

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

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель

Левичев Евгений Борисович

доктор физико-математических наук

НОВОСИБИРСК - 2020 г.

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Синхротрон-бустер NSLS II.....	13
1.1. Оптика и основные параметры	14
1.2. Влияние ошибок поля магнитов на параметры синхротрона	17
1.3. Коррекция бетатронных частот	28
1.4. Коррекция хроматизма.....	29
1.5. Влияние вихревых токов в вакуумной камере	31
Глава 2. Магниты с совмещенными функциями	37
2.1. Параметры дипольных магнитов	37
2.2. Двумерное моделирование поля	39
2.3. Изменение межполюсного зазора из-за магнитного поля.....	47
2.4. Ошибки штамповки пластин	49
2.5. Компенсация влияния краевого поля	51
2.6. Конструкция магнитов.....	53
Глава 3. Изготовление магнитов.....	57
3.1. Изготовление сердечников диполей.....	57
3.2. Штамповка пластин.....	60
3.3. Сборка сердечника	61
3.4. Измерение параметров сердечников	64

3.5.	Катушки поворотного магнита	65
3.6.	Изготовление катушек поворотных магнитов.....	67
3.7.	Поворотные магниты в сборе	69
3.8.	Требования на точность выставки магнитов	70
Глава 4. Магнитные измерения		72
4.1.	Методика магнитных измерений	72
4.2.	Оценка точности измерения измерительной системы.....	75
4.3.	Измерительная система на основе датчиков Холла.....	81
4.4.	Результаты магнитных измерений.....	85
4.5.	Выставка диполей.....	93
4.6.	Коррекция параметров	94
4.7.	Импульсные магнитные измерения.....	95
4.8.	Квадрупольные и секступольные линзы	99
Глава 5. Запуск бустерного кольца NSLS-II.....		103
5.1.	Коррекция выставки магнитов	103
5.2.	Система впуска и выпуска	105
5.3.	Измерение и коррекция равновесной орбиты пучка	107
5.4.	Измерения и коррекция настройки бетатронных частот	109
5.5.	Измерения оптических функций кольца	111
5.6.	Измерение эмиттанса пучка	112

Заключение	115
Приложение А. Мультипольное разложение магнитного поля	118
Приложение Б. Моделирование движения заряженных частиц в магнитном поле	122
Список литературы	126

Введение

Первые циклические ускорители заряженных частиц со слабой фокусировкой использовали магниты с совмещенными функциями, которые формировали орбиту пучка и, одновременно, обеспечивали фокусировку по обоим поперечным направлениям. Иногда полюс такого магнита дополнительно профилировался, чтобы создать более высокие компоненты магнитного поля, например, квадратичную для компенсации хроматических aberrаций, или оснащался вспомогательными обмотками коррекций.

Магниты с совмещенными функциями трудоемки в проектировании и изготовлении, когда сложный поперечный профиль полюса может сочетаться со значительным радиальным изгибом магнита. По той же причине затруднена процедура измерения распределения магнитного поля в таких устройствах: измеряющие датчики должны перемещаться с хорошей пространственной точностью ($\sim 50 \text{ мкм} - 100 \text{ мкм}$) 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.

Поэтому после открытия сильной фокусировки появилась тенденция разделения функций магнитных элементов в циклических ускорителях. Поворотные магниты с плоскими полюсами формировали замкнутую орбиту, квадрупольные линзы обеспечивали требуемую фокусировку, а секступольные линзы – корректировали хроматизм движения частиц с разными энергиями. Магниты с разделенными функциями проще в изготовлении и наладке, а ускорители, их использующие, более «предсказуемы» с точки зрения настройки требуемых параметров и эксплуатации.

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.

Поэтому в последние годы наблюдается явный рост числа современных циклических ускорителей, где используются или планируются магниты с совмещенными функциями. Стоит упомянуть такие установки, как источники синхротронного излучения ALBA (Барселона, Испания) [1], Solaris (Краков, Польша) [2] и MAX IV (Лунд, Швеция) [3], проект компактного протонного синхротрона в Японии для терапии рака [4]. В последнем случае для уменьшения размера протонного синхротрона поворотный магнит содержит чередующиеся фокусирующий и дефокусирующий секторы. В проекте MAX IV используются не только дипольные магниты с фокусировкой, но и комбинированные квадрупольно-секступольные линзы [2]. Вообще говоря, все 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.

Росту популярности сложных магнитов способствует, также, развитие технологической базы ускорителей заряженных частиц, позволяющей эффективно преодолеть недостатки, описанные выше. «Продвинутые» программы расчета позволяют с высокой точностью вычислять 3D конфигурации магнитного поля, системы автоматического проектирования и современные станки с числовым программным управлением (ЧПУ) облегчают производство магнитов, координатно-измерительные комплексы производят высокоточное пространственное позиционирование магнитов ускорителя или датчиков измерения магнитного поля. Что касается зависимости параметров пучка от орбиты в магнитах с неоднородным полем, эта проблема решается использованием датчиков положения пучка с субмикронной точностью измерения орбиты, прецизионных корректирующих магнитов и мощных алгоритмов коррекции орбиты.

В 2009 году в Брукгейвенской национальной лаборатории (BNL, США) были начаты, а в 2014 году закончены, работы по созданию источника СИ поколения 3+ NSLS II с максимальной энергией пучка 3 ГэВ [5]. С 2015 года источник успешно работает на пользователей; в 2018 году на этой современной установке эксплуатировалось 30 экспериментальных станций.

В качестве бустерного (промежуточного) ускорителя используется синхротрон, ускоряющий электроны от 170 МэВ до 3.15 ГэВ со средним током пучка 20 мА и частотой повторения импульсов инжекции до 2 Гц [6]. Особенностью синхротрона является его относительно малый горизонтальный эмиттанс пучка $\epsilon_x \approx 37$ нм (для примера, эмиттанс синхротрона английского источника синхротронного излучения (СИ) Diamond с энергией 3 ГэВ и периметром 158.4 м $\epsilon_x = 142$ нм). Работа по созданию бустерного синхротрона для BNL началась в ИЯФ СО РАН в мае 2010 г. и была завершена за три года.

Сжатые сроки выполнения проекта и высокое качество оборудования заслужили отличную оценку американских физиков и позволили в короткие сроки запустить синхротрон и получить проектные параметры.

Целью диссертационной работы является разработка оптической структуры кольца, исследование динамики пучка, оценка допусков на магнитные элементы, моделирование, проектирование, оптимизация и производство ключевых магнитных элементов бустерного синхротрона. Такими элементами магнитной системы ускорителя, определяющими характеристики пучка (в т.ч., малый эмиттанс при небольшом периметре) и его качество, являются 28 фокусирующих (BF) и 32 дефокусирующих (BD) поворотных магнита с совмещенными функциями [7]. Кроме дипольной и квадрупольной компонент поля, полюс магнита формирует также квадратичную нелинейность для компенсации натурального хроматизма.

Дипольные магниты изготовлены из шихтованного железа для работы в импульсном режиме. Н-образная форма поперечного сечения магнита обеспечивает небольшие габаритные размеры. Радиус кривизны сердечников диполей составляет 8.8 м и 21.7 м для BD и BF типов, соответственно. Дипольные магниты имеют параллельные края торцевого среза магнитопровода. Для повышения интегрального (вдоль орбиты пучка) качества поля во всем диапазоне энергий ускорителя торцевые фаски магнитов были оптимизированы сначала путем тщательного трехмерного моделирования, а затем, после изготовления прототипов, по результатам измерений поля.

Для небольшой настройки параметров ускорителя в процессе ускорения на кольце установлены 24 (16) отдельные квадрупольные (секступольные) линзы.

Следует отметить, что в ИЯФ СО РАН имеется большой опыт по конструированию и изготовлению магнитов с совмещенными функциями. Магниты электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4М и накопительного

кольца ВЭПП-3 представляют собой сложные магнитные блоки, содержащие полюса с фокусирующими и дефокусирующими секторами, квадратичной нелинейностью и оснащенные дополнительными обмотками для линейных и нелинейных коррекций. Несмотря на сложную конфигурацию магнитного поля, прецизионное изготовление магнитных блоков, тщательное измерение характеристик поля и развитое диагностическое оборудование позволило провести на комплексе ВЭПП-4М с 2000 года ряд уникальных экспериментов, как посвященных физике ускорителей [8], так и по физике частиц [9]. Достаточно сказать, что для экспериментов по прецизионному измерению масс элементарных частиц, была освоена методика калибровки средней энергии пучка методом резонансной деполяризации с рекордной относительной точностью $\sim 10^{-6}$ [9], что было бы невозможно без тщательного исследования и анализа особенностей работы магнитов с совмещенными характеристиками поля. Впоследствии результаты этих исследований и анализа были использованы при проектировании, изготовлении и измерении магнитов бустера BNL.

В диссертации описаны методы расчетов, моделирования движения пучка, проектирования, производства, измерений и оптимизации характеристик для магнитов BF и BD , предназначенных для постановки в бустерный синхротрон источника СИ NSLS II, а также, результаты успешного запуска ускорителя.

Диссертация состоит из **введения, пяти глав и заключения.**

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

Во **второй главе** обосновывается выбор конструкции поворотных магнитов BF и BD . Приводятся и обсуждаются результаты 2-х и 3-х мерного моделирования магнитных полей. На основании результатов моделирования формулируются требования к точности изготовления сердечников магнитов.

В **третьей главе** описан процесс производства поворотных магнитов, проанализированы результаты измерения механических параметров сердечников и их влияние на характеристики магнитов.

В **четвертой главе** приводится методика прецизионного измерения магнитного поля с помощью датчиков Холла и описывается разработанное в ИЯФ для этих целей измерительное оборудование. Для учета влияния наведенных токов в стенках вакуумной камеры на параметры диполей был разработан и создан стенд для измерений импульсных магнитных полей. Описаны результаты измерения магнитных параметров 32 дефокусирующих и 28 фокусирующих поворотных магнитов, проводится анализ результатов измерений, и их сравнение с результатами моделирования магнитных полей.

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.

На защиту выносятся следующие положения:

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 ± 2 см была лучше, чем $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ в диапазоне полей от 0.08 Т до 1.13 Т для диполей *BD* и от 0.03 Т до 0.46 Т для диполей *BF*.

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.

Работа проходила в тесном сотрудничестве специалистов ИЯФ и Брукхейвенской национальной лаборатории США в 2010-2014 годах. По результатам диссертационной работы опубликовано 16 статей, в том числе 4 статьи в периодических изданиях, входящих в рекомендуемый перечень ВАК [7-9, 11], 11 статей в трудах международных конференций [13-23], 1 статья в трудах Всероссийских конференций [12].

Глава 1. Синхротрон-бустер NSLS II

В Брукхейвенской национальной лаборатории США был создан и в период 2009-2014 г. запущен источник синхротронного излучения NSLS II с натуральным горизонтальным эмиттансом меньше 1 нм [12], [18]. Источник СИ включает в себя линейный ускоритель на энергию до 200 МэВ, бустер на энергию до 3 ГэВ и накопительное кольцо с энергией 3 ГэВ.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН провел полный цикл работ по созданию синхротрона-бустера для источника NSLS II, от разработки и проектирования, до изготовления, сборки и успешного запуска. Синхротрон длиной 158.4 м ускоряет пучок электронов из линейного ускорителя и выпускает его в основное кольцо на номинальной энергии 3 ГэВ.

Основными требованиями для бустера являются его компактность, обеспечение оптимальных параметров пучка и высокая эффективность перепуска. Для выполнения требования компактности в конструкции синхротрона применяются дипольные магниты с совмещенными функциями. Дипольные магниты обеспечивают, как сильную фокусировку, так и коррекцию натурального хроматизма с помощью секступольной компоненты поля.

Важным параметром для инжекции пучка является минимальные потери частиц при перепуске из линейного ускорителя, дальнейшем ускорении в бустере и выпуске в основное накопительное кольцо. Специфицированная величина потерь не должна превышать 75%. При этом коэффициент инжекции в бустер не должен быть хуже 85%.

Существуют две опции работы бустера: инжекция-ускорение и инжекция-накопление-ускорение. В случае накопления размер накопленного и инжектируемого пучка полностью занимает акцептанс вакуумной камеры синхротрона. 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 $d^2B/dx^2 < 5 \cdot 10^{-2}$.

Такое качество поля обеспечивает приемлемую динамическую апертуру и допустимые биения оптических функций.

Для моделирования трехмерного (3D) распределения магнитного поля в апертуре магнита применялись программы ANSYS [24] и Mermaid [25]. Рассчитанные значения поля использовались для численного моделирования движения равновесной частицы в медианной плоскости. При необходимости по результатам моделирования вводилась коррекция поля как в центральной части магнита, так и в краевой (путем подбора формы и размеров торцевой фаски магнитопровода). В реальной жизни из-за различия магнитных свойств сердечников и неточности изготовления (сборки) свойства разных магнитов могут слегка отличаться.

1.1. Оптика и основные параметры

Основным требованием к синхротрону было получение на энергии выпуска 3 ГэВ достаточно малого горизонтального эмиттанса $\epsilon_x \approx 37$ нм при относительно небольшом периметре 158 м. Это достигается использованием большого числа идентичных коротких магнитных ячеек с малым углом поворота. Фактически, используется тот же подход, что и для современных источников СИ. Ячейки собраны в четыре суперпериода, разделенных прямолинейными промежутками, в которых размещаются системы впуска и выпуска, ускоряющие высокочастотные резонаторы и оборудование диагностики пучка. Общая схема синхротрона приведена на Рис.1.1.

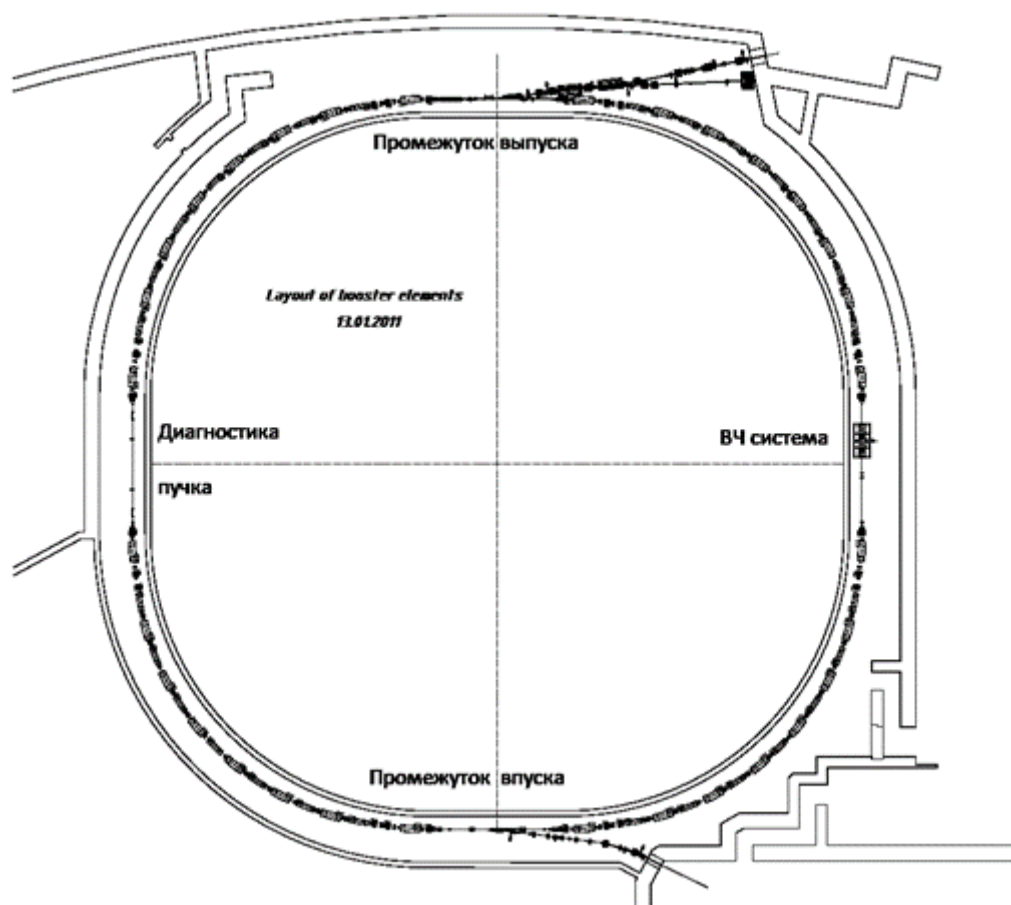


Рис.1.1. Схема бустерного синхротрона NSLS II.

