллайдера):

$$I_p = \frac{\sqrt{2\pi}R}{\sigma_z} I_b, \quad (2.22)$$

где R – средний радиус ускорителя. Тогда зависимость тока от продольной координаты определяется формулой (σ_z – среднеквадратичный размер пучка в продольном направлении, распределение заряда внутри сгустка подчиняется нормальному распределению):

$$I(s) = I_p e^{-\frac{s^2}{2\sigma_z^2}} = \frac{\sqrt{2\pi}R}{\sigma_z} I_b e^{-\frac{s^2}{2\sigma_z^2}}. \quad (2.23)$$

Электрическое поле, возбуждаемое пучком, с характерным распределением индуктивности вакуумной камеры вдоль кольца $L(s)$ будет иметь вид (c – скорость света, s – продольная координата):

$$E(s) = \frac{dL}{ds} c \frac{dI}{ds} \approx \frac{dL}{ds} c \frac{I_p}{\sigma_z^2} s, \quad (2.24)$$

где было взято разложение $I(s)$ до первого порядка малости, поскольку эффект искажения потенциальной ямы, в основном, сказывается на центре сгустка.

Интегрируя $E(s)$ по всей длине кольца можно получить выражение, соответствующее добавочному напряжению V_{in} к ВЧ-системе:

$$V_{in} = -LI_p c \frac{s}{\sigma_z^2} = -\frac{I_p R \omega_0 L s}{\sigma_z^2} = \frac{\sqrt{2\pi} R^2}{\sigma_z^3} I_b * \mathfrak{S} \left(\frac{Z_{||}}{n} \right) s, \quad (2.25)$$

где $\mathfrak{S} \left(\frac{Z_{||}}{n} \right) = \omega_0 L$ – нормализованный продольный импеданс вакуумной камеры.

Раскладывая до первого порядка малости выражение для напряжения ВЧ-системы $V(\varphi) = V_0(\sin \varphi_s + \cos \varphi_s * \varphi)$, где φ_s – равновесная синхротронная фаза и учитывая связь продольной координаты s и фазы ВЧ-колебаний φ ($s = -\frac{R}{h} \varphi$) получаем полное значение напряжения, действующего на пучок:

$$V(\varphi) = V_0 \sin \varphi_s + V_0 \cos \varphi_s \left[1 + \frac{\sqrt{2\pi} I_b}{h V_0 \cos \varphi_s} \mathfrak{S} \left(\frac{Z_{||}}{n} \right) \left(\frac{R}{\sigma_z} \right)^3 \right] \varphi. \quad (2.26)$$

Вышеописанный эффект ведет к уменьшению глубины ВЧ-ямы, в которой находится пучок, что впоследствии приводит к уменьшению синхротронной частоты электронного сгустка и росту продольного размера. Учитывая тот факт, что частота синхротронных колебаний $\omega_s^2 \sim \left| \frac{dV}{d\varphi} \right|$, получаем:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\omega_s}{\omega_{s0}} \right)^2 &= \left(\frac{\sigma_{s0}}{\sigma_s} \right)^2 = 1 + \frac{\sqrt{2\pi} I_b}{h V_0 \cos \varphi_s} \mathfrak{S} \left(\frac{Z_{||}}{n} \right) \left(\frac{R}{\sigma_z} \right)^3 = \\ &= 1 - \frac{e}{\sqrt{2\pi}} \frac{\alpha_p I_b}{E Q_{s0}^2} \mathfrak{S} \left(\frac{Z_{||}}{n} \right) \left(\frac{R}{\sigma_z} \right)^3, \end{aligned} \quad (2.27)$$

где 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: $x_p = D_x \frac{\delta p}{p}$), $Q_{s0} = \frac{\omega_{s0}}{\omega_0}$ – невозмущенная синхротронная частота. Отсюда получается кубическое уравнение, описывающее удлинение сгустка [8]:

$$\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{s0}} \right)^3 - \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{s0}} \right) - \frac{e}{\sqrt{2\pi}} \frac{\alpha_p I_b}{E Q_{s0}^2} \mathfrak{S} \left(\frac{Z_{||}}{n} \right) \left(\frac{R}{\sigma_{s0}} \right)^3 = 0. \quad (2.28)$$

При этом происходит также смещение фазы синхротронных колебаний пучка на величину [30], где R_a – активное сопротивление импеданса на низких частотах:

$$\Delta \varphi = \frac{I_b}{V_0 \cos \varphi_s} \frac{R_a}{\omega_0 \sigma_{s0}}. \quad (2.29)$$

Следует отметить, что данное рассмотрение эффекта искажения формы потенциальной ямы неприменимо в случае очень коротких сгустков ($\sigma_z \ll b$, где b – поперечный размер вакуумной камеры), когда вклад высокочастотных резонансных составляющих импеданса становится преобладающим.

2.3 Изменение формы пучка за счет искажения потенциальной ВЧ-ямы наведенными полями

Уравнение Власова описывает эволюцию функции распределения взаимодействия частиц. Пусть уравнение движения частицы задаются обобщенными координатой q и импульсом p [29]:

$$\begin{aligned}\dot{q} &= f(q, p, t), \\ \dot{p} &= g(q, p, t).\end{aligned}\tag{2.30}$$

(q, p) задают фазовое пространство для частиц, где движение частицы (в консервативной системе, т.е. в которой все действующие на неё внешние и внутренние непотенциальные силы не совершают работы, а все потенциальные силы стационарны) полностью определяются начальными условиями (q_0, p_0) в начальный момент времени t_0 . Частица, имеющая одинаковые начальные условия с какой-либо еще, имеет ровно такую же траекторию в фазовом пространстве. Учитывая консервативность системы, величины f и g задаются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}f &= \frac{\partial H}{\partial p}, \\ g &= -\frac{\partial H}{\partial q},\end{aligned}\tag{2.31}$$

где H - гамильтониан системы. Отсюда следует, что

$$\frac{\partial f}{\partial q} + \frac{\partial g}{\partial p} = 0.\tag{2.32}$$

Условие (2.32) приводит к сохранению во времени фазового объема, занятого частицами, вне зависимости от изменения формы распределения частиц в фазовом пространстве. В случае неконсервативных сил левая часть выражения (2.32) не будет равна нулю, а будет задавать скорость изменения фазового объема.

Выберем в фазовом пространстве прямоугольник $ABCD$, со сторонами Δp и Δq , такой, чтобы, с одной стороны, площадь прямоугольника была достаточно малой, для того, чтобы соседний прямоугольник с такими же сторонами

содержал примерно равное количество частиц, а с другой, достаточно большой, чтобы в нем заключалось хотя бы несколько частиц. Проследим его изменение за время dt . Если начальные координаты вершин прямоугольника задаются соотношениями:

$$\begin{aligned} A(p, q), \\ B(q + \Delta q, p), \\ C(q + \Delta q, p + \Delta p), \\ D(q, p + \Delta p), \end{aligned} \quad (2.33)$$

то конечные координаты имеют вид:

$$\begin{aligned} A'(p + f(q, p, t)dt, q + g(q, p, t)dt), \\ B'(q + \Delta q + f(q + \Delta q, p, t)dt, p + g(q + \Delta q, p, t)dt), \\ C'(q + \Delta q + f(q + \Delta q, p + \Delta p, t)dt, p + \Delta p + g(q + \Delta q, p + \Delta p, t)dt), \\ D'(q + f(q, p + \Delta p, t)dt, p + \Delta p + g(q, p + \Delta p, t)dt). \end{aligned} \quad (2.34)$$

Пусть $\psi(q, p, t)$ - функция распределения частиц, нормированная на суммарное их количество. Тогда условие сохранения числа частиц в выбранной нами области дает:

$$\psi(q, p, t) \times \text{area}(ABCD) = \psi(q + fdt, p + gdt, t + dt) \times \text{area}(A'B'C'D'). \quad (2.35)$$

Условие (2.32) гарантирует сохранение выбранного фазового объема консервативной системы:

$$\begin{aligned} \text{area}(A'B'C'D') = |A'\vec{B}' \times A'\vec{D}'| = \Delta p \Delta q \left[1 + \left(\frac{\partial f}{\partial q} + \frac{\partial g}{\partial p} \right) dt \right] = \\ \Delta p \Delta q = \text{area}(ABCD). \end{aligned} \quad (2.36)$$

В итоге из (2.35) с условием (2.36) получается уравнение Власова (здесь использовано разложение $\psi(p, q, t)$ до первого порядка малости):

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + f \frac{\partial \psi}{\partial q} + g \frac{\partial \psi}{\partial p} = 0. \quad (2.37)$$

Используя свойство (2.31) стационарное решение уравнения Власова можно записать в следующем виде:

$$\psi = F(H(q, p)), \quad (2.38)$$

где F - любая функция. Если предположить, что в конечном счете пучок достигнет равновесного состояния с распределением Больцмана в фазовом

пространстве синхротронных колебаний, то $F \sim e^{-H/T}$, где T - продольная температура пучка [31]. Гамильтониан синхротронных колебаний, учитывающий действие наведенных полей:

$$H = \frac{\Delta\omega^2}{2} - \frac{(\omega_{s0}^2)\varphi^2}{2} + \omega_0 \frac{Ne^2\alpha_p}{Cp} \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{-iZ_n}{n} \rho_n e^{in\varphi}, \quad (2.39)$$

где $\Delta\omega = \frac{\omega_s\alpha_p}{pv} \Delta E$, $(\omega_s^2) = \omega_0^2 \frac{eV_0 \sin \varphi_s \alpha_p}{2\pi pv}$, v - скорость частицы. Тогда равновесная функция распределения ($\sigma_\Delta = \omega_0\sigma_0$):

$$F \sim \exp\left(-\frac{H}{2\sigma_\Delta^2}\right) = \exp\left(-\frac{\Delta\omega^2}{2\sigma_\Delta^2} - \frac{\varphi^2}{2\sigma_{s0}^2} - \frac{Ne^2\omega_0}{eV_0 \sin \varphi_s \sigma_{s0}^2} \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{-iZ_n}{n} \rho_n e^{in\varphi}\right), \quad (2.40)$$

где σ_Δ - равновесный разброс частот пучка, который по предположению не зависит от N . Интегрирование F по $\Delta\omega$ приводит к трансцендентному уравнению на плотность пучка, называемому уравнением Хайссинского:

$$\rho(\varphi) = \rho_0 \exp\left(-\frac{\varphi^2}{2\sigma_{s0}^2} - \int_{-\infty}^{\infty} d\varphi' \omega(\varphi' - \varphi) \rho(\varphi')\right), \quad (2.41)$$

$$\omega(\varphi) = \frac{Ne^2\omega_0}{eV_0 \sin \varphi_s \sigma_{s0}^2} \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{-iZ_n}{n} e^{in\varphi}.$$

Один из примеров решения этого уравнения был найден А. Ружжеро [32], который получил его, предположив взаимодействие пучка с чисто активным импедансом $Z(n) = Z_0$. Тогда $\omega(\varphi) = \frac{Ne^2\omega_0\pi Z_0 \text{sgn}(\varphi)}{eV_0 \sin \varphi_s \sigma_{s0}^2}$, а решение выглядит следующим образом ($x = \varphi/\sigma_{s0}$):

$$\rho(x) = \frac{\exp(-x^2/2)}{\sqrt{2\pi}\zeta\sigma_{s0}(\coth(\zeta) + \Upsilon(x/\sqrt{2}))}, \quad (2.42)$$

$\zeta = \frac{Ne^2\omega_0\pi Z_0\alpha_p}{Q_{s0}^2 pv}$, а $\Upsilon(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ - интеграл вероятности (функция ошибки).

При малом действии наведенных полей ($\zeta \ll 1$) полученное решение близко к распределению Гаусса, а увеличение длины пучка мало:

$$\rho(x) = \frac{e^{-x^2/2}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{s0}} [1 - \zeta\Upsilon(x/\sqrt{2})]. \quad (2.43)$$

Эффект удлинения существенно проявляется в обратном случае, при $\zeta \gg 1$, что означает сильное действие *wake*-полей [31], где распределение $\rho(x)$

принимает близкую к треугольнику форму:

$$\rho(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x > 0, \\ \frac{|x|}{2\sigma_{s0}\zeta} \frac{Y(x)}{1+Y(x)(1-1/x^2)}, & \text{если } x < 0, \end{cases} \quad (2.44)$$

$$Y(x) = \frac{\exp(-x^2/2+2\zeta)}{\sqrt{2\pi}|x|}.$$

2.4 Сингулярное разложение матриц (*SVD*) и коррекция положения пучка в ускорителе

Сингулярное разложение - это декомпозиция вещественной матрицы, с целью ее приведения к каноническому виду. Возможность разложения матрицы базируется на следующей теореме.

Пусть M - прямоугольная матрица $m \times n$. Существует такие ортонормированные базисы $\{e^k\}_{k=1}^n \subset \mathbb{C}^n$, $\{q^k\}_{k=1}^m \subset \mathbb{C}^m$ и положительные числа $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r$, $0 \leq r \leq \min\{m, n\}$, что:

$$Me^k = \begin{cases} 0, & \text{если } k > r, \\ \sigma_k q^k, & \text{если } k \leq r. \end{cases} \quad (2.45)$$

Числа $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r$ называют *сингулярными числами* матрицы M . Базисы $\{e^k\}_{k=1}^n$ и $\{q^k\}_{k=1}^m$ - *сингулярными базисами* матрицы.

Доказательство представленной теоремы можно найти в [33].

В матричном виде равенство (2.45) можно записать в виде

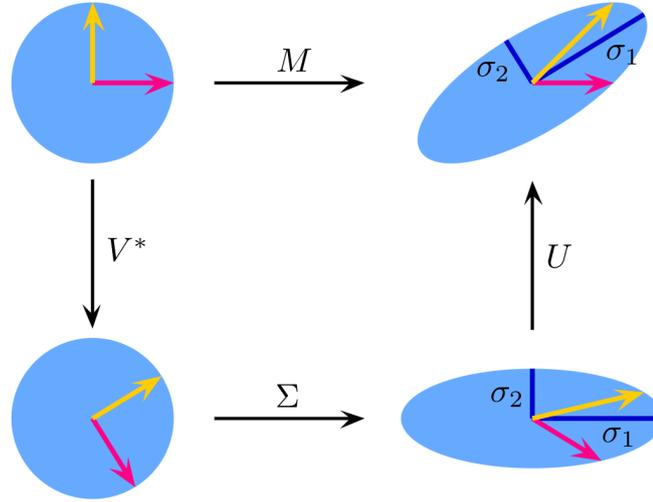
$$M = U\Sigma V^*. \quad (2.46)$$

Здесь U - матрица, столбцами которой служат векторы $\{q^k\}_{k=1}^m$; V - матрица, столбцами которой является векторы $\{e^k\}_{k=1}^n$; Σ - матрица, у которой главный минор порядка r диагональный, где и расположены сингулярные числа матрицы M , а все остальные элементы тождественно равны нулю.

Геометрический смысл сингулярного разложения - это разложение линейного оператора (представленного матрицей M) на последовательно выполняемые операторы вращения и растяжения. Сами же компоненты сингулярного разложения показывают геометрические изменения при отображении оператором M векторов из некоторого векторного пространства в себя (квадратная

матрица) либо в векторное пространство иной размерности (прямоугольная матрица).

Рисунок 2.1 демонстрирует геометрический смысл сингулярного разложения в двумерном случае, когда оператор, задаваемый матрицей V^* , выполнил вращение, Σ - растяжение и U - еще одно вращение.



$$M = U \cdot \Sigma \cdot V^*$$

Рисунок 2.1 — Геометрическая интерпретация сингулярного разложения матрицы в двумерном случае

Имея сингулярное разложение матрицы M в виде (2.46), можно найти псевдообратную матрицу M^+ по формуле:

$$M^+ = V \Sigma^{-1} U^*, \quad (2.47)$$

где Σ^{-1} - псевдообратная матрица к Σ , полученная заменой каждого диагонального элемента σ_i на обратный σ_i^{-1} , а U^* - транспонированная матрица к U .

Пусть в кольцевом ускорителе имеются m датчиков положения пучка (ДПП) и n корректоров для коррекции положения пучка, i -й датчик имеет бета-функцию и набег бетатронной фазы (β_i, ψ_i) , а j -й корректор - (β_{cj}, ψ_{cj}) . Тогда матричные элементы $M^{i,j}$ матрицы отклика M задаются следующим выражением:

$$M^{i,j} = \frac{\sqrt{\beta_i \beta_{cj}}}{2 \sin \pi \nu} \cos (|\psi_i - \psi_{cj}| - \pi \nu), \quad (2.48)$$

где ν - это частота бетатронных колебаний. Экспериментально матрицу отклика M можно измерить отслеживая изменение координаты пучка на каждом

из датчиков положения при варьировании токов дипольных корректоров ускорителя [34].

Пусть Δx - вектор разницы координат пучка на каждом из ДПП, который определяется отличием оптимальных координат пучка (x_r) для работы ускорителя и текущих (x_c):

$$\Delta x = x_r - x_c. \quad (2.49)$$

Для того, чтобы совместить текущие положения пучка с оптимальными требуется определить вектор изменения токов дипольных корректоров $\Delta\theta$, удовлетворяющих уравнению $M \cdot \Delta\theta = \Delta x$. Описанный выше *SVD* формализм дает ответ:

$$\Delta\theta = M^+ \Delta x. \quad (2.50)$$

В данном контексте сингулярные числа задают связь между трансформированным пространством ДПП $\Delta x^t = U^* \cdot \Delta x$ и трансформированным пространством корректоров $\Delta\theta^t = V^* \cdot \Delta\theta$ (как было выше отмечено, операторы V^* и U^* выполняют вращение):

$$\Sigma \cdot \Delta\theta^t = \Delta x^t. \quad (2.51)$$

Слишком малые сингулярные числа задают слабую связь между координатами пучка и корректорами, вследствие чего оказывается, что для конечного изменения положения пучка может понадобиться слишком большое изменение тока корректора, которое может выйти за рамки рабочего диапазона источника тока. Для обхода подобных ситуаций проводится процедура исключения слишком малых сингулярных чисел. Такая процедура является правомерной, математически является приближением исходной матрицы отклика M другой матрицей M_a с заранее заданным, меньшим чем у M , рангом a :

$$M_a = U \Sigma_a V^*, \quad (2.52)$$

где Σ_a - матрица Σ , у которой занулили все диагональные элементы, кроме a наибольших. Теорема Эккарта-Янга [35] говорит о том, что такое приближение является наилучшим в смысле наименьшего значения Фробениусовой (евклидовой) нормы разности матриц M и M_a .

$$\|M - M_a\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |M^{i,j} - M_a^{i,j}|^2}, \quad (2.53)$$

Вследствие того, что M_a (и ее обратная M_a^+) является приближением матрицы M , то

$$\Delta\theta_a = M_a^+ \Delta x, \quad (2.54)$$

также будет являться приближением, а не точным решением $\Delta\theta$, которое задано выражением (2.50).

Вследствие этого, процесс коррекции положения пучка становится итерационным, с перерасчетом Δx и $\Delta\theta_a$ на каждом шагу, а момент окончания коррекции должен определяться моментом, когда норма вектора Δx станет меньше заданной точности коррекции ε .

2.5 Выводы к Главе 2

В данной главе дано общее теоретическое описание изучаемых в работе процессов и используемых при этом методов. Рассмотрен феномен возникновения *wake*-полей и дано их описание через т.н. импедансы связи. Уделено особое внимание влиянию этих полей на пучок, приводящее к искажению формы продольного распределения частиц пучка и его удлинению. Кроме того, в главе рассматриваются вопросы сингулярного разложения матриц применительно к коррекции положения пучка в вакуумной камере ускорителя.

Глава 3. Изучение коллективных эффектов пучка на накопителе-охладителе ВЭПП-5

3.1 Устройство диссектора

Диссектор – это электронно-оптический преобразователь, в основе которого лежит стробоскопический вариант электронно-оптической хронографии [36] (рисунок 3.1).

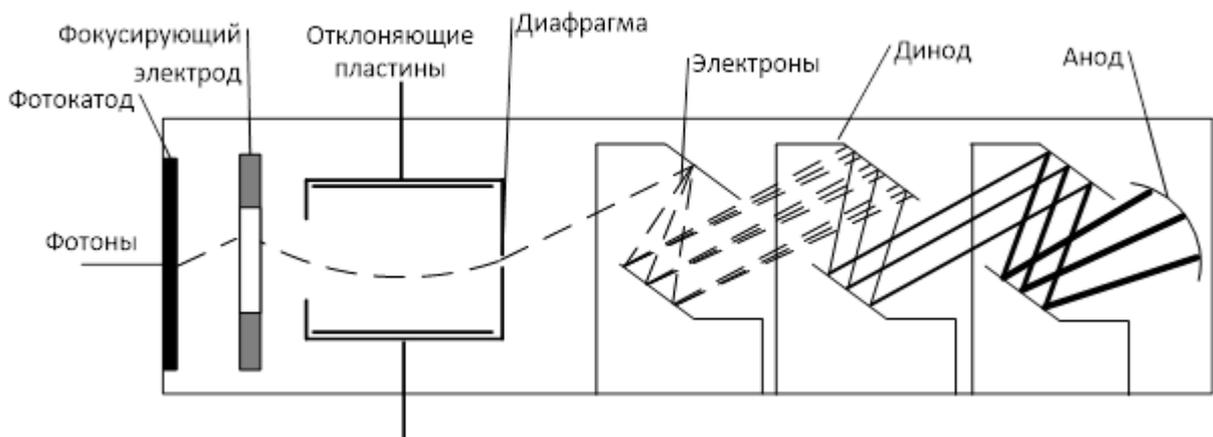


Рисунок 3.1 — Схема внутреннего устройства диссектора

На фотокатод диссектора попадает импульс синхротронного излучения (СИ), порожденный пучком, совершающим поворот в магнитном поле. Этот импульс конвертируется на фотокатод в первичный поток электронов, повторяющий временное распределение СИ. Поток электронов проходит через фокусирующий электрод, отклоняющие пластины и попадает на экран с диафрагмой. На отклоняющие пластины подаются два напряжения: пилообразное и синусоидальное. Они используются для того, чтобы развернуть пучок, тем самым преобразовать временное распределение интенсивности $I(t)$ в пространственное, на экране, $q(x)$. Пилообразное сканирующее напряжение медленно меняет фазу высокочастотного сигнала, при которой электроны проходят через щель в экране. И через несколько периодов обращения пучка частиц в синхротроне будет измерен его продольный профиль. Таким образом, за время периода сканирующего напряжения происходит измерение продольного распределения частиц пучка (рисунок 3.2).

