

*На правах рукописи*



**СИНЯТКИН Сергей Викторович**

**МАГНИТНАЯ СИСТЕМА БУСТЕРНОГО СИНХРОТРОНА С  
ЭНЕРГИЕЙ 3 ГэВ ДЛЯ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ NSLS – II**

**01.04.20 - физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**НОВОСИБИРСК – 2020**

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

#### НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ЛЕВИЧЕВ Евгений Борисович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КОРЧУГАНОВ Владимир Николаевич – доктор физико-математических наук, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, заместитель руководителя научного комплекса по перспективным ускорительным технологиям.

РОЯК Михаил Эммануилович – доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» НГТУ, г. Новосибирск, профессор кафедры прикладной математики, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории моделирования и обработки данных наукоемких технологий.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Международная межправительственная организация «Объединенный институт ядерных исследований», г. Дубна

Защита диссертации состоится « 9 » октября 2020 г. в « 12:15 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН и на сайте:

[http://inp.nsk.su/images/diss/Sinyatkin\\_disser.pdf](http://inp.nsk.su/images/diss/Sinyatkin_disser.pdf).

Автореферат разослан «23» июля 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук



А.В. Бурдаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Первые циклические ускорители заряженных частиц со слабой фокусировкой использовали магниты с совмещенными функциями, которые формировали орбиту пучка и обеспечивали фокусировку по обоим поперечным направлениям. Дополнительное профилирование полюса позволяло создать более высокие компоненты магнитного поля, например, квадратичную для компенсации хроматических aberrаций.

Магниты с совмещенными функциями трудоемки в проектировании и изготовлении, когда сложный поперечный профиль полюса может сочетаться со значительным радиальным изгибом магнита. Так же затруднена процедура измерения распределения магнитного поля в таких устройствах: измеряющие датчики должны перемещаться с хорошей пространственной точностью (~50 мкм – 100 мкм) относительно сложной трехмерной поверхности полюса магнита. Имеются проблемы и в использовании магнитов с совмещенными функциями, поскольку в неоднородном магнитном поле свойства пучка зависят от его орбиты, и возмущения замкнутой орбиты могут приводить, например, к изменению рабочей точки бетатронных частот и искажению оптических функций.

Однако у магнитов с совмещенными функциями есть ряд серьезных достоинств. Их использование позволяет делать циклические ускорители существенно меньшей длины (компактнее) ценой отказа от некоторого числа индивидуальных квадрупольных (и даже секступольных) линз. Введение градиента в поворотные магниты позволяет уменьшить горизонтальный эмиттанс по сравнению с магнитом с однородным полем, что немаловажно для источников синхротронного излучения. Распределение квадратичной нелинейности в длинных поворотных магнитах позволяет сделать ее азимутальное распределение более однородным (по сравнению со случаем коротких и сильных сосредоточенных секступольных линз), что уменьшает мощность соответствующих резонансов и благотворно влияет на динамическую апертуру.

В последние годы наблюдается рост числа современных циклических ускорителей, где используются или планируются магниты с совмещенными функциями, такие как источники синхротронного излучения ALBA (Барселона, Испания), Solaris (Краков, Польша) и MAX IV (Лунд, Швеция). Источники СИ будущего (четвертого поколения) вынуждены использовать магниты с совмещенными функциями, поскольку это помогает получить натуральный эмиттанс пучка существенно меньше  $1 \text{ нм} \cdot \text{рад}$  при приемлемом

размере накопительного кольца. Этим объясняется значительный интерес в последние годы со стороны разработчиков накопителей заряженных частиц к расчетам, проектированию, изготовлению и измерению магнитов с совмещенными функциями. Решению данных задач посвящена диссертация.

### **Цель работы**

Цель диссертационной работы:

- разработка оптической структуры кольца бустерного синхротрона для источника синхротронного излучения NSLS II (Брукхейвенская национальная лаборатория, США);
- исследование динамики пучка, оценка допусков на магнитные элементы;
- моделирование, проектирование и производство дипольных магнитных элементов с совмещенными функциями бустерного синхротрона.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора в получение научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Автор провел расчет оптики и динамики синхротрона-бустера для источника СИ NSLS-II. Выполнил анализ влияния различных погрешностей на оптику кольца. Автором были определены параметры магнитных элементов и допуски на точность их изготовления. Проведено моделирование вихревых токов в вакуумной камере, оценено влияние на динамику пучка и разработан способ коррекции данного эффекта. Автором были определены требования к точности магнитных измерений. Разработана методика получения параметров дипольных магнитов на основе карт магнитных полей. Выполнен анализ достоверности магнитных измерений и геодезической привязки магнитной оси элементов к геодезическим знакам. Автор принимал непосредственное участие в магнитном моделировании, разработке и изготовлении с требуемым качеством поля основных магнитных элементов бустера (28 поворотных магнитов BF типа и 32 магнитных элемента BD типа). Автором был проведен анализ результатов магнитных измерений, разработан метод коррекции параметров дипольных магнитов, определена выставка магнитных элементов на кольце. Автором создана модель оптической структуры кольца на основе магнитных измерений и проведенных экспериментов с пучком, учитывающая изменения параметров магнитов в течение ускорения пучка. Автор внес существенный вклад при формировании режима работы бустера, принимал непосредственное участие в запуске бустерного синхротрона и получении его номинальных параметров.