Структура напоминает т.н. Multipole Bend Achromat, активно применяемый в проектах источников СИ четвертого поколения, с той разницей, что здесь дисперсионная функция в прямолинейных промежутках не зануляется, поскольку не предполагается использовать магнитные периодические структуры (вигглеры), хотя и принимает небольшое значение в 15 см. Структурные функции суперпериода показаны на Рис.1.2.

Компактность ячейки и ускорителя достигается применением дипольных магнитов с совмещенными функциями. Для достижения малого эмиттанса необходима сильная фокусировка, которая приводит к появлению значительного натурального хроматизма, что вызывает большой разброс бетатронной частот в пучке в зависимости от импульса и потерю частиц если хроматизм не компенсировать. Другой важной причиной необходимости коррекции

хроматизма является коллективная «head-tail» неустойчивость пучка. Для коррекции хроматизма имеется секступольная компонента поля интегрированная в диполи и позволяющая получить рабочее значение хроматизма частот $(\xi_x, \xi_y) = (+1.2, +2)$. Включение квадрупольных компонент в поворотные магниты является достаточно обычным явлением, в то время, как интеграция компонент секступольного поля встречается редко.

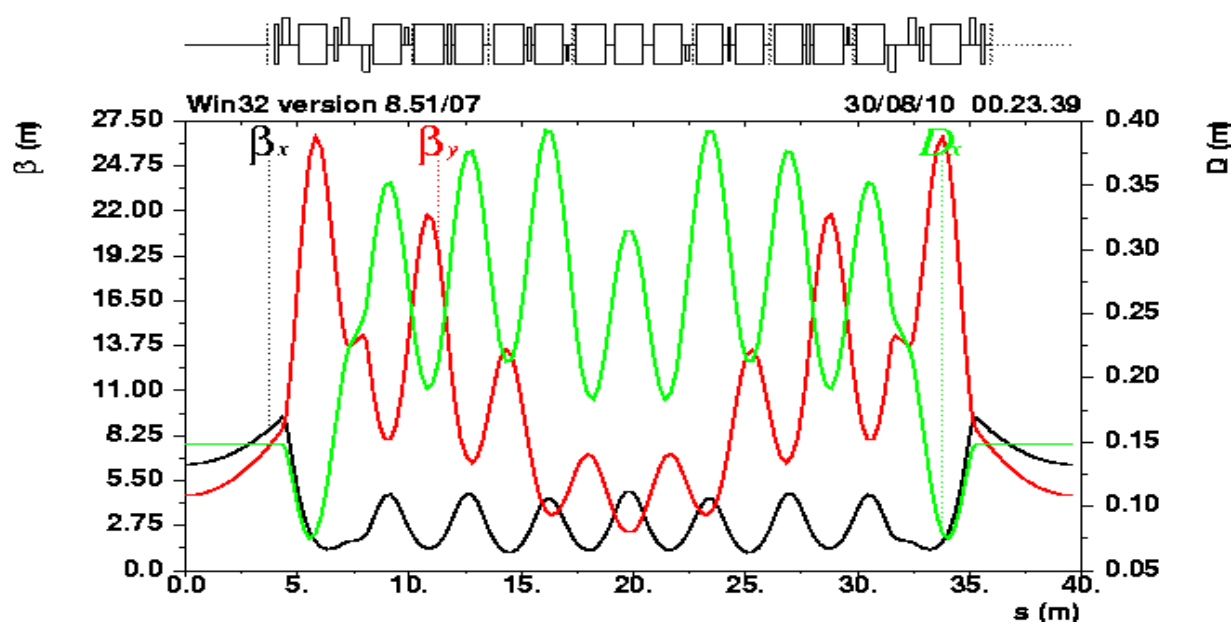


Рис.1.2. Оптические функции $\frac{1}{4}$ кольца.

Каждый суперпериод (квадрант) состоит из 8 дефокусирующих дипольных магнитов (BD), 7 фокусирующих магнитов (BF), 6 квадрупольных и 4 секступольных отдельных линз.

Два семейства отдельно стоящих квадрупольных линз обеспечивают настройку бетатронной рабочей точки $(\nu_x, \nu_y) = (9.6455, 3.4105)$ в процессе ускорения частиц. Для получения оптимального акцептанса структуры введено дополнительное семейство квадрупольных линз. Для коррекции остаточного хроматизма в структуре кольца предусмотрены отдельно стоящие секступольные линзы, сформированные в два семейства.

Параметры установки приведены в Таблице 1.1.

Таблица 1.1: 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	
Время оборота, нс	528	
ВЧ частота, МГц	499.68	
ВЧ гармоника	264	
ВЧ напряжение, МВ	0.2	1.2
Синхротронная частота, кГц	36.4	20.9
ВЧ акцептанс, ε_{RF} , %	1.65	0.54
Бетатронные частоты: ν_x/ν_y	9.6455/3.4105	
Макс./мин.оптические функции		
Натуральный хроматизм: ξ_x/ξ_y	-9.5/-13.5	
Остаточный хроматизм: ξ_x/ξ_y	1.25 / 2.05	
Коэффициент уплотнения орбит, α	0.00882	
Эмиттанс инжек.пучка, нм	150	-
Энерг.разброс инжек.пучка, σ_E/E	$<1 \cdot 10^{-2}$	-
Горизонтальный эмиттанс, ε_x , нм	0.166	37.4
Энергетический разброс, σ_E/E	$0.55 \cdot 10^{-4}$	$8.31 \cdot 10^{-4}$
Потери на оборот, U_0 , кэВ	0.0135	685.8
Время затухания: τ_x/τ_s , мс	$15.6/7.8 \cdot 10^3$	4.62/2.31
Радиационные числа: $J_x/J_y/J_s$	1.001/1.000/1.999	

1.2. Влияние ошибок поля магнитов на параметры синхротрона

Качество поля магнитных элементов определяется чувствительностью магнитной оптики к ошибкам, требуемой эффективностью пропуска частиц и параметрами инжектируемого в бустер пучка. Ошибки поля приводят к отклонениям параметров оптической структуры, включая искажение замкнутой орбиты, сдвиг бетатронных частот, биение бетатронных функций, изменение коэффициента бетатронной связи, уменьшение динамической апертуры и т.д.

Особенностью магнитов с комбинированными функциями является наличие высоких требований на точность их выставки относительно расчётного положения в пространстве. Конструкция и технология изготовления диполей должны обеспечить точное позиционирование области поля внутри апертуры магнита (как правило, расчетной орбиты в поле заданной/измеренной конфигурации) относительно геодезических знаков («геознаков») снаружи магнитопровода, а также, самого магнита относительно остального оборудования ускорителя.

На Рис.1.3 показана система координат относительно магнита, которая будет использоваться в тексте ниже. Ось x лежит в медианной плоскости и направлена по локальному радиусу кривизны; ось y направлена вверх (перпендикулярно медианной плоскости), ось s направлена по касательной к мгновенному положению равновесной орбиты в магните.

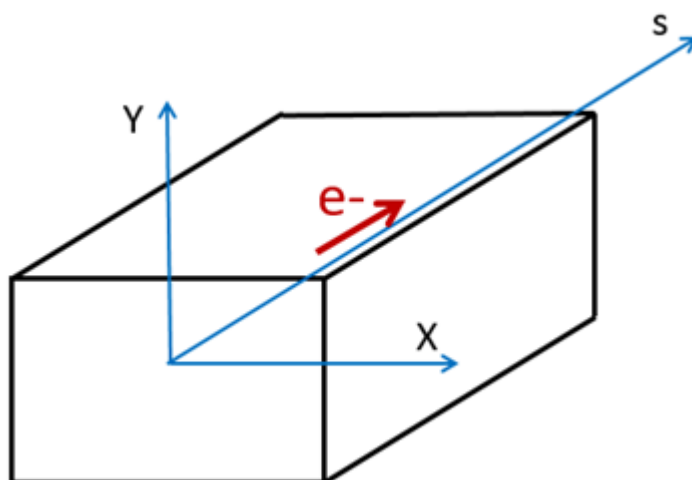


Рис.1.3. Система декартовых координат, привязанная к магнитному блоку.

На самом деле, система координат, описывающая поперечное движение частицы в циклическом ускорителе – криволинейная, сопровождающая, привязанная к центру пучка и движущаяся с его средней скоростью. Однако, как правило, апертура магнита существенно меньше его длины, поле в каждом сечении можно считать двумерным (см. Приложение А) и описывать в

двумерной декартовой системе (x, y) . Ниже мы будем считать именно так, если не оговорено другое.

Мультипольное разложение двумерного магнитного поля приведено в Приложении А. В этой главе мы используем выражение для разложения поля в декартовой системе координат (А.7):

$$\vec{B}(z) = B_y + iB_x = \sum_{n=0}^{\infty} (B_n + iA_n) \left(\frac{z}{R_0}\right)^n, \quad (1.1)$$

где, напомним, $z = x + iy = r \cdot \exp(i\theta)$, а B_n и A_n , задающие «нормальные» и «повернутые» (skew) мультиполи, определяются как

$$B_n = \frac{R_0}{n!} \left(\frac{\partial^n B_y}{\partial x^n}\right)_{x=y=0}, \quad A_n = \frac{R_0}{n!} \left(\frac{\partial^n B_x}{\partial x^n}\right)_{x=y=0}. \quad (1.2)$$

Для эффективной инжекции и ускорения пучка в бустере динамическая апертура должна быть не меньше требуемого акцептанса. Согласно спецификации, оптика бустера должна обеспечивать акцептанс:

- $A_x = 30$ мм-мрад – радиальный и
- $A_y = 3.6$ мм-мрад – вертикальный.

Эти величины позволяют получить надежные инжекцию и накопление в бустере. Опираясь на эти значения, было изучено влияние ошибок геометрической выставки магнитной системы и дополнительных нелинейностей на размер динамической апертуры.

Следующие факторы могут быть источником уменьшения акцептанса бустерного кольца:

(1) Отличие интегрального значения дипольной компоненты магнитного поля (угла поворота) для различных магнитов приводит к искажению горизонтальной орбиты согласно [26]

$$\Delta x(s) = \frac{\sqrt{\beta_x(s)}}{2 \sin(\pi\nu_x)} \sum_{i=1}^N \theta_{x,i} \sqrt{\beta_x(s_i)} \cos(|\varphi_x(s) - \varphi_x(s_i)| - \pi\nu_x), \quad (1.3)$$

где β_x – бетатронная функция, ν_x – частота бетатронных колебаний, φ_x – набег бетатронной фазы, θ_{xi} – ошибка в угле поворота в i -м элементе, s – азимут наблюдения, s_i – азимут расположения i -го элемента. Искажение орбиты, в свою очередь, приводит к сдвигу бетатронных частот для горизонтального и вертикального движения из-за магнитов с комбинированными функциями и, в конце концов, к ограничению физической апертуры.

(2) Поперечное смещение дипольных магнитов Δx , Δy вызывает искажение равновесной орбиты из-за наличия в магните градиента $G = dB_y/dx$ и секstupольной компоненты $S = d^2B_z/dx^2$. Угловое отклонение частицы в i -м магните оценивается как

$$\begin{aligned}\theta_{x,i} &= \frac{GL}{B_0\rho} \Delta x_i + \frac{SL}{B_0\rho} \frac{(\Delta x_i^2 - \Delta y_i^2)}{2}, \\ \theta_{y,i} &= -\frac{GL}{B_0\rho} \Delta y_i + \frac{SL}{B_0\rho} \Delta x_i \Delta y_i,\end{aligned}\tag{1.4}$$

где L – эффективная длина магнита, а $B_0\rho$ – магнитная жесткость ускорителя. Как и в предыдущем пункте, искажение орбиты вызывает уменьшение геометрического акцептанса.

(3) Поперечное смещение магнитов приводит, из-за наличия секstupольной компоненты поля, к возникновению добавочного градиента поля:

$$\Delta K_{n,i} = \frac{SL}{B_0\rho} \Delta x, \quad \Delta K_{s,i} = \frac{SL}{B_0\rho} \Delta y.\tag{1.5}$$

Первое выражение в (1.5) соответствует «нормальной» квадрупольной линзе и приводит к появлению добавочной фокусировки пучка, второе – к «повернутой» (skew) и приводит к связи поперечных мод колебаний. Для малых погрешностей сдвиг рабочей точки бетатронных частот равен

$$\Delta \nu_{x,y} \approx \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N \beta_{x,yi} (\Delta K_n L)_i.\tag{1.6}$$

Искажение бетатронных функций равно

$$\frac{\Delta\beta_{x,y}(s)}{\beta_{x,y}(s)} \approx \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta K_{x,y} L) \beta_{x,y}(s) \cos(2|\varphi_{x,y}(s) - \varphi_{x,y}(s_i)| - 2\pi\nu_{x,y})}{2\sin(2\pi\nu_{x,y})}. \quad (1.7)$$

Коэффициент связи бетатронных колебаний равен:

$$\kappa = \frac{1}{2\pi} \int_s^{s+C} k_s \sqrt{\beta_x \beta_y} \cdot e^{i\varphi} ds, \quad (1.8)$$

здесь $\varphi = \varphi_x + m \varphi_y - (\nu_x + m \nu_y + q) 2\pi s / C$, $\varphi_{x,y}$ – бетатронная фаза, $\nu_{x,y}$ – бетатронная частота, $m = \pm 1$, q – целое число и k_s – skew-квадрупольная компонента поля.

Из-за данного типа ошибок может уменьшиться как физическая, так и динамическая апертура кольца. При больших ошибках происходит деградация равновесного фазового объема пучка и изменение натурального хроматизма пучка.

(4) Мультипольные (октупольные и выше) компоненты магнитного поля, вызванные погрешностями изготовления и сборки магнитов, уменьшают размер динамической апертуры генерируя нелинейные резонансы высокого порядка.

Для анализа влияния ошибок параметров диполей на оптику кольца было проведено численное исследование движения частиц в магнитной структуре синхротрона с использованием моделирующей программы MAD8 [27]. Каждый тип ошибки или погрешности магнитного поля вносился случайным образом в магниты, и на основе выборки из 1000 результатов определялись допустимые значения погрешностей. Распределение ошибок нормальное. Для исключения нереально больших погрешностей распределение «обрезалось» на уровне двух среднеквадратичных отклонений.

Исходя из требуемых значений вертикального и горизонтального акцептансов, приведенных в предыдущем разделе, результатов моделирования поля, точностей производства и сборки магнитов и т.п. были определены

допуски на погрешности различных компонент поля и пространственной выставки магнитов (Таблица 1.2). Среднеквадратичные ошибки поля даются *относительно среднего*, под которым понимается проектное или номинальное значение, то есть, $\langle B \rangle = \sigma_B / B_0$ – относительная ошибка вертикальной компоненты магнитного поля на орбите и т.д.

Таблица 1.2: Чувствительность оптической структуры бустера к ошибкам магнитных параметров диполей.