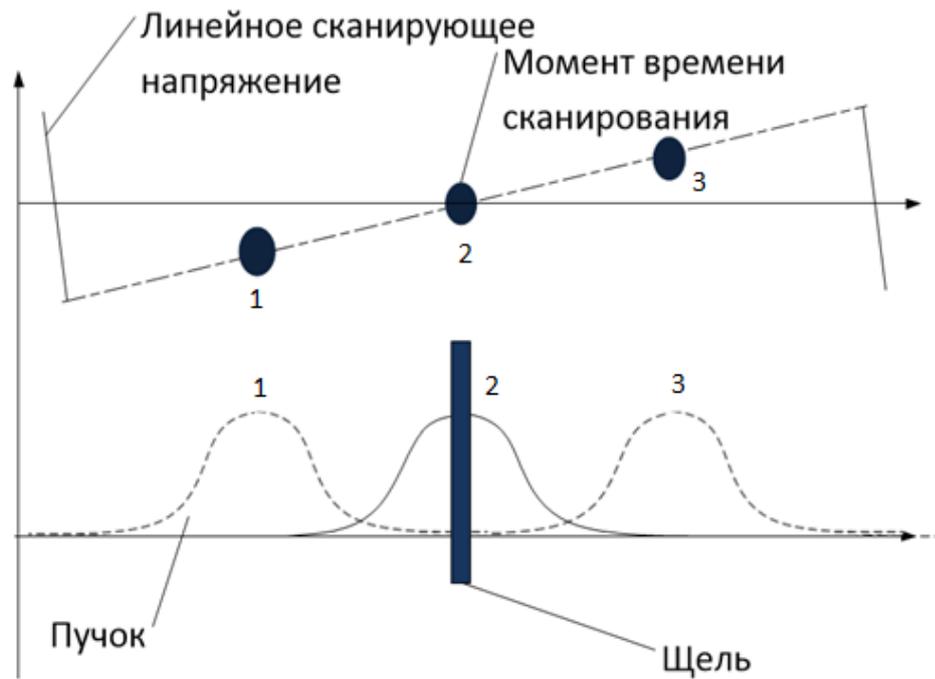


Рисунок 3.2 — Схема сканирования пучка фотоэлектронов диссектора. Вверху - зависимость пилообразного напряжения от времени. Внизу - плотность электронов на экране в три момента времени, отмеченные на верхнем рисунке и отстоящие на период обращения электронов в накопителе

Если исходный импульс синхротронного излучения стабилен, (это в свою очередь означает отсутствие каких-либо продольных (фазовых) колебаний самого пучка частиц в накопителе-охладителе), то сигнал на выходе анода умножителя полностью повторит форму исследуемого сгустка. При возникновении фазовых колебаний нарушается синхронизация времени пролета пучка и напряжения развертки, из-за чего сигнал анода фотоумножителя перестает повторять форму исходного (рисунок 3.3). Это, в свою очередь, является одним из способов регистрации колебаний пучка в продольном направлении.

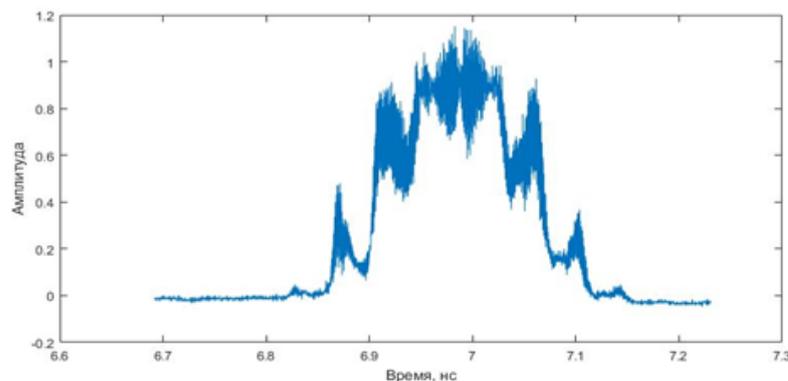


Рисунок 3.3 — Типичный вид сигнала с диссектора при наличии фазовых колебаний пучка в синхротроне

3.2 Диссектор на накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5

Диссектор используется на накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5 для продольной диагностики пучка (рисунок 3.4). Его параметры приведены в таблице 2.

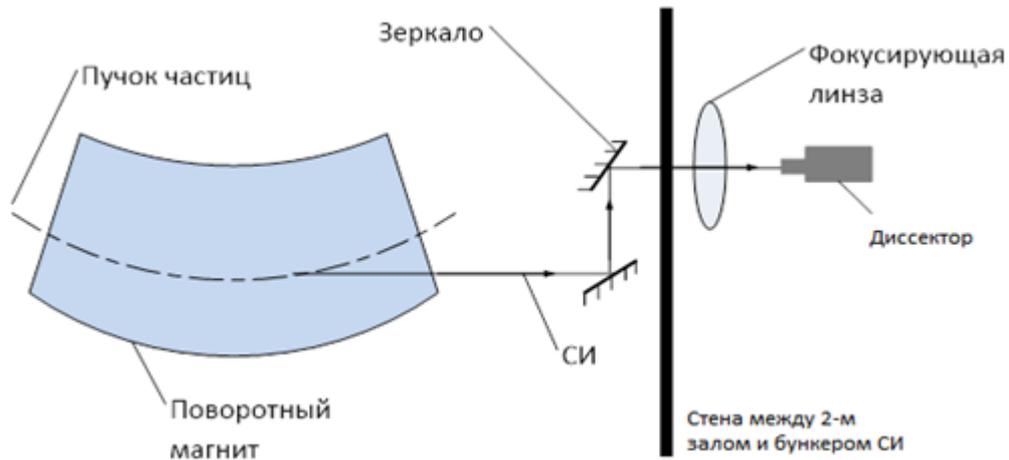


Рисунок 3.4 — Схема измерения длины пучка диссектором

С выхода блока усилителя диссектора (dissector driver) сигнал (измеренное распределение плотности частиц внутри сгустка) оцифровывается АЦП, для автоматизации работы которой используется фреймворк CXv4 [37], который основан на классической трехуровневой модели, состоящей из клиентского, серверного и аппаратного уровней. ПО диссектора, реализующее обработку полученных данных и управление ВЧ-системой диссектора работает на клиентском уровне (рисунок 3.5).

Таблица 2 — Параметры диссектора

Напряжение фотокатода, кВ	12
Напряжение сетки, кВ	10
Напряжение фокусирующего электрода, кВ	9
Напряжение ВЭУ, кВ	2
Частота ВЧ, МГц	78.6
Разрешение диссектора, пс	20

При каждом измерении продольного профиля пучка программное обеспечение диссектора производит обработку данных (их усреднение и аппроксимацию модельной функцией) и отображает результат обработки (рисунок 3.6).



Рисунок 3.5 — Схема программного обеспечения диссектора

Вся эта информация является доступной на пультовых компьютерах инъекционного комплекса.

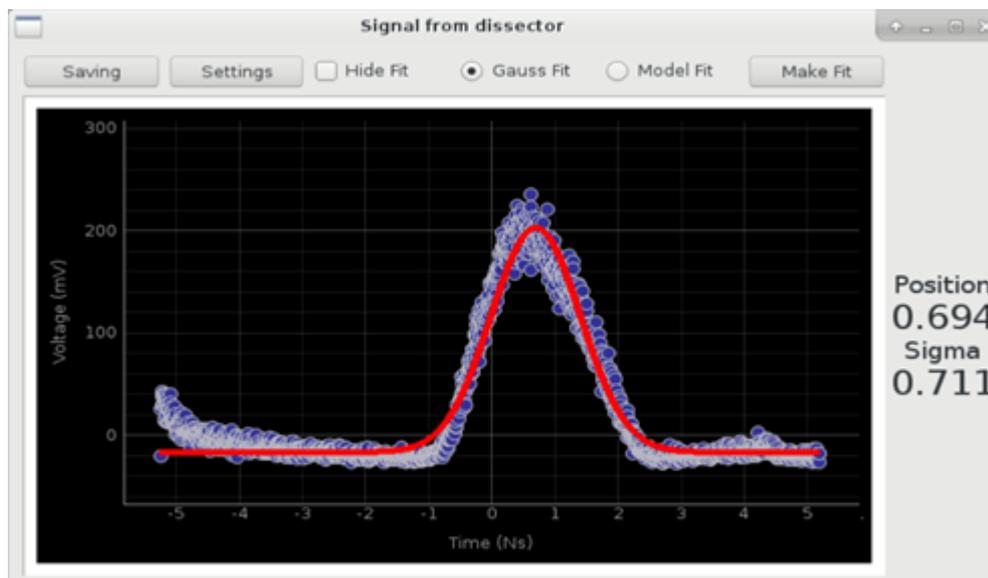


Рисунок 3.6 — Окно вывода данных программного обеспечения диссектора. Кроме отображения результатов обработки, программное обеспечение позволяет удаленно настраивать ВЧ-систему диссектора, выбирать одну из двух модельных функций аппроксимации (в зависимости от того, с какой величиной тока идут измерения) и сохранять параметры обработки и исходные массивы данных с АЦП

3.3 Результаты измерений параметров пучка с помощью диссектора

Удлинение сгустка. Был проведен ряд измерений длины пучка в зависимости от его тока и напряжения ВЧ-резонатора. Для выявления мнимой части импеданса была проанализирована зависимость длины сгустка от среднего тока (рисунок 3.7).

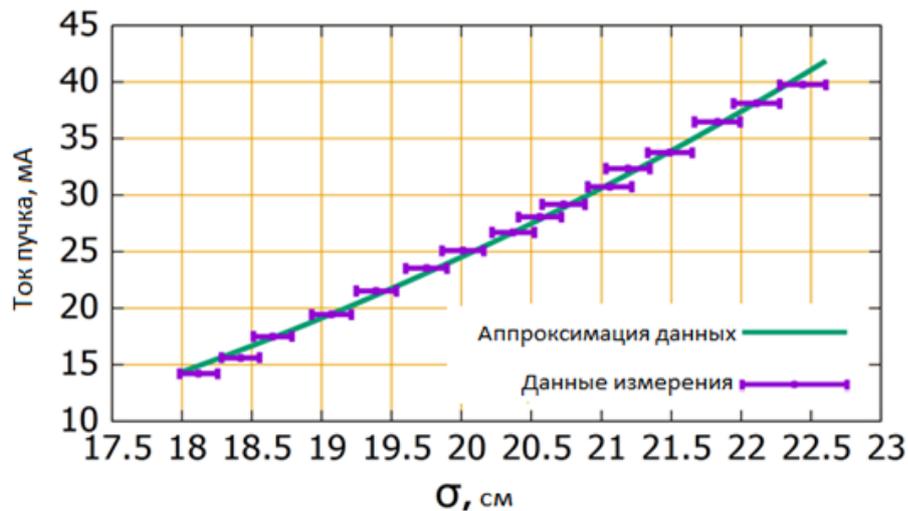


Рисунок 3.7 — Зависимость длины сгустка от среднего тока

Используя измеренные данные и проведя их аппроксимацию выражением (2.28) можно получить значение мнимой части импеданса связи накопителя:

$$\Im\left(\frac{Z_{||}}{n}\right) = 5.71 \pm 0.50 \text{ Ом.}$$

В проекте накопителя-охлаждителя оценка этого импеданса составляла величину не более 1 Ома [38]. Однако, этот расчет был проведен с резонатором 64-й гармоники. В новых же реалиях накопитель-охлаждитель работает с ферритовым резонатором 1 гармоники (с габаритами, сопоставимыми со старым резонатором) [39], что, по-видимому, и приводит к расхождению величин расчетного и измеренного импеданса.

Для выявления действительной части импеданса были произведены измерения зависимости сдвига синхронной фазы пучка от его тока. Результаты измерения представлены на рисунке 3.8.

Из формулы (2.29) выводится следующее выражение действительной части импеданса связи в зависимости от смещения фазы пучка:

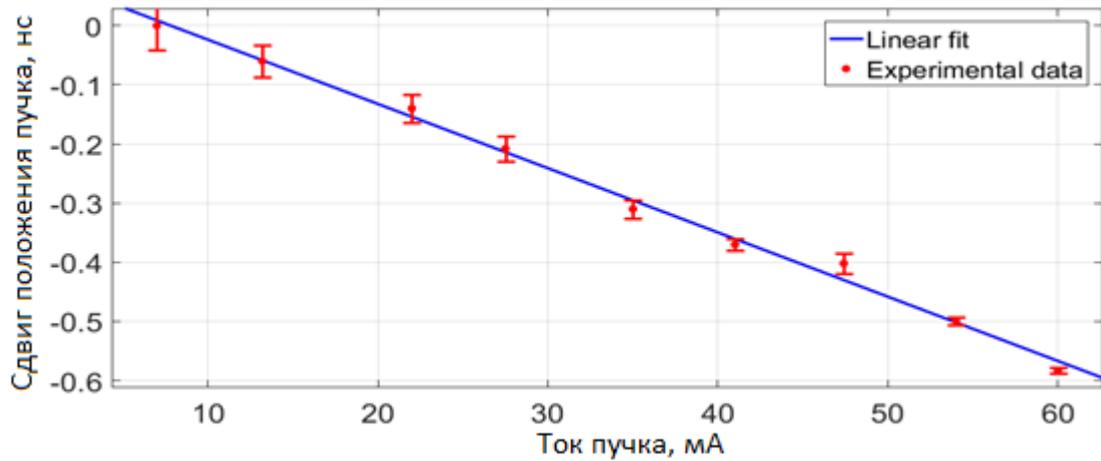


Рисунок 3.8 — Величина сдвига пучка по фазе относительно от среднего тока

$$R_a = \Delta\varphi \frac{V_{rf} \cos\varphi_s \sigma \omega_0}{I_b}. \quad (3.1)$$

Из измеренных данных рассчитывается численное значение R_a , которое равно 247 ± 7 Ом. Для построения трехмерной зависимости длины пучка от его тока и напряжения ВЧ-системы, были проведены измерения длины пучка при разных напряжениях резонатора накопителя-охлаждителя. Совместные результаты приведены на рисунке 3.9.

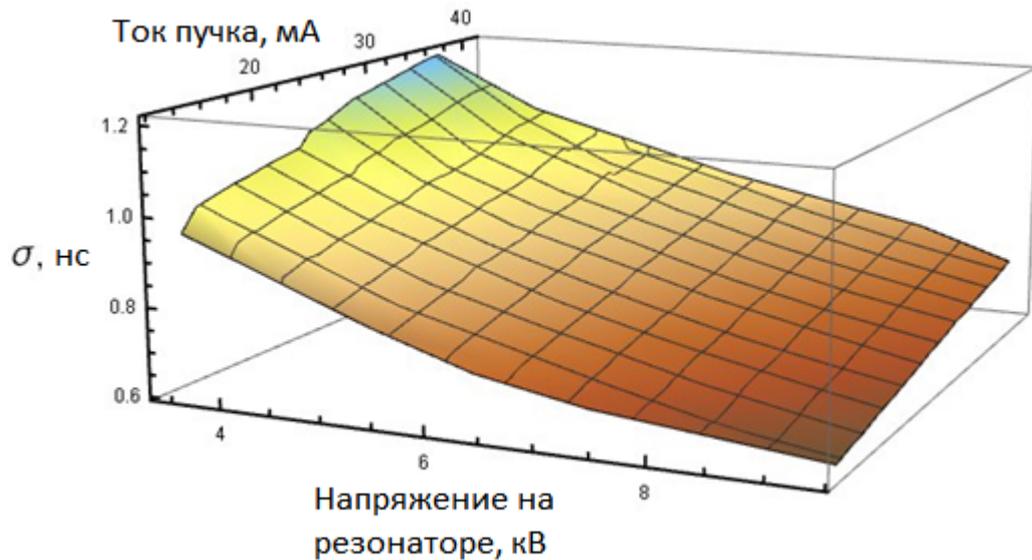


Рисунок 3.9 — Трехмерное отображение зависимости длины пучка от его тока и напряжения ВЧ-системы

Искажение формы пучка. При относительно низких токах форма продольного распределения частиц хорошо описывается нормальным распределением (рисунок 3.10), где среднеквадратичное отклонение задает характерный размер сгустка. При токе пучка накопителя-охладителя около 50 мА начинает происходить искажение формы пучка, и его аппроксимация распределением Гаусса становится некорректной (рисунки 3.11, 3.12).

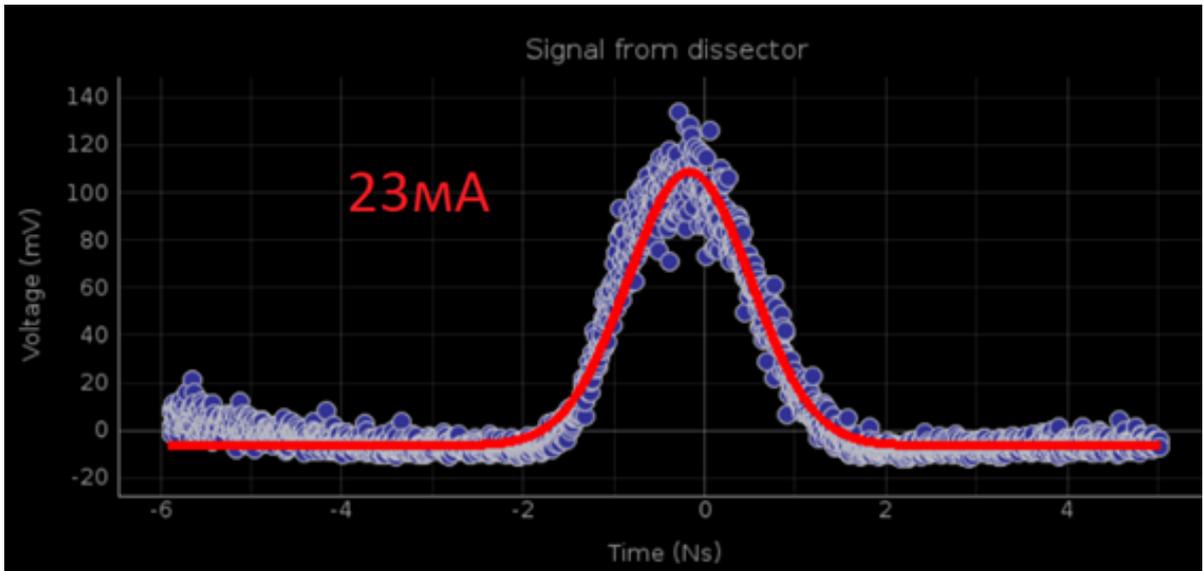


Рисунок 3.10 — Форма продольного распределения частиц в пучке, измеренная диссектором (красным обозначена аппроксимация экспериментальных данных нормальным распределением для тока пучка 23 мА)

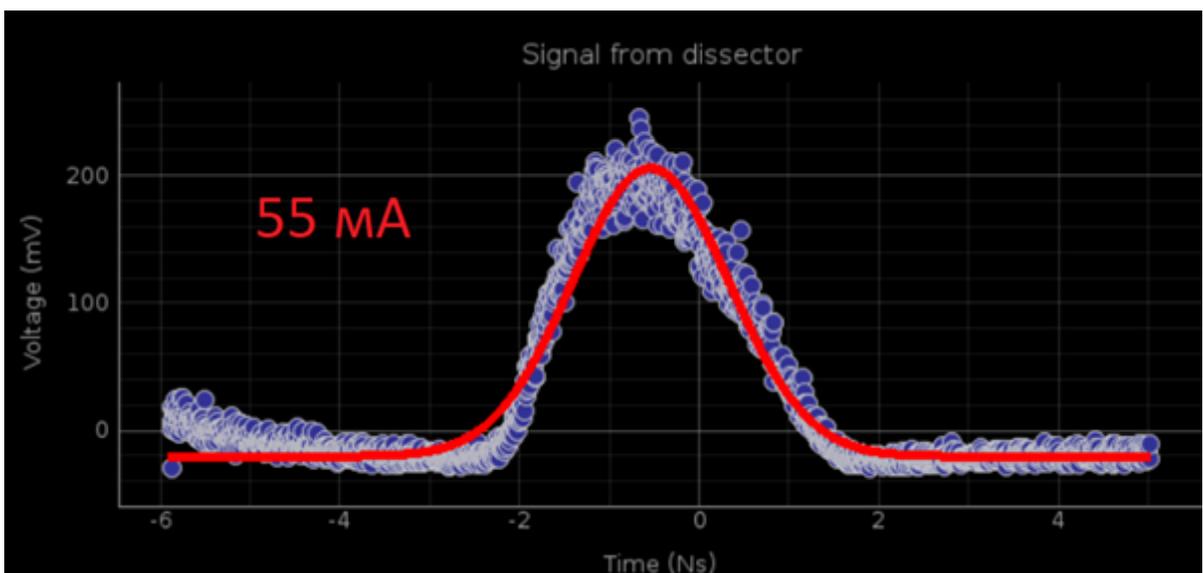


Рисунок 3.11 — Форма продольного распределения частиц в пучке, измеренная диссектором (красным обозначена аппроксимация экспериментальных данных нормальным распределением для тока пучка 55 мА)

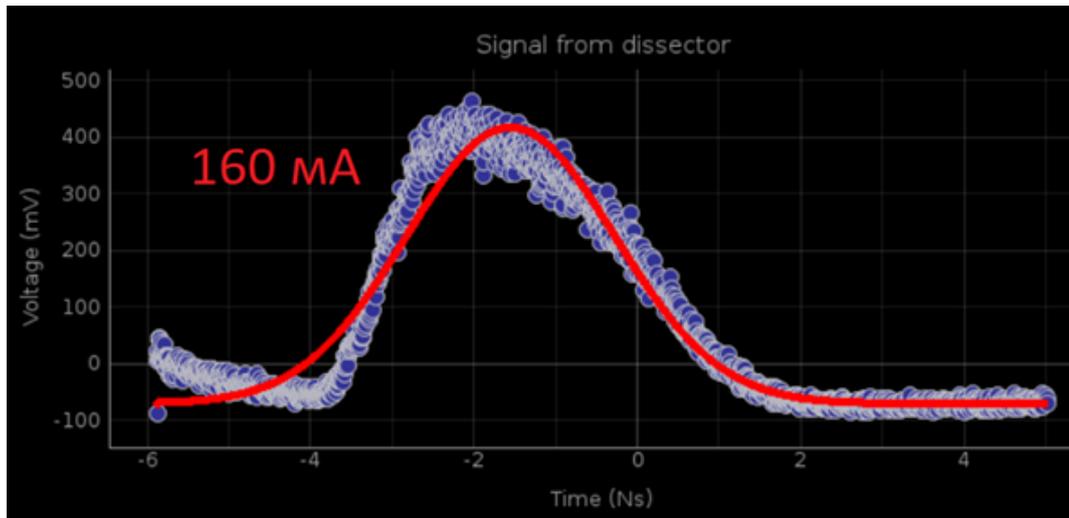


Рисунок 3.12 — Форма продольного распределения частиц в пучке, измеренная диссектором (красным обозначена аппроксимация экспериментальных данных нормальным распределением для тока пучка 160 мА)

Для аппроксимации данных при искажении профиля пучка необходимо использовать модель (2.42). Программное обеспечение диссектора позволяет произвести это (рисунок 3.13).

