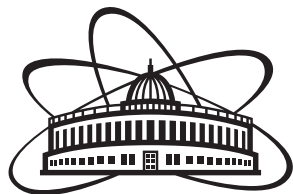


ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
ИМ. В. И. ВЕКСЛЕРА И А. М. БАЛДИНА

На правах рукописи



A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Shandov', written in a cursive style.

Шандов Михаил Михайлович

**Коррекция ведущего магнитного поля «Бустера»
NICA**

Специальность 1.3.18 —
«Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна — 2023

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Костромин Сергей Александрович

Официальные оппоненты: **Винокуров Николай Александрович**,
доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН,
ФГБУН Институт ядерной физики им.
Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск,
Главный научный сотрудник лаборатории 8-1
Филатов Юрий Николаевич,
кандидат физико-математических наук,
ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (НИУ)» МФТИ, МО, г. Долгопрудный,
Ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией физики ускорителей

Защита состоится «_____» _____ 2024 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета ОИЯИ.02.01.2024.П при Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина Объединенного института ядерных исследований по адресу: г. Дубна, Московская область, ул. Академика Балдина, д. 4.

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru/ru/Dissertations/Announcement/XXX>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 141980, г. Дубна, Московская область, ул. Академика Балдина, д. 4, ученому секретарю диссертационного совета ОИЯИ.02.01.2024.П.

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 года.
Телефон для справок: +7 (49621) 6-32-06.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ОИЯИ.02.01.2024.П,
канд. физ.-мат. наук

В. А. Арефьев

Общая характеристика работы

Актуальность работы. NICA (Nuclotron—based Ion Collider fAcility) — новый ускорительно-накопительный комплекс, сооружаемый в Лаборатории Физики Высоких Энергий Объединённого института ядерных исследований (ЛФВЭ ОИЯИ) для изучения свойств барионной материи высокой плотности. Ускорительный комплекс включает различные источники ионов, 2 линейных ускорителя, новый сверхпроводящий (СП) бустерный синхротрон (Бустер) с максимальной магнитной жесткостью 25 Тл·м, действующую базовую установку ЛФВЭ — СП синхротрон Нуклотрон с максимальной магнитной жесткостью 38 Тл·м, новый СП коллайдер, состоящий из двух накопительных колец длиной 503 м каждое, с максимальной магнитной жесткостью 45 Тл·м и каналы транспортировки пучков. Комплекс будет обеспечивать пучками заряженных частиц экспериментальные установки для выполнения исследований в различных областях: релятивистская ядерная физика, физика спина частиц, радиобиология, прикладные исследования и др.

Инжекционная цепочка тяжёлых ионов (вплоть до $^{197}\text{Au}^{31+}$ и $^{209}\text{Bi}^{35+}$) в Нуклотрон включает в себя источник тяжёлых многозарядных ионов КРИОН, линейный ускоритель тяжёлых ионов (ЛУТИ), Бустер, станцию обдирки и каналы транспортировки пучков. Сборка Бустера (заключительного элемента цепочки) завершена в 2020 г., а в декабре проведен первый сеанс пусконаладочных работ (ПНР) с пучком. В настоящее время завершено четыре сеанса ПНР с различными пучками ионов, два из которых сопровождалось проведением экспериментов на установке BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron). Тем самым, завершён первый этап сооружения ускорительного комплекса NICA.

Ключевыми параметрами любого коллайдера являются энергия пучка, светимость и её время жизни. Несмотря на наличие систем электронного и стохастического охлаждения в коллайдере NICA, проектная светимость $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ достижима только при условии, что интенсивность инжектируемого пучка достаточна для накопления требуемого числа ионов. Ключевую роль в получении требуемой интенсивности пучка тяжёлых ионов играет Бустер, поскольку основные потери ожидаются на начальном этапе ускорения пучка в нём (на энергиях до 5 МэВ/нуклон).

Возмущения замкнутой орбиты (ЗО) в синхротронах приводят к непосредственным потерям пучка на стенках вакуумной камеры (ионопровода), а также к усилению влияния ошибок (в том числе нелинейно зависящих от амплитуды возмущения ЗО) ведущего магнитного поля (МП) на устойчивость движения заряженных частиц, что приводит к потерям пучка под действием разного рода резонансов. Эти факторы оказывают определяющее влияние на интенсивность циркулирующего и ускоряемого пучка. В синхротронах с характерными поперечными размерами ионопровода в

несколько десятков мм допустимое возмущение ЗО, как правило, составляет от 2 до 5 мм. Для достижения проектных параметров комплекса NICA отклонение ЗО Бустера от траектории, проходящей по центру элементов магнитооптической структуры, не должно превышать 5 мм на протяжении всего цикла ускорения от инжекции до вывода, включая этап электронного охлаждения. Именно поэтому, одной из первых операций после настройки инжекции пучка в синхротрон является коррекция ЗО и обеспечение устойчивой циркуляции для перехода к адиабатическому захвату пучка в режим ускорения.

Требования, предъявляемые к величине возмущения ЗО, невозможно обеспечить без системы коррекции ведущего МП. В Бустере NICA для реализации этих требований, а также для компенсации влияния краевых полей, погрешности позиционирования структурных элементов магнитной оптики, неоднородностей магнитных полей и «натуральной» хроматичности разработана развитая система коррекции.

Для настройки и эксплуатации такой системы необходимо рассчитать основные характеристики полей корректирующих магнитов (корректоров), а также оценить влияние погрешностей МП на динамику циркулирующего и ускоряемого пучка.

Одной из ключевых характеристик любого кольцевого ускорителя является его динамическая апертура (ДА) отражающая устойчивость движения заряженных частиц в электромагнитном поле установки под действием всей совокупности возмущений. В процессе создания кольцевого ускорителя, важной задачей является оценка влияния ошибок магнитных полей её структурных элементов и системы коррекции ведущего МП на ДА. Получение ДА превышающей величину геометрического акцептанса свидетельствует о высоком качестве изготовления элементов магнитооптической структуры и проектирования системы коррекции ведущего МП.

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное исследование системы коррекции ведущего магнитного поля Бустера NICA и её использование при настройке устойчивой циркуляции и ускорении пучка с проектной интенсивностью.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Разработана и создана математическая модель магнитооптической структуры Бустера на основе данных измерений магнитных характеристик всех его структурных элементов.
2. Сделана оценка влияния ошибок магнитного поля Бустера на динамику циркулирующего и ускоряемого пучка.
3. Проведён расчёт основных магнитных характеристик корректоров ведущего поля Бустера.
4. Экспериментально исследованы характеристики магнитной структуры Бустера при работе с пучком.
5. Получена устойчивая циркуляция и ускорение пучка.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель магнитооптической структуры Бустера на основе данных измерений магнитных характеристик всех его структурных элементов.
2. Результаты расчётов влияния ошибок магнитного поля Бустера на динамику циркулирующего и ускоряемого пучка на основе данных измерений магнитных характеристик всех его структурных элементов.
3. Результаты расчётов динамической апертуры с учётом всех ошибок ведущего магнитного поля.
4. Результаты экспериментальной проверки физических характеристик системы коррекции ведущего магнитного поля Бустера.
5. Соответствие результатов измерений с предсказаниями математического моделирования на уровне точности 10 %.

Научная новизна:

1. Построена математическая модель Бустера на основе данных измерений магнитных характеристик его структурных элементов, описывающая динамические характеристики установки на уровне точности 10 %, что является достаточным для настройки ускорителя.
2. На основе данных измерений магнитных характеристик всех структурных элементов, впервые выполнен анализ влияния погрешностей ведущего магнитного поля Бустера на динамику циркулирующего и ускоряемого пучка.
3. Создана двумерная аналитическая модель, позволяющая рассчитать требуемый рабочий ток в обмотке корректора в зависимости от необходимой величины магнитного поля на уровне точности 5 %.