Тип	Знач.	$\langle v_x \rangle 10^3$	$\langle v_y \rangle 10^3$	$\langle \xi_x \rangle 10^2$	$\langle \xi_y \rangle 10^2$	\bar{X}_m мм	\bar{Y}_m мм	$\langle \varepsilon_x \rangle$ нм
Ошибки магнитного поля								
$\langle B \rangle \%$	0.1	5	10	-	-	2.01	-	-
$\langle G \rangle \%$	0.5	9	27	5	31	-	-	0.2
$\langle S \rangle \%$	3.0	-	-	7	18	-	-	-
Ошибки позиционирования магнитов в пространстве								
$\langle x \rangle$ мм	0.15	4	13	2	5	3.15	-	0.09
$\langle y \rangle$ мм	0.15	4	4	7	8	0.47	7.35	6.39
$\langle z \rangle$ мм	0.5	1	4	-	1	0.89	-	0.02
$\langle \alpha_x \rangle$ мрад	0.1	1	1	2	2	0.09	3.13	0.85
$\langle \alpha_y \rangle$ мрад	0.1	2	6	1	2	1.37	-	0.03
$\langle \alpha_s \rangle$ мрад	0.2	-	-	1	1	0.03	1.84	0.20

Среднеквадратичные ошибки выставки магнитов даются в *абсолютных* значениях, т.е., $\langle x \rangle = \sigma_x$ – смещение магнита как целого вдоль горизонтальной оси, а $\langle \alpha_y \rangle = \sigma_{\alpha_y}$ – поворот магнита вокруг вертикальной оси и т.д. В том же смысле нужно понимать и изменение параметров пучка, вызванное ошибками, приведенными в первой колонке Таблицы 1.2. Так, среднеквадратичная ошибка градиента магнита (по 1000 выборкам) $\frac{\sigma_G}{G_0} = 0.5\%$ приводит к среднеквадратичному изменению вертикального хроматизма $\langle \xi_x \rangle = \sigma_{\xi_x} = 31 \cdot 10^{-2}$, а смещение магнита по вертикали со среднеквадратичным значением $\langle y \rangle = \sigma_y = 0.15$ мм вызывает рост эмиттанса со среднеквадратичным значением $\langle \varepsilon_x \rangle = \sigma_{\varepsilon_x} = 6.39$ нм. В Таблице 1.2 \bar{X}_m и \bar{Y}_m – максимальное (по кольцу)

значение искажения замкнутой орбиты пучка усредненное по 1000 случайных выборок.

Среднеквадратичная относительная ошибка градиента диполей $\langle G \rangle = \frac{\sigma_G}{G_0} = 5 \cdot 10^{-3}$ соответствует среднеквадратичному разбросу бетатронных частот для горизонтального движения $\sigma_{\nu_x} = 9 \cdot 10^{-3}$, а для вертикального – $\sigma_{\nu_y} = 27 \cdot 10^{-3}$. Существенно бóльшая чувствительность вертикального движения вызвана, согласно (1.3), (1.6) и (1.7), большей величиной вертикальной бетатронной функции в магнитах по сравнению с горизонтальной (см. Рис.1.2).

На Рис.1.4 показан разброс рабочей точки бетатронных частот по результатам моделирования ошибок всех типов, приведенных в Таблице 1.2. Видно, что вертикальный разброс гораздо больше, чем горизонтальный. Приведены, также, линии бетатронных резонансов до 4-го порядка включительно.

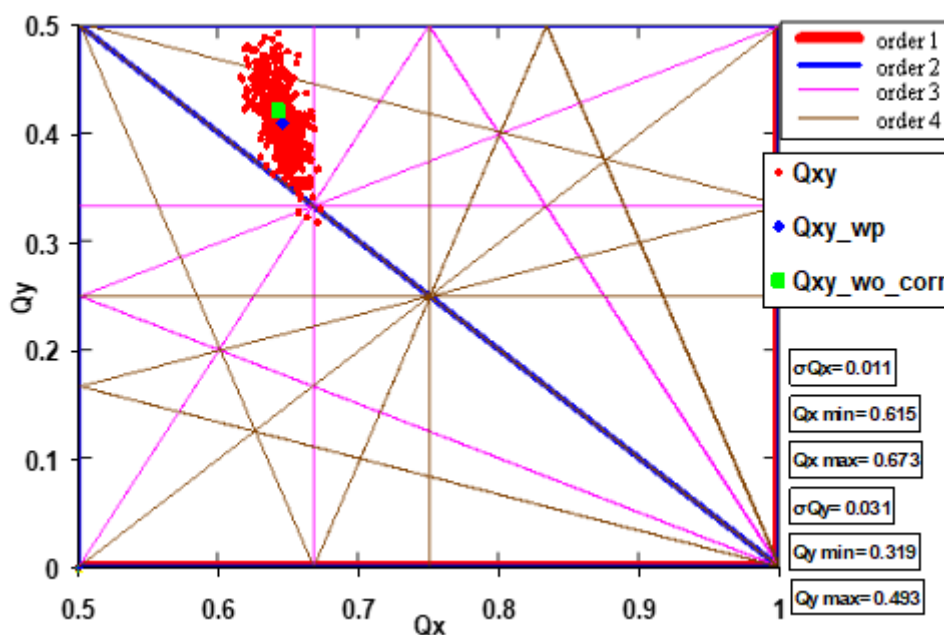


Рис.1.4. Разброс бетатронных частот по результатам моделирования с ошибками, приведенными в Таблице 1.2.

Моделирование показывает, что горизонтальное искажение орбиты зависит, в основном, от горизонтального же сдвига магнитов ($\bar{X}_m = 3.15$ мм),

ошибок дипольного поля ($\bar{X}_m = 2.01$ мм) и от поворота магнита вокруг вертикальной оси ($\bar{X}_m = 1.37$ мм). Вертикальная орбита возмущается вертикальным смещением магнита ($\bar{Y}_m = 7.35$ мм), его вращением относительно горизонтальной ($\bar{Y}_m = 3.13$ мм) и продольной ($\bar{Y}_m = 1.84$ мм) осей. Вклад ошибок позиционирования и градиентов квадрупольных и секступольных магнитов в искажение замкнутой орбиты небольшой.

На Рис.1.5 представлено среднеквадратическое (по всем случайным выборкам) значение искажения замкнутой орбиты вдоль кольца. Максимальные среднеквадратичные значения составляют $\sigma_{xmax} = 2.7$ мм и $\sigma_{ymax} = 5.5$ мм. Как уже указывалось выше, бóльшие значения искажения по вертикали объясняются бóльшими значениями вертикальной бетатронной функции.

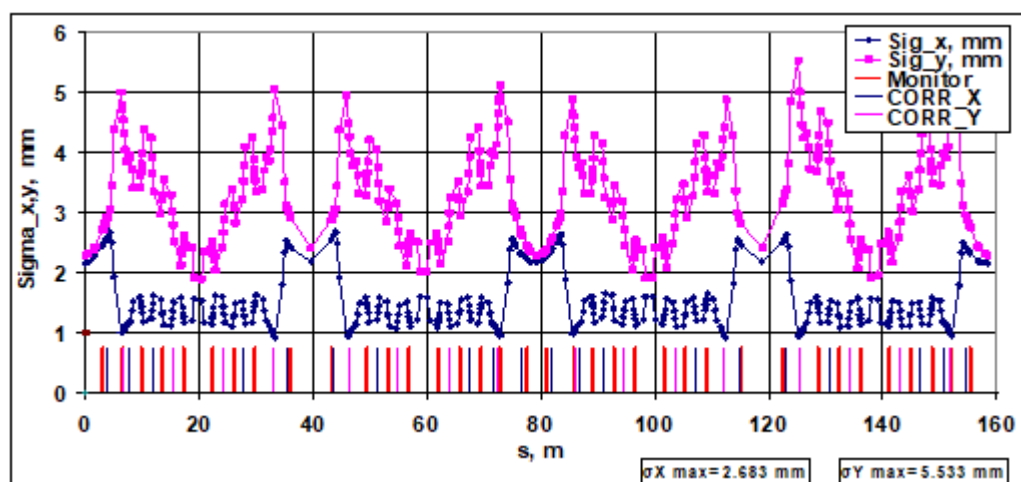


Рис.1.5. Среднеквадратическое искажение орбиты вдоль азимута кольца.

Отнюдь не все варианты случайного искажения орбиты оказываются оптически устойчивы. Как видно из Рис.1.4, сдвиг вертикальной частоты бетатронных колебаний может оказаться столь велик, что частица гибнет на параметрическом резонансе $\{\nu_y\} = 0.5$, где фигурные скобки обозначают нецелую часть. Доля оптически замкнутых решений для величины ошибок из Таблицы 1.2 составляет 66%. После проведения стандартной процедуры коррекции искажения замкнутой орбиты максимальное среднеквадратичное

искажение орбиты уменьшается до 0.67 мм, а вертикальное – до 0.36 мм и для всех орбит имеется замкнутая оптика.

Важный аспект моделирования относится к наличию мультипольных компонент магнитного поля магнитов (учитывались как дипольные магниты, содержащие квадрупольную и секступольную составляющие, так и отдельно стоящие квадрупольные и секступольные линзы), связанных с особенностями конструкции, погрешностями производства и сборки и т.д. Мультиполи высоких порядков, хотя и малы, могут создавать нелинейные резонансы, которые ограничивают динамическую апертуру.

С помощью численного моделирования были определены допуски на мультипольные составляющие магнитного поля. Критерием служил необходимый акцептанс, указанный выше ($A_x = 30$ мм-мрад и $A_y = 3.6$ мм-мрад): совокупное влияние мультиполей (до девятого включительно) должно обеспечить поперечную динамическую апертуру не меньше этого акцептанса.

При моделировании учитывались только нормальные компоненты магнитного поля (B_n в (1.2)). Skew-компоненты получались автоматически при введении в моделировании ошибок поворота магнита вокруг продольной оси s . Способ определения допусков на мультипольные ошибки взят из [28] и заключался в следующем алгоритме. На первом этапе в магниты вводится только один тип мультипольной ошибки $B_{3...9}$ (дипольная B_0 , квадрупольная B_1 и секступольная B_2 составляющие считаются основными) и их величины подбираются так, чтобы результирующая динамическая апертура была равна требуемому акцептансу. Затем все мультиполи задавались одновременно случайно, как это описано выше, с нормирующим коэффициентом, определенным на предыдущем шаге: чем «эффективнее» мультиполь уменьшает апертура, тем жёстче допуск. Если динамическая апертура

оказывалась меньше заданного акцептанса, весь набор мультиполюсных ошибок уменьшался пропорционально пока не получался удовлетворительный результат. Получившийся набор допусков на мультиполюсные коэффициенты разложения поля использовался при расчете и изготовлении магнитов.

Рис.1.6 иллюстрирует результаты моделирования только для мультиполюсных ошибок поля магнитов. Рис.1.7 включает также, кроме высших мультиполей, рассмотренные ранее ошибки пространственной выставки магнитов, градиента и секступольной компоненты. Результирующая динамическая апертура (среднее значение) удовлетворяет поставленным требованиям, поскольку превышает заданный акцептанс. Апертура приводится для начальной точки структуры на Рис.1.2, где $\beta_{x0} = 6.5$ м, $\beta_{y0} = 4.6$ м.

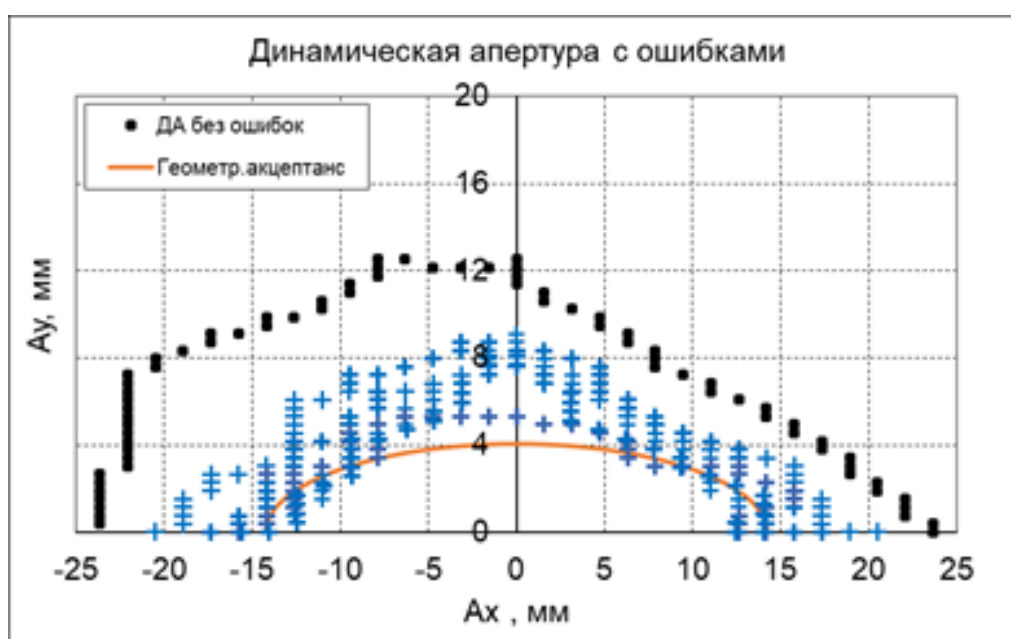


Рис.1.6. Уменьшение динамической апертуры из-за влияния мультиполюсных ошибок поля. Здесь: наружный черный контур показывает апертуру без ошибок, коричневый эллипс – требуемый акцептанс, маркеры – результат моделирования 10 выборок с ошибками.

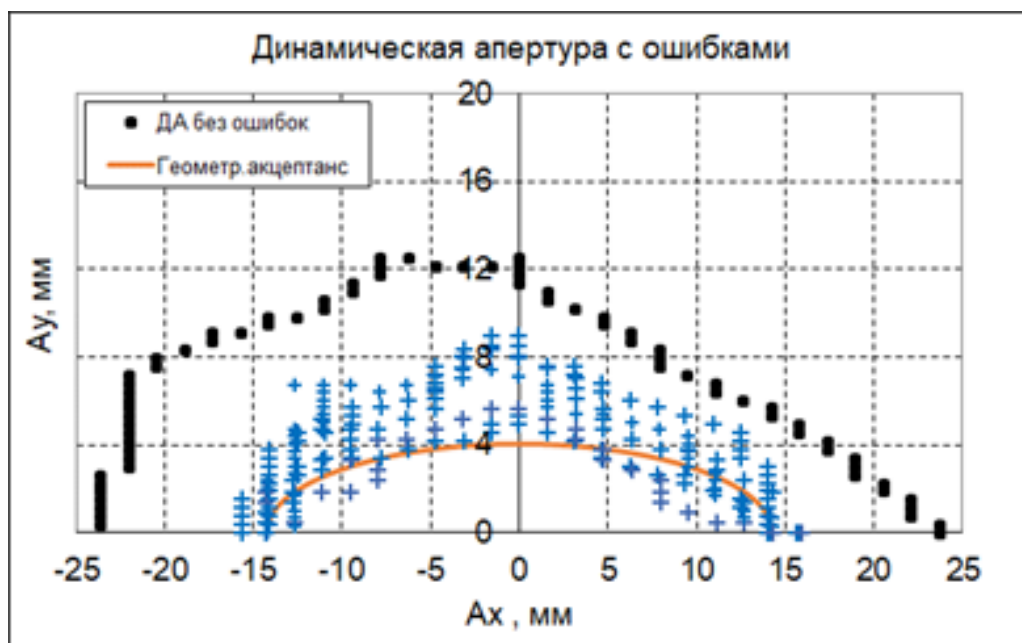


Рис.1.7. Уменьшение динамической апертуры из-за влияния мультипольных ошибок поля, ошибок позиционирования магнитных элементов, ошибок интеграла поля, градиента и секступольной составляющей согласно Таблице 1.2.