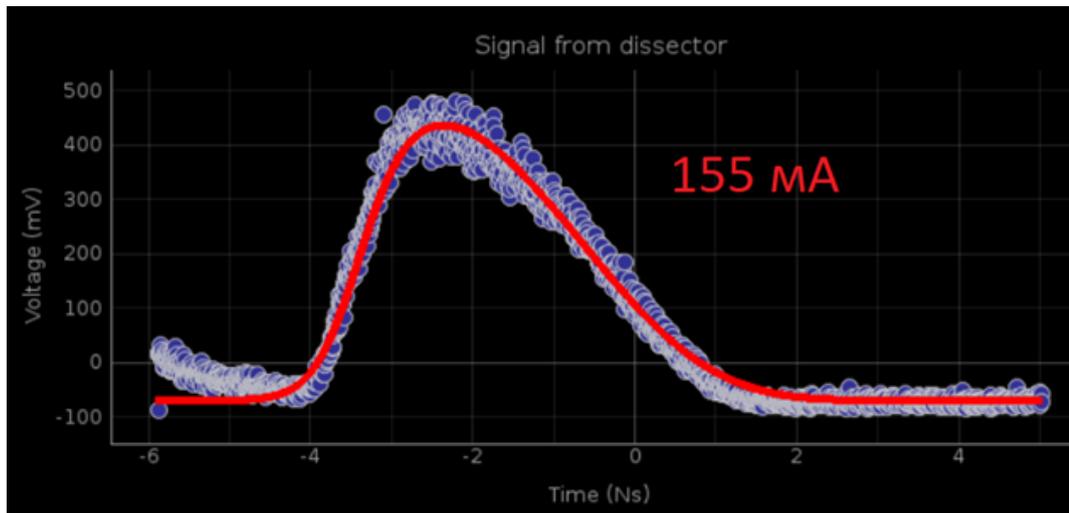


Рисунок 3.13 — Форма продольного распределения частиц в пучке для тока 155 мА, измеренная диссектором. Аппроксимация выполнена модельной функцией (2.42)

Помимо искажения формы распределения частиц внутри пучка также происходит и смещение синхронной фазы (рисунок 3.8). При работе с большими токами на накопителе-охладителе с резонатором первой гармоники не было отмечено возникновение различного рода неустойчивостей, которые приводили бы к гибели пучка вследствие коллективных эффектов. Однако, стоит учитывать факт значительного удлинения сгустка, который, в свою очередь,

может задавать порог тока, перепускаемого из НО потребителям. Вклад вносят следующие два фактора.

Во-первых, при токе порядка 150 мА длина сгустка по основанию составляет около 5 нс, длина же сепаратрисы БЭП с резонатором 180 МГц \approx 5.5 нс. Как следствие, возникает ограничение на максимальный ток перепуска в БЭП масштаба 150 мА. При перепуске большего значения тока неизбежно возникнут дополнительные потери, связанные с тем, что длина пучка становится больше длины сепаратрисы бустера.

Во-вторых, форма импульса дефлекторов такова, что на ней отсутствует так называемая «полочка». Это означает, что если настроить режим выпуска на центр продольного распределения плотности частиц пучка, то голова и хвост распределения получат отличный от центра удар электромагнитной волны, что задаст им неверный угол выпуска, и это, в свою очередь, приведет к потерям частиц пучка во время перепуска потребителям по транспортному каналу К-500.

3.4 Исследования коллективных эффектов накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 с помощью стрик-камеры

3.4.1 Устройство стрик-камеры

На рисунке 3.14 приведена схема устройства стрик-камеры.

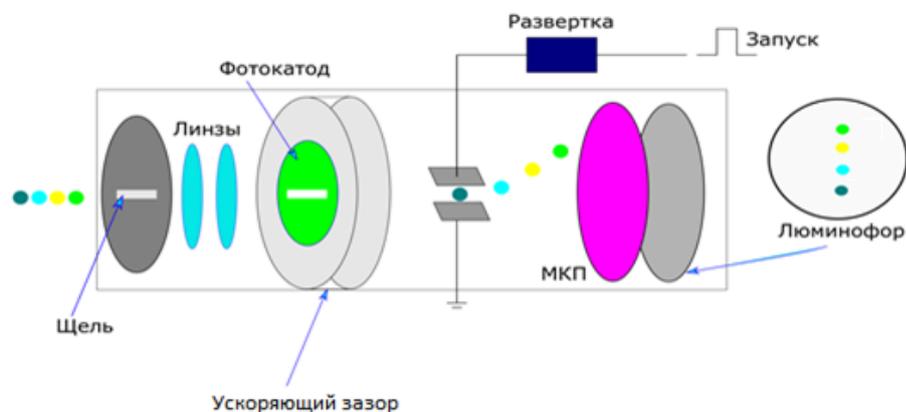


Рисунок 3.14 — Схема устройства стрик-камеры

Импульс синхротронного излучения, испущенного пучком, проходящим поворотный магнит, попадает на фотокатод стрик-камеры. Фотокатод преобразует падающий световой пучок в электронный, повторяющий временное распределение светового импульса. Затем пучок фотоэлектронов ускоряется и проходит через систему отклоняющих электродов. Смещение частиц после электродов по вертикали пропорционально их продольной координате, что позволяет преобразовать продольное распределение частиц в поперечное. Принцип работы блока развертки, преобразующего распределение представлен на рисунке 3.15.

Далее пучок попадает на микроканальную пластину, значительно усиливающую его интенсивность, и после – на люминесцентный экран. Испущенный экраном свет фокусируется на ПЗС-матрице, и полученное таким образом изображение подвергается дальнейшей программной обработке.

При обработке конечного изображения, регистрируемого ПЗС-камерой, стоит учитывать, что ненулевой поперечный размер светового импульса синхротронного излучения вносит ошибку в определение продольного размера пучка в направлении его развертки стрик-камерой.

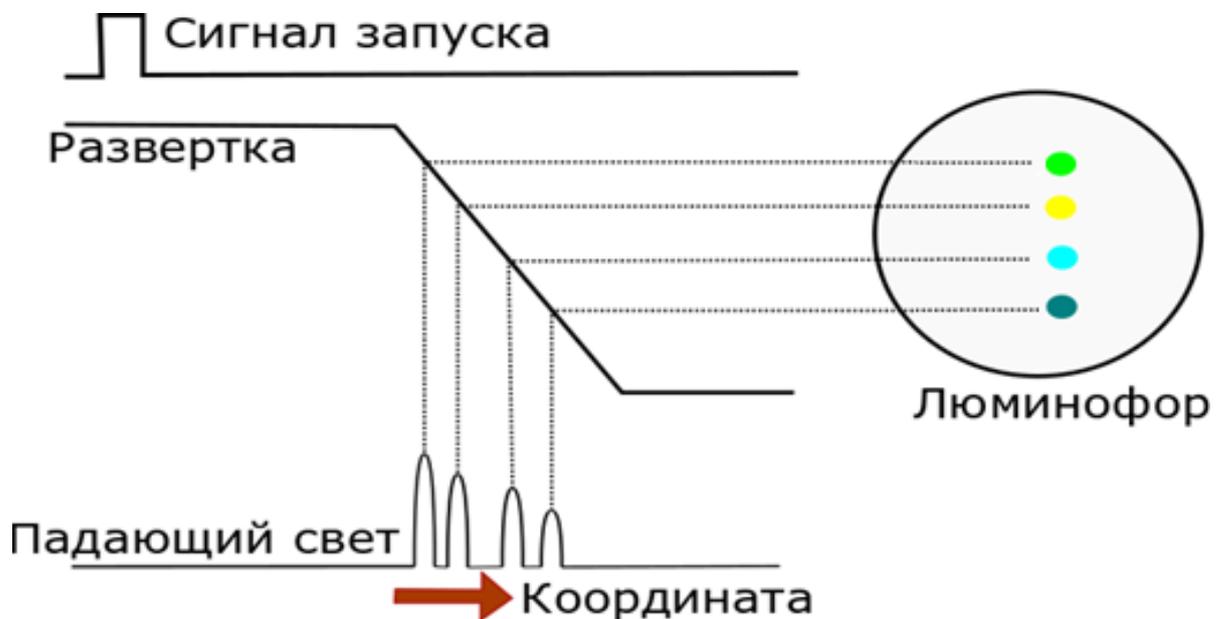


Рисунок 3.15 — Схема работы развертки стрик-камеры

3.4.2 Измерение параметров пучка накопителя-охладителя ИК ВЭПП-5 стрик-камерой

Для исследования параметров пучка накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 при инжекции и после охлаждения была использована стрик-камера PS-1/S1 (ее параметры приведены в таблице 3).

Таблица 3 — Параметры стрик-камеры PS-1/S1

Ширина аппаратной функции стрик-камеры	10 пс
Спектральный диапазон фотокатода	350-1300 нм
Диапазоны длительности развертки (на экран 25 мм)	0.25, 1, 5, 20, 100, 200 нс
Динамическое пространственное разрешение (вдоль щели)	10 пар лин/мм
Временное разрешение для трубки с фотокатодом	< 1 пс
Максимальный динамический диапазон регистрации	100
Временная нелинейность разверток	не более 10%
Задержка срабатывания	не более 15 нс
Нестабильность срабатывания	0.12 нс (развертка 10 нс)
Запускающий импульс (положительный)	1-5 В
Частота запуска	до 1 кГц

Ее запуск был синхронизирован с временем инжекции пучка, что позволяло отслеживать процесс захвата пучка в накопитель-охладитель и проводить измерения продольных размеров пучка с точностью до одного оборота. Схема расположения стрик-камеры представлена на рисунке 3.16.

Несмотря на неоспоримое преимущество стрик-камеры, заключающееся в том, что она способна регистрировать продольный профиль пучка за 1 пролет (в то время, когда диссектору требуется множество совершенных пучком оборотов), ее нельзя использовать как стандартное средство диагностики на накопителе. Причина заключается в том, что внутренние схемы устройства не являются радиационно стойкими и потребуют применения дополнительной

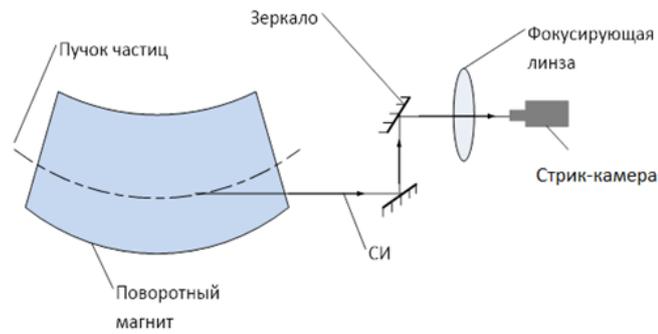


Рисунок 3.16 — Схема измерения длины пучка стрик-камерой

защиты данного устройства. Потому эксперименты с ней проводятся по мере необходимости, а для рутинной работы на НО используется именно диссектор.

3.4.3 Удлинение пучка и искажение его формы

Аналогично измерениям, выполненным диссектором, стрик-камерой проводилось исследование длины охлажденного в НО пучка в зависимости от его тока и напряжения ВЧ резонатора. Первая часть проходила при рабочем напряжении резонатора – 9.4 кВ. Был измерен диапазон значений тока пучка от 45 до 2.2 мА в 10 точках. Характерное изображение и профиль пучка для тока 2.2 мА приведен ниже на рисунке 3.17. Длина пучка (стандартное отклонение нормального распределения) при данном токе – 10.5 см.

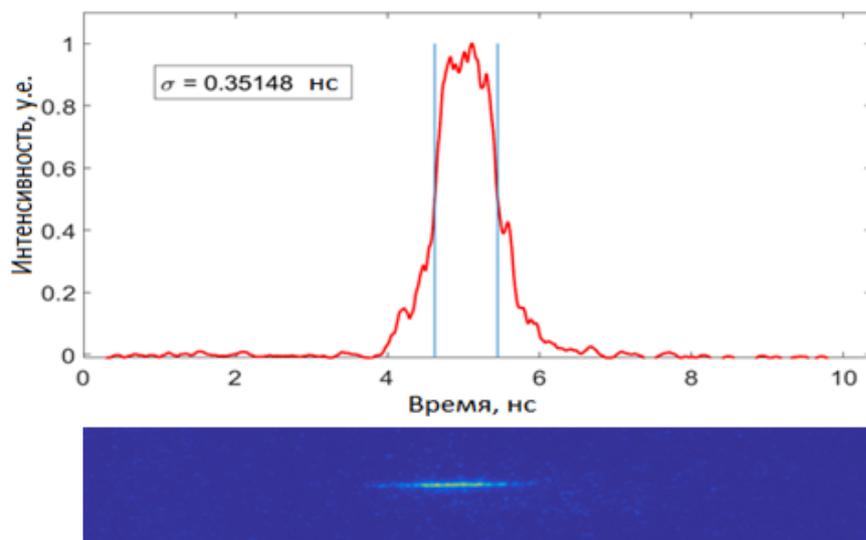


Рисунок 3.17 — Усредненный продольный профиль пучка накопителя-охлаждителя при его токе 2.2 мА

Результаты измерений профиля пучка в точках, соответствующих току 2.2 мА, 45 мА и промежуточным приведены на рисунке 3.18. Как было описано выше в Главе 2, с учетом искажения потенциальной ямы, это распределение должно аппроксимироваться моделью (2.28).

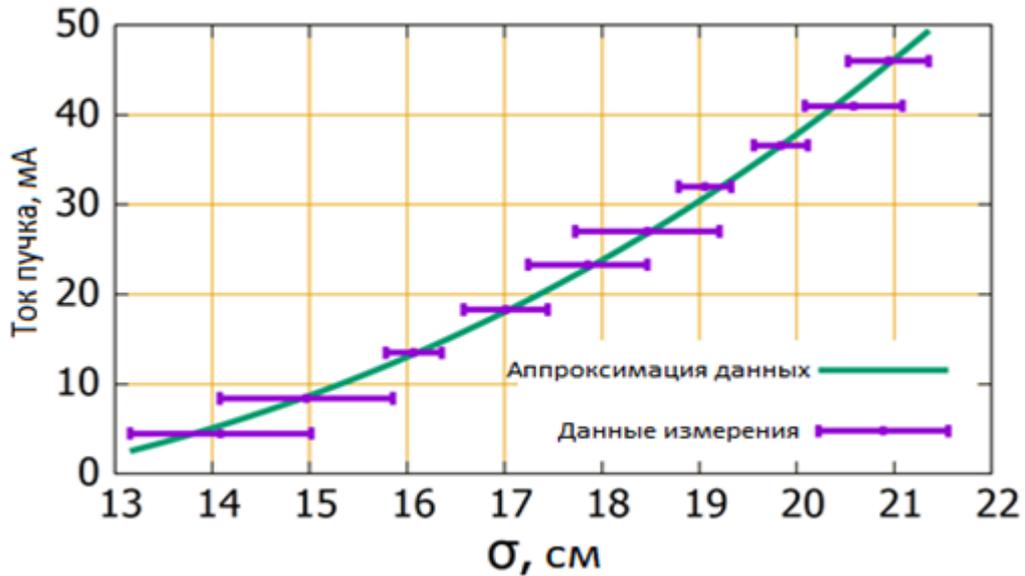


Рисунок 3.18 — Измерение зависимости длины пучка накопителя-охладителя от его тока и аппроксимация измеренных значений моделью искажения потенциальной ямы (см. Главу 2)

Из результатов аппроксимации было получено значение мнимой части импеданса связи $\Im\left(\frac{Z_{\parallel}}{n}\right) = 6.15 \pm 0.18$ Ом, что хорошо согласуется со значением, полученным путем измерения продольного профиля сгустка диссектором (5.71 ± 0.5 Ом).

Зависимость длины пучка от напряжения ВЧ резонатора показана на рисунке 3.19. Данная зависимость хорошо согласуется с теоретической кривой, имеющей вид $\sigma = \mu \times U^{-1/2}$, где μ - некоторая константа, зависящая от параметров накопителя-охладителя.

С помощью стрик-камеры также отчетливо наблюдается и искажение продольного профиля пучка, вызванное искажением потенциальной ямы, наведенными пучком *wake*-полями. Измерения также находятся в согласовании с моделью, предложенной в ранее (2.42). Демонстрация этого эффекта показана на рисунке 3.20.

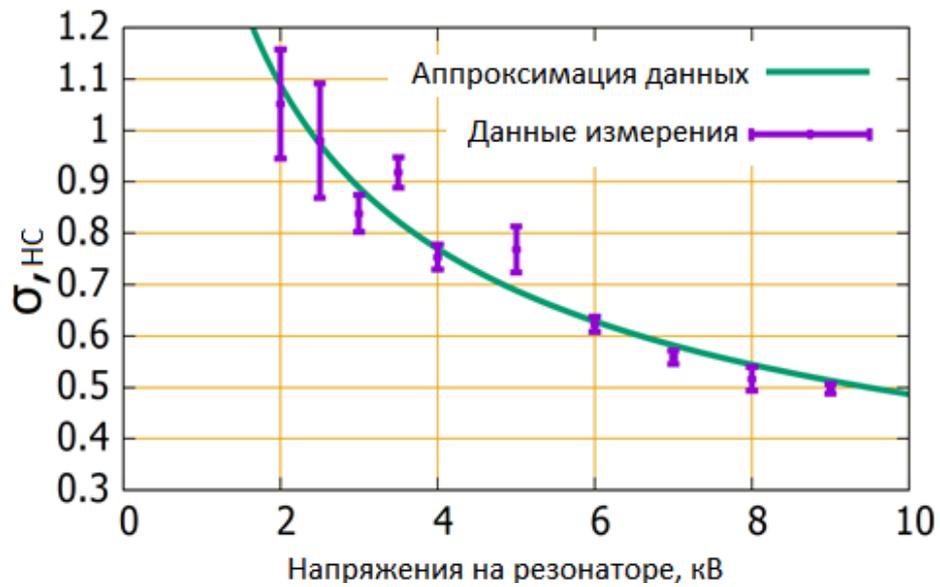


Рисунок 3.19 — Измерения и аппроксимация зависимости длины пучка накопителя-охладителя от напряжения ВЧ-системы

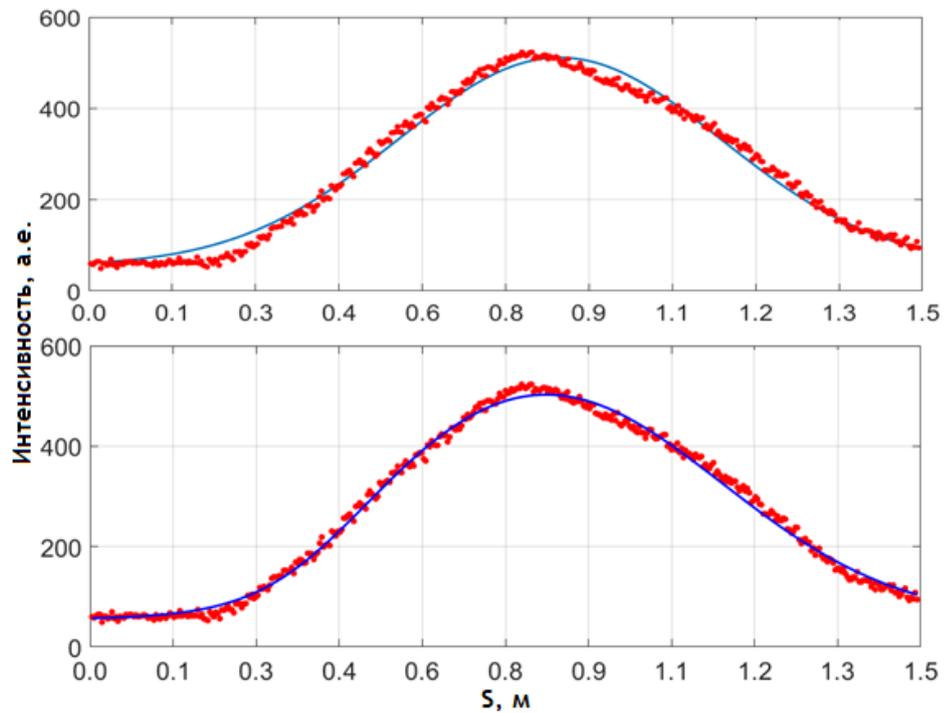


Рисунок 3.20 — Искажение продольной формы пучка накопителя-охладителя при токе 150 мА. Сверху приведен пример аппроксимации профиля нормальным распределением, снизу - модельной функцией (2.42)

3.4.4 Инжекция пучка из линейного ускорителя в накопитель-охладитель

Чтобы исследовать процесс захвата сгустков частиц, инжектируемых из линейного ускорителя, в ВЧ-систему накопителя-охладителя был проведен ряд измерений продольного профиля пучка на впуске стрик-камерой.