Практическая значимость результатов. Разработана методика расчёта динамической апертуры ускорителя и зависимостей бетатронных частот от начальных амплитуд частиц в пучке, с учётом всех выявленных ошибок ведущего магнитного поля. Создана и успешно применена методика исследования проверки полярности подключения источников питания корректоров. Впервые на инжекционном комплексе NICA реализована динамическая коррекция ЗО во всём диапазоне рабочих энергий Бустера.

Проведен физический пуск стартовой конфигурации системы коррекции ведущего магнитного поля Бустера, в ходе которого получена циркуляция пучка в Бустере и проведена компенсация возмущений ЗО при параметрах, близких к проектным.

Получен опыт настройки системы коррекции ведущего МП Бустера с использованием методик, разработанных на основе результатов моделирования динамики пучка на виртуальных моделях магнитооптической

структуры ускорителя, учитывающих полную статистику результатов магнитных измерений всех структурных элементов и моделирования полей элементов системы коррекции.

Использование созданной модели ускорителя и накопленный экспериментальный опыт его настройки позволяет разрабатывать программно-аппаратные средства автоматизированной настройки системы коррекции ведущего МП. Полученный опыт апробации методик настройки дает возможность применять данный подход в будущем для синхротронов и каналов транспортировки пучка ускорительного комплекса NICA.

Достоверность полученных результатов подтверждается итогами сеанса пусконаладочных работ бустерного синхротрона NICA, в том числе получением ускоренного пучка в кольце ускорителя.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: международных конференциях по ускорителям заряженных частиц «IPAC» (2017, г. Копенгаген, Дания; 2018, г. Ванкувер, Канада), Международной конференции по магнитным технологиям «MT 25» (2017, г. Амстердам, Нидерланды), всероссийских конференциях по ускорителям заряженных частиц «RuPAC» (2016, г. Санкт—Петербург, РФ; 2018, г. Протвино, РФ), конференциях молодых ученых и специалистов Объединенного Института Ядерных Исследований «Alushta-2022» (2022, г. Алушта, Крым) и «AYSS-2022» (2022, г. Дубна, РФ), международных семинарах по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В. П. Саранцева (2017, 2019, 2022, г. Алушта, Крым) и неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах в Объединенном институте ядерных исследований.

Личный вклад автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. Автором лично или при его определяющем участии были разработаны алгоритмы анализа экспериментальных данных и реализованы все программы обработки полученных результатов. Также, автором были проведены расчеты магнитных полей и выполнено моделирование динамики пучка, результаты которого изложены в диссертации. Кроме того, автор принимал участие в подготовке, проведении и обсуждении результатов экспериментов на Бустере NICA, представленных в диссертационной работе.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 13 печатных изданиях, 7 из которых изданы в периодических научных журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых Web of Science и Scopus, 6 — в тезисах докладов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и трёх приложений. Полный объем диссертации 188 страниц текста с 76 рисунками и 17 таблицами. Список литературы содержит 145 наименования.

Содержание работы

Во **введении** дано краткое описание ускорительного комплекса NICA, обосновывается важность и актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость.

Основное содержание работы изложено в четырёх главах.

Первая глава посвящена общему описанию систем Бустера NICA и обсуждению сводных результатов магнитных измерений его структурных элементов. Новый СП бустерный синхротрон — одна из ключевых установок в инжекционной цепочке тяжёлых ионов в Коллайдер и основной инжектор тяжёлых ионов в Нуклотрон.

Пучок из Бустера переводится в Нуклотрон по специальному каналу транспортировки заряженных частиц. Тяжелые ионы перед инжекцией в Нуклотрон полностью обдираются на мишени, установленной в канале, и сепарируются по зарядности, после чего ионы нецелевой зарядности направляются в предусмотренный поглотитель.

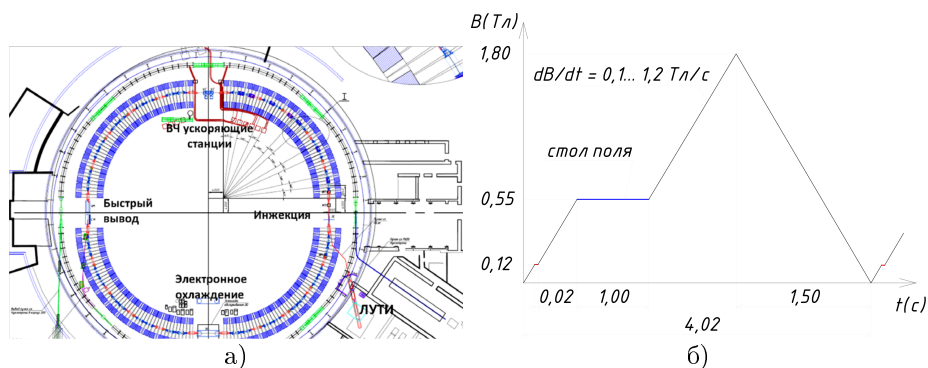


Рис. 1 — Схема расположения бустерного синхротрона ускорительного комплекса NICA в здании № 1 (синим показано ярмо Синхрофазотрона) ЛФВЭ ОИЯИ (а) и диаграмма «стандартного цикла» МП Бустера (б).

Кольцо Бустера с периметром 210,96 м размещается в корпусе № 1 ЛФВЭ ОИЯИ, внутри ярма магнита Синхрофазотрона (см. рис. 1а). Установка состоит из четырёх поворотных и четырёх прямолинейных участков (секций). На прямолинейных секциях располагаются устройства ввода и вывода пучков, высокочастотные (ВЧ) станции ускоряющей системы и система электронного охлаждения (СЭО) пучков. Максимальная магнитная жесткость Бустера составляет 25,2 Тл · м (поле дипольных магнитов — 1,8 Тл), что соответствует проектной энергии 578 МэВ/нуклон ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$.

Длительность рабочего цикла Бустера при ускорении тяжёлых ионов составляет 4,02 с (см. рис. 1б) — так называемый «стандартный цикл». Скорость изменения индукции МП в дипольных магнитах $dB/dt = 0,1-1,2$ Тл/с. При необходимости возможна технологическая пауза между циклами длительностью до 1 с и более.

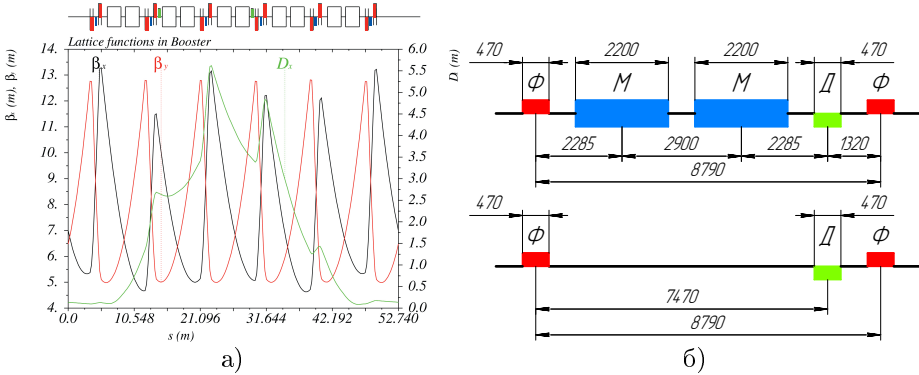


Рис. 2 — Оптические функции суперпериода (а), регулярный период (б, сверху) и прямолинейный промежуток (б, снизу) Бустера.

Факторами, обеспечивающими необходимую интенсивность ускоряемого пучка, связанными с характеристиками инжектируемых сгустков и динамикой движения заряженных частиц в ускорителе, являются достаточные величины продольного и поперечного акцептансов установки.

Адмиттанс (поперечный акцептанс) определяется геометрическими размерами вакуумной камеры, максимальным возмущением ЗО и оптическими функциями установки. Поэтому важно обеспечить устойчивое движение заряженных частиц в пределах адмиттанса ускорителя и возмущение ЗО не превышающее 5 мм для чего ведущее магнитное поле Бустера требует коррекции.