В Таблице 1.3 показаны значения допустимых относительных мультипольных ошибок, полученных с помощью численного моделирования, описанного выше. Ошибки приведены, как это изложено в Приложении А (см.формулу (А.9)), в виде поля соответствующего мультиполя на радиусе $R_0 = x_0 = 20$ мм, нормированного на расчетное поле магнита (в медианной плоскости). Для отдельно стоящих квадрупольных и секступольных линз такое поле вычислялось согласно $B_y = G_0 x$ и $B_y = (S_0/2)x_0^2$ соответственно. Для дипольных магнитов

$$B_y = B_{y0} + G_0 x_0 + \frac{1}{2} S_0 x_0^2. \quad (1.9)$$

Результаты в Таблице 1.3 даны в единицах $1 \text{ unit} = 10^{-4}$.

Согласно расчетам, наиболее жесткие требования на амплитуду гармоник предъявляются к дипольным магнитам, что еще раз подчеркивает их преобладающее значение в формировании оптики синхротрона и важность

достижения необходимой точности при их проектировании, изготовлении и пространственной выставки.

Таблица 1.3: Допуски на величину мультипольных компонент b_n .

n	Диполь	Квадруполь	Секступоль
0	10000	-	-
1	-	10000	-
2	-	-	10000
3	0.14	2.3	1.4
4	0.57	3.6	3.4
5	0.29	3.6	2.8
6	0.57	9.1	5.7
7	1.1	4.3	11
8	2.3	5.1	14
9	2.8	1.4	27
Σ	7.8	42	65

Суммарная неоднородность поля магнита (от энергии инжекции до энергии выпуска!) в горизонтальной области ± 20 мм от оси пучка составляет, согласно Таблице 1.3

$$\frac{\Delta B(x=20 \text{ мм})}{B_0(x=20 \text{ мм})} \leq \pm 1 \cdot 10^{-3}. \quad (1.10)$$

1.3. Коррекция бетатронных частот

Интегрирование квадрупольной и секступольной составляющих в дипольные магниты обеспечивают компактность бустерного кольца и малый эмиттанс пучка. Однако из-за индивидуальных особенностей магнитов и слегка отличающегося насыщения ярма во время подъема энергии может происходить нарушение расчетного соотношения между величиной ведущего поля и его градиентом для разных магнитов. Это приводит к динамическому изменению

бетатронных частот при ускорении пучка и может приводить к гибели частиц, если частоты примут резонансные значения. Для динамической подстройки бетатронных частот во время линейного изменения энергии используются три пары отдельно стоящих квадрупольных линз расположенных около каждого прямолинейного промежутка кольца (с каждого края суперпериода, Рис.1.2), объединенные по питанию в три семейства.

Для коррекции отклонения бетатронных частот $(\Delta\nu_x, \Delta\nu_y)$ достаточно двух семейств квадрупольных линз QF и QD . Соответствующее преобразование частот задается расчетной матрицей, полученной из оптической модели кольца,

$$\begin{pmatrix} \Delta G/G_{QD} \\ \Delta G/G_{QF} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3137 & 0.2956 \\ 0.3426 & 0.0533 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta\nu_x \\ \Delta\nu_y \end{pmatrix}. \quad (1.11)$$

Третье семейство квадрупольных линз QG используется для коррекции горизонтального акцептанса,

$$\begin{pmatrix} \Delta G/G_{QD} \\ \Delta G/G_{QF} \\ \Delta G/G_{QG} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.2744 & 0.0420 & 0.0109 \\ 0.3172 & 0.4240 & 4.69 \cdot 10^{-4} \\ -0.6381 & -0.2752 & 0.0118 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\nu_x \\ \Delta\nu_y \\ \Delta A_x \end{pmatrix}, \quad (1.12)$$

или для коррекции соотношения между вертикальным и горизонтальным акцептансами:

$$\begin{pmatrix} \Delta G/G_{QD} \\ \Delta G/G_{QF} \\ \Delta G/G_{QG} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.3452 & -0.0716 & -5.174 \\ 0.3142 & 0.0375 & -0.2232 \\ -0.7149 & -0.3985 & -5.6140 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\nu_x \\ \Delta\nu_y \\ \frac{\Delta A_y}{\Delta A_x} \end{pmatrix}. \quad (1.13)$$

1.4. Коррекция хроматизма

Натуральный хроматизм бетатронных частот кольца составляет $\xi_{x0} = -9.5$ и $\xi_{y0} = -13.5$. Для его компенсации, как уже говорилось, в дипольные магниты введена секступольная компонента поля, которая корректирует хроматизм кольца до значений $\xi_x = +1.25$ и $\xi_y = +2.05$.

Для возможности настройки хроматизма бетатронных частот (например, при ускорении из-за возможной разбалансировки полей индивидуальных магнитов) в синхротроне предусмотрены два семейства отдельно стоящих секступольных корректоров SF и SD . Изменение хроматизма секступольными линзами имеет вид

$$\Delta\xi_{x,y} = \pm \frac{1}{4\pi} \oint K_2(s) \beta_{x,y}(s) \eta_x(s) ds, \quad (1.14)$$

где $K_2(s) = B''(s)/B\rho$ – приведенная сила секступольной линзы, $\beta_{x,y}(s)$ и $\eta_x(s)$ – бетатронные и дисперсионные функции. Величину $\beta_{x,y}(s)\eta_x(s)$ можно считать мерой эффективности секступольной коррекции хроматизма частот: чем это произведение больше, тем меньшие силы секступольных линз нужны.

Произведение $\beta_{x,y}(s)\eta_x(s)$ для одного квадранта синхротрона показано на Рис.1.8. Для постановки секступольных корректоров выбраны азимуты с высокой эффективностью.

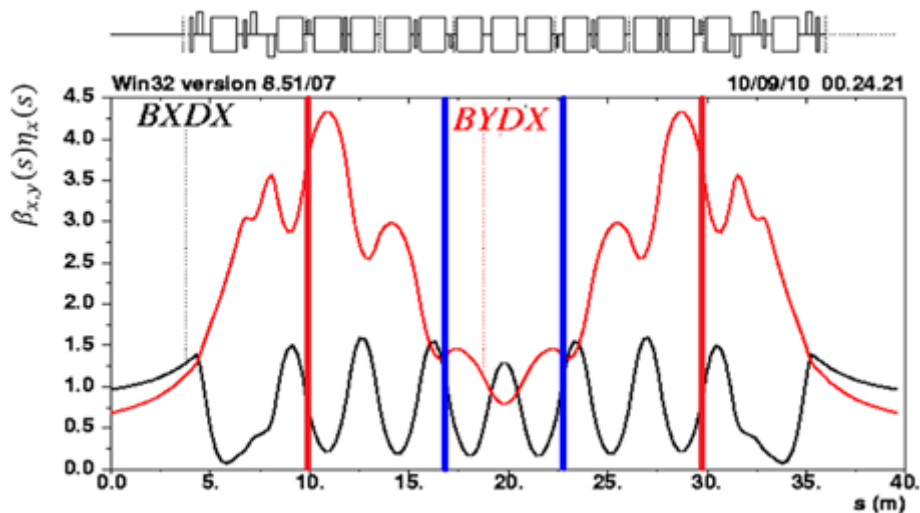


Рис.1.8. Величина $\beta_{x,y}(s)\eta_x(s)$, показывающая эффективность коррекции секступольными линзами хроматизма бетатронных частот. Размещение секступольных линз показано вертикальными линиями.

Всего в структуре синхротрона имеется по восемь фокусирующих SF и дефокусирующих SD секстопольных корректоров. Диапазон доступной коррекции хроматизма этими секступольными линзами показан на Рис.1.9.

Здесь же показана область изменения значений хроматизма (ромб вокруг рабочей точки), из-за возможных ошибок секступольной составляющей дипольных магнитов с относительной величиной $\Delta B''/B'' \leq \pm 3\%$. Видно, что доступный диапазон регулировки хроматичности секступольными корректорами существенно превосходит область возможной ошибки.

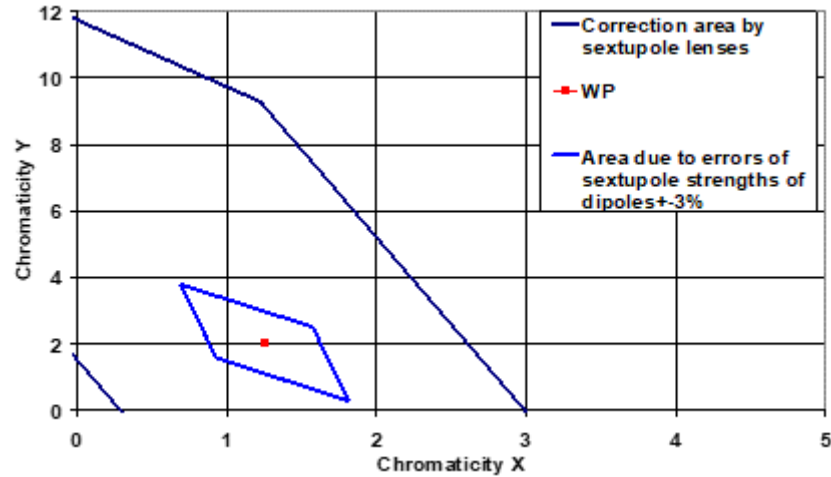


Рис.1.9. Диапазон изменения хроматизма бетатронных частот секступольными корректорами. Также показана область хроматизма из-за ошибок секступольной компоненты в дипольных магнитах (ромб вокруг рабочих значений хроматизма).

Аналогично вариации бетатронных частот во время ускорения, обсуждавшейся выше, неоднородность насыщения ярма поворотных магнитов приводит и к малому изменению хроматизма частот $(\Delta\xi_x, \Delta\xi_y)$. Это смещение так же корректируется динамическим изменением тока линз SF и SD во время подъема поля согласно зависимости, найденной расчетным путем:

$$\begin{pmatrix} \Delta K_{2SD} \\ \Delta K_{2SF} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 29.59 & 5.64 \\ -11.18 & -5.56 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta\xi_x \\ \Delta\xi_y \end{pmatrix}. \quad (1.15)$$

1.5. Влияние вихревых токов в вакуумной камере

Во время ускорения пучка в синхротроне поле поворотных магнитов меняется во времени и в вакуумной камере, сделанной из материала с конечной

проводимостью (нержавеющая сталь), наводятся вихревые (индукционные) токи (Рис.1.10), которые, в свою очередь, являются источниками магнитного поля, искажающего поле магнита без вакуумной камеры.

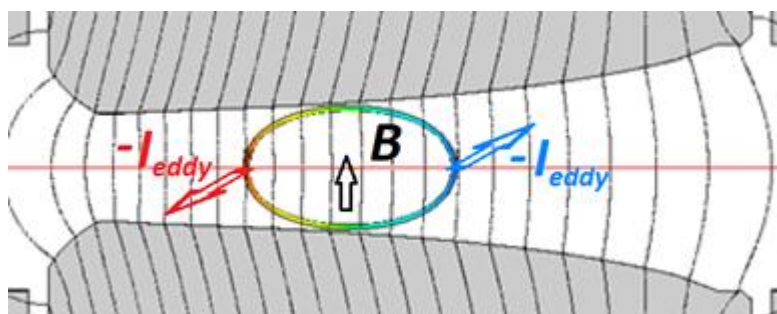


Рис.1.10. Направление и плотность (показана цветом) вихревых токов в вакуумной камере диполя BD (схематично).

График относительного изменения тока питания поворотных магнитов синхротрона во время ускорения пучка в синхротроне NSLS II показан на Рис.1.11. Выпуск частиц в основное кольцо происходит в максимуме распределения.

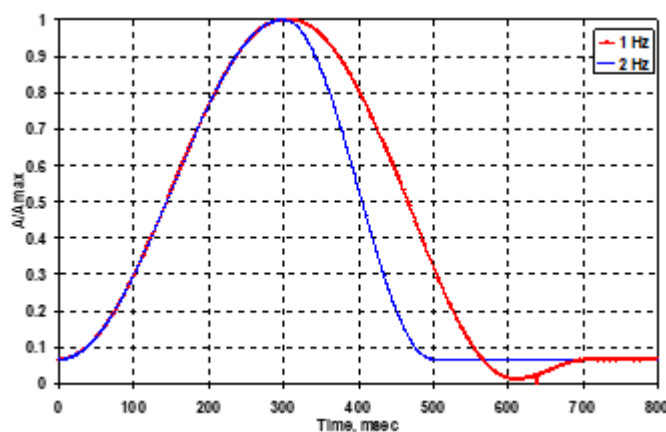


Рис.1.11. Циклы ускорения частиц в бустере. Красная кривая соответствует частоте инъекции 1 Гц, синяя – 2 Гц.

Если вакуумная камера симметрична относительно осей x и y , что имеет место в нашем случае, а полюса магнита плоскопараллельны, то в медианной плоскости поле, вызванное вихревыми токами вертикально, и первые два члена

его мультипольного разложения – это дипольная и секступольная компоненты [19], [29], [30]

$$B_{ey}(x, 0) = \mu_0 \sigma \frac{dB_{0y}}{dt} (f_0 + f_2 \cdot x^2), \quad (1.16)$$

где B_{0y} – поле магнита без камеры, σ – проводимость материала камеры, а факторы $f_{0,2}$ учитывают форму, размеры и толщину стенок вакуумной камеры, и для прямоугольной и эллиптической форм аналитически найдены в [29].

Наведенные в вакуумной камере синхротрона-бустера NSLS II токи моделировались с помощью компьютерного кода ANSYS [24] для вакуумной камеры дипольного магнита изготовленной из нержавеющей стали с толщиной стенки 1 мм и поперечным сечением 41×24 мм². Удельное сопротивление стали принималось $72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. На Рис.1.12 показано относительное отклонение магнитных мультиполей от идеальных для магнитов BD и BF .

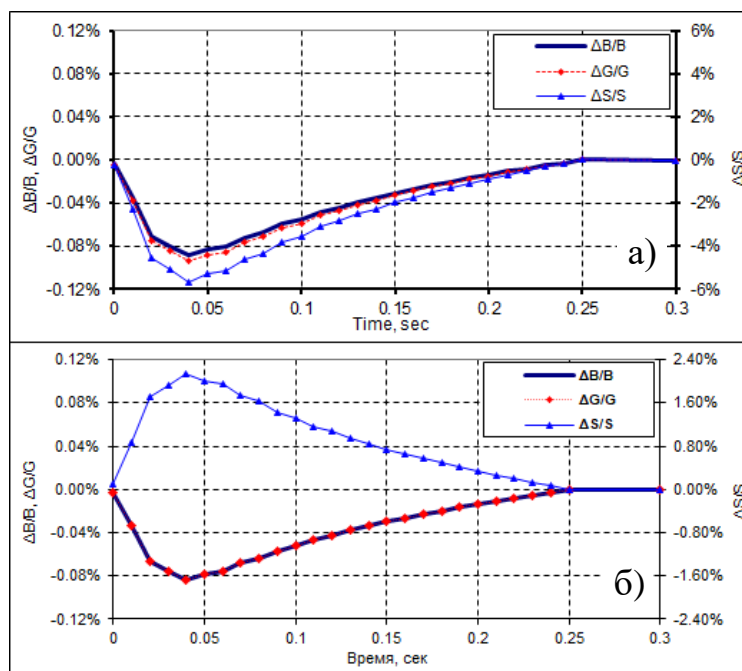


Рис.1.12. Относительное изменение компонент магнитного поля из-за вихревых токов в вакуумной камере магнитов BD (а) и BF (б).

Вихревые токи в стенках камеры приводят к примерно одинаковому относительному отклонению магнитного поля и градиента $\Delta B/B_e \approx \Delta G/G_e \approx -1 \cdot 10^{-3}$,

которое может быть скорректировано простым изменением тока питания магнита. После такой коррекции бетатронная рабочая точка соответствует проектному значению. Причиной появления градиента поля из-за вихревых токов является то, что полюса магнита не плоскопараллельны (см. Рис.1.10). Из-за этого симметрия распределения токов в камере относительно оси y нарушается.