Инжектируемый из линейного ускорителя пучок состоит из 16 сгустков (рисунок 3.21). Попадая в потенциальную яму, образованную ускоряющим ВЧ-резонатором первой гармоники частоты обращения накопителя, пучок начинает перегруппировываться, образуя один сгусток. Как показали измерения, характерное время перегруппировки составляет около 270 микросекунд (≈ 3000 оборотов), что существенно меньше времени радиационного затухания пучка, равного 18 миллисекундам.

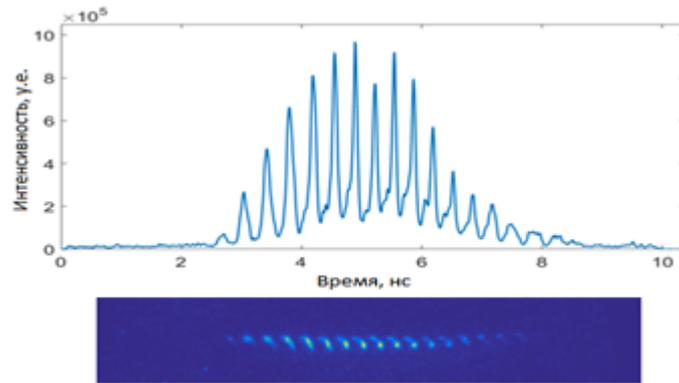


Рисунок 3.21 — Продольный профиль пучка, измеренный в момент инжекции пучка в накопитель-охладитель

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 продольный импеданс связи накопителя-охладителя задается как эквивалентная RLC -цепь, заданная в (2.13) с соответствующей ему $wake$ -функцией (2.14). Для оценки параметров эквивалентной цепи проводилась минимизация целевой функции φ , задаваемой как:

$$\varphi = \sum^n [I_{model}(N, R_s, Q, \omega_r) - I_{mes}(N)]^2, \quad (3.2)$$

где $I_{model}(N, R_s, Q, \omega_r)$ – смоделированное распределение тока пучка, зависящее от номера оборота и параметров эквивалентного импеданса связи, $I_{mes}(N)$ – измеренный стрик-камерой продольный профиль пучка на N -том обороте. Составив такую модельную функцию (3.2) и найдя ее минимум, можно оценить эквивалентные параметры RLC -цепи.

Рисунок 3.22 иллюстрирует качественное соответствие измеренного стрик-камерой профиля пучка и результата моделирования при наличии импеданса связи. Очевидно, что импеданс накопителя и связанные с ним коллективные эффекты оказывают заметное влияние на продольную динамику пучка.

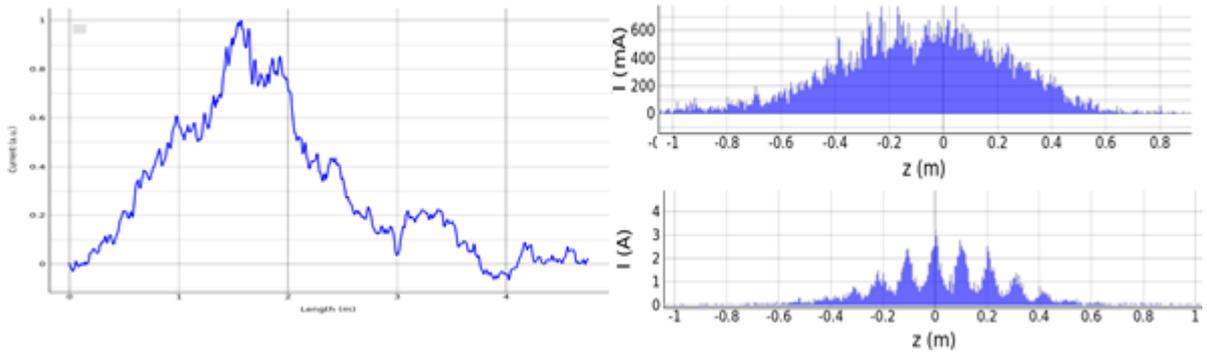


Рисунок 3.22 — Продольный профиль пучка накопителя-охладителя через 3200 оборотов после инжекции. Слева – измеренный стрик-камерой, справа – результаты моделирования (снизу без учета импеданса связи, сверху – с учетом)

Причина такого быстрого процесса перегруппировки пучка заключается в возникновении микроволновой неустойчивости, которая в фазовом пространстве смешивает между собой отдельные сгустки. Проявление микроволновой неустойчивости особенно четко видно на рисунке 3.23.

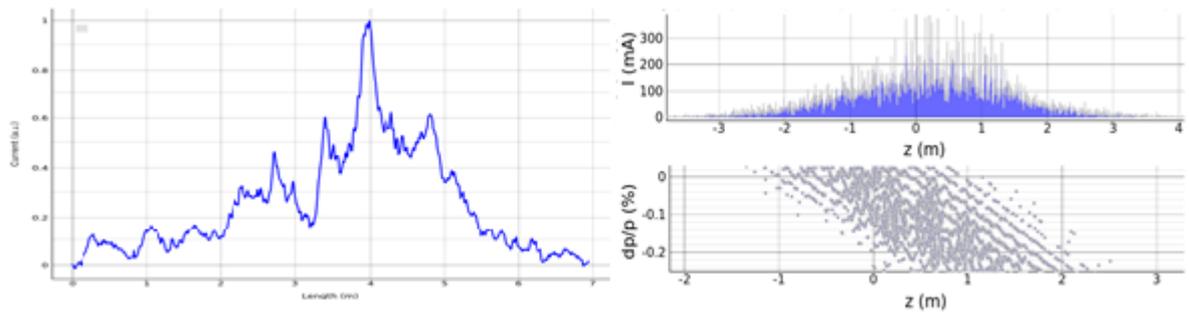


Рисунок 3.23 — Продольный профиль пучка накопителя-охладителя через 800 оборотов после инжекции. Слева – измеренный стрик-камерой, справа – смоделированный, с учетом влияния импеданса

Ее характерной особенностью является появление на профиле пучка модуляции плотности, которые уже никак не связаны с начальным продольным

распределением частиц, полученном при инжекции из линейного ускорителя. Параметры эквивалентной RLC -цепи (2.13), полученные минимизацией целевой функции (3.2) составляют: $R_s = 39$ кОм, $Q = 4.2$ и $f_r = 2.6$ ГГц. Пороговый ток микроволновой неустойчивости задается формулой:

$$I_{th} = \frac{\sqrt{2\pi}EQ_{s0}^2}{\alpha e} \left(\frac{\sigma_{s0}}{R}\right)^3 \frac{1}{(Z/n)_{eff}} \sqrt{1 + \frac{(Z/n)_{eff}}{(Z/n)_{crit}}}, \quad (3.3)$$

где для длинного пучка верно соотношение $(Z/n)_{eff} = (Z/n)_{crit} = \Im(Z_{||}/n)$ [8].

Оцененный по параметрам накопителя-охладителя токовый порог микроволновой неустойчивости составляет 2.3 А (средний ток пучка 30 мА, длина сгустка 13.5 см). Пиковый ток накопленного пучка – 1.62 А (средний 30 мА, длина сгустка 21 см), при максимальном напряжении ВЧ системы 9.41 кВ. Значение тока накопленного пучка существенно ниже порога поэтому возникновения микроволновой неустойчивости на накопленном пучке не происходит. Среднеквадратичный же размер сгустка из линейного ускорителя составляет 20 пс, что уже при среднем токе пучка 3 мкА дает достижение порога неустойчивости. То есть уже при токе пучка линейного ускорителя 30 мкА (с учетом всех 16 сгустков из линейного ускорителя) достигается порог микроволновой неустойчивости сгустков, поэтому динамика продольного профиля пучка после инжекции определяется именно этой неустойчивостью. Рисунок 3.24 демонстрирует возникновение модуляции плотности сгустка в НО при перегруппировке (которая обуславливается микроволновой неустойчивостью), причем видно, что модуляция плотности не совпадает с плотностью распределения сгустков пучка из линейного ускорителя.

Однако, накопленный в НО пучок слишком длинный, для того чтобы в нем происходило ее возбуждение, приводящее к потерям частиц. Таким образом, можно сделать вывод, что с точки зрения коллективных эффектов, возникновение микроволновой неустойчивости неустойчивости не приводит к существенным потерям частиц и резонатор первой гармоники накопителя полностью выполняет свои функции.

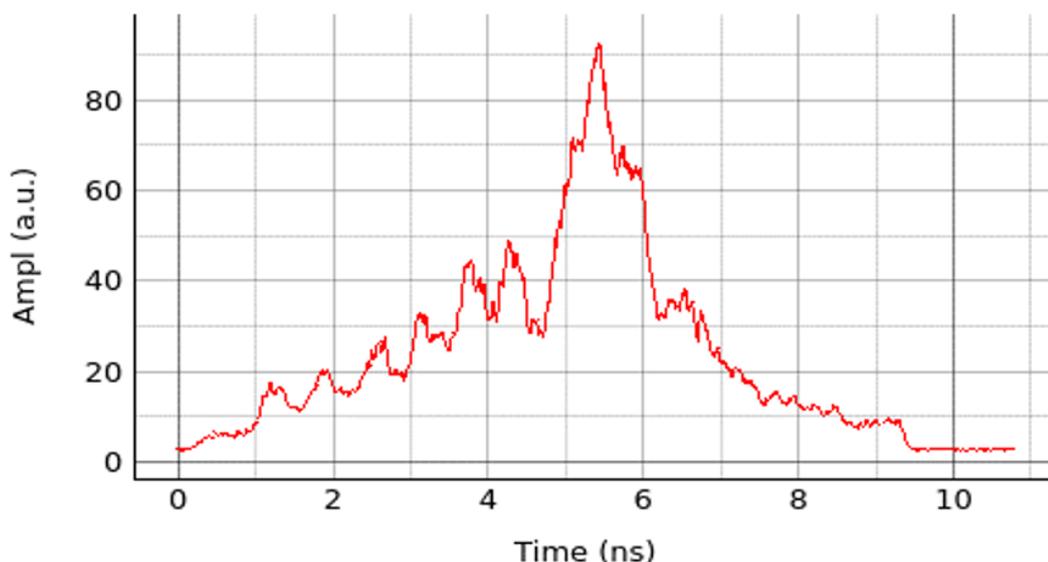


Рисунок 3.24 — Продольный профиль пучка накопителя-охладителя через 500 оборотов после инжекции. Модуляция плотности не совпадает с плотностью распределения сгустков пучка из линейного ускорителя

3.4.5 Моделирование поведения пучка при изменении модели импеданса связи накопителя-охладителя

Для исследования димюония (связного состояния $\mu^+\mu^-$) [40] в ИЯФ СО РАН разрабатывается проект коллайдера $\mu^+\mu^-$ -трон (Мюютрон). Источником частиц для него станет инжекционный комплекс. Однако, накопитель-охладитель работает с резонатором 1 гармоника (10.94 МГц), и имеет значительно более длинный пучок, чем предполагается использовать в $\mu^+\mu^-$ -троне. Как итог, перепуск такого пучка в коллайдер с частотой ВЧ-станции 338.98 МГц [40] будет приводить к значительным потерям частиц в момент захвата пучка этим коллайдером.

Один из вариантов решения данной проблемы – установка дополнительного резонатора в накопитель-охладитель для предварительного сжатия (перегруппировки) пучка в самом НО перед его транспортировкой в Мюютрон. Для моделирования поведения пучка в таком процессе были использованы параметры резонатора для проекта сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ), который имеет следующие характеристики: частота – 357 МГц, добротность – 17000, шунтовое сопротивление 2.55 МОм, ускоряющее напряжение – 400 кВ. Для исследования влияния такого устройства на динамику пучка при инжекции его параметры были добавлены в уже построенную модель (Глава

3) продольного импеданса связи. Как видно из приведенных ниже результатов моделирования дополнительный резонатор практически не меняет динамику пучка при инжекции – на ранних оборотах все также возникает микроволновая неустойчивость, которая перегруппировывает пучок из 16 коротких сгустков в 1 длинный.

На рисунке 3.25 представлены характерные профили тока пучка в обоих случаях и его распределения в фазовом пространстве для случая без дополнительного импеданса (соответствующего новому резонатору) и с ним на 200 и 3400 оборотах.

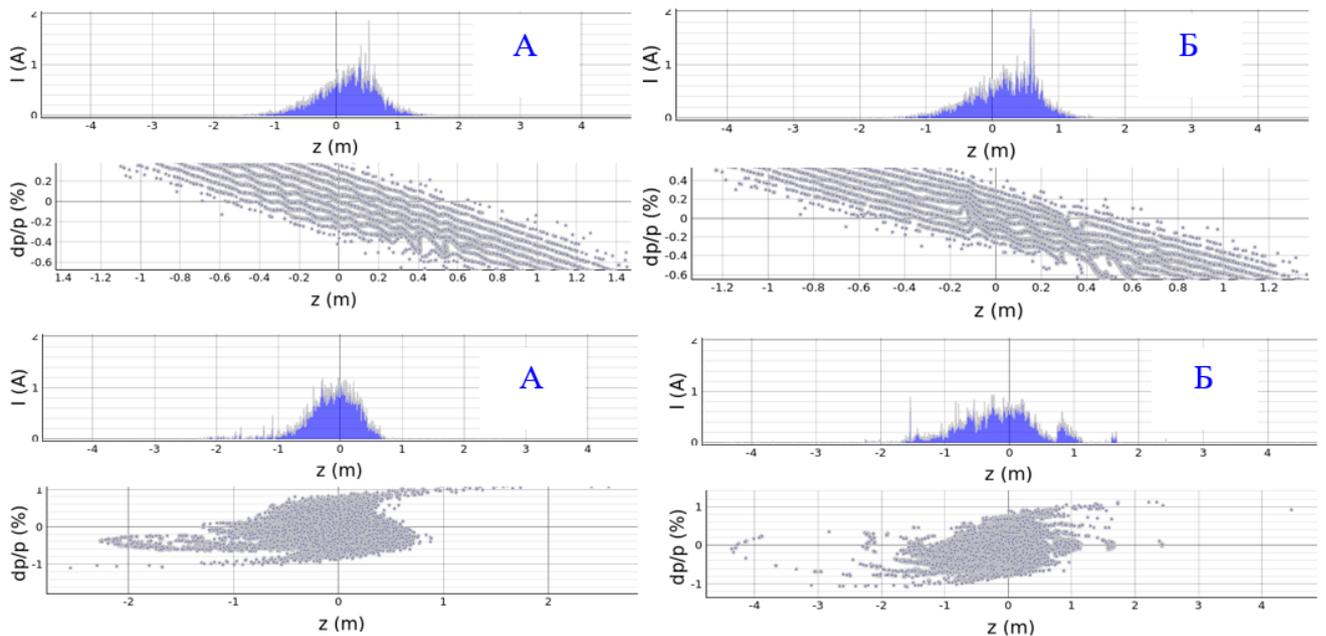


Рисунок 3.25 — Продольный профиль пучка накопителя-охладителя после инжекции на 200 (сверху) и 3400 обороте (снизу), для случая без импеданса дополнительного резонатора (А) и с ним (Б)

Рисунок 3.26 демонстрирует дальнейшее затухание пучка с дополнительным резонатором на 40 000 и 200 000 оборотах. Из этих распределений видно, что за время, соответствующего характерному времени радиационного затухания пучка, происходит его группировка в имеющейся сепаратрисе.

Далее, затухший пучок необходимо перегруппировать путем отключения резонатора 10.94 МГц, в который он инжектировался, и включением нового резонатора 357 МГц. Если резко выключить первую ВЧ станцию и тут же запустить вторую, то перегруппировка пучка будет сопровождаться потерями. Чтобы этого избежать было предложено постепенно увеличивать ускоряющее напряжение в резонаторе 357 МГц, и, когда оно дойдет до номинала в 400

кВ, начать уменьшать поле в резонаторе 10.94 МГц до нуля. Таким образом удастся провести медленную перегруппировку пучка без возникновения каких-либо существенных потерь, связанных с резким исчезновением потенциальной ямы, удерживающей накопленный пучок, и появлением новой, от резонатора 357 МГц. Процесс такой перегруппировки пучка проиллюстрирован на рисунке 3.27.

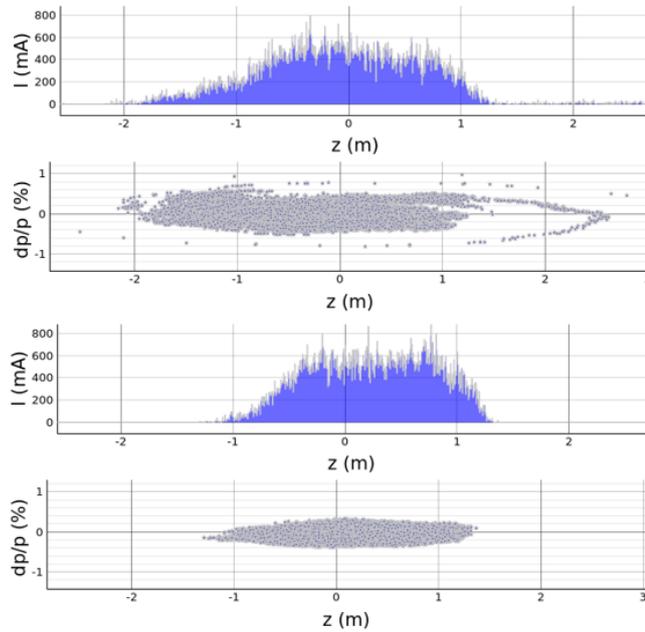


Рисунок 3.26 — Продольный профиль пучка накопителя-охладителя после инжекции на 40 000 (сверху) и 200 000 обороте (снизу)

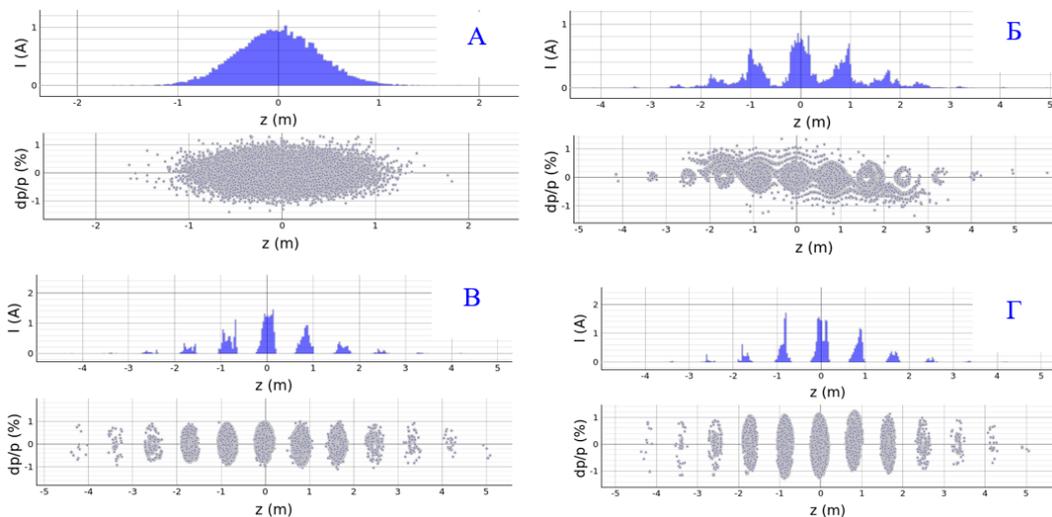


Рисунок 3.27 — Продольный профиль пучка накопителя-охладителя на 1 (А) и 2000 (Б), 13 500 (В) и 20 000 (Г) оборотах при постепенном включении резонатора 357 МГц и последующем отключении резонатора 10.94 МГц

3.4.6 Перегруппировка пучка накопителя-охладителя при отключении ВЧ системы накопителя-охладителя

Стрик-камера позволила провести исследования по изучению изменения профиля накопленного пучка после выключения ВЧ-системы накопителя-охладителя. Для реализации этого эксперимента был подготовлен так называемый «проброс», который производил быстрое выключение питания резонатора НО (при этом время затухания колебаний поля в резонаторе составляло около 20 оборотов пучка или 1.8 мкс) и через некоторое время (≈ 5 мс или ≈ 54 тысячи оборотов) вновь его запускал. Продольные профили пучка в зависимости от оборота представлены ниже (рисунок 3.28).

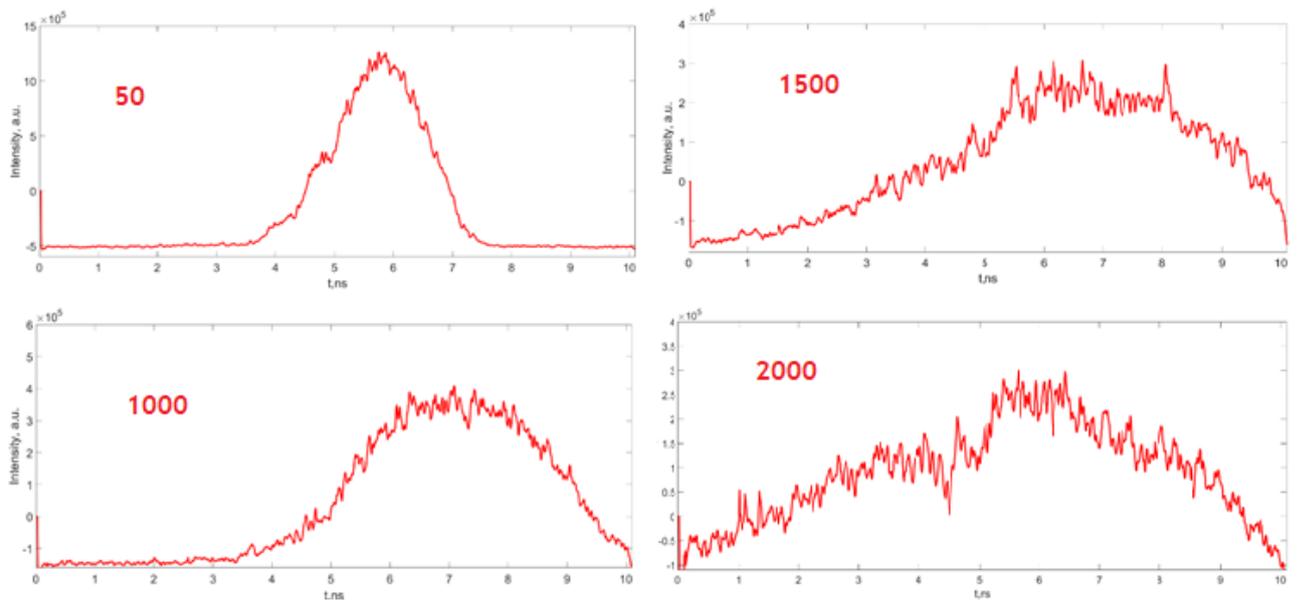


Рисунок 3.28 — Продольный профиль пучка накопителя-охладителя после отключения ВЧ-системы (число на профиле обозначает номер оборота)

В процессе измерений было обнаружено, что при отключении ВЧ-системы не происходит возникновения каких-либо неустойчивостей, приводящих к изменению продольного профиля пучка, только лишь его удлинение и потеря за характерное время, соответствующее одному синхротронному колебанию.