Магнитная структура Бустера состоит из четырёх суперпериодов (оптические функции одного суперпериода показаны на рис. 2а), в каждый из которых входят пять регулярных периодов и один период, не содержащий дипольных магнитов (всего 6 ячейки типа ДФО на один суперпериод). Регулярный период установки (см. рис. 2б) включает в себя фокусирующий (Ф) и дефокусирующий (Д) квадрупольный магниты, два дипольных магнита (М) и четыре малых свободных промежутка, предназначенных для размещения дипольных (ДК) и мультипольных (МПК) магнит-корректоров, коллиматоров гало пучка и диагностического оборудования.

Магнитная система Бустера устроена по аналогии с магнитной системой Нуклотрона: состоит из СП-магнитов с полем, формируемым железным ярмом (типа «оконная рама» для дипольных и с гиперболическими полюсами для квадрупольных магнитов) с обмоткой из трубчатого сверхпроводника. Дипольные магниты Бустера изогнуты (радиус кривизны по центральной (осевой) линии составляет 14,09 м), поперечные размеры геометрической апертуры магнита составляют (ШхВ): 130х67 мм. Радиус окружности вписанной в гиперболические полюса квадрупольного магнита: 95 мм.

Магнитное поле структурных элементов ускорителя ключевым образом определяет характер движения частиц (включая возмущение ЗО). Систематизация ошибок МП по результатам оценок достижимой конечной «точности» магнитных элементов и ограничений со стороны динамики движения частиц в установке позволила определить требования технического задания (ТЗ) на качество МП структурных элементов Бустера.

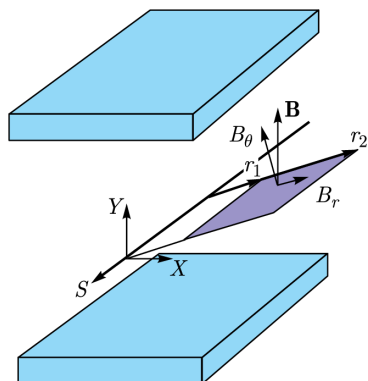


Рис. 3 — Измерительная рамка и система координат, используемая в анализе результатов МИ.

Каждый магнит Бустера во время сборки и испытаний в ЛФВЭ прошёл этапы «тёплых» (при температуре окружающей среды) и «холодных» (при рабочей температуре $-4,5$ К) магнитных измерений (МИ), целью которых является ранее обнаружение дефектов в магните, проверка качества его изготовления и сборки, а также измерение параметров МП, работающего в номинальном режиме. Для реализации серийных МИ была выбрана методика гармонических катушек с дополнительными требованиями:

- учёт конструктивных особенностей магнитов;
- обеспечение измерений магнитов всех типов;
- проведение необходимой серии измерений за один сеанс охлаждения;

- учёт невозможности использования антикриостата для измерительного датчика из-за геометрических ограничений апертуры магнитов.

При проведении МИ в каждом магните ТЗ регламентирует измерение следующих параметров ($r_{\text{ref}} = 30$ мм) (система координат показана на рис. 3):

- поле в центре: $B_{1;2} = B_y(s = 0) = B_{\text{ref}} \cdot b_{1;2}$;
- интеграл МП: $BL = \int_{-\infty}^{\infty} B_y ds = B_{\text{ref}} L \cdot b_{1;2}$;
- эффективная длина: $L_{\text{eff}} = BL/B_{\text{ref}}$;
- относительные (нормированные на B_{ref}) величины интегральных «гармоник» МП до 10-го порядка включительно: $b_n^*, a_n^*, n = \overline{1,10}$;
- угол наклона медианной плоскости относительно средней плоскости дипольного магнита: $\alpha_{\text{ми}} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} B_x ds}{\int_{-\infty}^{\infty} B_y ds} = \frac{a_1^*}{b_1^*}$;

Сводные результаты по всей серии «холодных» МИ (ХМИ) [1; 2; 8–13] для магнитной жёсткости 1,6 и 25,2 Тл·м приведены в таблице 1 (красным выделены параметры, превышающие допуск, определенный в ТЗ).

Таблица 1 — Сводные результаты ХМИ элементов Бустера ($r_{\text{ref}} = 30$ мм) [1; 3]

Параметр	Дипольный магнит		Квадрупольный магнит	
	Среднее	СКО	Среднее	СКО
Магнитная жёсткость 1,6 Тл·м				
α , мрад	-1,3	1,7	—	0,1
$dX = dY$, мм	—	—	—	0,1
$B_1 L (B_2 L)$, Тл·мм	—	0,19	—	0,06
$b_3 \cdot 10^{-4}$	-1,0	0,5	-2,0	4,5
$a_3 \cdot 10^{-4}$	—	—	1,5	4,5
$b_4 \cdot 10^{-4}$	—	—	7,5	3,0
$b_6 \cdot 10^{-4}$	—	—	5,0	0,5
Магнитная жёсткость 25,2 Тл·м				
α , мрад	-1,2	1,6	—	0,1
$dX = dY$, мм	—	—	—	0,1
$B_1 L (B_2 L)$, Тл·мм	—	2,19	—	0,70
$b_3 \cdot 10^{-4}$	8,5	0,5	-2,0	5,0
$a_3 \cdot 10^{-4}$	—	—	1,5	4,0
$b_4 \cdot 10^{-4}$	—	—	7,0	3,0
$b_6 \cdot 10^{-4}$	—	—	4,2	0,8
Отклонение относительной ошибки $B_1 L (B_2 L)$: $1-2 \cdot 10^{-3}$				

Для подтверждения возможности получения проектных параметров установки необходимо выполнение расчётов динамики циркулирующего и ускоряемого пучка с учётом полученных данных МИ структурных элементов ускорителя (см. табл. 1). Для исследования влияния ошибок МП на динамику циркулирующего и ускоряемого пучка построена математическая модель Бустера на основе сводных результатов МИ всех структурных элементов с использованием программного комплекса MAD-X, позволяющая выполнять оценки во всём диапазоне рабочих энергий установки [3; 4]. Данная модель, дополнительно, учитывает расстановку элементов и ошибки их позиционирования, наличие не циклирующих магнитных элементов (соленоид и магниты-корректора СЭО), а также позволяет независимо оценивать влияние отдельно выбранной ошибки.

В **Главе 2** исследуется влияние параметров МП Бустера на динамику циркулирующего и ускоряемого пучка. Выполнена оценка независимого влияния каждого из параметров МП структурных элементов согласно таблицы 1 для соответствующей магнитной жёсткости с учётом расстановки структурных элементов по периметру ускорителя.

Гамильтониан заряженной частицы e во внешнем электромагнитном поле, заданным векторным ($\vec{A}(\vec{x}, t)$) и скалярным ($\Phi(\vec{x}, t)$) потенциалами, имеет вид:

$$\mathcal{H}(\vec{x}, \vec{p}, t) = e\Phi(\vec{x}, t) + c \sqrt{(\vec{p} - e\vec{A}(\vec{x}, t))^2 + m_0^2 c^2}.$$

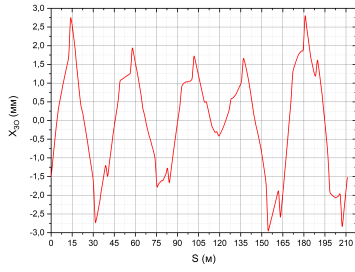
Для случая прохождения магнитного элемента ускорителя, поле которого задано в виде «гармоники» порядка n , можно записать:

$$\mathcal{H}_n = \frac{1}{n} \operatorname{Re} \left[(k_n^{(b)} + ik_n^{(a)})(x + iy)^n \right] + \frac{p_x^2 + p_y^2}{2(1 + \delta p)}. \quad (1)$$

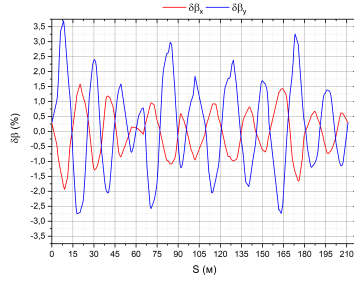
Здесь $k_n^{(b;a)} = \frac{1}{B\rho} \frac{\partial^{n-1} B_{y;x}}{\partial x^{n-1}}$ — нормализованная на магнитную жёсткость пучка ($B\rho$) «прямая» и «косая» (верхний индекс b и a , соответственно) «гармоника» МП порядка n ; $\delta p = (p - p_0)/p_0$ — относительное отклонение импульса частицы от равновесного значения.