## **Научная новизна**

Рассчитаны, спроектированы и изготовлены уникальные поворотные магниты с шихтованным сердечником и с совмещенными функциями, включающими в себя градиентную и секступольную компоненты поля, обеспечивающие проектные параметры пучка. Предложен оригинальный способ определения допусков на качество и выставку магнитных элементов кольца. Разработана оригинальная технология изготовления сердечника и торцевых фасок сложной формы магнита, обеспечивающая требуемые допуски. Продемонстрирован способ коррекции параметров диполей на основе результатов магнитных измерений посредством изменения межполюсного зазора и нахождения новой магнитной оси.

Впервые предложена и реализована методика использования современного высокоточного геодезического оборудования для привязки магнитной оси элементов к геодезическим знакам на магнитопроводе при проведении магнитных измерений. Рассчитано и подтверждено влияние вихревых токов в вакуумной камере и её заземления на эффективные характеристики дипольных магнитов. Подтверждено полное согласие между выработанными техническими требованиями на качество магнитных элементов, качеством производства, результатами контроля и параметрами работающего бустерного кольца.

## **Научная и практическая ценность**

Выработанные методы моделирования магнитных полей позволяют проектировать дипольные магниты с высокой степенью достоверности и помогают учесть ключевые эффекты при работе синхротронного кольца. Разработанная технология изготовления сердечника и торцевых фасок сложной формы магнитов позволяет изготовить дипольные магниты с требуемыми магнитными характеристиками. Разработанная методика и инструментарий для магнитных измерений с использованием геодезической системы обеспечивают высокоточные измерения магнитных характеристик поворотных магнитов. Полученное высокое качество магнитных элементов и их соответствие требованиям Технического Задания позволили в короткие сроки собрать магнитную систему кольца, инжектировать пучок и получить проектные параметры пучка в синхротроне-бустере. Результаты запуска бустера подтвердили высокое качество расчетов, моделирования, проектирования, изготовления и измерения магнитных элементов ускорителя. В настоящее время бустер стабильно работает в стандартном цикле ускорения при проектном токе пучка.

Полученные в рамках диссертационного исследования результаты и наработки по конструированию, моделированию, измерению магнитных параметров магнитов и производству магнитных элементов имеют большое значение для создания магнитных систем современных ускорительных комплексов, коллайдеров и источников синхротронного излучения.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Рассчитана оптическая модель бустерного синхротрона с малым эмиттансом, определены допуски на качество магнитных элементов кольца, проведена оценка влияния вихревых токов в вакуумной камере на параметры пучка.

2. Рассчитаны, спроектированы и изготовлены уникальные поворотные магниты с шихтованным сердечником и с совмещенными функциями, включающими в себя градиентную и секступольную компоненты поля, удовлетворяющие всем требованиям Технического Задания и обеспечивающие проектные параметры пучка. Относительная однородность магнитного поля за вычетом номинальных градиентной и секступольной компонент магнитного поля в области  $\pm 2$  см была лучше, чем  $\pm 5 \cdot 10^{-4}$  в диапазоне полей от 0.08 Т до 1.13 Т для диполей ВD и от 0.03 Т до 0.46 Т для диполей ВF.

3. Разработана оригинальная технология изготовления сердечника магнита, обеспечивающая требуемые допуски.

4. Разработана технология изготовления торцевых фасок сложной формы, позволяющая корректировать как основные, так и высшие мультипольные компоненты поля.

5. Отработан метод коррекции параметров диполей на основе результатов магнитных измерений посредством изменения межполюсного зазора и нахождения новой магнитной оси.

6. Выработана методика использования современного высокоточного геодезического оборудования для привязки магнитной оси элементов к геодезическим знакам на магнитопроводе.

7. Отработана методика двух- и трехмерного моделирования магнитных параметров. В процессе моделирования изучено влияние погрешности изготовления профиля полюсов магнитных элементов и механической деформации из-за магнитных сил на параметры магнитных элементов.

8. Исследовано влияние погрешностей изготовления измерительного оборудования и ошибок измерительной электроники на точность определения магнитного поля. Эти исследования позволили добиться высокой точности измерений.

9. Выполнены высокоточные измерения магнитных характеристик поворотных магнитов с использованием геодезической системы. Подтверждено полное соответствие магнитных характеристик требованиям Технического Задания.

10. Сделан расчет влияния вакуумной камеры на эффективные параметры диполей при работе в импульсном режиме. Проведены экспериментальные исследования поведения импульсного магнитного поля, хорошо согласующиеся с результатами расчета.

### **Апробация работы и публикации**

Основные результаты работы докладывались на семинарах в Институте ядерной физики СО РАН и на международных конференциях: PAC'13, IPAC'13, IPAC'14, IPAC'15, "Synchrotron and Free Electron Laser Radiation: Generation and Application". По результатам диссертационной работы опубликовано 16 статей, в том числе 4 статьи в периодических изданиях, входящих в рекомендуемый перечень ВАК.