3.5 Анализ ошибок измерений

Измерения, проводимые в данной работе, были выполнены с использованием стрик-камеры и диссектора, имеющих разрешение 10 и 20 пс соответственно.

Для диссектора точность алгоритмов обработки данных, полученных при измерении параметров продольного распределения частиц в пучке, составляет величину 3-4 %. Для уменьшения величины ошибки измерений, проводилась серия измерений, по итогам которой величина стандартной ошибки составила 1%.

Для стрик-камеры значение среднеквадратичного отклонения может достигать значения 10-15%. При этом, проводя множество измерений удалось достичь стандартной ошибки 2-6%.

3.6 Выводы к Главе 3

Данная глава посвящена исследованию коллективных эффектов накопителя-охладителя ВЭПП-5: изучению феномена удлинения пучка НО и искажения его формы, показано, что причиной этого является искажения потенциальной ямы ВЧ-системы накопителя-охладителя. По результатам обработки измерений продольного профиля пучка стрик-камерой и диссектором была определена мнимая часть импеданса связи накопителя-охладителя, действительная же – с помощью измерений сдвига синхронной фазы пучка диссектором.

При проведении измерения продольного профиля пучка при его инжекции из линейного ускорителя в накопитель было обнаружено, что слияние 16 сгустков, созданных СВЧ-системой линейного ускорителя происходит значительно быстрее характерного времени радиационного затухания пучка. Моделирование захвата пучка помогло не только определить, что причиной тому является возникновение микроволновой неустойчивости, но и оценить параметры эквивалентной RLC -цепи для представления импеданса связи накопителя-охладителя.

В дальнейшем построенная модель была использована для исследования поведения пучка во время инжекции при модификации вакуумной камеры

накопителя, путем вставки дополнительного резонатора. Было показано, что дополнительный элемент не приводит к возникновению неустойчивостей, приводящих к гибели пучка, при инжекции и его охлаждении. Также моделирование подтвердило гипотезу сохранения частиц пучка при его перегруппировке из основного резонатора в дополнительный путем медленного отключения первой ВЧ-станции и при включении второй.

Глава 4. Создание системы диагностики и управления параметрами пучка накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5

Положение пучка в вакуумной камере ускорителя возможно измерять с точностью до нескольких микрон, что позволяет проводить вариационные измерения электронно-оптических функций ускорителя. Примером является измерение изменения положения пучка в вакуумной камере в зависимости от слабого возмущения магнитного поля дипольных корректоров или частот бетатронных колебаний пучка в зависимости от силы фокусирующих линз. Подобные эксперименты помогают решать множество ускорительных задач: калибровку модели ускорителя; коррекцию значения бетатронных частот пучка, оптических функций синхротрона; измерение физической апертуры вакуумной камеры и многое другое.

Для систематического проведения вышеперечисленных процедур требуется программное обеспечение, способное, во-первых, проводить обработку данных, поступающих со станций датчиков положения пучка. Ввиду того, что результаты обработки уже дают существенную информацию о текущем состоянии накопителя-охладителя ИК, они должны отображаться на пультовых компьютерах и быть доступны оператору комплекса.

Во-вторых, для калибровки модели и других операций с ускорителем на основе модельно-независимого анализа необходимо получать т.н. матрицы отклика накопителя-охладителя, вследствие чего нужно иметь программу, выполняющую ряд необходимых для этого процедур. Это приложение должно давать оператору возможность выбирать элементы магнитной системы, с которых измеряется отклик, следить за корректностью изменения тока этих элементов и иметь доступ к измеренным координатам пучка для последующего формирования искомой матрицы.

В-третьих, часто возникает необходимость изолированного изменения одного выделенного параметра ускорителя, что достигается, например, комбинацией нескольких элементов магнитной системы, с индивидуальными для каждого элемента изменением тока. Элемент интерфейса, проводящий такие изолированные изменения далее называется «ручкой». Возможность создавать и пользоваться «ручками», решающими вышеописанную задачу, необходимо

предоставить не только оператору ускорительного комплекса, но и другим пользовательским приложениям.

4.1 Описание устройства инструментов программного контроля и управления параметрами пучка

Для реализации возможностей, которые предоставляют датчики положения пучка, было разработано программное обеспечение (ПО), позволяющее проводить сбор, обработку, отображение и хранение данных, полученных после поворотных измерений положения пучка. Такое ПО позволяет проводить работы по калибровке и настройке ускорителя, повышению его стабильности.

Программное обеспечение, реализованное на языке Python 3, состоит из трех типов программ:

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 (ДЧБЧ).

3. Административные графические приложения:

- rms – 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 4.1.

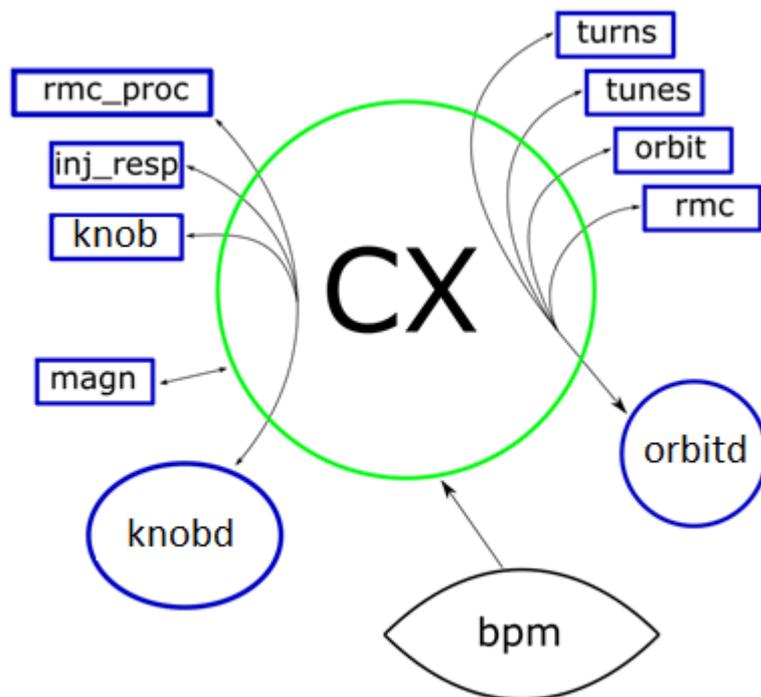


Рисунок 4.1 — Блок-схема инструментов программного контроля и управления параметрами пучка

Из рисунка видно, что ПО разбивается на 2 ключевые части. Первая – это программы для обработки собранных с датчиков положения пучка данных (*orbitd*) и отображения результатов обработки для оператора комплекса на пультовых компьютерах (*turns*, *tunes* и *orbit*), а также административная программа для измерения матрицы отклика (*rmc*).

Вторая же часть включает в себя приложение для создания «ручек» оператором (*knob*), службу для их обслуживания (*knobd*), обработку матрицы отклика (*rmc_proc*) и получение числа инжектированных в накопитель-охладитель частиц в зависимости от бетатронных частот пучка (которые изменяются

посредством созданных в *knob* «ручек») – *inj_resp*. Черные стрелки показывают связи частей программного обеспечения, у которых передача данных и команд друг другу происходит через инфраструктуру фреймворка СХ [41].

Система управления инжекционного комплекса работает в среде операционных систем семейства Linux. Для взаимодействия с системой управления ускорителя используется разработанный ранее в ИЯФ СО РАН фреймворк СХv4 [41], основанный на классической трехуровневой модели, состоящей из клиентского, серверного и аппаратного уровней. В СХv4 используется канальная абстракция данных, когда любое устройство представляется набором каналов – единиц ввода-вывода, для которых возможны чтение, запись, получение событий. Клиентские библиотеки фреймворка СХv4 написаны на языке С и, соответственно, могут быть напрямую использованы для написания программ на С/С++. Для работы с СХv4 существует и библиотека для языка Python – *rusx4* [37], которая предоставляет набор высокоуровневых классов для автоматизации работы с каналами и их событиями. Эта библиотека может быть использована в основном цикле приложений PyQt4/5 или в собственном основном цикле СХv4 с большой степенью унификации кода между этими вариантами. Таким образом, библиотека подходит для разработки графических приложений на PyQt и служб, автоматизирующих процессы. Описанные в работе программы реализованы на языке Python 3 с применением *rusx4*.

Разделение программ на службы и графические приложения обуславливается необходимостью отделения непосредственно обработки данных от их отображения и использования результатов этой обработки. С одной стороны, это позволяет независимо друг от друга изменять каждую из компонент ПО (логику или визуализацию), не затрагивая остальные его части, с другой – запуск нескольких копий программ для отображения требует наличия всего лишь одной копии службы, обрабатывающего данные.

4.2 Описание инструментов программного контроля и управления параметрами пучка

4.2.1 Обработка данных с датчиков положения пучка

Датчики положения пучка (ДПП) – один из основных инструментов диагностики пучков заряженных частиц на ускорителе, которые позволяют определить отклонение положения пучка относительно их электромагнитного центра. Устанавливая такие датчики по периметру синхротрона (либо вдоль линейного ускорителя или канала транспортировки) можно отслеживать координаты пучка в местах расположения датчиков, а также изменения этих координат, траектории или оптических функций. Подробное описание принципов работы датчиков положения пучка и предобработки данных с них описаны в [42].

Служба *orbitd* получает от станций ДПП массив данных, в котором содержится информация о координатах и токе пучка с каждого из 16 датчиков за заданное количество оборотов. Она же анализирует этот массив, формирует по измерениям координат массив отклонений пучка от электростатических центров датчиков в накопителе, а также выделяет в отдельные массивы измеренных координаты пучка с выбранного оператором датчика и выполняет дискретное преобразование Фурье этих координат. После этой предобработки данные отсылаются на хранение на СХ-сервер, где они становятся доступны другим программам системы: *turns*, *tunes* и *orbit*, предназначенным для отображения соответствующих данных пользователям.

Обработка данных, их сохранение и загрузка из файловой системы (или базы данных в будущих версиях) реализуется в *orbitd*, пользовательские приложения лишь формируют команду и передают ее службе посредством протокола СХv4 и его библиотеки русх4. Задача программы *tunes* – это отображение текущих дробных частей бетатронных частот пучка накопителя-охладителя в каждом из четырех режимов работы (рисунок 4.2).

Бетатронные частоты являются ключевой характеристикой настройки магнитной системы синхротрона. Их случайные изменения могут приводить к значительным потерям частиц на всех этапах работы комплекса. Данное

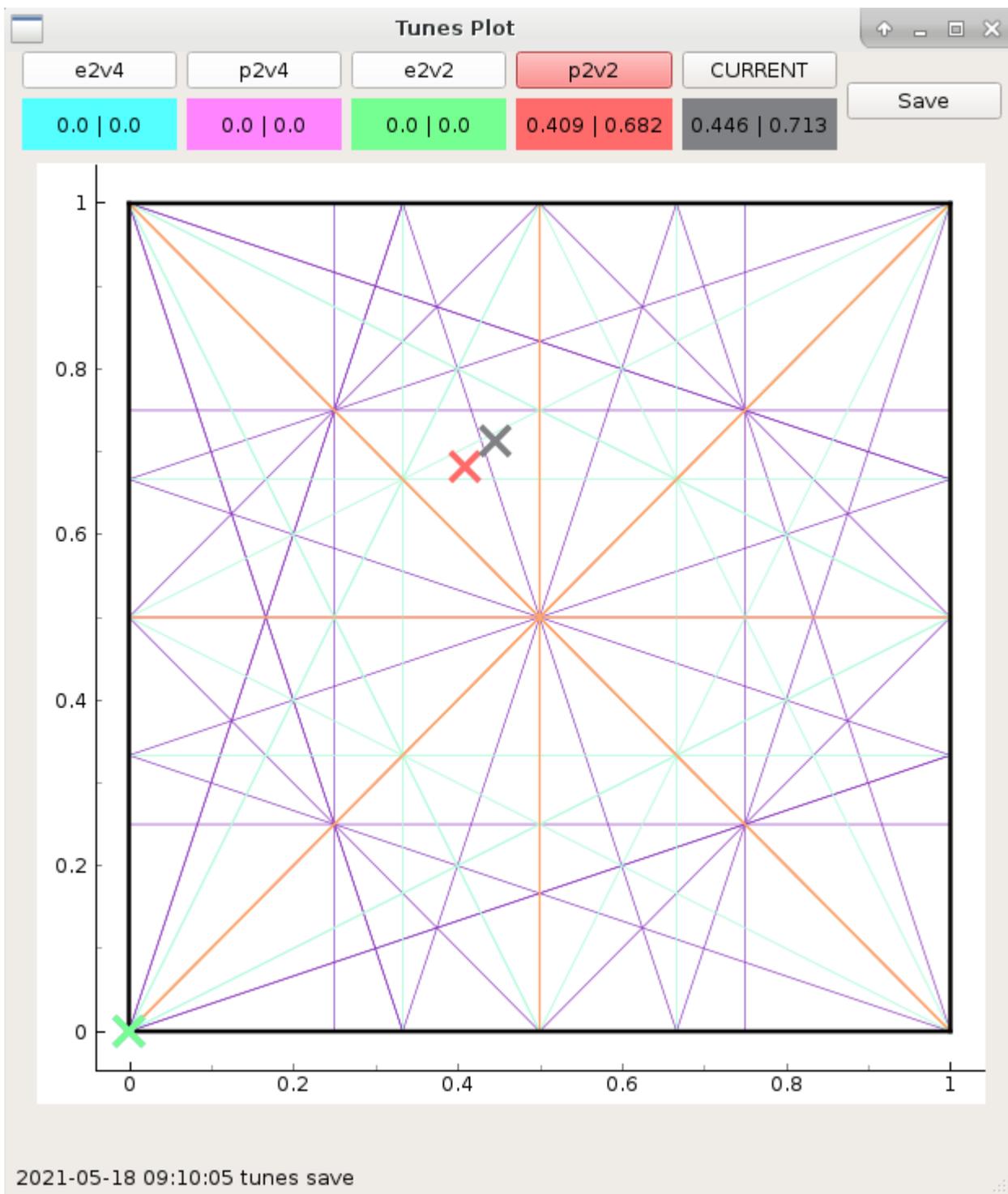


Рисунок 4.2 — Пример отображения значений дробных частей бетатронных частот пучка накопителя-охладителя на резонансной сетке в пользовательском окне программы *tunes*

же приложение дает оператору возможность отслеживать их расположение и отклонение на резонансной сетке, где приближение к линиям сетки означает близость к резонансу, который может приводить к потерям частиц пучка или полной его гибели.

Каждый из четырех цветов ярлыков вверху пользовательского окна (бирюзовый, пурпурный, зеленый и красный) отвечает за частоты в каждом режиме работы инжекционного комплекса (электроны или позитроны в режиме работы на ВЭПП-4М или ВЭПП-2000 соответственно), этого же цвета созданы и крестообразные метки на резонансной сетке. Серые ярлык и метка - это текущие измерения частот.

По изменению бетатронных частот можно проводить измерения усредненной бета-функции в местах расположения корректоров [43]. Известно, что малое изменение фокусирующей силы линзы ведет к смещению частоты:

$$\Delta\nu = \frac{1}{\pi} \int \Delta k \times \beta(s) \delta s. \quad (4.1)$$

Отсюда, усредняя значение бета-функции по линзе, получаем усредненное значение искомой величины: $\bar{\beta} \approx \frac{4\pi \Delta\nu}{L \Delta k}$. Проведя измерение зависимости бетатронных частот пучка от силы линзы, возможно, через аппроксимацию зависимости $\nu(k)$ вычислить значение $\frac{\Delta\nu}{\Delta k}$, а значит, и $\bar{\beta}$. Результаты измерений, проведенных на накопителе-охладителе, представлены на рисунках 4.3 и 4.4.

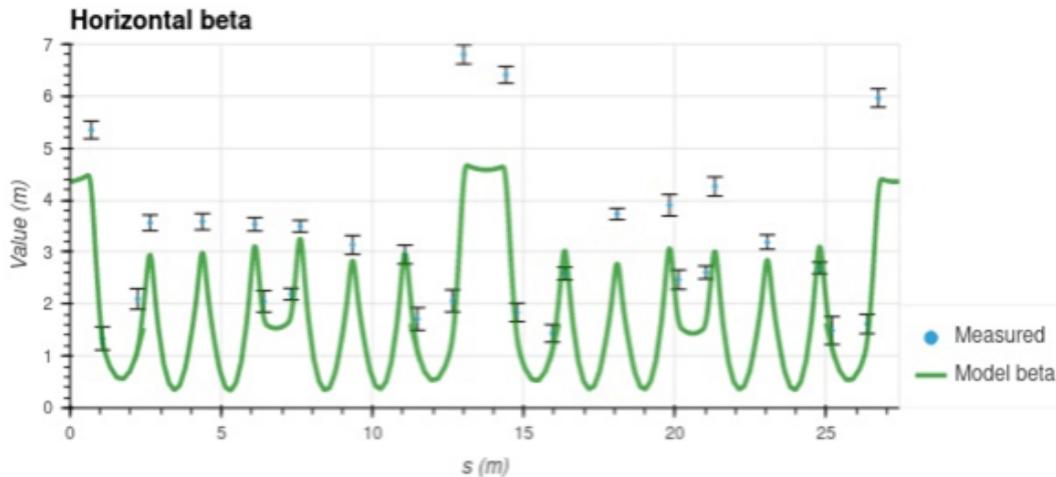


Рисунок 4.3 — Измеренная и модельная (сплошная) горизонтальная бета-функция накопителя-охладителя

При анализе результатов становится ясно, что предсказание модели (сплошная зеленая линия) и поведение пучка в ускорителе отличаются. Имея данные измерений, можно получить возможность проведения корректировки модели накопителя. Не менее важной задачей является отображение положения пучка в вакуумной камере накопителя-охладителя (рисунки 4.5 и 4.6). Оно влияет на то, как пучок захватывается магнитной системой НО во время инжекции и на его выпуск в транспортный канал К-500.

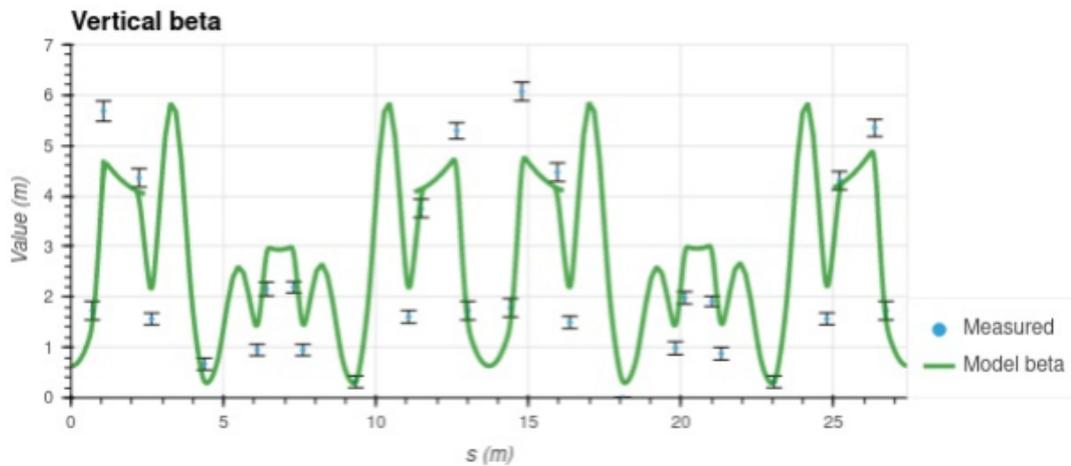


Рисунок 4.4 — Измеренная и модельная (сплошная) вертикальная бета-функция накопителя-охладителя

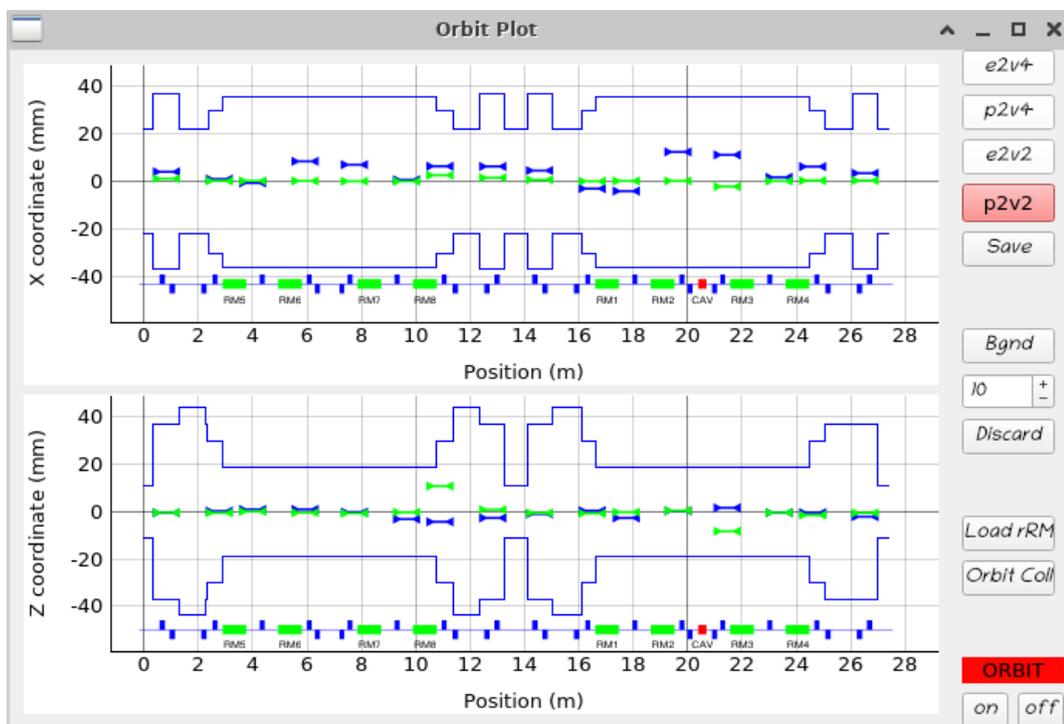


Рисунок 4.5 — Отображение положения пучка накопителя-охладителя вдоль периметра вакуумной камеры. Зеленый маркер – последняя измеренная координата пучка с активного ДПП, синий – сохраненная, красный – неактивные датчики, на которых не происходит измерение координаты

Отклонение координаты или угла пучка при выпуске может привести к частичной или даже полной его потере при перепуске, а потому необходимо удерживать эти параметры постоянными и при необходимости проводить их коррекцию. Приложение *orbit* предназначено для этого, и оно не только отображает текущее положение пучка, но и сохраненное оптимальное значение для работы в данном режиме.