Отклонения интегральной величины основной компоненты МП сказываются на возмущении ЗО (в случае дипольных магнитов) и амплитудных (или β -) функций (в случае квадрупольных магнитов) (см. рис. 4). Величины данных возмущений можно найти непосредственно из решения уравнения Хилла.

Учёт результатов МИ при расстановке магнитных элементов позволил минимизировать возмущения ЗО до ± 2 мм (1,6 Тл·м) и ± 3 мм (25,2 Тл·м). Таким образом, основной задачей системы дипольных корректирующих магнитов является компенсация случайных ошибок МП



а) 25,2 Тл · м



б) 1,6 Тл · м

Рис. 4 — Величина возмущения ЗО (а) и $\delta\beta$ (б).

обусловленных точностью позиционирования квадрупольных магнитов, где величина соответствующей β -функции принимает максимальное значение.

Оценка биения β -функции выполнена по относительной величине $\delta\beta = (\beta_{\text{pert}} - \beta_{\text{init}})/\beta_{\text{init}}$ (здесь β_{init} и β_{pert} — величина невозмущенной и возмущенной β -функции, соответственно), являющейся инвариантом. Для принятой расстановки элементов $\delta\beta_{x/y} < \pm 4/2\%$ (1,6 Тл · м) и $\pm 3/2\%$ (25,2 Тл · м), что значительно меньше величины, допустимой в современных СП-синхротронах и значительно расширяет возможности по работе в режиме накопления пучка при инжекции. Интегральные величины градиента МП квадрупольных магнитов не оказывают существенного влияния на стабильность значений амплитудных функций вдоль периметра кольца Бустера. Тем не менее, отличие средней интегральной величины градиента МП квадрупольных магнитов всей установки приводит к смещению положения рабочей точки, что необходимо учитывать при настройке источников питания магнитов.

Смещение бетатронных частот от влияния «прямых» квадрупольных «гармоник» (b_2 или G) можно также найти из решения уравнения Хилла. Поскольку ошибки магнитных полей элементов в результате измерений определены в виде относительных величин среднеинтегральных «гармоник» (здесь и далее), удобно перейти от интегрирования по периметру установки к суммированию усредненных параметров на длине элемента. Учитывая поведение β -функций:

$$\Delta\nu_{x,y} \approx \begin{cases} \frac{20}{4\pi} \frac{L_{\text{eff}}}{\rho} \left\langle \frac{1}{B_{\text{ref}}} \frac{\partial B_y}{\partial x} \right\rangle (\langle\beta_{x,y}\rangle_1 + \langle\beta_{x,y}\rangle_2), & \text{дипольный магнит;} \\ \frac{1}{4\pi} \sum_i \frac{\Delta(GL_{\text{eff}})_i (\pm \langle GL_{\text{eff}} \rangle)}{B\rho} \langle\beta_{x,y}\rangle_i, & \text{квадрупольный магнит.} \end{cases}$$

Выполненные оценки показали, что смещение бетатронных частот от влияния квадрупольных ошибок не превышает $2,0 \cdot 10^{-3}$ и $5,4 \cdot 10^{-3}$ для

дипольных и квадрупольных магнитов, соответственно, что является пренебрежимо малой величиной.

Для независимой оценки ошибок более высоких порядков, полагая, что рассматриваемая гамильтонова система близка к точно интегрируемой по Луивиллю, гамильтониан (1) может быть представлен в виде: «интегрируемая (невозмущённая) часть» + «малое возмущение»:

$$\mathcal{H}(J, \psi, \varepsilon) = \mathcal{H}_0(J) + \varepsilon \mathcal{H}_1(J, \psi) + \dots, \quad (2)$$

где ε — малый параметр; $\mathcal{H}_0(J)$ — гамильтониан вырожденной (не возмущённой) системы; (J, ψ) — переменные «действие-угол (фаза)». Возмущённая часть гамильтониана в (2) предполагается 2π -периодической по всем угловым переменным ψ и может быть найдена из (1) переходом к соответствующим координатам.

Оценка влияния «косых» квадрупольных «гармоник» (a_2) на связь бетатронных колебаний проведена только для дипольных магнитов по величине соответствующего коэффициента:

$$\kappa^{(2)} \approx \frac{1}{4\pi} \sum_i \langle k_2^a L_{\text{eff}} \rangle_i \sqrt{\langle \beta_x \beta_y \rangle_i}.$$

Расчёт показал, что коэффициент возбуждения разностного резонанса $\nu_x = \nu_y$ от «косой» квадрупольной «гармоники» МП дипольных магнитов $|\kappa^{(2)}| < 3,8 \cdot 10^{-3}$ и резонанс не будет оказывать существенного влияния на размер пучка при величине отстройки $\Delta_r > 0,02$.

Влияние «прямой» секступольной «гармоники» (b_3) на хроматичность оптической системы оценивалось как:

$$\xi_{x/y} \approx \frac{1}{4\pi} \sum_i [\langle k_3^b L_{\text{eff}} \rangle_i \langle \eta_x \rangle_i \langle \beta_{x/y} \rangle_i].$$

Хроматичность оптической системы от «прямых» секступольных «гармоник» дипольных магнитов составила: $\xi_{x/y} = -0,53/-0,43$ (1,6 Тл · м) и 5,90/5,68 (25,2 Тл · м). Вкладом от квадрупольных магнитов можно пренебречь ($|\xi_{x/y}| < 0,15$). Полученные оценки совпадают с предсказаниями разработанной модели с точностью 2–3 %.

Разброс частиц по бетатронным колебаниям от действия «прямой» секступольной «гармоники» (b_4):

$$\begin{cases} \Delta \nu_x \approx \frac{1}{16\pi} \varepsilon_y \sum_i [\langle k_4^b L_{\text{eff}} \rangle_i \langle \beta_x \beta_y \rangle_i] - \frac{1}{64\pi} \varepsilon_x \sum_i [\langle k_4^b L_{\text{eff}} \rangle_i \langle \beta_x^2 \rangle_i]; \\ \Delta \nu_y \approx \frac{1}{16\pi} \varepsilon_x \sum_i [\langle k_4^b L_{\text{eff}} \rangle_i \langle \beta_x \beta_y \rangle_i] - \frac{1}{64\pi} \varepsilon_y \sum_i [\langle k_4^b L_{\text{eff}} \rangle_i \langle \beta_y^2 \rangle_i]. \end{cases}$$

При эмиттансе пучка в пределах адмиттанса ускорителя (гор./верт. 150/60π мм · мрад) влияние «прямых» октупольных «гармоник» на разброс по бетатронным частотам частиц пренебрежимо мало для ускорителей такого типа: $\Delta\nu_{x,y} < 2,1 \cdot 10^{-3}$.

Комплексное влияние ошибок МП структурных элементов на динамику движения частиц в ускорителе оценивалось по величине ДА, при этом рассмотрена только поперечная ДА (без учёта синхротронного движения). В рамках работы [3] для нахождения и исследования ДА ускорителя разработана методика на базе численных (трассировка (трекинг) в математической модели ускорителя) и аналитических методов. Данная методика позволяет определить величину двух- (см. рис. 5а) и четырёхмерной (см. рис. 5в) ДА, оценить влияние различных возмущений на величину ДА и получить зависимости бетатронных частот от амплитуд частиц в пучке $\nu_{x/y} = f(x/y)$ (см. рис. 5б) с помощью алгоритма численного анализа несущей частоты (Numerical Analysis of Fundamental Frequencies (NAFF)).