### **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений и списка литературы из 38 наименований, изложена на 130 страницах машинописного текста, включает 85 иллюстраций и 21 таблицу.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведено краткое изложение тенденции развития современных ускорителей заряженных частиц, определены проблемы создания оптических структур, обоснована актуальность темы диссертации, определена цель, сформулированы задачи, отмечена научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** определены основные требования, предъявляемые к бустерному кольцу при его проектировании, такие как: компактность кольца, оптимальные параметры магнитной структуры кольца (Таблица 1) и высокая эффективность перепуска ускоряемых частиц. Проведен подробный анализ магнитной структуры и оптики синхротрона NSLS II. Отдельно исследованы факторы, задающие требования на параметры и точность изготовления магнитных элементов. К таким факторам, прежде всего, относятся чувствительность оптики ускорителя к ошибкам пространственного позиционирования магнитов, влияние качества магнитного поля на искажение

оптических функций, параметров пучка, уменьшение динамической апертуры и т.д.

Таблица 1: Основные параметры структуры бустера.

Энергия	200 МэВ	3 ГэВ
Число периодов	4	
Периметр, м	158.4	
Частота инжекции, Гц	1 (2 Гц)	
Число сгустков	1; 80÷150	
ВЧ частота, МГц	499.68	
ВЧ напряжение, МВ	0.2	1.2
ВЧ акцептанс, $\epsilon_{RF}$ , %	1.65	0.54
Бетатронные частоты: $\nu_x/\nu_y$	9.6455/3.4105	
Натуральный хроматизм: $\xi_x/\xi_y$	-9.5/-13.5	
Остаточный хроматизм: $\xi'_x/\xi'_y$	1.25 / 2.05	
Коэффициент уплотнения орбит, $\alpha$	0.00882	
Горизонтальный эмиттанс, $\epsilon_x$ , нм	0.166	37.4
Энергетический разброс, $\sigma_E/E$	$0.55 \cdot 10^{-4}$	$8.31 \cdot 10^{-4}$
Время затухания: $\tau_x/\tau_s$ , мс	15.6/7.8 ( $\cdot 10^3$ )	4.62/2.31

Моделирование процесса инжекции показывает, что при этом качество поля дипольных магнитов должно быть  $\Delta B/B_0 \leq \pm 5 \cdot 10^{-4}$  (где  $B_0$  – расчетное поле) в горизонтальной области  $\Delta x = \pm 2$  см от оси пучка для энергии 0.2÷3 ГэВ. Отличие интегральных параметров поворотных магнитов не должно превышать:

- Для интеграла дипольного поля  $B < 10^{-3}$ ;
- Для интеграла градиента поля  $dB/dx < 5 \cdot 10^{-3}$ ;
- Для интеграла секступольной компоненты поля  $d^2B/dx^2 < 5 \cdot 10^{-2}$ .

Точность выставки элементов в кольце:

- Позиционирование в поперечном направлении относительно равновесной орбиты  $|\Delta x, y| \leq 150 \mu\text{м}$ ;
- Позиционирование в продольном направлении  $|\Delta s| \leq 0.5 \text{ мм}$ ;
- Вращение относительно продольной оси  $|\Delta \alpha_s| \leq 0.1 \text{ мрад}$ .

В главе приводится сводная таблица требований к магнитам с совмещенными функциями BF и BD, определивших особенности их проектирования, изготовления, измерений и оптимизации.

В первой главе также показаны способы коррекции оптики из-за наличия вышеописанных ошибок и рассмотрены эффекты, связанные с вихревыми токами, протекающими в стенках вакуумной камеры, которые могут существенно уменьшить эффективность работы бустера. Одной из особенностей данного эффекта наличие не нулевого полного тока, протекающего через полное сечение вакуумной камеры. Данный ток возбуждает дополнительные мультипольные компоненты поля (Рис.1) приводящие к нарушению оптической структуры кольца.

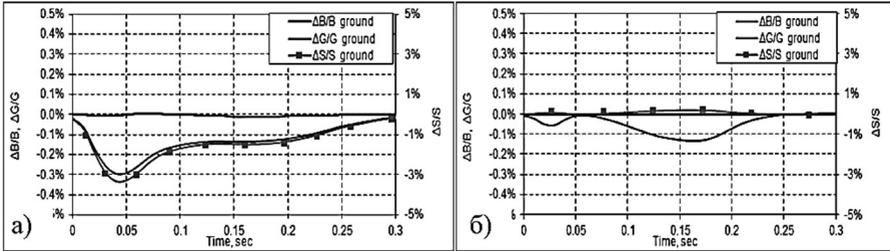


Рис.1. Изменение поля, градиента и секступольной составляющей от времени из-за заземления вакуумной камеры для магнитов *BF* (а) и *BD* (б).

**Во второй главе** обосновывается выбор конструкции поворотных магнитов *BF* и *BD*. Основные параметры диполей приведены в Таблице 2.

Таблица 2: Спецификация диполей.