Вихревой ток в вакуумной камере индуцирует, также, существенную секступольную составляющую магнитного поля, положительную для обоих типов магнитов (Рис.1.12). Поскольку для магнита BD поле для энергии 3 ГэВ в два с лишним раза выше, чем для BF , скорость изменения поля будет, также, выше, что, согласно (1.16), приведет к большему изменению секступольной составляющей: $(\Delta S/S_e)_{BD} \approx -5.6\%$ против $(\Delta B/B_e)_{BF} \approx +2.1\%$. Такое отклонение секступольной компоненты приводит к появлению отрицательного хроматизма во время цикла ускорения частиц, что, в свою очередь, может привести к head-tail-неустойчивости.

Отдельно изучался вопрос заземления вакуумной камеры синхротрона с обеих сторон поворотного магнита по требованию заказчика. Из-за нарушения симметрии распределения токов в камере относительно оси y (о чем уже говорилось выше), полный ток через камеру не равен нулю, его величина и распределение по поперечному сечению камеры зависят от уровня поля, геометрии камеры и т.д. График тока через заземляющие проводники для разных магнитов, как функция времени в течении цикла ускорения (Рис.1.11), показан на Рис.1.13.

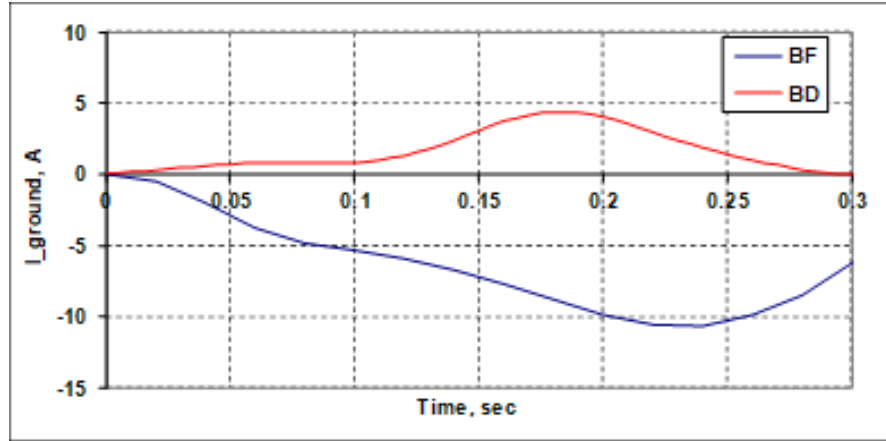


Рис.1.13. Ток, текущий через проводник, заземляющий вакуумную камеру диполей BF и BD .

Ток, протекающий через вакуумную камеру, производит дополнительный градиент $\Delta G/G_g$ и секступольную компоненту поля $\Delta S/S_g$, и вносит небольшой вклад в дипольную составляющую поля $\Delta B/B_g$. Зависимость этих мультипольных компонент от времени подъема поля показана на Рис.1.14.

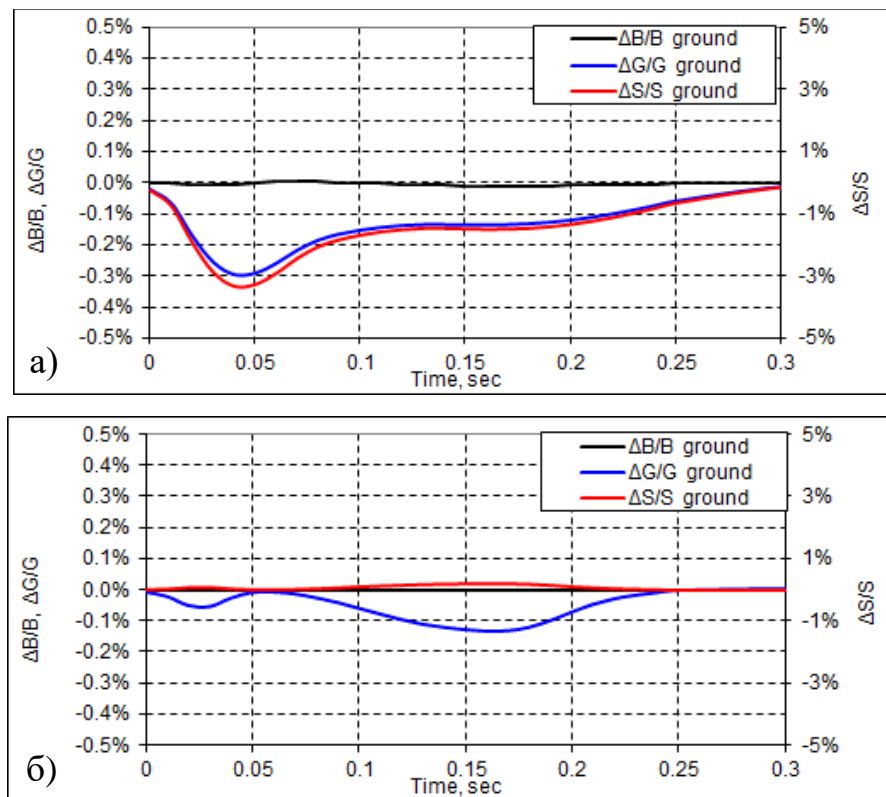


Рис.1.14. Изменение поля, градиента и секступольной составляющей от времени из-за заземления вакуумной камеры для магнитов BF (а) и BD (б).

Суммарный эффект от токов индукции и заземления приводит во время ускорения пучка в синхротроне к большим динамическим изменениям бетатронной частоты ($\Delta\nu_y > 0.1$) и хроматизма частот, что показано на Рис.1.15. Пересечение вертикальной бетатронной частотой значения полуполого резонанса, а также отрицательное значение хроматизма во времени подъема поля приведет к гибели пучка. Для компенсации этих эффектов используются квадрупольные QD , QF , QG и секступольные SF и SD линзы.

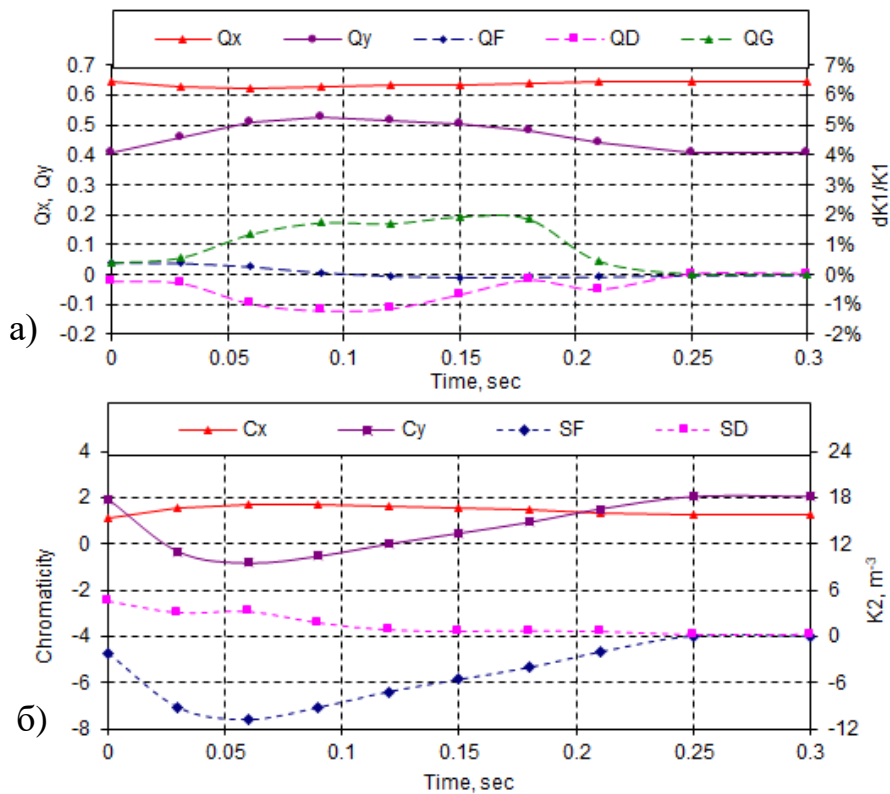


Рис.1.15. Изменение бетатронных частот (а) и хроматизма (б) из-за влияния токов, текущих в вакуумной камере поворотных магнитов во время ускорения. Здесь же показаны графики относительного изменения значений линз QD , QF , QG и SF , SD , необходимых для коррекции.

Относительное изменение градиентов этих линз, требуемое для коррекции описанных выше явлений, показано на Рис.1.15.

Глава 2. Магниты с совмещенными функциями

2.1. Параметры дипольных магнитов

Поворотные магниты с совмещенными функциями синхротрона-бустера NSLS II содержат, помимо дипольной составляющей, квадрупольную и секступольную. Динамика пучка требует высокого качества интегрального магнитного поля $\Delta B/B_0 \leq \pm 1 \cdot 10^{-3}$ в горизонтальной области $\Delta x = \pm 2$ см при работе бустера в области энергий от 0.2 ГэВ до 3 ГэВ. Магниты набираются из штампованных с высокой точностью пластин электротехнической стали Н-образной формы. Радиус кривизны магнита BD 8.8 м и BF – 21.7 м. Параметры магнитов представлены в Таблица 2.1.

Таблица 2.1: 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 ⁻²	-0.555 м ⁻²
Секступ. компонента K_2	3.6 м ⁻³	-4.3 м ⁻³
Область хорошего поля ($y \times x$)	±12 × ±20 мм ²	
Качество поля $\Delta B/B_0$	± 1·10 ⁻³	

Форма полюса дипольных магнитов была оптимизирована с помощью детального моделирования карты магнитных поля на разных токах возбуждения. Для моделирования использовались программы расчета магнитных полей на основе метода конечных элементов ANSYS [24] и Mermaid [25]. Способы коррекции профиля пластин и торцевых фасок, для получения требуемого качества интеграла поля, были разработаны автором при создании поворотных магнитов для накопителя SAGA (Япония) [31] и MLS (Германия) [32]. Дипольные магниты с параллельными краями имеют сагитту 8.838 мм (BF) и 23.788 мм (BD). Изогнутая форма сердечников позволила, по сравнению с альтернативным прямым магнитом, сэкономить на ширине полюса диполей и, соответственно на весе и цене.

Сердечник магнитов изготавливается из шихтованной стали M1200-100A с клеевым покрытием Стаболит-70 [33]. Сердечники склеивались (спекались) из набора идентичных пластин толщиной 1 мм. Пластины сердечника изготавливались штамповкой, что обеспечивало высокую точность и повторяемость профиля полюса.

Для коррекции интегрального значения поля в зависимости от поперечных координат (учет как влияния собственного краевого поля, так и ошибок поля внутри магнита) используются торцевые фаски. Фаски имеют сложную форму и выполнены под углом к медианной плоскости для BF магнита – 30° и для BD – 45° . Форма фаски обеспечивает регулировку одновременно магнитной длины диполя и мультипольных компонент поля. В процессе производства форма фасок уточнялась исходя из результатов магнитных измерений. Для этого первым шагом изготавливалась предварительная фаска, обеспечивающая магнитную длину поля слегка больше требуемой. После магнитных измерений и сравнения результатов с моделированием форма фаски корректировалась.

Технические параметры дипольных магнитов синхротрона-бустера NSLS II приведены в Таблице 2.2.

Таблица 2.2: Технические параметры дипольных магнитов.

Диполь		<i>BF</i>			<i>BD</i>		
Тип		Ш-образный			Ш-образный		
Число магнитов		28			32		
Угол поворота		3.26732°			8.3911°		
Радиус поворота	м	21.74467			8.87661		
Эффективная	м	1.24			1.30		
Поле на выпуске	Т	0.46021			1.12734		
Поле на инъекции	Т	0.03068			0.07516		
Зазор	мм	28			26		
Пиковый ток	А	861.66			741.65		
Число катушек		2			2		
Витков на катушку		6			16		
Размер шинки	мм ²	16.5 × 12.5			12 × 12		
Канал охлаждения	мм	7.35			8		
Сопротивление/диполь	мΩ	3.8			19.5		
Полная индуктивность	мГн	1.1			9.58		
Режим работы	Гц	1	2	Max	1	2	Max
P_{aver} / P_{max}		0.367	0.393	1	0.367	0.393	1
Ср. мощность/магнит	Вт	1033	1106	2835	3932	4212	1086
Число контуров		1			2		
Перепад давл./диполь	бар	4			4		
Перепад температуры	°С	2.3	2.5	6.4	4.4	4.7	12
Расход воды на диполь	л/мин	6.5			13		
Вес магнита	тонн	0.75			1.2		

2.2. Двумерное моделирование поля

Учитывая, что в большинстве случаев длина магнитных элементов в ускорителе меньше длины волны бетатронных колебаний, движение частиц

определяется интегральными характеристиками поля магнитов. Однако согласно (А.12) из Приложения А, интегральное качество магнитного поля зависит, прежде всего, от качества поля (двумерного) в каждом сечении магнита. Поэтому в качестве первого шага оптимизация поля магнита осуществляется для двумерной модели.

Основные задачи двумерного моделирования поля – это создание «правильного» профиля полюса магнита, обеспечивающего требуемую однородность поля в заданной области во всем диапазоне энергии пучка, и оценка необходимой точности изготовления профиля полюса для формирования требований на точность штамповки пластин и сборки сердечника.

Оптимизация профиля полюса для дипольных магнитов BD и BF проводилась для значения поля, соответствующего энергии выпуска частиц из бустера в накопительное кольцо NSLS-II 3 ГэВ ($B_{BD} = 1.127$ Т, $B_{BF} = 0.460$ Т). При таком поле мало влияние остаточного намагничивания сердечника, можно обеспечить высокую точность измерения поля и, тем самым, точность сравнения моделирования и эксперимента. На следующем этапе распределение поля оптимизировалось при постепенном понижении энергии до уровня инжекции 200 МэВ (магнитное поле $B_{BD} = 0.075$ Т, $B_{BF} = 0.031$ Т).

Кривая намагничивания электротехнической стали (магнитная проницаемость, как функция уровня поля) М1200-100А взята из сопроводительной документации производителя материала, и показана на Рис.2.1. Известно, что магнитная проницаемость для листовой холоднокатаной стали в направлении проката и поперек проката отличаются. Ядро магнита BD работает в области достаточно больших полей и направление проката необходимо учитывать. Вдоль направления проката магнитная проницаемость выше в сравнении с поперечным направлением. При штамповке пластины полюса размещались вдоль направления проката, чтобы уменьшить их

насыщение и, соответственно, обеспечить хорошее качество поля в более широкой области по энергии.

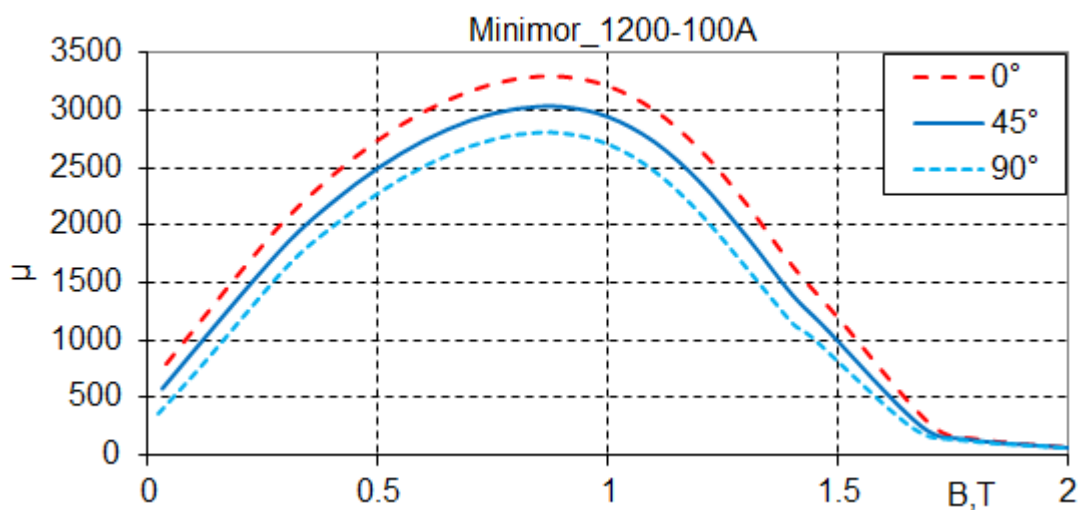


Рис.2.1. Магнитная проницаемость M1200-100A в зависимости от величины магнитного поля для различных направлений проката.