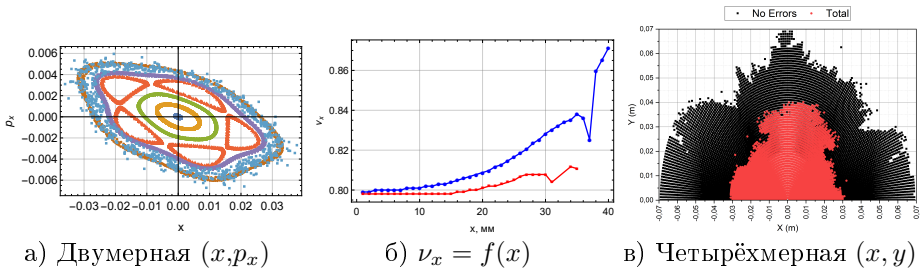


Рис. 5 — Пример расчёта ДА для магнитной жёсткости 1,6 Тл · м. Зависимости $\nu_x = f(x)$ приведены при выключенных (синяя кривая) и включенных (красная кривая) секступольных корректорах [3].

Полученные результаты показали превышение ДА над адмиттансом на уровне 10 %. В расчётных зависимостях $\nu_{x/y} = f(x/y)$ наблюдается согласие с поведением частиц в соответствующем фазовом пространстве, максимальные начальные амплитуды $(x, 0)$ и $(0, y)$ совпадают для двумерного и четырёхмерного моделирования. Включение «прямых» секступольных обмоток корректоров позволяет сохранить сдвиг бетатронных частот в пределах $\Delta\nu_{x,y} < 0,01$ для частиц с амплитудами до 30 мм (1,6 Тл · м) и до 25 мм (25,2 Тл · м). Кроме того, созданная модель Бустера показала чувствительность к положению рабочей точки в окрестностях вертикальных и горизонтальных резонансов (до 5-го порядка включительно).

Выполненные оценки влияния погрешностей МП Бустера на динамику циркулирующего и ускоряемого пучка показали, что независимое

влияние большинства ошибок МП невелико, однако, их комплексный вклад оказывает заметный эффект на динамику движения заряженных частиц. Для компенсации совместного влияния систематических и случайных ошибок МП, а также погрешностей позиционирования элементов и коррекции резонансов требуется развитая система коррекции ведущего МП ускорителя.

В **Главе 3** рассматривается система коррекции ведущего МП Бустера, основным элементом которой являются корректирующие магниты. Конструктивно магниты-корректоры представляются собой неявнополюсные СП-магниты с секторными обмотками [5]. СП-обмотки устанавливаются в железное ярмо, замыкающее обратный магнитный поток. Все магниты-корректоры разделены на две группы (см. рис. 6): ДК (включают «прямую» (B_1) и «косую» (A_1) дипольные обмотки, всего 24 магнита) и МПК (включают «косую» квадрупольную (A_2), «прямую» (B_3) и «косую» (A_3) секступольные и «прямую» (B_4) октупольную обмотки, всего 8 магнитов). ДК располагаются в центре дублета квадрупольных магнитов, МПК — с торца у соответствующего (фокусирующего или дефокусирующего) квадрупольного магнита. Как и основные структурные магниты, магниты-корректоры изготовлены в ЛВФЭ ОИЯИ.

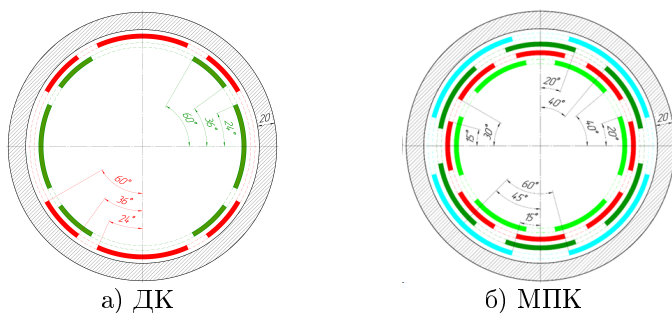


Рис. 6 — Поперечное сечение магнита-корректора Бустера.

Для обеспечения требуемых величин «гармоник» и анализа качества МП, а также проверки принятых конструкторских решений проведён цикл работ по моделированию и измерению полученных параметров МП [5], в рамках которых:

- создана аналитическая модель, позволяющая рассчитать требуемый рабочий ток в обмотке магнита-корректора с учётом наличия железного ярма в зависимости от необходимой величины МП на уровне точности 5 %;

- проведены расчёты методом конечных элементов показавшие сходимость с предсказаниями аналитической модели на уровне $< 2\%$ для ДК и $< 0,5\%$ для МПК;
- выполнены ХМИ четырёх МПК с помощью датчика Холла.

Для проведения ХМИ МПК магнитометрическая система дублета квадрупольных магнитов доработана для монтажа датчика Холла на наружной поверхности вала магнитометра, что позволило измерить распределение и величину МП. Полученные результаты (см. рис. 7) показали сходимость с предсказаниями двумерного моделирования на уровне $< 15\%$ [5].

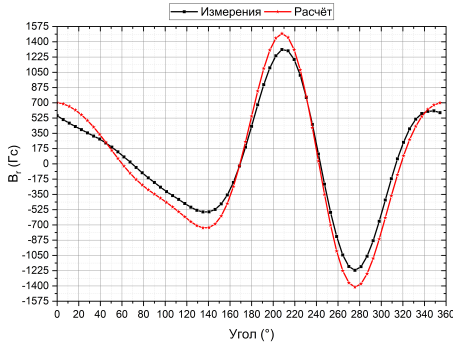


Рис. 7 — Результаты ХМИ (чёрная кривая) и моделирования (красная кривая) распределения $B_r(\theta)$ МПК на радиусе 41 мм [5].

По результатам моделирования и измерения характеристик магнитов-корректоров, проведены теоретические оценки возможностей и поиск решений по настройке системы коррекции.

Используя разработанную модель установки, рассмотрены следующие методики коррекции ЗО (с учётом ошибок позиционирования элементов) в Бустере [4]: методы локального искажения («бампа») ЗО, обратной матрицы, сингулярного разложения матрицы (SVD), наименьших квадратов и гармонической коррекции. Расчёты показали возможность компенсации возмущений ЗО ± 10 мм до уровня $\pm 1,5$ мм. В процессе ввода системы в эксплуатацию, все алгоритмы дополнены исходя из технических ограничений на минимальный и максимальный рабочие токи питания обмоток. Также предложены цепи ДК для коррекции ближайших к проектной рабочей точки Бустера гармоник возмущения орбиты.

Изучение возможностей разработанной системы МПК проводилось по аналитическим оценкам для коррекции хроматичности магнитооптической системы, связи бетатронных колебаний, секступольных и октупольных резонансов до 4-го порядка ($3\nu_{x/y} = 14$, $2\nu_x + \nu_y = 14$, $\nu_x + 2\nu_y = 14$ и $4\nu_x = 19$), а также разброса бетатронных частот.

Выполненные расчёты и измерения МП магнитов-корректоров подтвердили возможность коррекции ошибок ведущего МП Бустера. Разработанные двумерные аналитические модели позволяют рассчитать требуемый рабочий ток в обмотке магнита-корректора в зависимости от необходимой величины МП и могут использоваться в ПО системы управления установкой.

Четвёртая глава посвящена исследованию работы системы коррекции ведущего МП Бустера и сравнению экспериментальных результатов с предсказаниями разработанной математической модели установки с целью её верификации.

Для исследований работы системы ДК выбран метод дифференциальных орбит [6]. Под дифференциальной орбитой понимается разница между исходной (не возмущенной) Z_i^{init} и возмущенной Z_i^{pert} орбитами: $Z_i^{diff} = Z_i^{pert} - Z_i^{init}$. В качестве возмущения здесь могут использоваться включение ДК и изменение рабочей частоты ВЧ-станции.