Параметр	<i>BF</i>	<i>BD</i>
Количество	28	32
Эффективная длина поля	1.24 м	1.30 м
Радиус поворота магнита	21.745 м	8.877 м
Угол поворота	3.2673°	8.3911°
Межполюсной зазор	±14 мм	±13 мм
Поле на инжекции	0.0307 Т	0.0751 Т
Поле на выпуске	0.4602 Т	1.1273 Т
Квадруп. компонента $K_1$	0.82 м <sup>-2</sup>	-0.555 м <sup>-2</sup>
Секступ. компонента $K_2$	3.6 м <sup>-3</sup>	-4.3 м <sup>-3</sup>
Область хорошего поля ( $y \times x$ )	±12 × ±20 мм <sup>2</sup>	
Качество поля $\Delta B/B_0$	± 1·10 <sup>-3</sup>	

Приводятся и обсуждаются моделирование, оптимизация профиля диполей и результаты 2-х и 3-х мерного моделирования магнитных полей. Одной из задач 2-х мерного моделирования является определение профилей поперечного сечения дипольных магнитов исходя из требований на

необходимую область требуемого распределения магнитного поля и минимизации габаритных размеров магнитов. На Рис.2 показаны итоговые оптимальные профили пластин с учетом особенностей изготовления сердечников диполей.

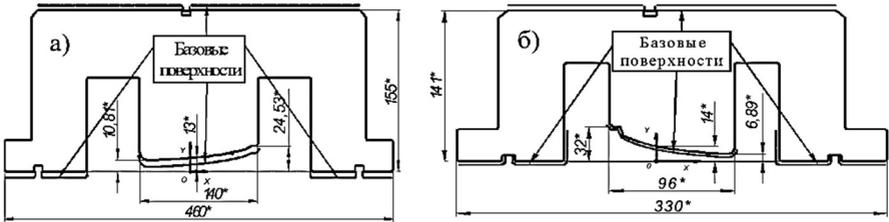


Рис.2. Профиль пластин дипольных магнитов *BD* (а) и *BF* (б).

На основании результатов моделирования показаны изменения параметров диполей в процессе ускорения заряженных частиц в бустере. Сделаны оценки механической прочности ярма диполей с учетом действия магнитных полей и определен вклад в изменение магнитных параметров. Также приведен результат моделирования ошибок при штамповке пластин и сформулированы требования к точности изготовления сердечников магнитов.

Во второй главе также приведено описание коррекции влияния краевого поля на интегральные характеристики магнитного поля диполей. Результаты моделирования и оптимизации торцевых фасок показаны на Рис.3.

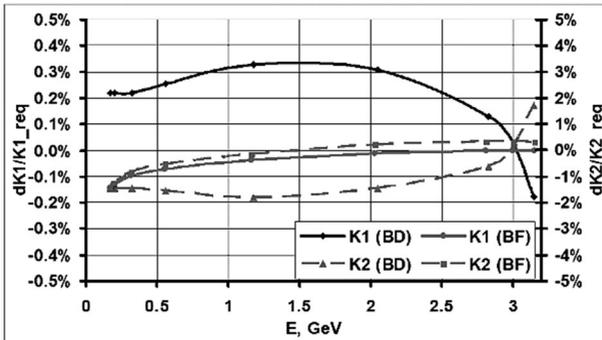


Рис.3. Изменение  $K_1$  и  $K_2$  в зависимости от энергии бустера.

Кратко приведено описание конструкции диполей и указаны особенности их изготовления. В главе затронуты вопросы технологии производства сердечников магнитов, точности сборки и выставки диполей в кольцо, а также способ изготовления торцевых фасок.

**В третьей главе** описан процесс производства поворотных магнитов, проанализированы результаты измерения механических параметров сердечников и их влияние на характеристики магнитов. Затронуты вопросы точности изготовления и технологии производства магнитов. Определены ключевые этапы производства и контроль параметров на каждой стадии производства. Сделаны выводы о качестве поставляемой стали для изготовления сердечников. Описана технология запекания сердечников диполей. Изложена технология изготовления, запечки и контроля катушек возбуждения магнитов. На Рис.4 показаны дипольные магниты в сборе.

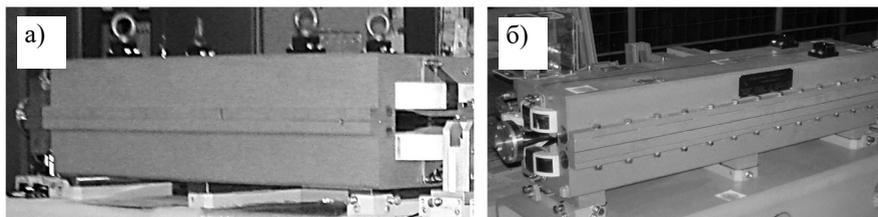


Рис.4. Готовые диполи: *BD* (а), *BF* (б).

Как основной параметр, влияющий на формирование требуемого распределения полей, приведены результаты (Таблица 3) измерений межполюсного зазора, усредненного по всей длине диполей для всех магнитов в *BD* и *BF* серии. В главе приводятся результаты измерений ряда ключевых геометрических параметров, которые лежат в пределах допусков Технического Задания (ТЗ).

Таблица 3: Межшимный зазор дипольных магнитов.