Рисунок 4.6 — Отображение положения пучка накопителя-охладителя в местах расположения датчиков положения пучка

Синей линией на рисунках 4.5 и 4.6 отображается апертура вакуумной камеры накопителя-охладителя, под ней (рисунок 4.5) – схематическое изображение магнитной системы. Кнопки на рисунке 4.6 рядом с именем датчика предназначены для установки датчиков положения пучка активными или неактивными (зеленые и красные соответственно), внизу численно отображаются координаты и стандартные отклонения пучка в месте расположения датчиков.

Другая часть этого блока (*turns*) предназначена для отображения поворотных значений тока пучка, его координат и дискретного преобразования Фурье этих координат в процессе инжекции. Оператору предоставляется возможность выбирать датчик для наблюдения, количество измеряемых оборотов и диапазон в котором определяются частоты поперечных колебаний пучка. Благодаря *turns* появляется возможность отслеживать параметры пучка при инжекции, влияние на пучок амплитуды и времени удара инфлекторов. Имея модель ускорителя, можно измерить угол пучка и его координату на влете в накопитель-охладитель, при необходимости провести их коррекцию. Аппроксимируя зависимость координат от номера оборота можно также получить параметры огибающей пучка и целую часть бетатронной частоты.

Ввиду того, что многие операции при работе с ускорителем базируются на построенной теоретической модели поведения пучка в магнитной системе, необходимо иметь согласование этой модели с полученными экспериментальными данными. Для этого проводится процесс калибровки, суть которого заключается в том, чтобы измерить ускорителя матрицу отклика и изменением параметров теоретической модели добиться совпадения (с заданной точностью) измеренной и теоретически рассчитанной матриц.

Приложение *rtc* (рисунок 4.7) предоставляет оператору интерфейс выбора элементов из дерева магнитных элементов накопителя-охладителя (слева) и задания параметров измерения матрицы (справа), информирует о текущем ходе выполнения процедуры (снизу), проводит обработку поступающих ей данных и следит за обработкой источника магнитных элементов заданных токов.

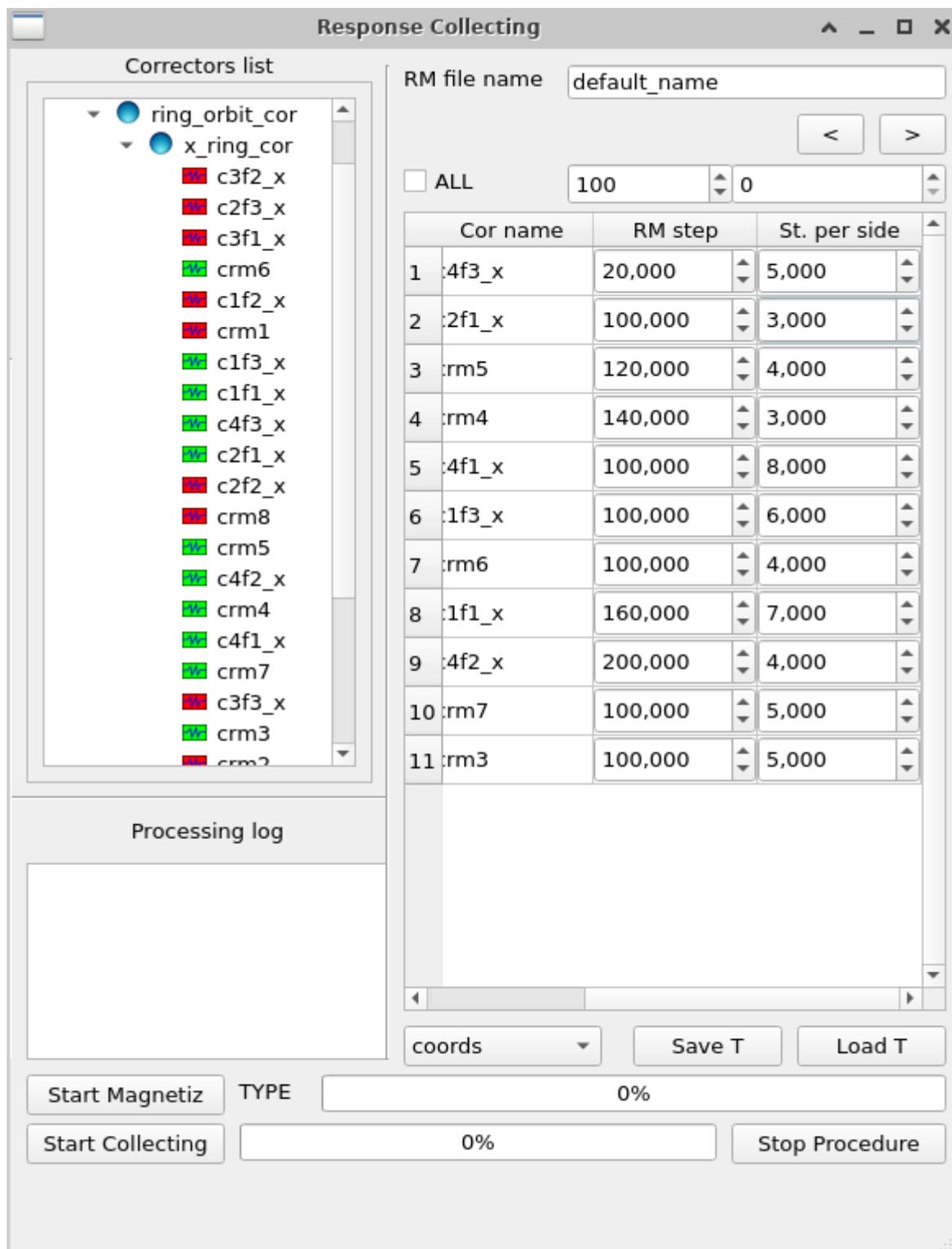


Рисунок 4.7 — Главное окно программы *rtc* по измерению матрицы отклика накопителя-охладителя

По завершении процесса пользователь получает измеренные матрицы отклика со всей необходимой информацией. Полученные данные можно использовать как для проведения калибровки модели ускорителя, так и для изменения координат (или других параметров пучка) без привязки к модельным расчетам.

Алгоритм измерения матрицы отклика выглядит следующим образом:

- Намагничивание элементов магнитной системы ускорителя, чтобы обеспечивать нахождение в одной ветке гистерезиса железа при каждом эксперименте, что обеспечивает повторяемость процедуры измерения и дальнейшего применения матрицы отклика в процедуре коррекции.
- Выбор необходимых для измерения матрицы элементов и задание параметров измерения матрицы. В зависимости от целей работы это могут быть квадрупольные и дипольные корректоры или другие элементы магнитной системы.
- Для выбранных элементов нужно провести серию измерений положения пучка в зависимости от тока заданных элементов. Отдельно стоит отметить тот факт, что при изменении тока необходимо следить за тем, выдает ли источник тока магнитного элемента заданное значение. Если да, то процесс идет дальше, иначе такой корректор отмечается неактивным и исключается из процесса измерения.
- Сформировать, по результатам измерений, матрицу отклика, матрицу с ошибками определения каждого элемента матрицы отклика и информацией об изначальных значениях токов элементов магнитной системы.

4.2.2 «Ручки»

Нередко для корректировки параметров ускорителя требуется задавать изменение тока не одного магнитного элемента, а нескольких, где шаг у каждого является строго индивидуальным – «ручки». Когда подобная операция происходит часто, то появляется необходимость иметь службу (*knobd*), регулярно выполняющей создание «ручки» и обеспечивающей их работу.

На рисунке 4.8 отображено окно управления программы *knob*, которое позволяет пользователю из дерева устройств инжекционного комплекса (сле-

ва) выбрать нужные и задать персональное изменение тока при шаге (область сверху в центре).

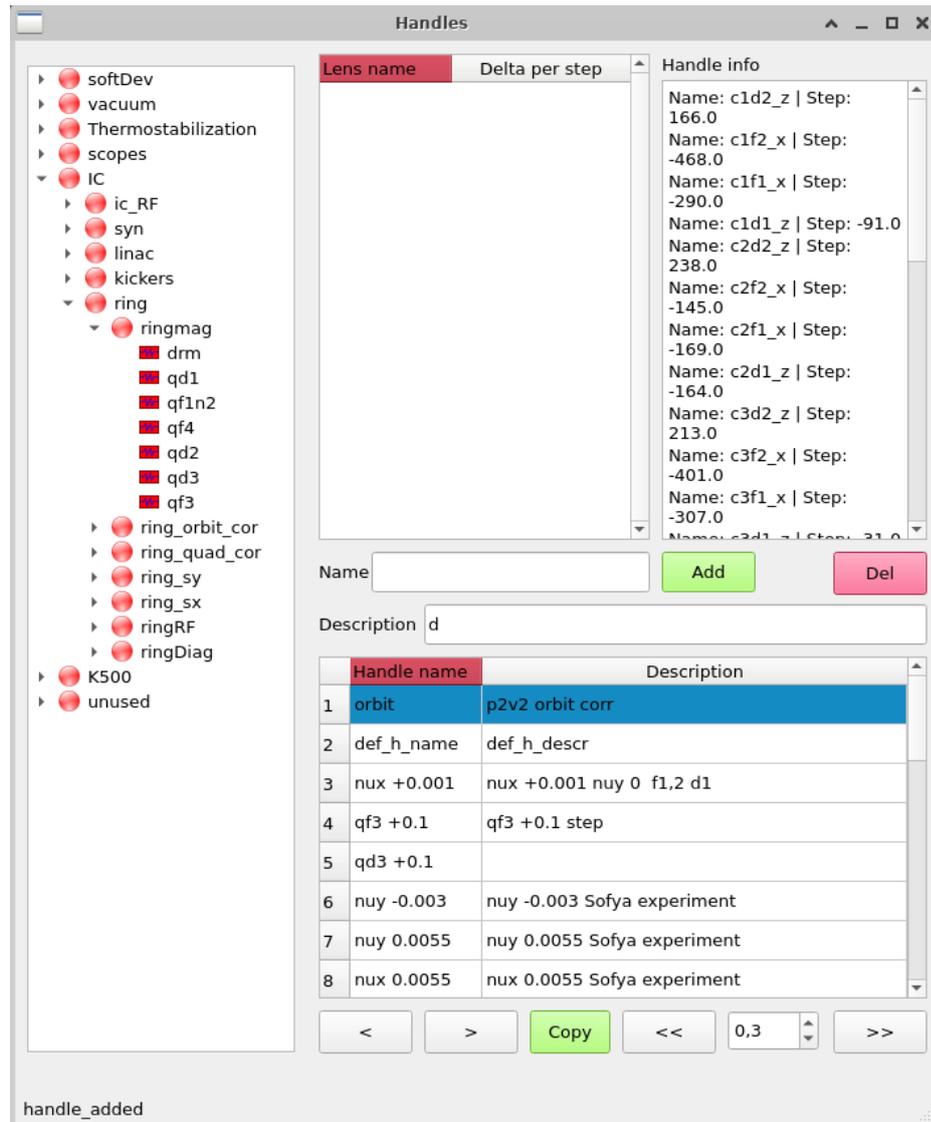


Рисунок 4.8 — Главное окно программы *knob* для создания «ручек» и их использования

По нажатию кнопки «Add» подается команда *knobd* на формирование этой «ручки» и добавление ее к уже существующим. Выделяя уже созданную «ручку» в таблице снизу можно получить информацию об элементах и шагах, содержащихся в ней (сверху справа), а также выполнить процесс сдвига в двух вариантах: либо на единичный шаг, либо на произвольный, с заданным множителем (снизу).

Создавать «ручку» можно не только из окна программы *knob*, но и отослав команду специального вида программе *knobd*. После ее получения «ручка» будет сформирована, а таблица, содержащая ее, будет обновлена у всех пользовательских приложений.

Именно такой возможностью пользуется *rtc_proc* – обработка измеренной матрицы отклика. В окне этого приложения (рисунок 4.9) выбирается матрица, отображаются ее сингулярные числа и, по выбранным пользователям числам, происходит вычисление псевдообратной матрицы. Далее, после задания необходимого смещения, рассчитывается «ручка», выполняющая сдвиг, и передается в *knobd*.

В данном случае «ручка» представляет собой список магнитных элементов, варьированием которых измерялась матрица отклика, и соответствующий ей список шагов каждого элемента, значение которых было получено умножением псевдообратной матрицы на столбец заданных смещений.

Созданными «ручками» может пользоваться не только оператор ускорительного комплекса, но и другие программы. Один из таких примеров – *inj_resp*, которая измеряет зависимость захваченных накопителем-охладителем частиц от бетатронных частот накопителя (рисунок 4.10). Для этого необходимо выбрать «ручку» (или несколько), с помощью которой (которых) будут изменяться бетатронные частоты, и регистрироваться изменение захватываемого количества частиц при каждом сдвиге. Таким образом, получается двумерное (или одномерное, если использовалась только одна «ручка») распределение числа инжектированных частиц, и по нему можно определить, не существует ли поблизости от текущих значений дробных значений частот поперечных колебаний пучка других, где в процессе инъекции захват будет оптимальнее.

Один из примеров использования *inj_resp* приведен ниже. Была измерена зависимость захваченных накопителем-охладителем позитронов от частот бетатронных колебаний пучка в режиме работы на коллайдер ВЭПП-2000 (рисунок 4.11). Четко видно, что в непосредственной близости от текущих бетатронных частот есть другая точка, с большей величиной захвата частиц - с 15 мА до 18 мА накопленного тока пучка за цикл инъекции (при этом также происходило уменьшение биений бетатронных колебаний пучка).

Ввиду того, что сканирование по частотам выполнялось при помощи созданных «ручек», то программой *knob* (рисунок 4.8) легко скорректировать бетатронные частоты пучка, получив увеличение инжектированных позитронов в накопитель-охладитель.

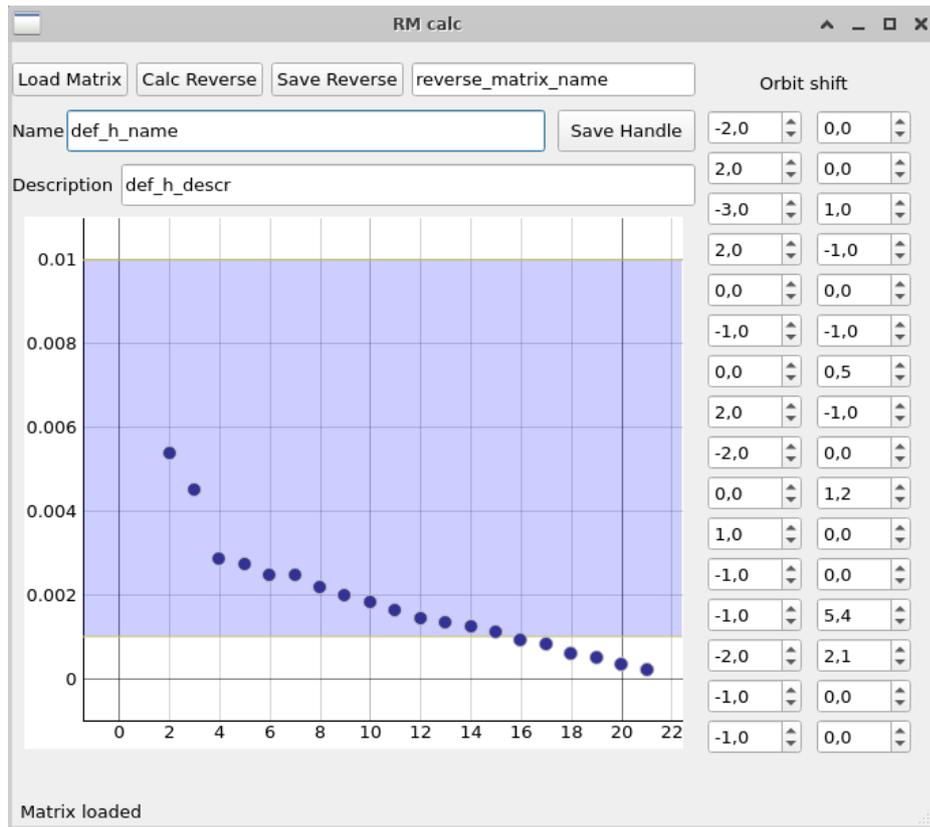


Рисунок 4.9 — Главное окно программы *rmc_proc* по обработке измеренной матрицы отклика

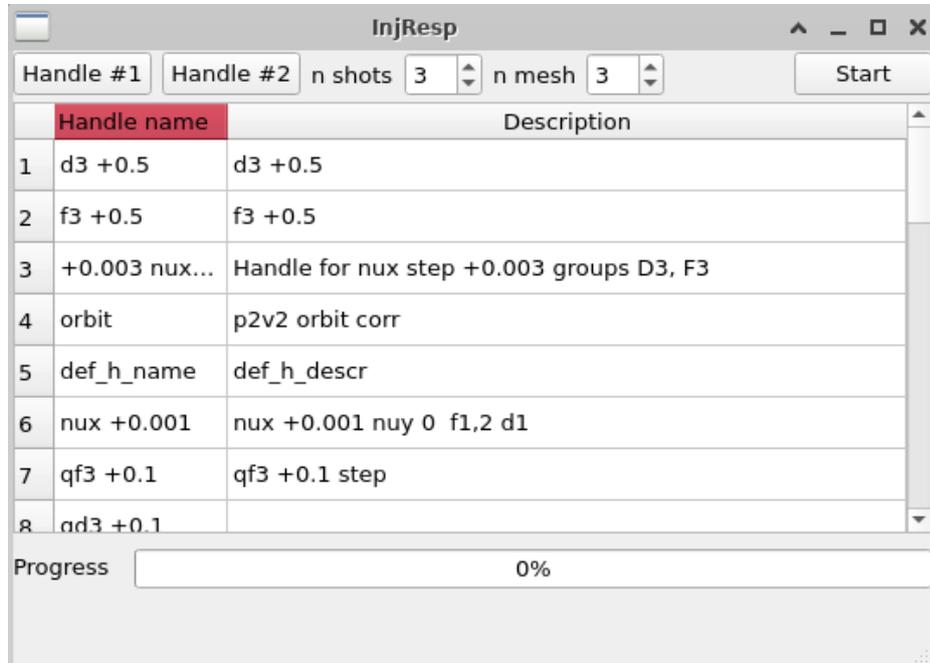


Рисунок 4.10 — Окно программы *inj_resp*, позволяющие выбрать одну или две ручки для измерения карты инжекции, количество циклов для усреднения итогового значения и количество узлов сетки, используемых при измерениях

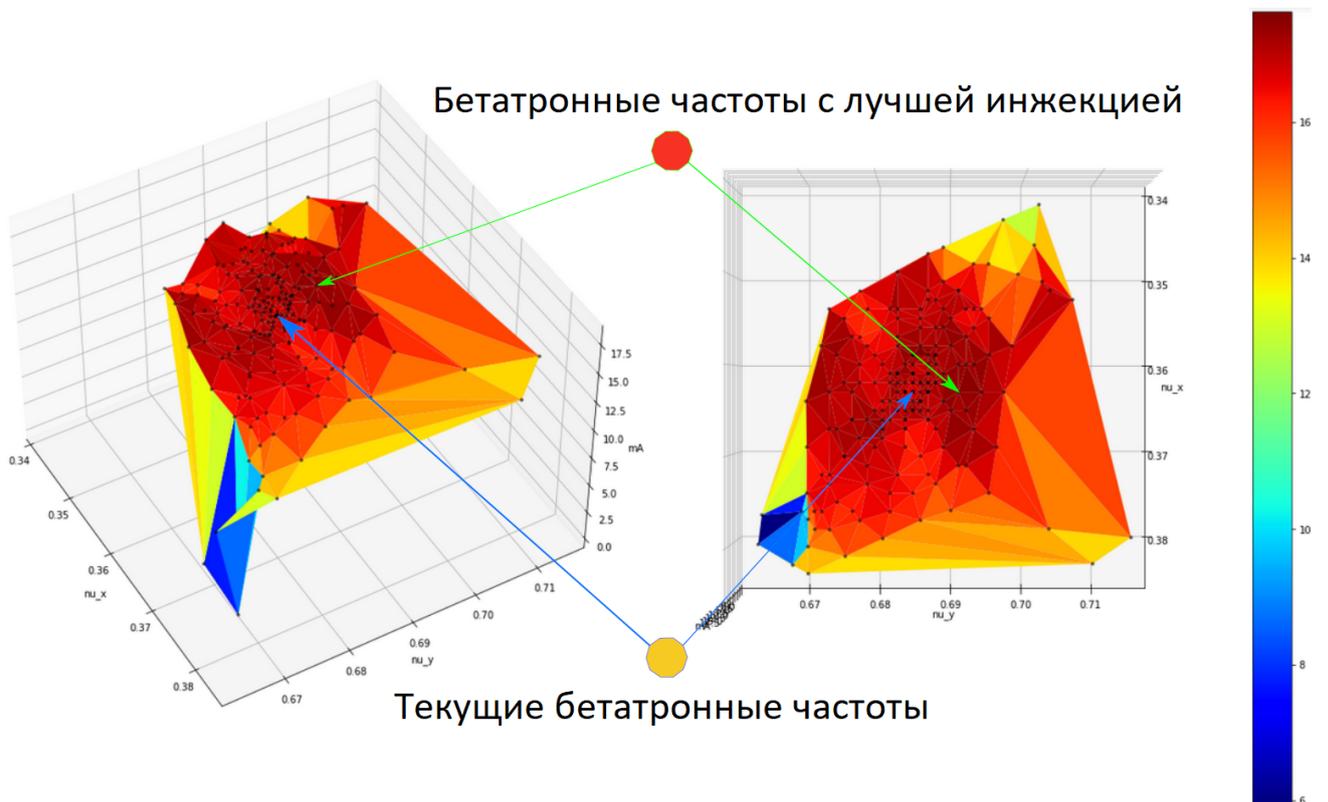


Рисунок 4.11 — Зависимость захваченных накопителем-охладителем позитронов от бетатронных частот накопителя-охладителя в режиме работы на коллайдер ВЭПП-2000

4.3 Удержание положения пучка в заданном диапазоне значений. Коррекция положения пучка на всем периметре накопителя-охладителя

На накопителе-охладителе установлены 16 датчиков положения пучка вдоль периметра вакуумной камеры (их параметры приведены в Приложении А. Это дает возможность проведения измерений поперечных координат пучка в 16 точках по периметру, и такой массив этих координат в дальнейшем будет называться орбитой пучка. Важнейшей задачей для стабильной работы инжекционного комплекса является удержание этой орбиты в заданном диапазоне значений, ввиду того, что изменения в орбите ведут к изменению углов и координат выпуска пучка, что снижает коэффициент перепуска заряженных частиц через канал К-500 потребителям, а это уже сказывается на стабильности их работы и достижении необходимой светимости коллайдеров.