При работе с одним из ДК, соответствующая дифф. орбита, нормированная на силу (или ток питания обмотки магнита) возмущения на рассматриваемом азимуте установки, по определению, является элементом матрицы отклика орбиты (МОО):

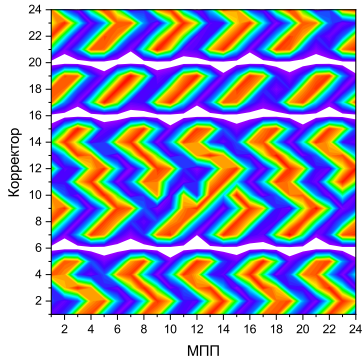
$$\begin{pmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \Leftrightarrow \vec{z} = \mathbf{R}\vec{\Theta};$$

$$R_{zz;ij} = \frac{Z_i^{diff}}{\theta_{z;j}}; \quad R_{xy(yx);ij} = \frac{X(Y)_i^{diff}}{\theta_{y(x);j}}.$$

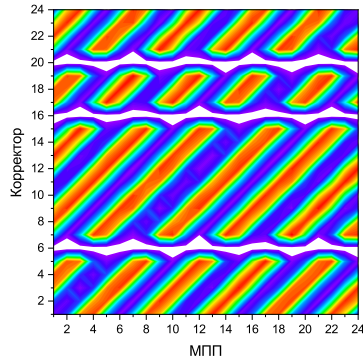
Комплексный графический анализ измеренного массива дифф. орбит, полученных последовательным созданием возмущений набором ДК, позволяет выполнить проверку полярности подключения источников питания к обмоткам.

Для анализа использовано графическое представление данных в виде графика линий уровня (см. рис. 8): начальные фазы бетатронных колебаний дифф. орбит при включении ДК, очевидно, соответствуют смещению магнита-корректора вдоль азимута установки и, следовательно, наклон цветowych линий на графике соответствует набегам бетатронных фаз при обходе вдоль периметра установки (см. рис. 8б). Смена цвета на противоположный однозначно указывает на необходимость смены полярности подключения данного источника (см. рис. 8а). Поскольку для текущей задачи такое графическое представление результатов является качественным, то применение палитры высокого разрешения не требуется.

В результате проведенных исследований восстановлена проектная полярность подключения источников питания четырёх ДК. Процесс измерения дифференциальных орбит Бустера автоматизирован с помощью



а) Исходная коммутация

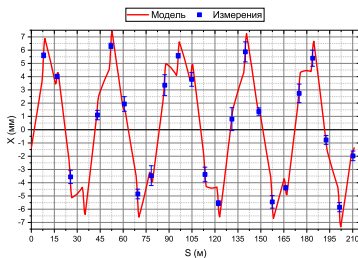


б) Проектная коммутация

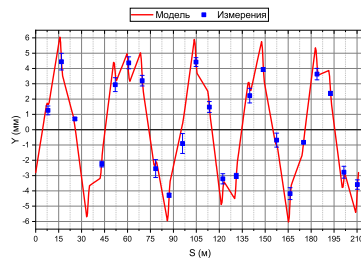
Рис. 8 — Набор дифф. орбит при возмущении различными ДК при наличии (а) и отсутствии (б) нарушений полярности подключения источников питания. По оси абсцисс указаны номера МПП, ординат — ДК [6].

разработанного ПО [6], что позволяет измерять весь требуемый массив экспериментальных данных (для 48 ДК) за 30–40 мин при времени рабочего цикла 3,2 с. Важно отметить, что подавляющую часть указанного времени занимает переключение режимов работы источника (переход из режима ожидания в режим работы «под нагрузкой» и т. п.). Кроме того, полученные в результате МОО использованы для отладки алгоритмов коррекции ЗО, в том числе, реализации режима «динамической» (во всём рабочем диапазоне энергий) коррекции (см. далее).

Сравнение измеренных дифф. орбит с предсказаниями математической модели Бустера (см. рис. 9) показало согласие с относительной точностью $< 3\%$.



а)



б)

Рис. 9 — Измеренные (точки) и полученные в модели (сплошные линии) дифф. орбиты в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях [6].

Оценка возможностей системы коррекции ЗО проводилась путем локального искажения («бампа») горизонтальной орбиты в рабочих точках $\nu_x/\nu_y = 4,88/5,39$ и $\nu_x/\nu_y = 4,80/4,85$ (см. рис. 10). Целью исследования была проверка функциональной возможности системы коррекции создавать локальные искажения ЗО. Коррекция ЗО на всём периметре установки до проектных величин не входила в задачи исследования.

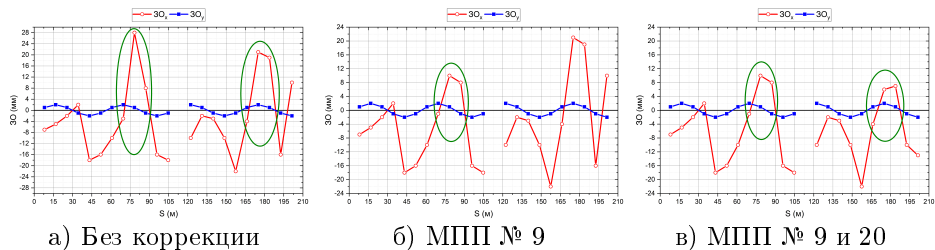


Рис. 10 — Пример локальной коррекции горизонтальной орбиты для рабочей точки $\nu_x/\nu_y = 4,80/4,85$. В подписи указано место локальной коррекции [6].

Полученный результат показал возможность локальной коррекции ЗО на величину ≈ 10 мм при величине рабочего тока $< \pm 3$ А (1,86 мрад) при работе с пучком ионов $^{12}\text{C}^{4+}$. При проведении работ были выявлены неисправности в работе монитора положения пучка (МПП) № 13, в связи с чем, показания данного МПП не представлены на рисунке 10.

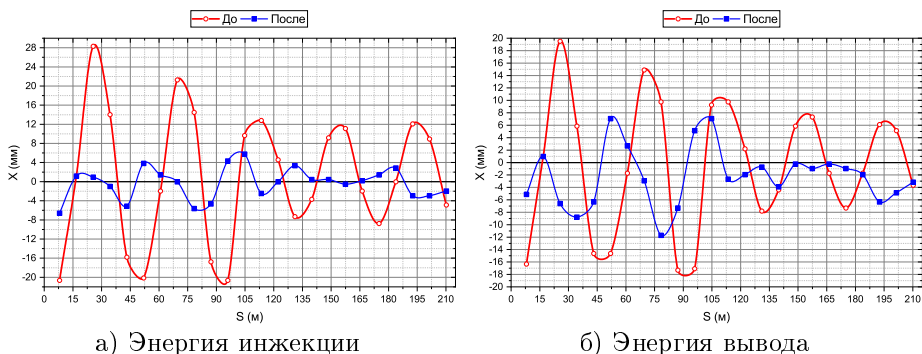
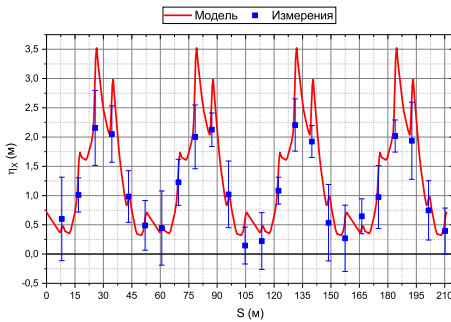


Рис. 11 — «Динамическая» коррекция горизонтальной ЗО.