Зазор	<i>BD</i>		<i>BF</i>	
	ТЗ	<Изм.> ± σ	ТЗ	<Изм.> ± σ
$h_{\text{left,MM}}$	49.056±0.015	49.071±0.015	13.774±0.015	13.788±0.015
$h_{\text{right,MM}}$	21.630±0.015	21.643±0.015	64.000±0.015	64.012±0.015

В главе описываются выставка магнитных элементов на подставках и размещение их в кольце с требуемой точностью. Приведены процедуры обеспечивающие заданную точность выставки магнитных элементов.

**В четвертой главе** приводится методика прецизионного измерения магнитного поля с помощью датчиков Холла и описывается разработанное в ИЯФ для этих целей измерительное оборудование. Отмечается, что особенностью данной измерительной системы является использование геодезической системы для коррекции координат положения датчиков Холла

относительно геодезических знаков диполей. Измерительная система (Рис.5) состоит из: (1) лазерного трекера, (2) каретки с датчиками Холла, (3) восьми геодезических знаков для определения положения каретки в пространстве с высокой точностью, (4) направляющей для линейного перемещения каретки с помощью шагового двигателя и измерительной электроники.

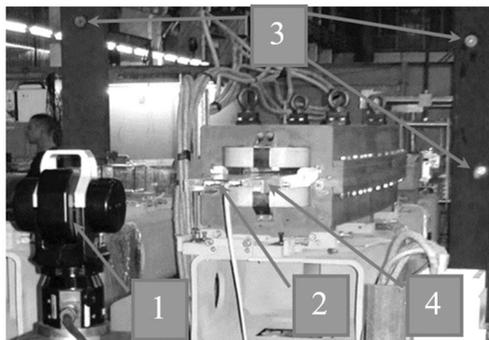


Рис.5. Измерительная система на основе датчиков Холла.

В главе подробно рассматриваются источники ошибок измерительной системы и влияние их на точность определения параметров дипольных магнитов. В Таблице 4 показаны итоговые требования к измерительной системе с датчиками Холла.

Таблица 4: Требования к измерительной системе с датчиками Холла.

Относительная точность выставки датчиков ( $x,y,z$ ), мкм	$\pm 20$
Абсолютная точность выставки датчиков Холла ( $x,y$ ), мкм	$\pm 50$
Абсолютная точность выставки датчиков Холла ( $z$ ), мм	$\pm 0.5$
Отклонение оси датчика относительно плоскости магнита, мрад	$\pm 20$
Непараллельность плоскостей каретки и магнита, мрад	$\pm 0.5$
Ошибка калибровки датчика, Гс	$\pm 0.1$
Смещение нуля датчик, Гс	$\pm 0.1$

Приведены результаты измерений магнитных параметров 32 дефокусирующих и 28 фокусирующих поворотных магнитов, проводится анализ результатов измерений, и их сравнение с результатами моделирования магнитных полей. Сделан вывод о влиянии остаточных магнитных полей, связанных с намагничиванием железа сердечника диполей, и определен оптимальный цикл намагничивания железа. В главе показаны относительные распределения магнитных полей для разных токов возбуждения катушки как для центрального сечения магнитов, так и для интегральных полей. Так же

приведены зависимости параметров магнитов от соответствующей энергии пучка. Сделаны выводы о качестве изготовления и точности магнитных измерений интегральных характеристик диполей. Так относительная точность производства магнитов  $BD$  ( $BF$ ) составила не хуже, чем:

- $1.4 \cdot 10^{-5}$  ( $1.4 \cdot 10^{-5}$ ) для интеграла магнитного поля;
- $10^{-4}$  ( $1.9 \cdot 10^{-4}$ ) для эффективной магнитной длины;
- $10^{-4}$  ( $1.9 \cdot 10^{-4}$ ) для дипольной компоненты;
- $1.6 \cdot 10^{-3}$  ( $4.3 \cdot 10^{-4}$ ) для квадрупольной компоненты;
- $5.5 \cdot 10^{-3}$  ( $4.8 \cdot 10^{-3}$ ) для секступольной компоненты.

В Таблицах 5 и 6 приведены усредненные по серии  $BD$  и  $BF$  параметры дипольных магнитов. Указана суммарная точность определения параметров, состоящая как из точности измерения, так и из точности изготовления диполей.

Таблица 5: Усредненные параметры  $BD$  диполя.

Ток питания, А	49.75	74.57	123.78	368.16	742.00
Энергия, ГэВ	0.20411	0.30430	0.50397	1.49940	3.00000
Эфф.длина, м	1.29945 $\pm 1.4 \cdot 10^{-4}$	1.29944 $\pm 1.5 \cdot 10^{-4}$	1.29946 $\pm 1.6 \cdot 10^{-4}$	1.29943 $\pm 1.6 \cdot 10^{-4}$	1.29896 $\pm 1.5 \cdot 10^{-4}$
$B$ , Т	0.07673 $\pm 0.6 \cdot 10^{-4}$	0.1144 $\pm 0.8 \cdot 10^{-4}$	0.18946 $\pm 1.3 \cdot 10^{-4}$	0.56369 $\pm 3.5 \cdot 10^{-4}$	1.12825 $\pm 1.3 \cdot 10^{-4}$
$G$ , Т/м	-0.3784 $\pm 0.7 \cdot 10^{-3}$	-0.5642 $\pm 1.1 \cdot 10^{-3}$	-0.9347 $\pm 1.6 \cdot 10^{-3}$	-2.7832 $\pm 4.6 \cdot 10^{-3}$	-5.5534 $\pm 8.8 \cdot 10^{-3}$
$S$ , Т/м <sup>2</sup>	-3.02 $\pm 0.4 \cdot 10^{-1}$	-4.45 $\pm 0.6 \cdot 10^{-1}$	-7.21 $\pm 0.7 \cdot 10^{-1}$	-20.91 $\pm 1.4 \cdot 10^{-1}$	-42.86 $\pm 2.4 \cdot 10^{-1}$
$O$ , Т/м <sup>3</sup>	-0.4 $\pm$ 7.0	-2.1 $\pm$ 11	-7.5 $\pm$ 11	-55.2 $\pm$ 20	-72.6 $\pm$ 47