При моделировании поперечное сечение магнита (пластины) разбивалось на участки, как это показано на Рис.2.2, для которых использовалась одна из кривых Рис.2.1. Так, участок 1 на Рис.2.2 соответствует случаю наилучшей магнитной проницаемости (кривая, обозначенная « 0° » на Рис.2.1). Соответственно, магнитная характеристика материала участка 3 описывается кривой « 90° » на Рис.2.1.

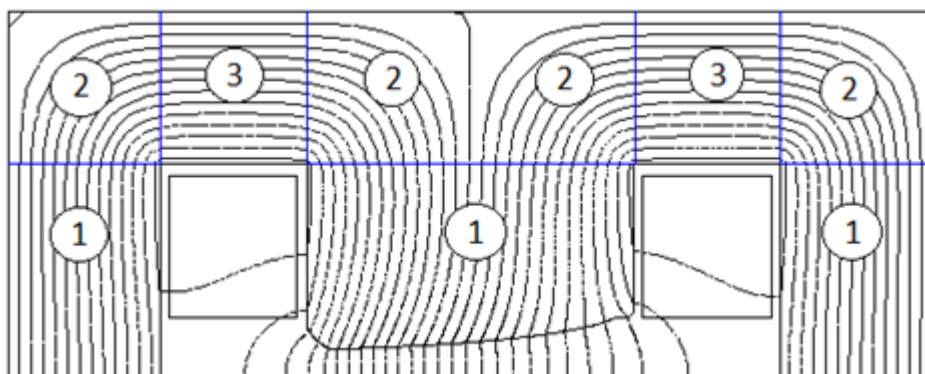


Рис.2.2. Разбиение на участки пластины магнита BD при моделирование магнитных полей: 1 – магнитный поток параллелен прокату, 2 – под углом 45° , 3 – поперек проката.

При моделировании профиль полюса и размеры сердечника были оптимизированы так, чтобы обеспечить требуемую однородность поля в зазоре во всем диапазоне рабочих токов возбуждения и минимизировать поперечные габариты сердечников. Так же было выполнено требование на максимальную плотность тока в катушке не более 8 А/мм^2 и перепад температуры на контуре охлаждения катушки не более 5°С . Эти требования ограничивают минимальное сечение катушки возбуждения.

В пределе слабого насыщения ярма магнита $\mu \rightarrow \infty$, требуемые ампер-витки можно оценить как

$$Iw = \oint \vec{H} d\vec{l} \approx \int_{gap} \vec{H} d\vec{l} \approx \frac{h}{\mu_0} \left(B_{y0} - \frac{1}{6} Sh^2 \right), \quad (2.1)$$

где h – межполюсной зазор магнита на равновесной орбите. Интересно отметить, что градиент поля не вошел в определение ампер-витков. Результаты расчета: $(Iw)_{BD} = 23.5 \text{ кА-витка}$ и $(Iw)_{BF} = 10.1 \text{ кА-витка}$. С учетом градиента и секступольной компоненты максимальное поле в зазоре диполей (в области минимума) достигает значения $B_{yBD} \approx 1.3 \text{ Т}$ и $B_{yBF} \approx 0.6 \text{ Т}$, и, как это видно из Рис.2.3, ярмо магнита BD достаточно сильно насыщено.

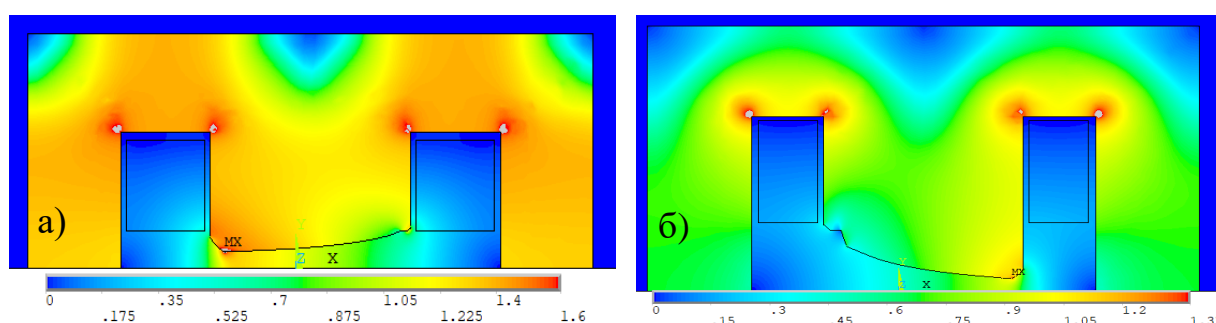


Рис.2.3. Распределение магнитного поля в магнитопроводе магнитов BD (а) и BF (б). Красный цвет соответствует большему насыщению.

Используя выражение для скалярного потенциала можно получить уравнение для кривой, определяющей форму полюса (2.2):

$$x = f_1 - \frac{1}{2}\sqrt{y^2 + f_2 y^{-1} + f_3}, \quad (2.2)$$

где

$$f_1 = \frac{G}{S} \sqrt{1 - \frac{2SB_{y0}}{G^2}}, \quad f_2 = h \left(h^2 - \frac{6B_{y0}}{S} \right), \quad f_3 = 3 \left(\frac{G^2 - 2B_{y0}S}{S^2} \right),$$

где h – половина межполюсного зазора на орбите пучка, остальные обозначения объяснены выше.

Из-за насыщения железа и конечной ширины полюса идеальное распределение поля, определяемое (2.2), нарушается, и требуется коррекция, обеспечивающая заданный градиент и секступольную компоненту при требуемой амплитуде поля. Кроме того, по технологическим соображениям по краям профиля полюса вводятся базовые площадки длиной 5 мм (т.н. «шимы»), параллельные медианной плоскости, для контроля межполюсного зазора, для точного (± 15 мкм) позиционирования сердечника в кассете для запекания и измерительной системы в зазоре магнита и т.п. Отклонение полюса от «идеального» значения в районе орбиты составляет не более 30 мкм.

Коррекция влияния этих действий на качество поля оказывается возможна с помощью уравнения (2.2) путем введения поправок к значениям, приведенным в Таблице 2.3 (индекс «0» показывает проектные значения).

Таблица 2.3: Поправки к (2.2) для обеспечения требуемого качества поля.

Поправка	BD	BF
$\frac{\Delta G}{G_0} = \frac{G_0 - G}{G_0}$	0.4%	-0.1%
$\frac{\Delta S}{S_0} = \frac{S_0 - S}{S_0}$	2.3%	0.2%

Профиль полюса дипольных магнитов, приведенный на Рис.2.4 после коррекции обеспечивает качество поля (см. Рис.2.7, Рис.2.8) в центральном сечении $\Delta B/B_0 \leq \pm 5 \cdot 10^{-4}$ в горизонтальной области ± 20 мм относительно равновесной орбиты.

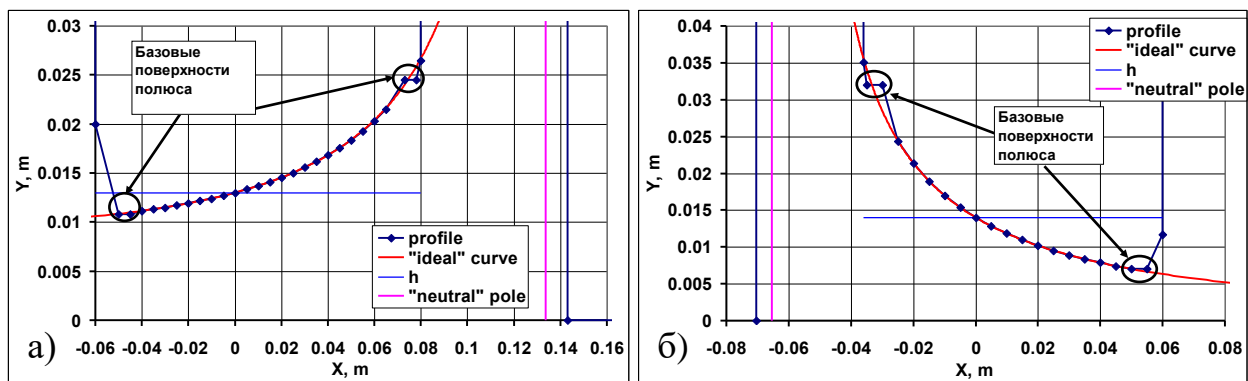


Рис.2.4. Профиль полюса дипольных магнитов: *BD* (а) и *BF* (б).

Базовые поверхности профиля (на Рис.2.5 выделены красной линией) должны обеспечивать высокую точность позиционирования профиля полюса и положения геодезических знаков относительно медианной плоскости магнита.

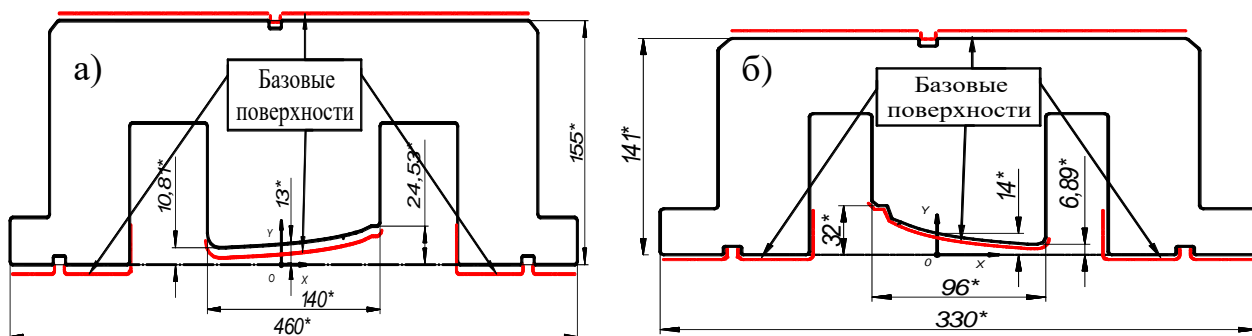


Рис.2.5. Профиль пластин дипольных магнитов *BD* (а) и *BF* (б).

Хорошее качество поля необходимо обеспечить в широком диапазоне энергий синхротрона 0.2÷3 ГэВ. При этом необходимо учитывать особенности насыщения стали, из которой изготавливаются пластины сердечника. График нелинейной зависимости поля от тока возбуждения показан на Рис.2.6. Для малых полей магнитное сопротивление стали ярма высоко и нелинейность $\approx -1.2\%$ как для *BF*, так и для *BD*. При высоких полях ярмо *BD* насыщается, что

приводит к нелинейности $\approx -0.6\%$. Эта нелинейность должна учитываться при задании тока во время ускорения, поскольку согласно Таблице 1.2 при рассогласовании полей магнитов на $\approx 0.6\%$ искажение замкнутой орбиты достигает 12 мм и пучок может погибнуть при соприкосновении со стенками вакуумной камеры.

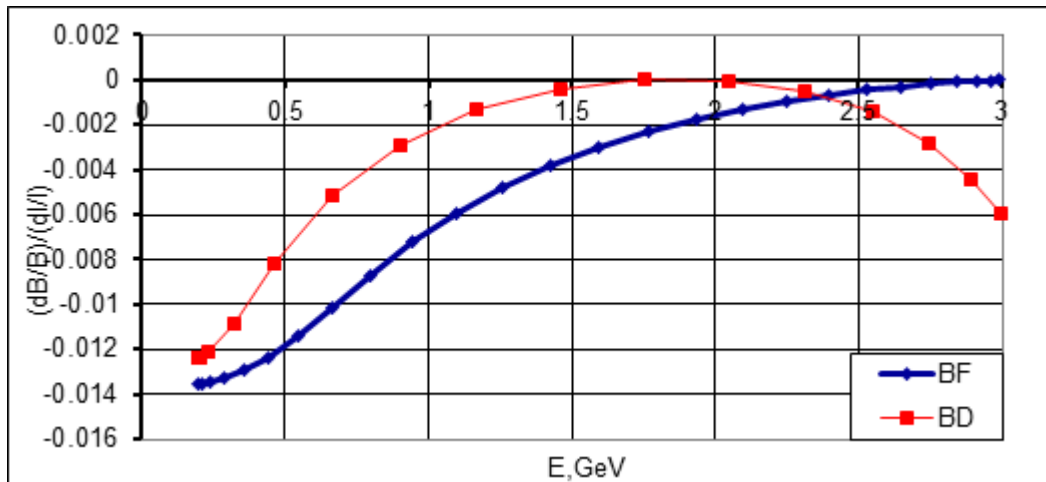


Рис.2.6. Нелинейность поля от тока для диполей *BF* и *BD*.

Область хорошего поля $\Delta B/B = \pm 5 \cdot 10^{-4}$, показанная на Рис.2.7, превышает размер вакуумной камеры. Это должно обеспечить эффективную инжекцию пучка в режиме накопления. Качество поля при разных уровнях энергии бустера в области ± 20 мм показано на Рис.2.8. Согласно результатам моделирования динамической апертуры, представленными в Главе 1 неоднородность поля во всем диапазоне энергии удовлетворяет требованиям на апертуру.

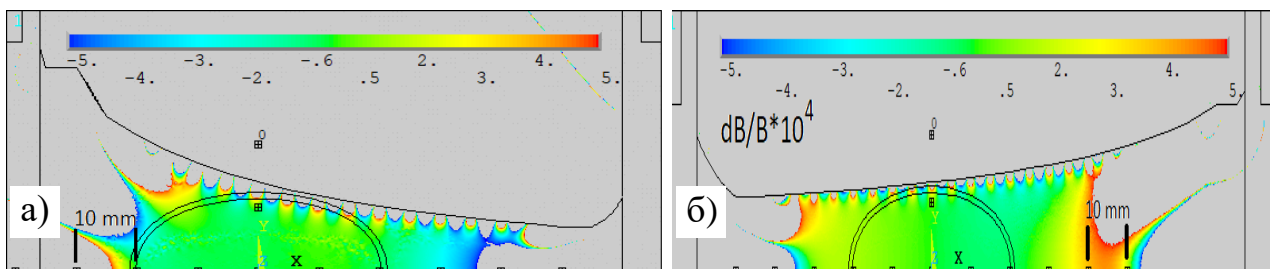


Рис.2.7. Расчетные неоднородности поля при 3 ГэВ для *BF* (а) и *BD* (б).