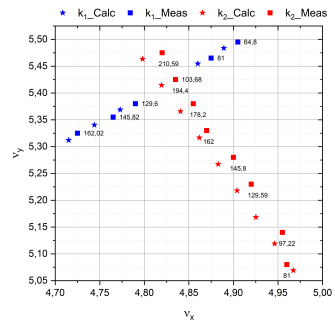
Разработанные алгоритмы коррекции, учитывающие технические ограничения на минимальный и максимальный токи питания обмоток, коррекция полярности подключения источников питания к обмоткам ДК,

измеренная МОО, разработанные средства ПО, а также расчётная математическая модель установки и её верификация позволили, впервые на инжекционном комплексе NICA, реализовать режим «динамической» (во всём диапазоне рабочих энергий) коррекции горизонтальной ЗО (см. рис. 11) при работе с пучком ионов $^{124}\text{Xe}^{28+}$. Удалось скорректировать возмущения ЗО до уровня ± 6 мм на энергии инжекции и до ± 12 мм на энергии вывода. Ключевыми факторами, ограничивающими возможности коррекции ЗО, стали неработоспособность трёх ДК в период проведения исследований и технические ограничения на минимальный рабочий ток $\pm 0,3$ А (для коррекции на энергии инжекции).

Для верификации разработанной модели, дополнительно, проведены измерения дисперсионной функции (см. рис. 12а) с использованием метода дифф. орбит (в качестве возмущения использована рабочая частота ускоряющей ВЧ-станции), зависимостей положения рабочей точки установки (см. рис. 12б) от рабочих токов питания квадрупольных магнитов и хроматичности оптической системы.



а) Измерения (точки) и расчёт (линия)



б) Измерения (квадрат) и расчёт (звезда)

Рис. 12 — Результаты измерений и моделирования: а) дисперсионной функции; б) положения рабочей точки при изменении рабочих токов источников I_F (синий график) и I_D (красный график), указанными рядом с измеренной точкой [6].

Расчётные и измеренные значения дисперсионной функции совпадают с точностью $< 3\%$ на участках с $\eta_x(s) > 1$ м.

С помощью методики измерения дробной части бетатронных частот путем анализа спектра когерентных колебаний пучка по данным МПП проведено исследование зависимости положения рабочей точки от токов питания квадрупольных магнитов (см. рис. 12б) в области

$\nu_x = 4,73-4,96$ и $\nu_y = 5,08-5,48$. Сравнение результатов измерений с предсказаниями разработанной модели установки показало сходимость с точностью $|\nu_{calc} - \nu_{meas}| \approx 1-2\%$.

Исследования когерентных колебаний на первых оборотах после инжекции пучка по сигналам непосредственно с измерительных пластин МПП показали расхождения с предсказаниями расчётной модели по величинам частот бетатронных колебаний $\Delta\nu_{x/y} = 0,06/0,02$ и натурального хроматизма $\Delta\xi_{x/y} = 0,28/3,12$. Большое отклонение по величине вертикальной хроматичности обусловлено малой начальной амплитудой когерентных колебаний.

Разработанная модель Бустера позволила получить параметры для настройки положения рабочей точки в сеансах ПНР № 3 ($\nu_x/\nu_y = 4,80/4,85$) и № 4 ($\nu_x/\nu_y = 5,17/5,20$). Для оценки положения рабочей точки установки использовался монитор положений пучка в поперечной фазовой плоскости. Показания монитора при настройке рабочей точки в сеансе ПНР № 3 показаны на рисунке 13. Кроме соответствия измеренных с помощью монитора дробных частей бетатронных частот, также как и в результатах моделирования двумерной ДА (см. рис. 5а) [3], наблюдалось искажение формы фазового «профиля» в горизонтальной плоскости при больших амплитудах, указывающее на расположение рабочей точки в окрестности соответствующего резонанса 5-го порядка $5\nu_x = 24$ (см. рис. 13а). Данный монитор и созданная модель также использованы при настройке инжекции пучка [7].

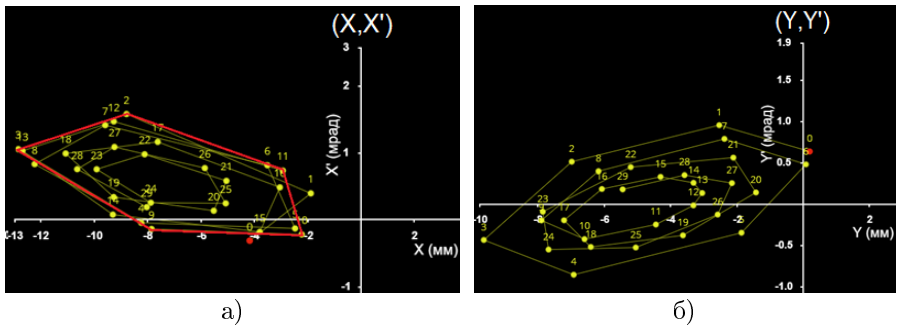


Рис. 13 — Фазовые профили положений пучка ионов $^{12}\text{C}^{4+}$ на энергии инжекции в рабочей точке $\nu_x/\nu_y = 4,80/4,85$: а) горизонтальный; б) вертикальный [6].

С начала ввода установки в эксплуатацию было проведено четыре сеанса ПНР с пучками ионов $^4\text{He}^{1+}$, $^{56}\text{Fe}^{14+}$, $^{12}\text{C}^{4+}$, $^{132}\text{Xe}^{28+}$ и $^{124}\text{Xe}^{28+}$, выполнены измерения оптических функций, исследования магнитооптических характеристик и настройка систем Бустера NICA. Повторяемость

показаний МПП за 9 тыс. циклов ускорения (более 24 ч) показала СКО в горизонтальной плоскости 0,4–1,0 мм и менее 0,2 мм в вертикальной. Ключевым фактором, влияющим на повторяемость показаний МПП в горизонтальной плоскости является нестабильность положения замкнутой орбиты пучка на протяжении исследуемого периода времени.

Отлажена методика, разработано и внедрено ПО для измерения дифф. орбит и МОО, проведена проверка полярности корректоров и получена МОО для дальнейших работ по коррекции орбиты. Сравнение измеренных дифф. орбит с моделью показало согласованность с точностью < 3 %, как для величины возмущения ЗО, так и для функции дисперсии. Выполнены измерения и сравнения с расчетами всех режимов коррекции. Экспериментально показана возможность коррекции ЗО, впервые на инжекционном комплексе НИСА, реализован режим «динамической» коррекции. С целью верификации разработанной модели, дополнительно, проведены измерения зависимостей положения рабочей точки установки от рабочих токов питания квадрупольных магнитов и хроматичности оптической системы.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что разработанная модель с точностью < 10 % описывает физические процессы при работе ускорителя, что позволяет использовать её для предсказаний и настройки рабочих режимов, что было продемонстрировано при настройке рабочей точки, инжекции пучка [7] и реализации режима «динамической» коррекции ЗО в сеансах ПНР №№ 3 и 4, а также показывают возможность и необходимость проведения аналогичных работ на других установках комплекса НИСА.

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. Создана математическая модель «Бустера» на основе данных измерений магнитных характеристик всех его структурных элементов. Модель описывает динамические характеристики установки на уровне точности 10 %, что является достаточным для настройки ускорителя.
2. На основе данных измерений магнитных характеристик всех структурных элементов, выполнен анализ влияния погрешностей ведущего магнитного поля «Бустера» на динамику циркулирующего и ускоряемого пучка. Результаты анализа показали:
 - а) Ошибки позиционирования структурных магнитов (в первую очередь, квадрупольных) играют ключевую роль в возмущении ЗО, таким образом, основной задачей системы дипольных корректоров является компенсация случайных ошибок МП.
 - б) Отклонения интегральных величин градиента МП квадрупольных магнитов не оказывают существенного влияния на стабильность значений β -функций вдоль

периметра кольца Бустера. Отличие средней интегральной величины градиента МП квадрупольных магнитов по всей установке приводит к смещению положения рабочей точки, что необходимо учитывать при настройке источников питания ускорителя.