4.3.1 Накладываемые ограничения

Для начала необходимо определить какой диапазон отклонений для орбиты является допустимым. Для этого была взята модель транспортного канала К-500 в сторону ВЭПП-2000 на позитронном направлении и проведен трекинг частиц с момента их выпуска из накопителя-охладителя до подъема в бустер электронов и позитронов (БЭП). Выбор именно этого направления и частиц объясняется более сложной геометрией транспортного канала в сторону ВЭПП-2000 и медленного темпа накопления позитронов по сравнению с электронами.

Рассматривались попарные комбинации отклонений координат XU , $X'U'$, XU' и YU' . Рисунок 4.12 демонстрирует результаты трекинга - процент пройденных через канал К-500 позитронов в направлении ВЭПП-2000.

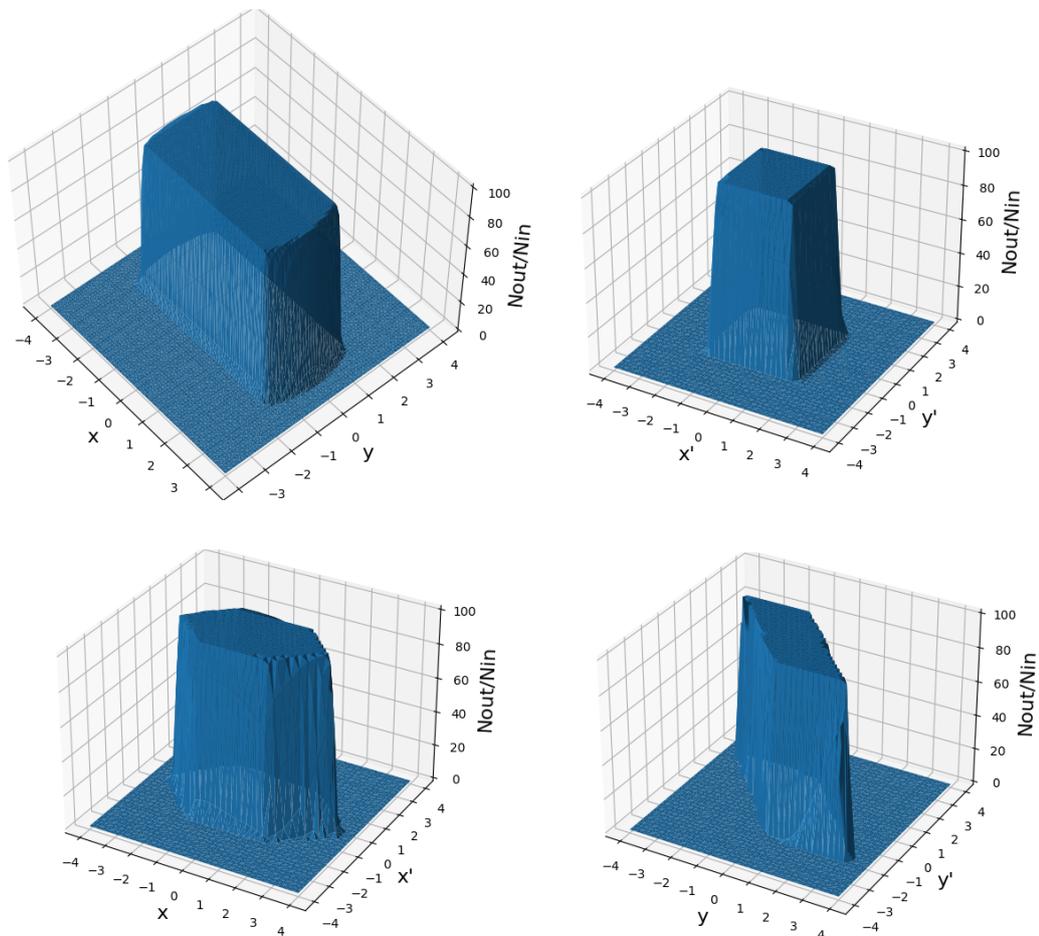


Рисунок 4.12 — Процент пройденных через канал К-500 позитронов в направлении ВЭПП-2000 при попарном варьировании параметров выпуска пучка (координаты выпучка и угла)

Видно, что существует область, оставаясь внутри которой пучок будет проходить транспортный канал практически без потерь ("платформа"). Ширина этой области невелика - около ± 1.5 мм \times ± 3 мм для XU и ± 1.5 мрад \times ± 1.5 мрад для $X'U'$.

Другой важный аспект для проведения корректировок - область линейности измеренной матрицы отклика. В нашем случае основной нелинейный вклад вносят сами датчики положения пучка, которые допускают значительное отклонение координаты пучка в их электростатическом центре без нарушения линейности матрицы отклика, и лишь малое отклонение координаты пучка по краям. Для выявления размеров области линейности ДПП были взяты многочлены для вычисления координат пучка по измеренным значениям напряжения на пластинах ДПП при пролете пучка (рисунок 4.13 и формула (4.2)). Сами же эти многочлены были получены путем калибровки датчиков.

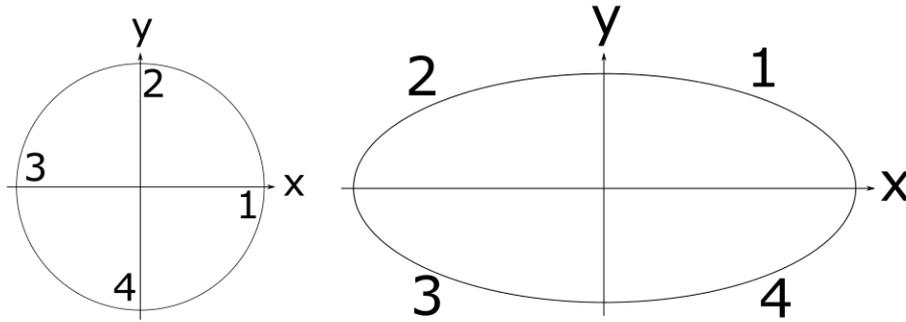


Рисунок 4.13 — Схема расположения пластин ДПП с круглым сечением (слева) и эллипсоидным (справа)

$$\begin{cases} x = a_{00} + a_{10}h + a_{01}v + a_{20}h^2 + a_{11}hv + \\ \quad + a_{02}v^2 + a_{30}h^3 + a_{21}h^2v + a_{12}hv^2 + a_{30}v^3, \\ y = b_{00} + b_{10}h + b_{01}v + b_{20}h^2 + b_{11}hv + \\ \quad + b_{02}v^2 + b_{30}h^3 + b_{21}h^2v + b_{12}hv^2 + b_{30}v^3. \end{cases} \quad (4.2)$$

Значения h и v вычисляются в зависимости от типа датчика: (4.3) для датчика круглого сечения (рисунок 4.13 (слева)), (4.4) для датчика эллипсоидального сечения (рисунок 4.13 (справа)). Величина самих коэффициентов a_{ij} и b_{ij} для датчиков круглого и эллипсоидального сечения приведены в Приложении Б.

$$h = \frac{U_1 - U_3}{U_1 + U_3}, v = \frac{U_2 - U_4}{U_2 + U_4}; \quad (4.3)$$

$$h = \frac{U_1 - U_2 - U_3 + U_4}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}, v = \frac{U_1 + U_2 - U_3 - U_4}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}. \quad (4.4)$$

Суть определения вклада нелинейности заключалась в следующем.

Пусть имеется величина $A(x)$, чье разложение в ряд Тейлора в некоторой точке x_0 задается выражением $A(x) = A(x_0) + A'(x_0)(x - x_0) + A''(x_0)\frac{(x-x_0)^2}{2}$, тогда можно определить смещение $\delta x = x - x_0$, при котором вклад линейной компоненты (первого члена разложения ряда) и нелинейной (второго) сравниваются. В данной работе выяснялось значения величин h и v , при котором вклад нелинейной компоненты будет равен 10% от линейной, после чего определялось соответствующее смещение координат X и Y . Далее строились графики нелинейностей, представленные на рисунке 4.14.

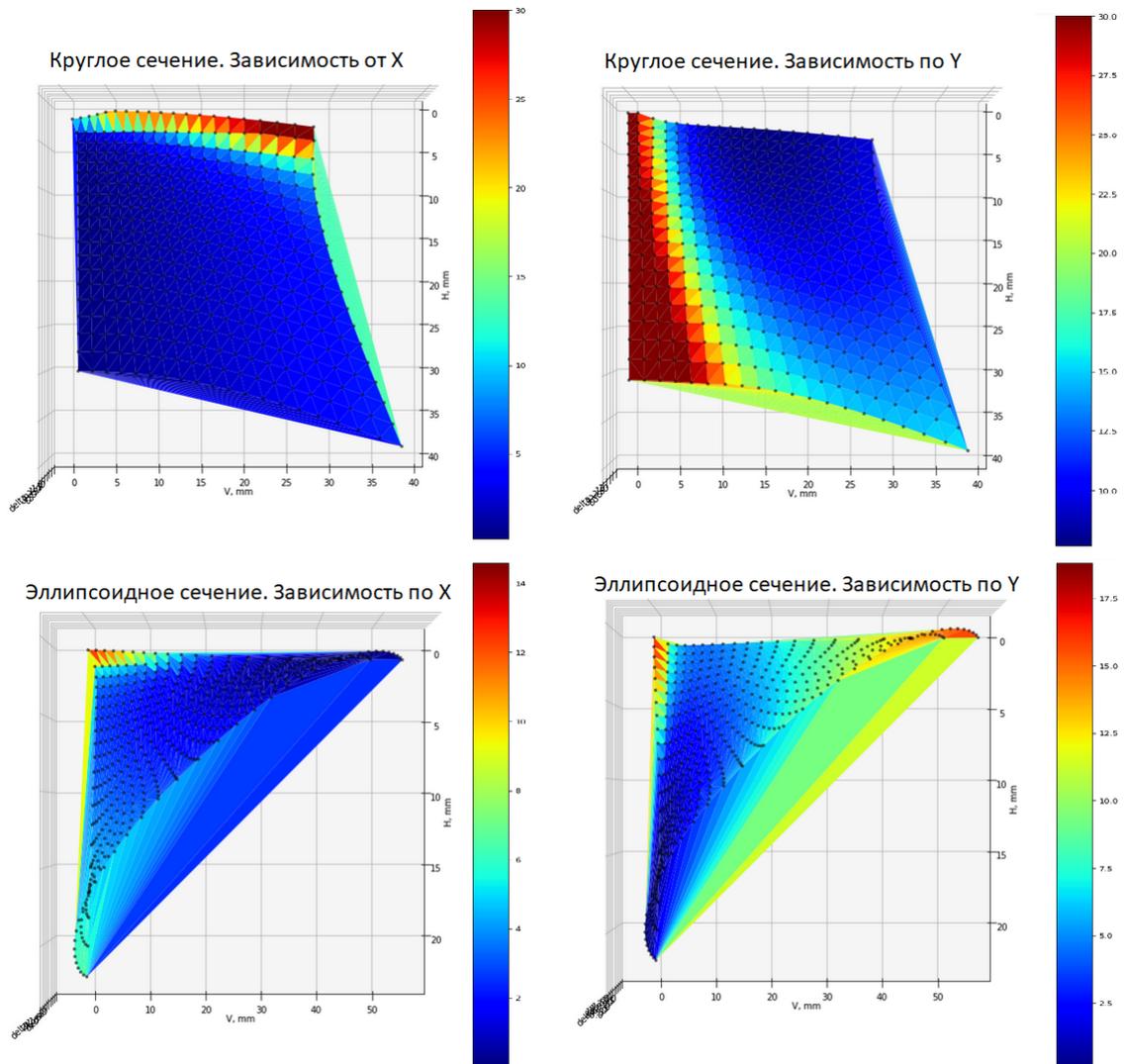


Рисунок 4.14 — Вклад нелинейных компонентов многочленов для вычисления координат пучка по измеренным значениям напряжения на пластинах ДПП на уровне 10%

Из графиков нелинейности видно, что область линейного определения координат пучка (по уровню 10%) невелика, и может составлять величину 2-3 мм при достаточно больших отклонениях пучка (около 10-15 мм, где часто проходит его орбита) от электростатического центра датчика.

4.3.2 Алгоритм удержания орбиты пучка

Матрица отклика - это таблица, которая содержит в себе массив изменения координат пучка в зависимости от возмущающего действия на пучок. Когда речь идет про коррекцию орбиты, обычно возмущение задается изменением тока дипольного корректора. Каждая строка (или столбец – в зависимости от типа представления самой матрицы) соответствует изменению тока одного корректора. Отсюда, найдя обратную матрицу к матрице отклика появляется возможность *задавать* нужное искажение орбиты и вычислять соответствующее новому положению пучка токи корректоров. Ввиду того, что матрица отклика не является квадратной, для нахождения обратной (псевдообратной) матрицы используется *SVD*-разложение. При этом надо помнить, что ресурс источников тока, которые питают дипольные корректоры ускорителя ограничены, а это значит, что слишком малые сингулярные числа, вызывающие наибольшие изменения тока корректоров, приходится выбрасывать при обращении матрицы, вследствие чего псевдообратная матрица перестает быть таковой в полном смысле этого слова и коррекцию орбиты нельзя провести разом за один шаг, алгоритм становится итерационным.

Вышеприведенные рассуждения легли в основу алгоритма, выполняющего коррекцию (удержание) орбиты пучка. Для его функционирования необходима актуальная псевдообратная матрица, которая подготавливается заранее экспериментально, путем нахождения наиболее удачного "отсечения" слишком малых сингулярных чисел *SVD*-разложения. Программа *orbit* постоянно следит за отклонением орбиты от сохраненной оператором в программе и при среднеквадратичном отклонении пучка более 1 мм красит ярлык "ORBIT" в красный цвет (рисунок 4.5), что является сигналом для оператора о необходимости проведения корректировки положения пучка в вакуумной камере накопителя-охладителя. Оператору при этом необходимо остановить автома-

тику комплекса, накопить в НО ток около 20-30 мА, загрузить приложению псевдообратную матрицу и нажатием кнопки "on" запустить процесс корректировки орбиты. Алгоритм самостоятельно вычислит искажение орбиты, с помощью матрицы рассчитывает 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 орбиту в заданный диапазон значений, то он остановит свою работу и известит об этом оператора. 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 ДПП, потому ставить задачу скорректировать орбиту точнее не имеет физического смысла.

Пример результата коррекции орбиты можно наблюдать на рисунке 4.15. Рисунок 4.16 показывает значение токов корректоров перед коррекцией и после. Само искажение было задано изменением тока одного корректора - "2F1_X", чье установленное значение было изменена с 0 мА до 2500.

4.4 Выводы к Главе 4

Для инжекционного комплекса ВЭПП-5 было реализовано программное обеспечение по контролю параметров пучка. Оно покрывает широкий спектр задач, начиная от обработки данных с датчиков положения пучка и их отображения, заканчивая измерением матрицы отклика накопителя-охладителя и формированием «ручек». Эти инструменты позволяют проводить эксперименты по изучению параметров пучка, влиянию на них подсистем ускорителя, что опосредованно можно использовать и как способ для изучения самих этих подсистем. Также разработанное программное обеспечение облегчает решение ключевых задач при наладке ускорителя, таких как изменение энергии пучка в накопителе-охладителе комплекса, создание локальных искажений положения пучка в вакуумной камере накопителя, изменение частот бетатронных колебаний пучка.

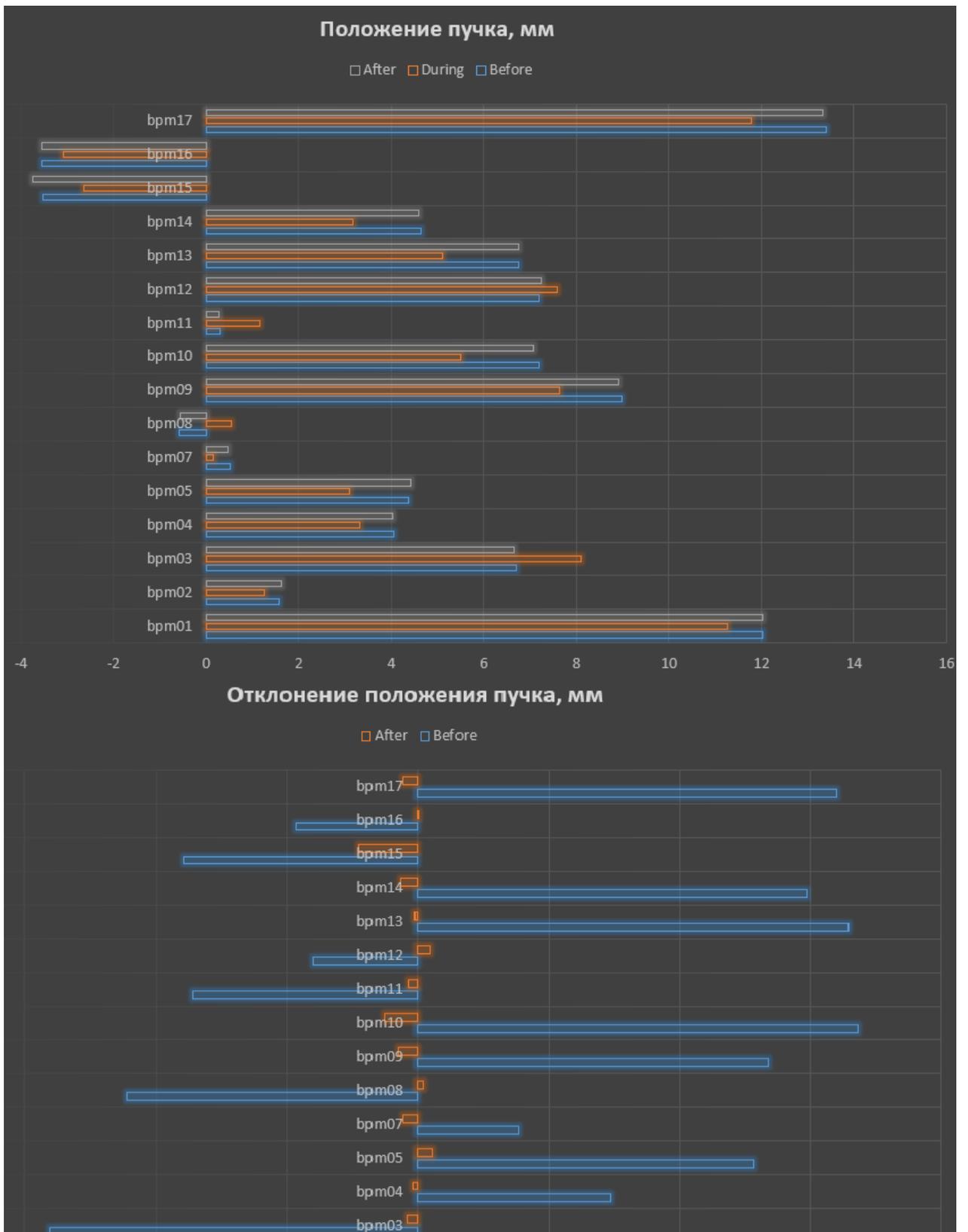


Рисунок 4.15 — Коррекция положения пучка. Сверху представлены изначальные координаты пучка до искажения (синий), после искажения (оранжевый) и после проведения коррекции орбиты (серый). Снизу показано то, какое искажение орбиты было задано и каким оно осталось после коррекции