Таблица 6: Усредненные параметры  $BF$  диполя.

Ток питания, А	58.33	87.13	145.40	432.08	863.70
Энергия, ГэВ	0.20658	0.30558	0.50666	1.50261	3.00000
Эфф.длина, м	1.24076 $\pm 2.4 \cdot 10^{-4}$	1.2407 $\pm 2.3 \cdot 10^{-4}$	1.24069 $\pm 2.5 \cdot 10^{-4}$	1.24073 $\pm 2.4 \cdot 10^{-4}$	1.24066 $\pm 2.4 \cdot 10^{-4}$
$B$ , Т	0.03167 $\pm 0.3 \cdot 10^{-4}$	0.04685 $\pm 0.3 \cdot 10^{-4}$	0.07768 $\pm 0.3 \cdot 10^{-4}$	0.23036 $\pm 0.6 \cdot 10^{-4}$	0.45996 $\pm 0.9 \cdot 10^{-4}$
$G$ , Т/м	0.5659 $\pm 0.5 \cdot 10^{-3}$	0.8358 $\pm 0.6 \cdot 10^{-3}$	1.3846 $\pm 0.6 \cdot 10^{-3}$	4.1045 $\pm 1.5 \cdot 10^{-3}$	8.1951 $\pm 3.5 \cdot 10^{-3}$
$S$ , Т/м <sup>2</sup>	2.43 $\pm 0.4 \cdot 10^{-1}$	3.54 $\pm 0.6 \cdot 10^{-1}$	5.87 $\pm 0.8 \cdot 10^{-1}$	17.51 $\pm 0.8 \cdot 10^{-1}$	34.94 $\pm 1.7 \cdot 10^{-1}$
$O$ , Т/м <sup>3</sup>	-7.7 $\pm$ 5.3	-2.3 $\pm$ 7.8	4.4 $\pm$ 12	11.9 $\pm$ 19	7.2 $\pm$ 26

Описана процедура выставки и способ коррекции параметров дипольных магнитов на основе результатов магнитных измерений.

Для учета влияния наведенных токов в стенках вакуумной камеры на параметры диполей был разработан и создан стенд для измерений импульсных магнитных полей. Результаты импульсных измерений полностью подтвердили результаты моделирования импульсных магнитных полей. Измерен ток, протекающий через цепь “вакуумная камера – земля – вакуумная камера”, который вносит существенную ошибку в эффективные магнитные параметры диполей.

В главе приведены результаты магнитных измерений квадрупольных и секступольных линз.

**В пятой главе** представлены основные результаты по запуску бустерного синхротрона для источника NSLS-II. Выполнено сравнение измеренных с помощью пучка параметров кольца с ожидаемыми значениями, полученными из моделирования ошибок магнитных элементов кольца. Приводится анализ выставки магнитных элементов в кольце бустера. В Таблице 7 приведены оценки выставки магнитов в кольце бустера на основе созданной модели с использованием результатов магнитных измерений и измерений, проведенных с циркулирующим пучком.

Таблица 7: Расчетные систематические и среднеквадратичные поправки к выставке элементов.

Тип	Среднее отклонение		Стандартное отклонение	
	$\Delta X, \mu\text{m}$	$\Delta Y, \mu\text{m}$	$\sigma_x, \mu\text{m}$	$\sigma_y, \mu\text{m}$
<i>BD</i>	81	51	60	12
<i>BF</i>	150	68	140	35
<i>QG</i>	440	84	547	49
<i>QD</i>	264	68	211	26
<i>QF</i>	95	120	60	80
Общая	92*	68	75*	42

Проведены измерения и их анализ для системы впуска и выпуска с использованием циркулирующего пучка. Выполнена коррекция орбиты пучка и проведено сравнение измеренных величин с моделированием ошибок. Результаты анализа показаны на Рис.6. Отмечается, что измеренное искажение орбиты пучка лежат внутри ожидаемых значений, как и силы корректирующих магнитов.