- в) Вклад секступольных «гармоник» МП дипольных магнитов в хроматичность магнитооптической системы ($\xi_{x/y}$) является определяющим: $\xi_{x/y} = -0,53/-0,46$ (1,6 Тл · м) и 5,90/5,68 (25,2 Тл · м). Полученные оценки совпадают с предсказаниями разработанной модели с точностью 2–3 %.
 - г) Влияние «прямых» октупольных «гармоник» на разброс по бетатронным частотам частиц $\Delta\nu_{x/y} < 2,1 \cdot 10^{-3}$, что мало для быстроциклирующих синхротронов.
3. Выполнен расчёт динамической апертуры ускорителя с учётом всех ошибок ведущего магнитного поля, показывающий превышение динамического акцептанса над геометрическим на уровне 10 %. Результаты расчёта подтверждают правильность основных концептуальных решений, заложенных на этапе разработки и создания магнитооптической системы.
 4. Получены зависимости бетатронных частот от амплитуд частиц в пучке, подтверждающие эффективность выбранной системы коррекции хроматичности магнитооптической структуры. Включение «прямых» секступольных обмоток корректоров позволяет сохранить сдвиг бетатронных частот в пределах $\Delta\nu_{x,y} < 0,01$ для частиц с амплитудами до 30 мм (1,6 Тл · м) и до 25 мм (25,2 Тл · м).
 5. Проведена коррекция замкнутой орбиты, после которой возмущения составили не более ± 6 мм на энергии инжекции и ± 12 мм на энергии вывода.
 6. Экспериментально измерены характеристики дифференциальных орбит «Бустера» и настроена система коррекции ведущего магнитного поля. Расчётные и измеренные результаты совпадают с точностью < 3 % на участках с $\eta_x(s) > 1$ м.
 7. В результате исследования системы коррекции ведущего магнитного поля восстановлена правильная проектная полярность подключения источников питания четырёх корректоров.
 8. Создана двумерная аналитическая модель, позволяющая рассчитать требуемый рабочий ток в обмотке магнита-корректора в зависимости от необходимой величины магнитного поля на уровне точности 5 %.
 9. Накопленный опыт и разработанное программное обеспечение проверки полярности подключения источников питания и получения

характеристик дифференциальных орбит, дает возможность применять данный подход в будущем для синхротронов и каналов транспортировки пучка ускорительного комплекса NICA.

В **Приложениях** приведены:

- А Технические характеристики бустерного синхротрона NICA.
- Б Динамика движения ионов в элементах оптической структуры с отклонениями параметров ведущего МП.
- В Результаты моделирования ДА и работы системы коррекции.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях из списка ВАК РФ и входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science

1. Magnetic Measurements of the NICA Booster Superferriс Magnets [Текст] / V. V. Borisov [et al.] // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2018. — Vol. 28, no. 3. — P. 1—5. — (Scopus, WoS, ВАК).
2. Serial magnetic measurements of quadrupole magnets of the NICA booster synchrotron [Текст] / A. V. Shemchuk [et al.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2018. — Vol. 15, no. 7. — P. 873—877. — (Scopus, WoS, ВАК).
3. *Шандов, М. М.* Моделирование динамической апертуры бустерного синхротрона комплекса NICA на основе данных магнитных измерений [Текст] / М. М. Шандов, С. А. Костромин // Письма в журнал физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2022. — Т. 19, 3(242). — С. 178—194. — URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2022_3/10_Shandov.pdf. — (Scopus, WoS, ВАК).
4. *Шандов, М. М.* Алгоритмы коррекции орбиты Бустера NICA [Текст] / М. М. Шандов, С. А. Костромин // Ядерная физика и инжиниринг. — 2023. — Т. 14, № 1. — С. 67—75. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_55866823_53902413.pdf. — (Scopus, WoS, ВАК).
5. Корректирующие магниты Бустера и Коллайдера NICA [Текст] / М. М. Шандов [и др.] // Письма в журнал физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2020. — Т. 17, 4(229). — С. 555—560. — URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2020_4/28_Shanov.pdf. — (Scopus, WoS, ВАК).

6. Исследование характеристик магнитной структуры Бустера NICA в сеансах пусконаладочных работ с пучком в 2020–2022 гг. [Текст] / М. М. Шандов [и др.] // Письма в журнал физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2023. — Т. 20, 4(249). — С. 968–982. — URL: http://www1.jinr.ru/PePan_letters/panl_2023_4/56_shandov.pdf. — (Scopus, WoS, ВАК).
7. *Коробицина, М. Ю.* Настройка инжекции в Бустер ускорительного комплекса NICA [Текст] / М. Ю. Коробицина, А. В. Тузиков, М. М. Шандов // Письма в журнал физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2023. — Т. 20, 4(249). — С. 862–868. — URL: http://www1.jinr.ru/PePan_letters/panl_2023_4/40_Korobit_r.pdf. — (Scopus, WoS, ВАК).

В сборниках трудов конференций

8. Series Magnetic Measurements Of NICA Booster Dipoles [Текст] / V. Borisov [et al.] // Proc. of Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'16), St. Petersburg, Russia, November 21-25, 2016 (St. Petersburg, Russia). — Geneva, Switzerland : JACoW, 02/2017. — P. 629–631. — (Russian Particle Accelerator Conference ; 25). — URL: <http://jacow.org/rupac2016/papers/thpsc043.pdf>; doi:10.18429/JACoW-RuPAC2016-THPSC043.
9. Magnetic Measurement System For The NICA Quadrupole Magnets [Текст] / A. Shemchuk [et al.] // Proc. of Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'16), St. Petersburg, Russia, November 21-25, 2016 (St. Petersburg, Russia). — Geneva, Switzerland : JACoW, 02/2017. — P. 559–562. — (Russian Particle Accelerator Conference ; 25). — URL: <http://jacow.org/rupac2016/papers/thpsc010.pdf>; doi:10.18429/JACoW-RuPAC2016-THPSC010.
10. Magnetic Measurements of NICA Booster Dipoles [Текст] / V. Borisov [et al.] // Proc. of International Particle Accelerator Conference (IPAC'17), Copenhagen, Denmark, 14-19 May, 2017 (Copenhagen, Denmark). — Geneva, Switzerland : JACoW, 05/2017. — P. 3458–3460. — (International Particle Accelerator Conference ; 8). — URL: <http://jacow.org/ipac2017/papers/wepva087.pdf>; <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-WEPVA087>.
11. Magnetic Measurement System for the NICA Quadrupole Magnets [Текст] / A. Shemchuk [et al.] // Proc. of International Particle Accelerator Conference (IPAC'17), Copenhagen, Denmark, 14-19 May, 2017 (Copenhagen, Denmark). — Geneva, Switzerland : JACoW, 05/2017. — P. 3464–3467. — (International Particle Accelerator Conference ; 8). — URL: <http://jacow.org/ipac2017/papers/wepva089.pdf>; <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-WEPVA089>.

12. Serial Magnetic Measurements for the NICA Quadruple Magnets of the NICA Booster Synchrotron [Текст] / A. Shemchuk [et al.] // Proc. 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC'18), Vancouver, BC, Canada, April 29-May 4, 2018 (Vancouver, BC, Canada). — Geneva, Switzerland : JACoW Publishing, 06/2018. — P. 3649—3652. — (International Particle Accelerator Conference ; 9). — URL: <http://jacow.org/ipac2018/papers/thpal014.pdf> ; <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-THPAL014>.
13. Serial Magnetic Measurements for the NICA Quadrupole Magnets of the NICA Booster Synchrotron [Текст] / A. Shemchuk [et al.] // Proc. 26th Russian Particle Accelerator Conference (RUPAC'18), Protvino, Russia, 01-05 October 2018 (Protvino, Russia). — Geneva, Switzerland : JACoW Publishing, 11/2018. — P. 353—356. — (Russian Particle Accelerator Conference ; 26). — URL: <http://jacow.org/rupac2018/papers/wepsb33.pdf> ; <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-WEPSB33>.

Шандов Михаил Михайлович

Коррекция ведущего магнитного поля «Бустера» NICA

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____.____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____