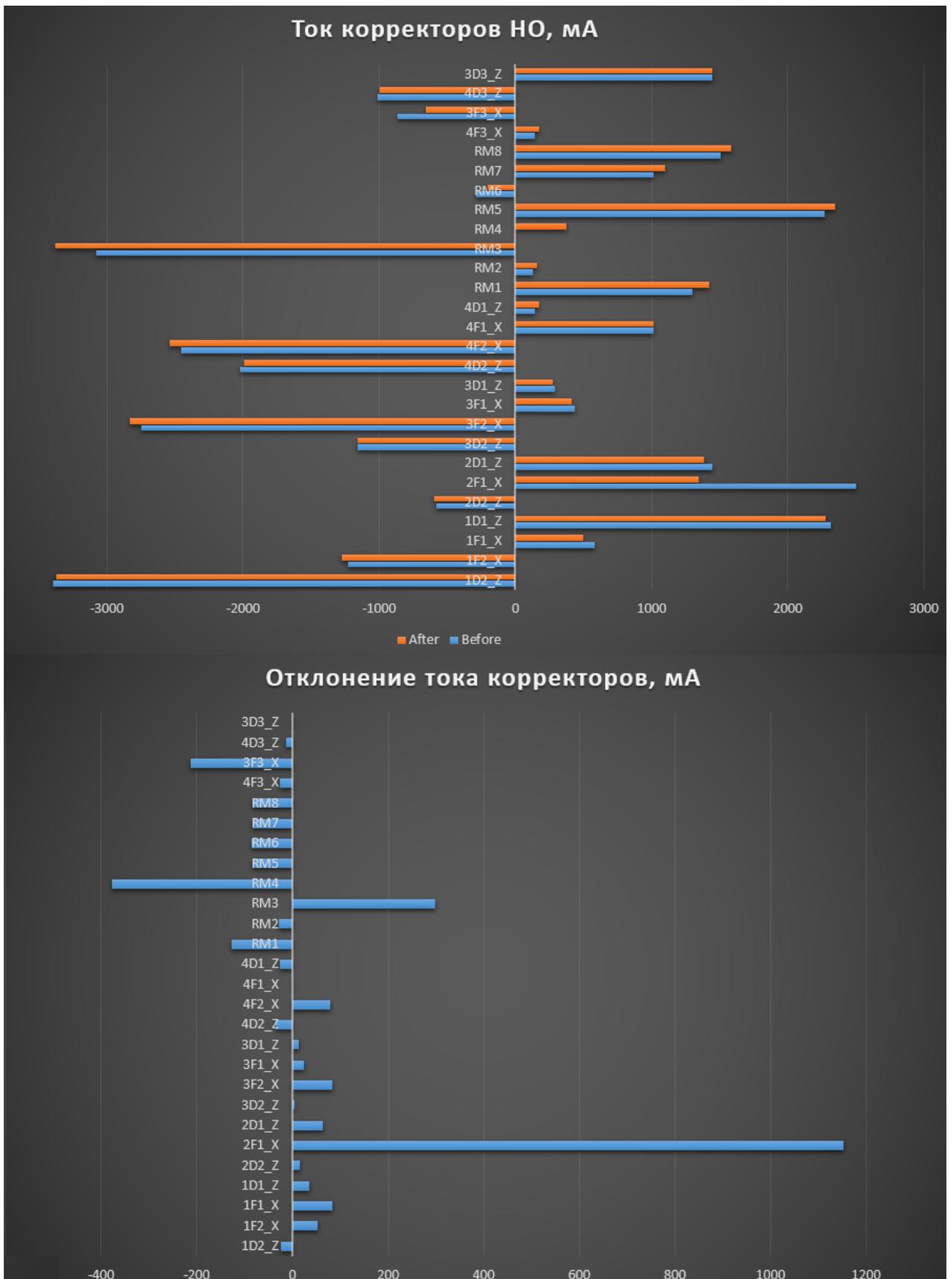


Рисунок 4.16 — Изменение токов корректоров при коррекции орбиты пучка. Сверху представлены изначальные токи (синий) и после проведения коррекции орбиты (оранжевый). Снизу показано какое изменение токов было выполнено

Созданными программными инструментами была измерена зависимость захваченных накопителем-охладителем позитронов в режиме работы на коллайдер ВЭПП-2000 и были обнаружены более оптимальные значения бетатронных частот, соответствующих большему числу инжектированных частиц (увеличен ток пучка накопителя с 15 мА до 18 мА за цикл инжекции). Регулярное применение такой процедуры позволит накопителю-охладителю инжекционного комплекса работать при том значении частот, которые отвечают локальному максимуму темпов накопления частиц.

Другим важным результатом проделанной работы является подготовленный и протестированный на накопителе-охладителе алгоритм по корректировке положения пучка. Он, имея в своем арсенале подходящую псевдообратную матрицу отклика, может помочь оператору удерживать орбиту пучка в заданном диапазоне значений. Это повышает стабильность работы комплекса в долгосрочной перспективе, исключая из "функции" работы комплекса зависимость от параметра "изменение углов и координат выпуска пучка в канал К-500".

Заключение

Основными целями проделанной работы являлись 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.

Помимо этого было необходимо разработать программные инструменты контроля и управления параметрами пучка для решения задач по оптимизации параметров магнитной системы накопителя и положения пучка, хроматизма, частот бетатронных колебаний.

В итоге, было проведено изучение коллективных эффектов пучка накопителя-охладителя ВЭПП-5: изучен феномен удлинения пучка НО и искажения его формы, показано, что причиной этого является искажения потенциальной ямы ВЧ-системы накопителя-охладителя. По результатам обработки измерений продольного профиля пучка стрик-камерой и диссектором была определена мнимая часть импеданса связи накопителя-охладителя, действительная же – с помощью измерений сдвига синхронной фазы пучка диссектором.

При проведении измерения продольного профиля пучка при его инжекции из линейного ускорителя в накопитель было обнаружено, что слияние 16 сгустков, созданных СВЧ-системой линейного ускорителя происходит значительно быстрее характерного времени радиационного затухания пучка. Моделирование захвата пучка помогло не только определить, что причиной тому является возникновение микроволновой неустойчивости, но и оценить параметры эквивалентной RLC -цепи для представления импеданса связи накопителя-охладителя.

В дальнейшем построенная модель 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. Также моделирование подтвердило гипотезу сохранения частиц пучка при его перегруппировке из основного резонатора в дополнительный путем медленного отключения первой ВЧ-станции и включения второй соответственно.

Также было реализовано программное обеспечение по контролю параметров пучка для инжекционного комплекса ВЭПП-5 и созданы службы, позволяющие автоматизировать работу с ускорителем. Они покрывают широкий спектр задач, начиная от обработки данных с датчиков положения пучка и их отображения, заканчивая измерением матрицы отклика накопителя-охладителя и формированием «ручек». Эти инструменты позволяют проводить эксперименты по изучению параметров пучка, влиянию на них подсистем ускорителя, что опосредованно можно использовать и как способ для изучения самих этих подсистем. Также разработанное программное обеспечение облегчает решение ключевых задач при наладке ускорителя, таких как изменение энергии пучка в накопителе-охладителе комплекса, создание локальных искажений положения пучка в вакуумной камере накопителя, изменение частот бетатронных колебаний пучка.

Созданными программными инструментами была измерена зависимость захваченных накопителем-охладителем позитронов в режиме работы на коллайдер ВЭПП-2000 и были обнаружены более оптимальные значения бетатронных частот, соответствующих большему числу инжектированных частиц (увеличен ток пучка накопителя с 15 мА до 18 мА за цикл инжекции). Регулярное применение такой процедуры позволит накопителю-охладителю инжекционного комплекса работать при том значении частот, которые отвечают локальному максимуму темпов накопления частиц.

Другим важным результатом проделанной работы является подготовленный и протестированный на накопителе-охладителе алгоритм по корректировке положения пучка. Он, имея в своем арсенале подходящую псевдообратную матрицу отклика, помогает оператору удерживать орбиту пучка в заданном диапазоне значений. Это повышает стабильность работы комплекса в долгосрочной перспективе, исключая из «функции» работы комплекса зависимость от параметра «изменение углов и координат выпуска пучка в канал».

Сейчас подобные измерения и последующие корректировки магнитной системы могут проводиться регулярно и стать неотъемлемой частью процесса настройки и рутинной работы инжекционного комплекса.

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/icaleps2011/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. — / Н. 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/wepou045.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 обращения: 09.04.2023).
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.
23. Probing Beam Collective Effects in the Damping Ring of the VEP-P-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.
24. 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.
 25. 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.
 26. 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).
 27. 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).
 28. Балакин, В. Программные инструменты для контроля и управления параметрами 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).

29. Chao, A. Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators. / A. Wu Chao. — Dallas : Wiley-Interscience Publication “JOHN WILEY and SONS, INC”, 1993. — P. 384. — Текст : непосредственный.
30. Chao, A. Handbook of Accelerator Physics and Engineering. / A. Wu Chao, M. Tigner. — New Jersey : World Scientific Publishing Co. Pre. Ltd, 1998. — P. 681. — Текст : непосредственный.
31. Пестриков, Д. В. Лекции по когерентным колебаниям: учебное пособие / Д. В. Пестриков ; Новосибирский государственный университет. — Новосибирск: НГУ (университет), 1996. — 175 с. — Текст : непосредственный.
32. Ruggiero, A. Theory of longitudinal instability for bunched electron and proton beams. / A. Ruggiero. — Текст : электронный // IEEE Trans. On Nucl. Science. — 1997. — Vol. 24, nr 3. — P. 1205-1207. — URL: https://accelconf.web.cern.ch/p77/PDF/PAC1977_1205.PDF (дата обращения: 09.04.2023).
33. Карчевский, Е. М. Лекции по линейной алгебре и аналитической геометрии: учебное пособие / Е. М. Карчевский, М. М. Карчевский ; Казанский (Приволжский) федеральный университет. — Казань: КПФУ (университет), 2014. — 352 с. — ISBN 978-5-00019-193-4. — Текст : электронный. — URL: https://kpfu.ru/portal/docs/F999414649/A_G_2014.pdf (дата обращения: 09.04.2023).
34. Chung, Y. Closed Orbit Correction Using Singular Value Decomposition of the Response Matrix. / Y. Chung, G. Decker, K. Evans, Jr. — Текст : электронный // Proceedings of International Conference on Particle Accelerators (Washington, DC, USA). — Washington, 1993. — P. 2263-2265. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=309289> (дата обращения: 09.04.2023).
35. Eckart, C. The approximation of one matrix by another of lower rank. / C. Eckard, G. Young. — Текст : электронный // PSYCHOMETRIKA. — 1936. — Vol. 1, nr 3. — P. 211-218. — URL: <https://ccrma.stanford.edu/dattorro/eckar%t26young.1936.pdf> (дата обращения: 09.04.2023).
36. Зинин, Э. И. Стробоскопический метод электронно-оптической хронографии с пикосекундным разрешением на основе диссектора с

- электростатической фокусировкой и отклонением. / Э. И. Зинин. — Текст : электронный. — // Препринт ИЯФ. — 1981. — URL: https://www.inp.nsk.su/images/preprint/1981_084.pdf (дата обращения 09.04.2023).
37. Volkhovityanov, D VEPP-5 injection complex control system base software upgrade. / D. Volkhovityanov, F. Emanov. — Текст : электронный // Proceedings, 26th Russian Particle Accelerator Conference (Protvino, Russia). — Protvino, 2018. — P. 417-419. — URL: <https://accelconf.web.cern.ch/rupac2018/papers/thpsc07.pdf> (дата обращения: 09.04.2023).
38. Накопитель-охладитель инжекционного комплекса ВЭПП-5. / В. В. Анашин, С. А. Беломестных, А. Н. Ворошилов [и др.]. — Текст : электронный. — // Препринт ИЯФ. — 1992. — URL: https://www.inp.nsk.su/images/preprint/1992_044.pdf (дата обращения 09.04.2023).
39. Статус и перспективы инжекционного комплекса ВЭПП-5. / Ф. А. Еманов, А. В. Андрианов, К. В. Астрелина [и др.]. — Текст : электронный // Письма в ЭЧАЯ. — 2018. — Т. 15, № 7. — С. 624-629 — URL: http://www1.jinr.ru/Реран_letters/panl_2018_7/03_Emanov_1.pdf (дата обращения: 09.04.2023).
40. Low-energy electron-positron collider to search and study ($\mu^+\mu^-$) bound state. / A. Bogomyagkov, V. Druzhinin, E. Levichev [et al.]. — Текст : электронный // EPJ Web of Conferences. — 2018. — Vol. 181, nr 01032. — P. 7. — URL: https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2018/16/epjconf_exa2017_01032.pdf — Дата публикации: 25.06.2018.
41. Volkhovityanov, D. CXv4, a modular control system. / D. Volkhovityanov, P. Cheblakov, F. Emanov. — Текст : электронный // Proceedings of the 15th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (Melbourne, Australia). — Melbourne, 2015. — P. 915-918. — URL: <https://accelconf.web.cern.ch/ICALPCS2015/papers/wepgf093.pdf> (дата обращения: 09.04.2023).

42. Черепанов В. Диагностика пучков заряженных частиц: учебное пособие / В. Черепанов ; Новосибирский государственный университет. — Новосибирск: НГУ (университет), 2007. — 100 с. — Текст : непосредственный.
43. Safranek J. Experimental determination of storage ring optics using orbit response measurements. / J. Safranek. — Текст : электронный // Nucl. Instrum. Methods A. — 1997. — Vol. 388. P. 27-36. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900297003094> — Дата публикации: 03.12.1997.

Приложение А

Параметры станций датчиков положения пучка накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5

На накопителе-охладителе установлено 16 4-х канальных датчиков положения пучка и один полосковый датчик. Сигналы с пластин ДПП поступают на входы станции датчиков положения пучка (СДПП), где проходит оцифровка наведенного пучком напряжения на каждой из пластин, формирование пакетов данных и их отправка драйверу. Драйвер производит предобработку полученных значений для их последующего использования. Блок-схема СДПП показана на рисунке А.1. Основные параметры станции приведены в таблице А1.

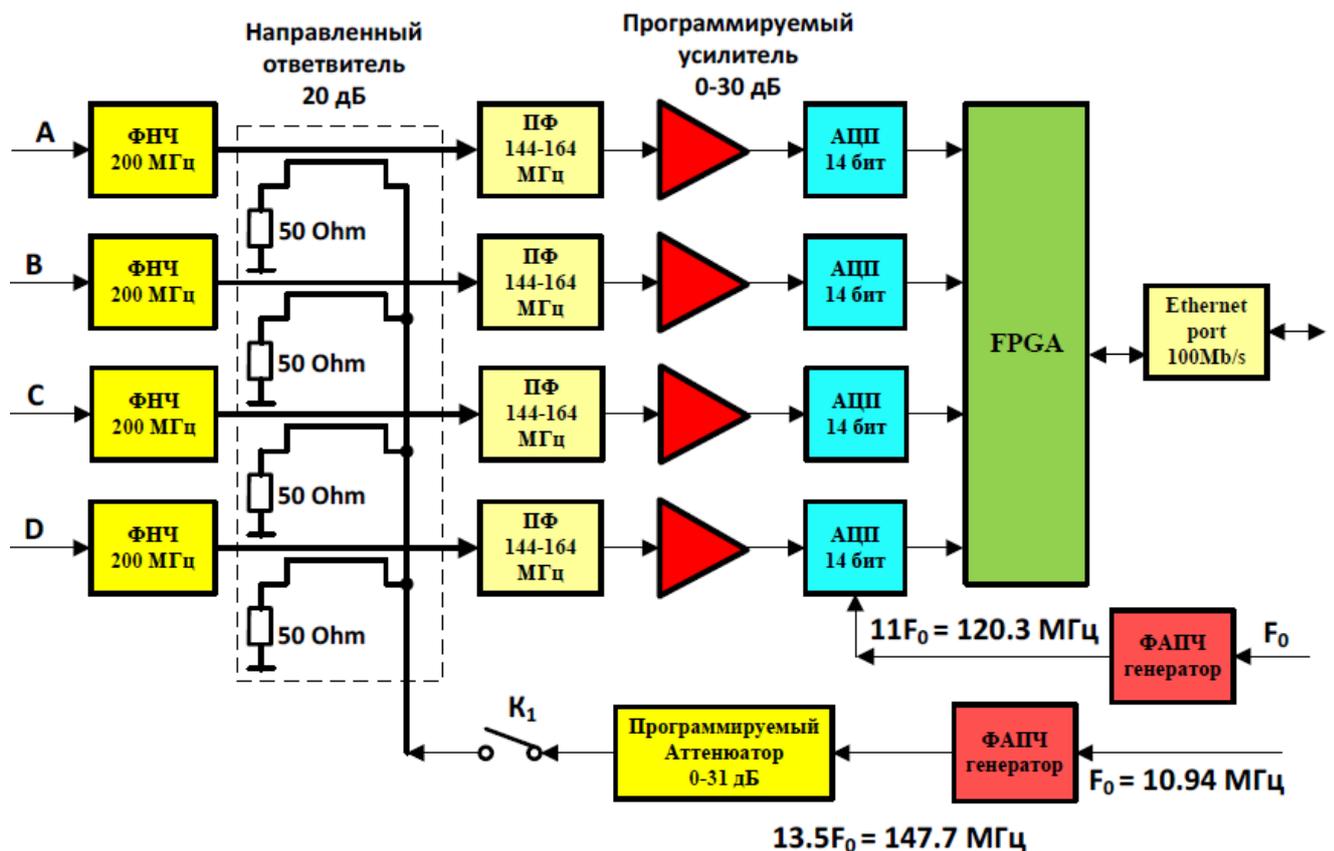


Рисунок А.1 — Блок-схема станции датчика положения пучка накопителя-охладителя.

Таблица А1 — Основные параметры станции датчиков положения пучка для геометрического фактора $G_X = G_Y = 20$ мм.

Диапазон токов пучка	0.5 - 200 мА
Разрешение при времени измерения 100 мс при токах 20-200 мА при токах 1 - 10 мА	0.2 - 0.5 мкм 1 - 3 мкм
Температурная нестабильность результатов измерений*	менее 2 мкм/°С
Зависимость результатов измерений от тока пучка* при токах пучка 5 - 200 мА при токах 1 - 200 мА	менее 15 мкм менее 50 мкм
Зависимость результатов измерения от кода усиления*	менее 20 мкм
Разрешение поворотных измерений при токах пучка 20 - 100 мА при токе 5 мА при токе 1 мА	лучше 4-5 мкм ≈ 20 мкм ≈ 100 мкм
Емкость буфера поворотных измерений	128 000 оборотов
Регулировка усиления каналов	28 дБ

*данные параметры действительны при использовании калибровочного сигнала, если его не использовать, то они будут в 5-6 раз хуже.

Параметры точности измерений станций датчиков положения пучка были определены с использованием тестовых сигналов – синусоидальной формы частотой ≈ 153 МГц и импульсного сигнала (импульсов длительностью 1.5 нс, следующих с частотой повторения $F_0 = 10.9374$ МГц). Данные сигналы подавались через разветвитель сигналов одновременно на 4 входа пикап-станции. Зная параметры ДПП, прежде всего геометрические факторы, можно оценить параметры точности непосредственно в микронах.

Автором электроники является сотрудник ИЯФ СО РАН Г.В. Карпов, публикации находятся в стадии подготовки.

Приложение Б

Значение коэффициентов a_{ij} и b_{ij} многочленов для вычисления координат пучка при измеренном напряжении с пластин датчиков положения пучка

Многочлены для вычисления координат пучка по измеренным значениям напряжения на пластинах датчиков положения пучка при пролете пучка:

$$\begin{cases} x = a_{00} + a_{10}h + a_{01}v + a_{20}h^2 + a_{11}hv + \\ \quad + a_{02}v^2 + a_{30}h^3 + a_{21}h^2v + a_{12}hv^2 + a_{30}v^3, \\ y = b_{00} + b_{10}h + b_{01}v + b_{20}h^2 + b_{11}hv + \\ \quad + b_{02}v^2 + b_{30}h^3 + b_{21}h^2v + b_{12}hv^2 + b_{30}v^3. \end{cases}$$

Значения h и v вычисляются в зависимости от типа датчика:

$$\begin{cases} h = \frac{U_1 - U_3}{U_1 + U_3}, v = \frac{U_2 - U_4}{U_2 + U_4}, & \text{если круг,} \\ h = \frac{U_1 - U_2 - U_3 + U_4}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}, v = \frac{U_1 + U_2 - U_3 - U_4}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4}, & \text{если эллипс.} \end{cases}$$

Величина коэффициентов a_{ij} и b_{ij} для датчиков круглого сечения:

$$\begin{pmatrix} a_{00} = 0.744 & a_{10} = 21.6 & a_{01} = -0.303 & a_{20} = 0 & a_{11} = 0 \\ a_{02} = 0 & a_{30} = 8.1 & a_{21} = -0.97 & a_{12} = 8.13 & a_{30} = 1.58 \\ b_{00} = -0.569 & b_{10} = 0.211 & b_{01} = 21.4 & b_{20} = 0 & b_{11} = 0 \\ b_{02} = 0 & b_{30} = -0.705 & b_{21} = 12.2 & b_{12} = -0.993 & b_{30} = 6.64 \end{pmatrix}$$

Величина коэффициентов a_{ij} и b_{ij} для датчиков эллипсоидального сечения:

$$\begin{pmatrix} a_{00} = 0.297 & a_{10} = 12.1 & a_{01} = -0.313 & a_{20} = 0 & a_{11} = 0 \\ a_{02} = 0 & a_{30} = 10.1 & a_{21} = 0.352 & a_{12} = -15.8 & a_{30} = -0.959 \\ b_{00} = -0.331 & b_{10} = -0.291 & b_{01} = 24.9 & b_{20} = 0 & b_{11} = 0 \\ b_{02} = 0 & b_{30} = 0.696 & b_{21} = -36.6 & b_{12} = -0.397 & b_{30} = 3.08 \end{pmatrix}$$

Калибровка датчиков проводилась сотрудником ИЯФ СО РАН Ю. Роговским, соответствующие публикации находятся в стадии подготовки.