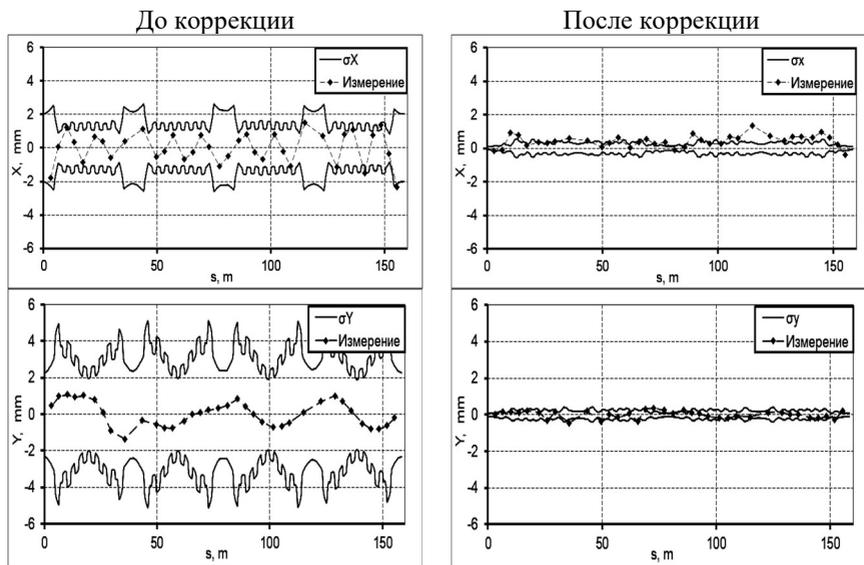


Рис.6. Измеренное искажение орбиты на энергии 3 ГэВ и ожидаемые отклонения орбиты ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ) согласно моделированию ошибок до и после коррекции орбиты.

В главе приводятся результаты измерения оптических функций кольца и проводится сравнения с ожидаемыми значениями. Описан способ коррекции бетатронных частот. Результаты коррекции показаны на Рис.7.

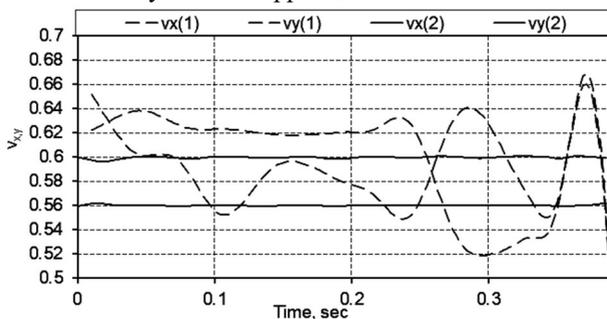


Рис.7. Бетатронные частоты: (1) – до коррекции; (2) – после коррекции

Отмечается высокая полученная эффективность захвата и ускорения частиц. Потери частиц не превышают 5 % (Рис.8).

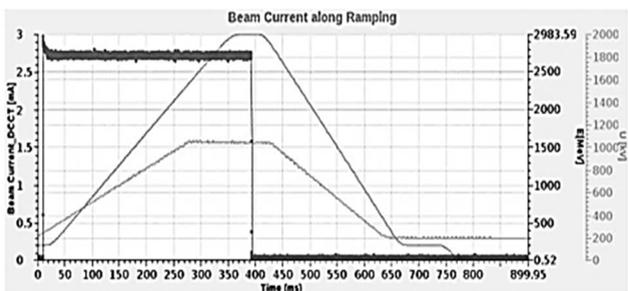


Рис.8. Эффективность ускорения частиц.

В главе описаны результаты измерения эмиттанса пучка, который соответствует расчетному значению и составляет: в горизонтальном направлении  $\epsilon_x \approx 38$  нм·рад, в вертикальном направлении  $\epsilon_y \approx 6$  нм. На Рис.9 приведена эволюция эмиттанса пучка во время процесса ускорения. Измерения осуществлялись с помощью синхротронного излучения магнита BR-A1BD8, выводимого из диагностического порта вывода BR-A1SLM, расположенного вблизи прямолинейного участка DS, где дисперсионная функция минимальна.

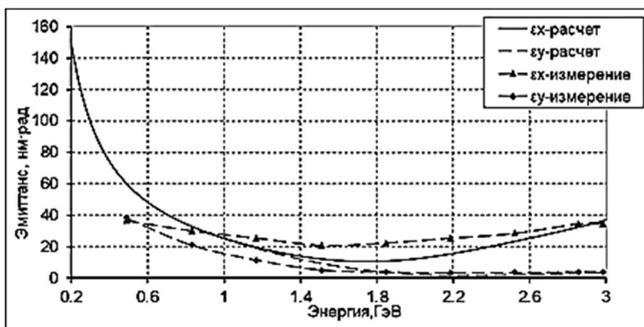


Рис.9. Изменение эмиттанса пучка от энергии.