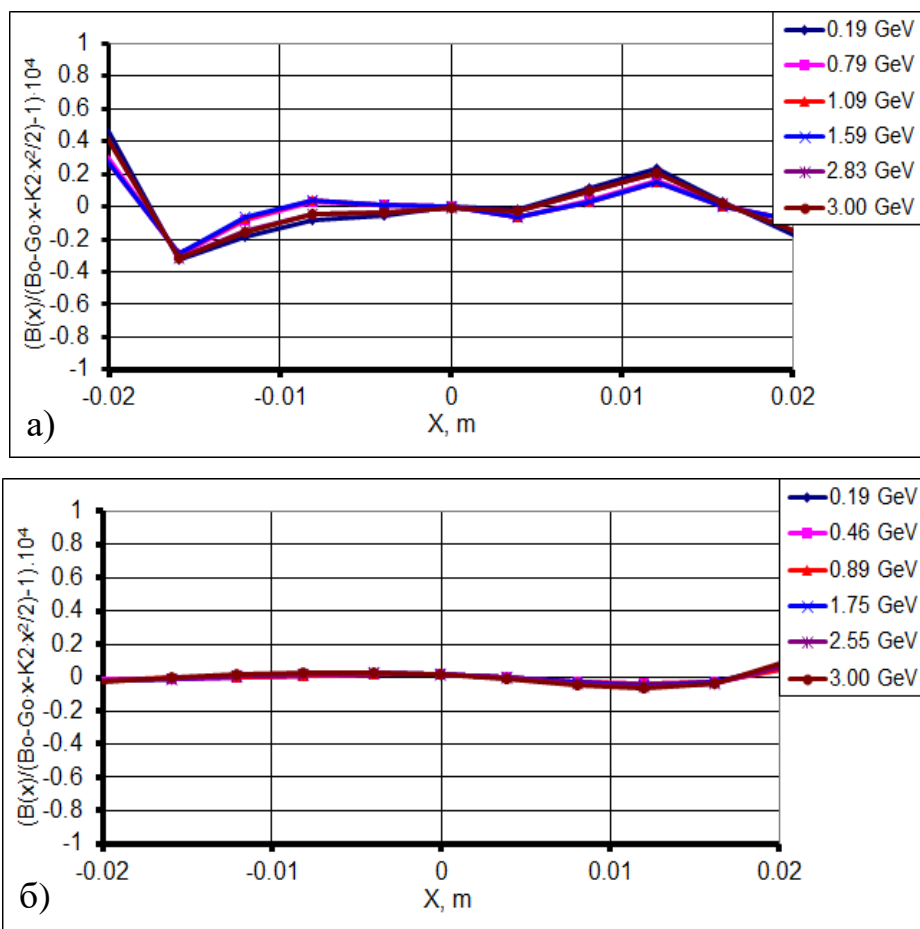


Рис.2.8. Относительное отклонение поля в центральном сечении для BF (а) и BD (б) диполей.

При изменении магнитного поля во время ускорения происходит нарушение пропорции между компонентами поля, как это показано на Рис.2.9. При этом максимальная ошибка градиента $\approx 0.36\%$ (BD) и -0.17% (BF). Согласно Таблице 1.2, максимальный сдвиг вертикальной бетатронной частоты составляет $\Delta\nu_y \leq 0.02$, что позволяет ускорять частицы без пересечения полуцелого резонанса, и дополнительной коррекции бетатронной рабочей точки отдельно стоящими квадрупольными линзами не требуется.

Максимальная ошибка секступольной компоненты при ускорении не превышает 2% . Согласно Таблице 1.2, изменение хроматизма при этом от проектного $\Delta\xi_x < 0.1, \Delta\xi_y < 0.2$. Коррекция таких значений не требуется.

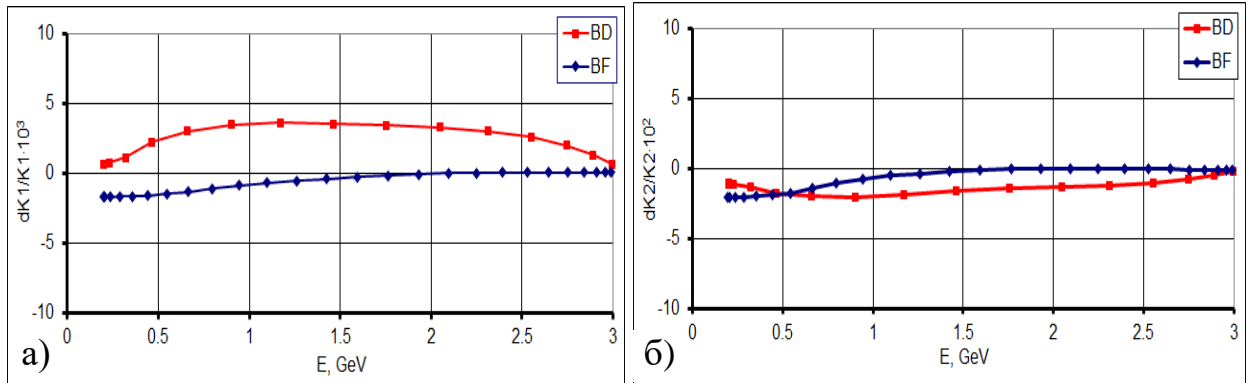


Рис.2.9. Изменение градиента (а) и секступольной компоненты (б) магнитного поля дипольных магнитов BF и BD в зависимости от энергии.

2.3. Изменение межполюсного зазора из-за магнитного поля

Одним из требований предъявляемым к дипольным магнитам является сохранение межполюсного зазора при ускорении с точностью $<15 \mu\text{м}$. При увеличении тока в возбуждающих катушках поле на равновесной орбите частиц увеличивается до 0.46 Т для BF диполя и до 1.1 Т для BD диполя. При этом возникает сила, направленная на уменьшение межполюсного зазора. Величину силы, действующую на полюса, можно записать в следующем виде:

$$F = \int P ds = \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 ds \approx L_{eff} \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 dx, \quad (2.3)$$

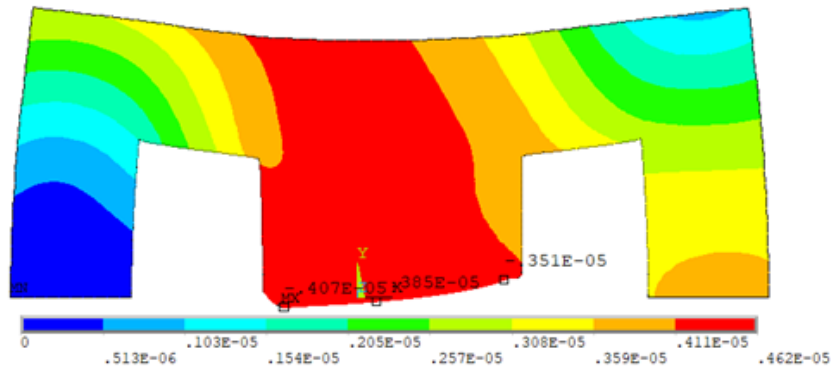
где P – давление магнитного поля на поверхность полюса; L_{eff} – эффективная продольная длина области поля в межполюсном зазоре; B – индукция магнитного поля на поверхности полюса. Сделано предположение, что в продольном направлении поле однородно, и интегрирование по поверхности заменено на интегрирование по горизонтальной координате.

Силы F , притягивающие полюса, согласно (2.3), прогиб полюсов Δh , изменение поля, градиента и секступольной компоненты, вызванные нарушением геометрии магнита, приведены в Таблице 2.4. Для стали М1200-100А коэффициент упругости, согласно спецификации, был взят $E = 1.93 \cdot 10^{11}$ Па/м. Рис.2.10 показывает деформацию полюса.

Таблица 2.4: Влияние магнитных сил на параметры диполей.

Диполь	F (кН)	Δh ($\mu\text{м}$)	$\Delta B/B_0 \cdot 10^4$	$\Delta G/G_0 \cdot 10^4$	$\Delta S/S_0 \cdot 10^4$
BF	18.5	-2	-	0.7	7
BD	83.7	-8	3	3.7	-1.8

Изменения градиентной и секступольной компоненты поля согласно Таблице 1.2 приводят к незначительным изменениям бетатронных частот и хроматизма, не требующих коррекции.

Рис.2.10. Деформация пластины BD диполя (увеличение 4000 раз).

Однако, изменение поля в зазоре магнита BD (Рис.2.11,а) не является пренебрежимым и приводит к искажению замкнутой горизонтальной орбиты до 1 мм. После коррекции (Рис.2.11,б) однородность поля становится лучше, чем $4 \cdot 10^{-5}$ и не приводит к заметным изменениям бетатронной точки и к уменьшению динамической апертуры.

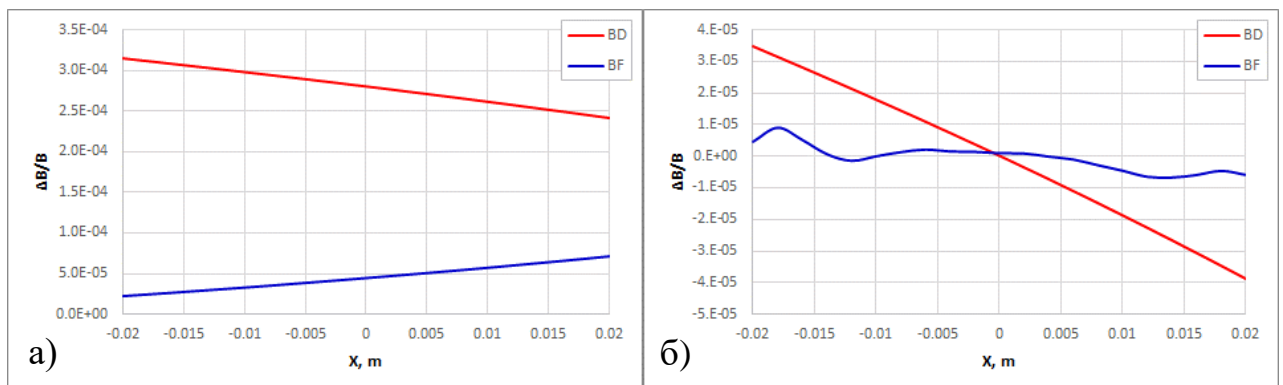


Рис.2.11. Изменение магнитного поля в зазоре диполей (а) и однородность поля из-за изменения зазора (б) под воздействием магнитных сил.

2.4. Ошибки штамповки пластин

Точность штамповки профиля полюсной части пластины и её базовых поверхностей определяется качеством изготовления штампа. На примере *BD* пластины мы рассмотрим некоторые наиболее часто возникающие ошибки, появляющиеся при сборке штампа (Рис.2.12):

- клиновидный перекося межполюсного зазора магнита (Рис.2.12,а);
- отклонение профилей полюсов в одну сторону (Рис.2.12,б).

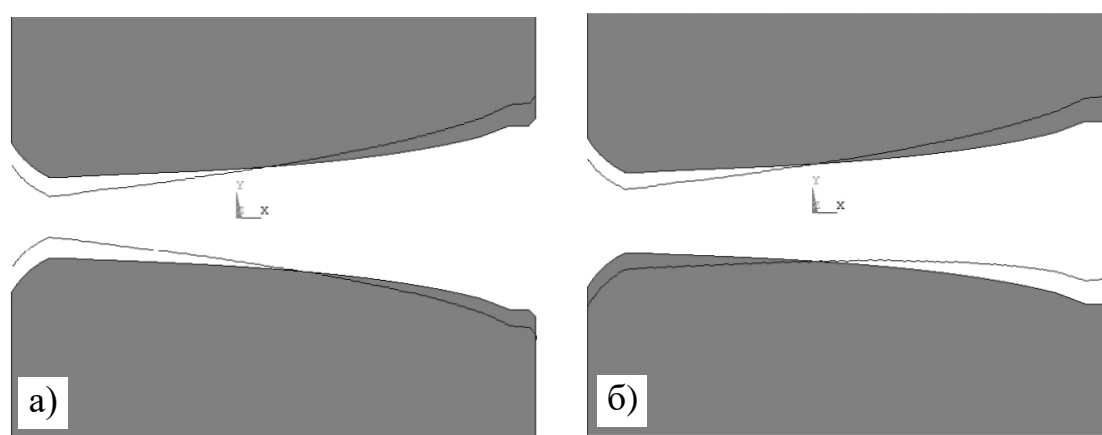


Рис.2.12. Схематичное изображение ошибок при штамповке полюсной части пластин диполей.

Для оценок было принято, что точность изготовления штампа (отклонение от идеального профиля) не хуже, чем $\pm 15 \mu\text{м}$.

Клиновидный перекося приводит к ошибке поля и градиента на орбите (проектный межполюсной зазор равен h_0) согласно

$$\frac{\Delta B(x)}{B_0} \approx \frac{2\Delta h}{h_0}, \quad \frac{\Delta G(x)}{G_0} \approx \frac{2\Delta h}{G_0 h_0} \left(\frac{B_0}{x} + \frac{1}{2} Sx \right), \quad (2.4)$$

где Δh – максимальная вариация межполюсного зазора в горизонтальной области $\pm x$. В нашем случае $\Delta h = 30 \mu\text{м}$, $x = \pm 6 \text{ см}$. Относительное изменение параметров магнита приведено в Таблице 2.5.

Таблица 2.5: Влияние клиновидного перекоса полюсов на параметры диполей.

Диполь	B_0 (Т)	S_0 (Т/м ²)	$\Delta B/B_0 \cdot 10^4$	$\Delta G/G_0 \cdot 10^4$	$\Delta S/S_0 \cdot 10^2$
<i>BF</i>	0.46	36	6.6	11	1.6
<i>BD</i>	1.1	-43	6.7	35	1

Результаты моделирования для клиновидного перекоса полюсов показаны на Рис.2.13.

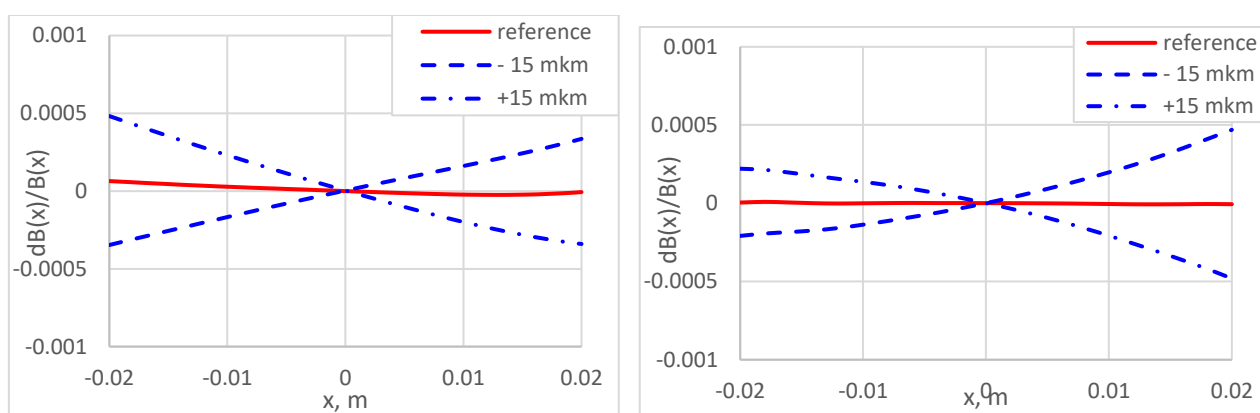


Рис.2.13. Относительное изменение поля для случая клиновидного перекоса.

Ошибки поля из Таблицы 2.5 и Рис.2.13 существенны и требуют коррекции индивидуальными квадрупольными и секступольными линзами. С этой оговоркой клиновидный перекося полюсов с допуском ± 15 μm допустим.

Случай, показанный на Рис.2.12,б равносителен повороту магнита вокруг продольной оси. Для характерных значений $\Delta h = 30$ μm и $x = \pm 6$ см этот угол равен ± 0.25 мрад. Согласно Таблице 1.2, такой угол создает линейную бетатронную связь колебаний на уровне $\approx 0.5\%$, что является приемлемым и не требует коррекции.

2.5. Компенсация влияния краевого поля

Для получения требуемого качества интеграла поля вдоль орбиты необходим учет краевых полей на торцах магнита. Это тем более важно для магнитов с комбинированными функциями, поскольку в этом случае конфигурация краевого поля сложнее, чем для случая плоскопараллельных полюсов.