**В заключении** изложены основные результаты, полученные в диссертации:

- Проведен расчет оптики и динамики синхротрона-бустера для источника СИ NSLS-II;
- Изучено влияние различных погрешностей на оптику кольца;
- Определены параметры магнитных элементов и допуски на точность их изготовления;

- Исследовано влияние вихревых токов в вакуумной камере на поведение пучка как для основных элементов, так и для магнитов «впуска-выпуска»;
- Выработана методика и оценена точность магнитных измерений с использованием геодезической системы для привязки магнитной оси элементов к геодезическим знакам.
- Разработаны и изготовлены с требуемым качеством основные магнитные элементы бустера (28 поворотных магнитов ВF типа и 32 магнитных элементов ВD типа), квадрупольные и секступольные линзы, корректоры, импульсные магниты и т.д.
- Проведена коррекция выставки дипольных магнитов с учетом минимизации искажения орбиты пучка и биения оптической функции из-за отклонения параметров дипольных магнитов от требуемых значений.
- Создана уточненная (реалистичная) модель магнитной структуры, учитывающая изменения параметров магнитов в течение ускорения пучка.
- Выполнена коррекция орбиты, бетатронных частот и остаточного хроматизма кольца в процессе ускорения. Определены необходимые зависимости задаваемых в магниты токов от энергии пучка, обеспечивающие минимальные потери интенсивности при подъеме энергии.

**В приложениях А и Б** изложена теория для мультипольного разложения поля и описано моделирование движения заряженных частиц в магнитном поле.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в следующих работах:

1. S. Gurov, S. Sinyatkin, et al. Status of NSLS-II booster. // Problems of Atomic Science and Technology, т. 4, № 80, 2012.
2. Анчугов О.В., Блинов В.Е., Богомягков А.В., Журавлев А.Н., Карнаев С.Е., Карпов Г.В., Киселев В.А., Куркин Г.Я., Левичев Е.Б., Мешков О.И., Мишнев С.И., Мучной Н.Ю., Никитин С.А., Николаев И.Б., Петров В.В., Пиминов А., Симонов Е.А., Синяткин С.В. Эксперименты по физике пучков заряженных частиц на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М. // ЖЭТФ, т. 136, № 10, 2009.
3. О. В. Анчугов, В. Е. Блинов, А. В. Богомягков, А. А. Волков, А. Н. Журавлев, С. Е. Карнаев, В. А. Киселев, Е. Б. Левичев, О. И. Мешков,

- С. И. Мишнев, И. И. Морозов, Н. Ю. Мучной, С. А. Никитин, И.Б.Николаев, В.В.Петров, А.Пиминов, С. В. Синяткин. Применение методов ускорительной физики в экспериментах по прецизионному измерению масс частиц на комплексе ВЭПП-4 с детектором КЕДР. // ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, т. 1, pp. 1-14, 2010.
4. D. A. Shvedov, O. V. Anchugov, V. A. Kiselev, A. A. Korepanov, S.V. Sinyatkin. Fast magnetic injection and extraction kickers for NSLS-II booster synchrotron. // Instruments and Experimental Techniques, т. 58, № 3, pp. 319-324, 2015.
  5. S. Sinyatkin, G. Baranov, A. Batrakov, P. Burdin, D.Burenkov, S. Gurov, V. Kiselev, V. Kobets. Magnetic Measurement Results of NSLS-II Booster Dipole Magnets. // IPAC'13, Shanghai, 2013.
  6. Wang G.M., Shaftan T. et al. NSLS II INJECTOR INTEGRATED TESTING. // IPAC 2013, Shanghai, 2013.
  7. Wang G.M., Smaluk V.V., Karnev S.E., Sinyatkin S.V. et al. NSLS II COMMISSIONING TOOLS. // IPAC 2013, Shanghai, 2013.
  8. V.A. Kiselev et al. THE NSLS-II BOOSTER DEVELOPMENT AND COMMISSIONING. // IPAC 2014, Dresden, 2014.
  9. Wang G.M., Shaftan T. et al. NSLS II BOOSTER EXTENDED INTEGRATION TEST. // IPAC 2015, Richmond, 2015.
  10. A. Akimov et al. NSLS-II injector commissioning and initial operation. // Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, 2015.
  11. S.Gurov, V.Kiselev, S.Sinyatkin. Current induced in vacuum chamber during NSLS-II booster ramp. // Proceedings of PAC2013, Pasadena, CA USA, 2013.
  12. S.Sinyatkin et al. Design of NSLS-II booster dipole magnets with combine functions. // IPAC'13, Shanfhai, 2013.
  13. S.Sinyatkin et all. Magnetic measurement of NSLS-II booster dipole magnets with combine functions. // IPAC'13, Shanghai, 2013.
  14. I. Okunev, V. Kobets, A. M. Batrakov, A. Pavlenko, S. Sinyatkin, V.A. Kiselev, G. Baranov, A. Erokhin, R. Vakhrushev. Ramped magnetic measurement of NSLS-II booster dipoles. // Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, 2013.
  15. S.Gurov et al. Status of NSLS-II Booster. // IPAC'13, Shanghai, May 2013.
  16. S.M. Gurov et al. NSLS-II BOOSTER. // Physics Procedia, № 84, pp. 74-81, 2016.

СИНЯТКИН Сергей Викторович

**Магнитная система бустерного синхротрона с  
энергией 3 ГэВ для источника синхротронного  
излучения NSLS – II**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Сдано в набор 06.07.2020 г.  
Подписано в печать 07.07.2020 г.  
Формат 60x90 1/16 Объем 1.0 усл. печ.л., 0.8 уч.-  
изд.л. Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 6  
Обработано на РС и отпечатано  
на ротапинтере ИЯФ СО РАН,  
*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*