Для учета краевых полей было проведено трехмерное моделирование поля с помощью универсальной программной системы конечно-элементного анализа ANSYS [24]. По результатам моделирования была определена конфигурация торцевых фасок, позволяющая выполнить предъявляемые к магнитам требования. Оптимизация фасок проводилась для поля, соответствующего энергии выпуска пучка, поскольку для таких значений можно получить хорошее совпадение расчета и измерений (влияние остаточных полей мало). Для минимизации высших компонент поля и, одновременно, подгонки эффективной магнитной длины к проектному значению, форма фаски получилась весьма сложной, как это показано на Рис.2.14. Фаска со сложным профилем выполнена под углом 45° к медианной плоскости для BD диполя и 30° для BF диполя.

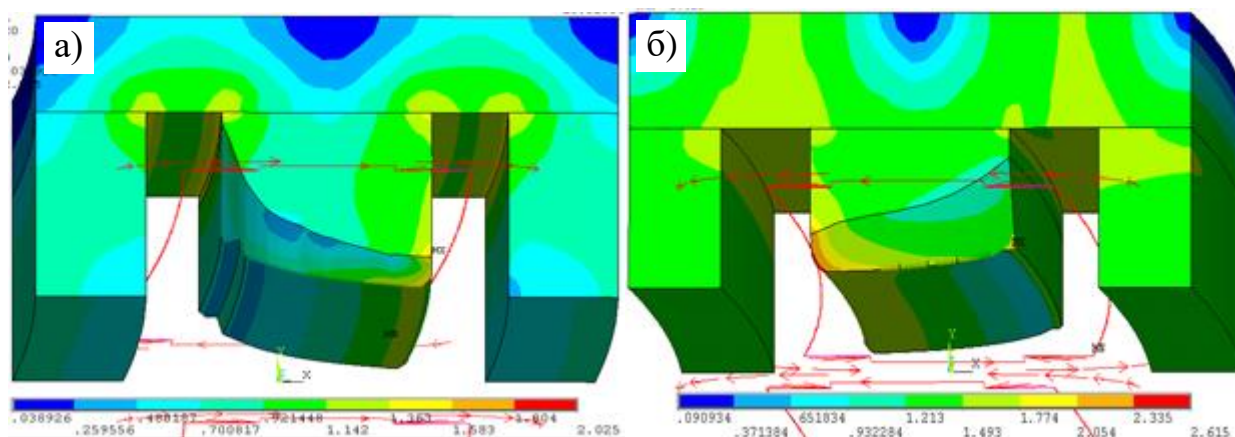


Рис.2.14. Конфигурация торцевой фаски для магнитов BF (а) и BD (б).

На Рис.2.15 показана неоднородность интеграла поля после оптимизации торцевых фасок.

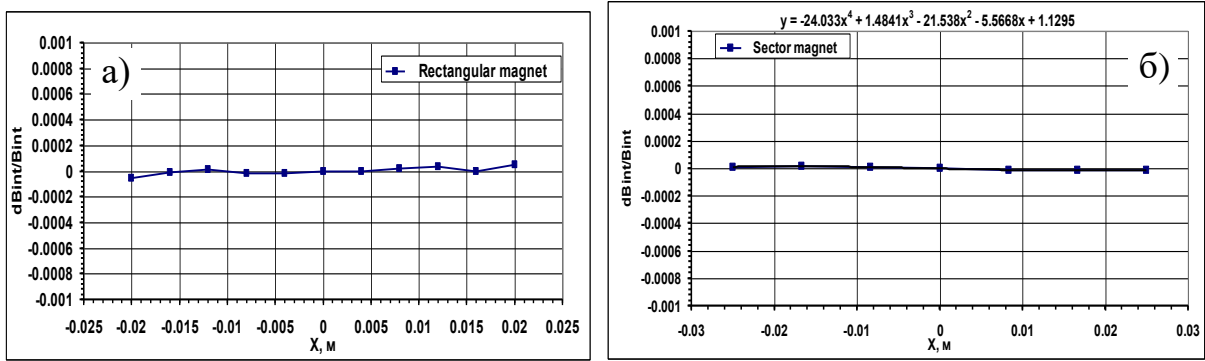


Рис.2.15. Интегральная неоднородность поля BF (а) и BD (б) диполей на энергии 3 ГэВ.

Согласно результатам моделирования, относительное изменение эффективной магнитной длины составляет не более чем $2 \cdot 10^{-4}$ (Рис.2.16).

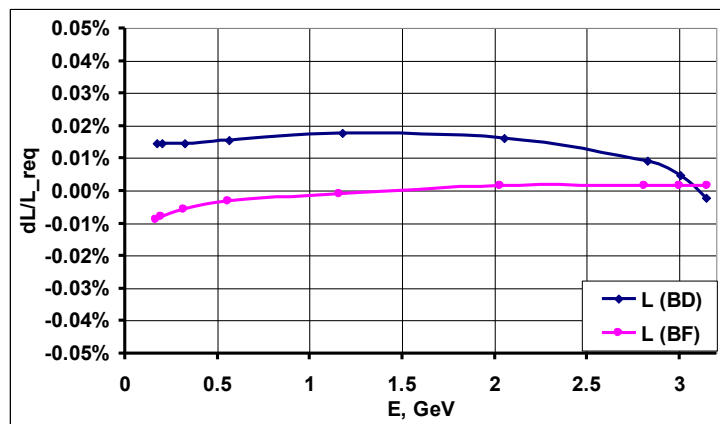


Рис.2.16. Изменение эффективной длины магнита от энергии бустера.

Распределение интегральных компонент магнитного поля показано на Рис.2.17. Отклонение градиента интегрального поля лежит внутри допусков и не превышает $\pm 0.3\%$. Для секступольной компоненты поля отклонение составляет $\leq 2\%$. Зависимость параметров магнита BD для поля, соответствующего энергии > 3 ГэВ, становится сильно нелинейной из-за насыщения железа. Октупольная и декапольная компоненты поля для диполей BF и BD минимизированы с помощью описанных выше торцевых фасок. В области энергии бустера $0.17 \div 3.15$ ГэВ величина приведенной октупольной компоненты не превышает 7.5 м^{-4} , а декапольной компоненты имеет величину не более 1800 м^{-5} .

Кривые на Рис.2.16 и Рис.2.17 учитываются в процессе ускорения частиц.

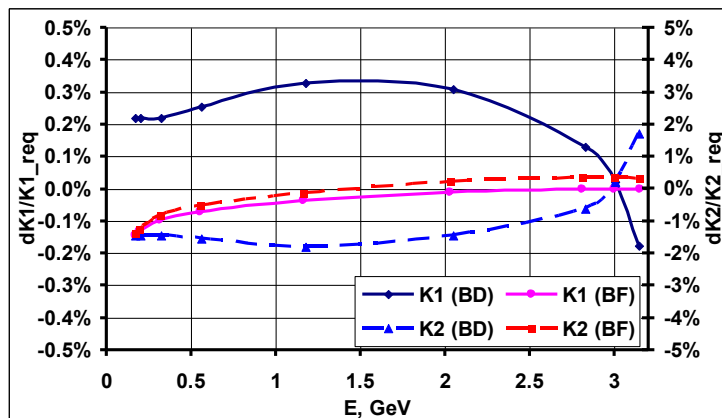


Рис.2.17. Изменение K_1l и K_2l в зависимости от энергии бустера.

2.6. Конструкция магнитов

Кратко опишем основные особенности конструкции магнитов с совмещенными функциями синхротрона-бустера NSLS II. На Рис.2.18 показан общий вид магнитов. Дипольный магнит состоит из верхней и нижней половин сердечника с закрепленными на них катушками возбуждения. Для *BF* катушки изготовлены из прямоугольного медного проводника 16.5×12.5 мм² с внутренним отверстием $\varnothing 7.35$ мм для протока охлаждающего дистиллята; для *BD* используется шинка 12×12 мм² с отверстием $\varnothing 8$ мм².

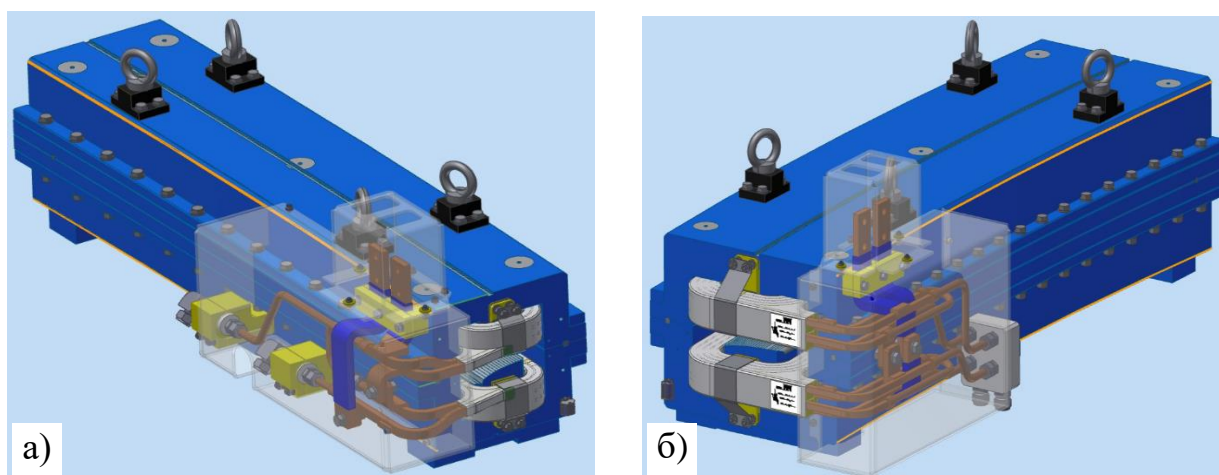


Рис.2.18. Общий вид дипольных магнитов *BF* (а) и *BD* (б).

Каждая половина сердечника собирается из штампованных пластин толщиной 1 мм в специальном точном стапеле. Используется тип стали M1200-100A с изолирующим покрытием Stabolite 70. Stabolit 70 – это связующий лак на основе термообработанной синтетической смолы. Он предназначен для склеивания пластин из электротехнической стали и был специально разработан, как альтернатива клепке или сварке, которые вызывают неприемлемые магнитные нарушения (линейные двигатели, магниты и т.д.).

После сборки пластины склеиваются (спекаются) путем нагрева стапеля с зафиксированным сердечником магнита по специальной технологии. В профиле пластины предусмотрены канавки для установки дюбелей. Отклонение поверхностей канавок от базовых поверхностей составляет не более 15 μm . Данное требование необходимо для точного позиционирования верхней и нижней частей сердечника в поперечном направлении. В верхней части пластины имеется точная канавка с отклонением поверхностей от базовых не более 15 μm . На верхней половине сердечника расположены пять геодезических меток, две пары на концах магнита и одна в центре. Поверхность под установочные геодезические знаки – круг $\varnothing 50$ мм с отверстием $\varnothing 6.35$ мм в центре. В нижней части сердечника имеются три базовые плоскопараллельные пластины с резьбовыми отверстиями для крепления магнита к подставке. Магниты крепятся к подставке при помощи болтов и двух конических штифтов. Между этими пластинами и сердечником установлены пластины из нержавеющей стали для разрыва магнитного потока.

Верхняя и нижняя половины магнитного сердечника стягиваются между собой болтами и зажимами. Позиционирование верхней и нижней половин осуществляется в плоскости разъема цилиндрическими штифтами расположенных в выштампованных канавках. Применение штифтов необходимо

для точного позиционирования половин магнита друг относительно друга при сборке/разборке диполей в туннеле.

Торцевые фаски, служащие, как уже обсуждалось выше, для коррекции интеграла поля, обрабатываются специальной фасонной фрезой на половине сердечника. Их форма и размер определяются по результатам моделирования и магнитных измерений. Изолирующий промежуточный слой толщиной 50 $\mu\text{м}$ (пленка лавсана) размещается в плоскости разъема сердечника для электрической изоляции верхней и нижней половин.

Катушка магнита BF состоит из шести витков. Катушка диполя BD состоит из двух обмоток, по восемь витков в каждой. Медный проводник обмотан двумя слоями изолирующей стекловолоконной ленты толщиной 0.13 мм. Каждый слой ленты наполовину перекрыт последующим, так что общая толщина изоляции достигает 0.52 мм. Вся катушка в сборе так же изолируется слоем той же стекловолоконной ленты без перекрытия. Катушки пропитываются в специальных откачиваемых формах эпоксидным компаундом с порошком оксида алюминия. Толщина внешней изоляции после пропитки должна составлять 1 мм.

Для магнита BF верхняя и нижняя катушки соединены последовательно как электрически, так и по охлаждающей воде. В магните BD для снижения требуемого перепада давления коммутация трубок охлаждения выполнена параллельно между верхней и нижней катушкой. На торцевых концах катушек припаяны медные трубки (Рис.2.19) для установки соединительных муфт-фитингов. Между муфтой и медной шинкой катушки имеются изолирующие проставки, через которые охлаждающая вода подается к магнитам. Они предусмотрены для того чтобы избежать токов утечки на землю.

Зажимы с отверстиями для коммутации тока припаяны к выводам катушек. К ним подсоединены не охлаждаемые водой шинки с большим поперечным сечением для внешней коммутации магнита по электричеству.

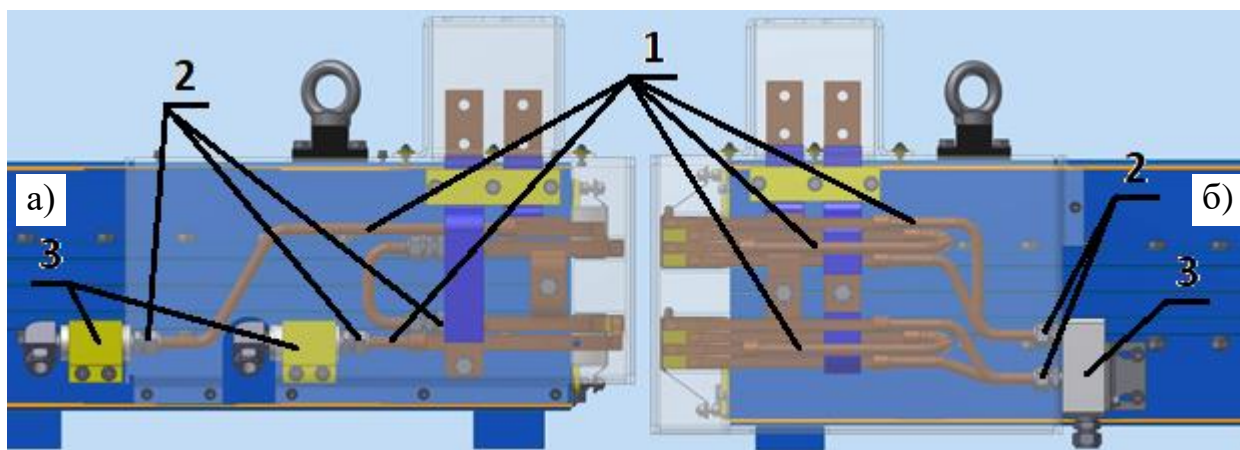


Рис.2.19. Коммутация по воде и электричеству *BF* (а) и *BD* (б) диполей. Обозначения: 1 – медные коммутационные трубки, 2 – соединительные муфты-фитинги, 3 – изолирующие проставки.

Каждая катушка оснащена пластиной с двумя резьбовыми отверстиями для крепления термовыключателей. Эта пластина припаяна к выводу охлаждающей воды из катушки. Нижняя катушка является зеркальным отражением верхней. Катушки крепятся на сердечнике с помощью петлеобразных стальных лент и фиксируются резьбовыми штифтами, расположенными на торцевых поверхностях сердечника. Клиновидные опоры также установлены между катушками. Изолирующий корпус устанавливается для защиты токоведущих частей диполей.

Глава 3. Изготовление магнитов

3.1. Изготовление сердечников диполей

Магнитное моделирование определило координаты профиля пластин сердечников магнитов и допуски на точность изготовления пластин (Рис.3.1).

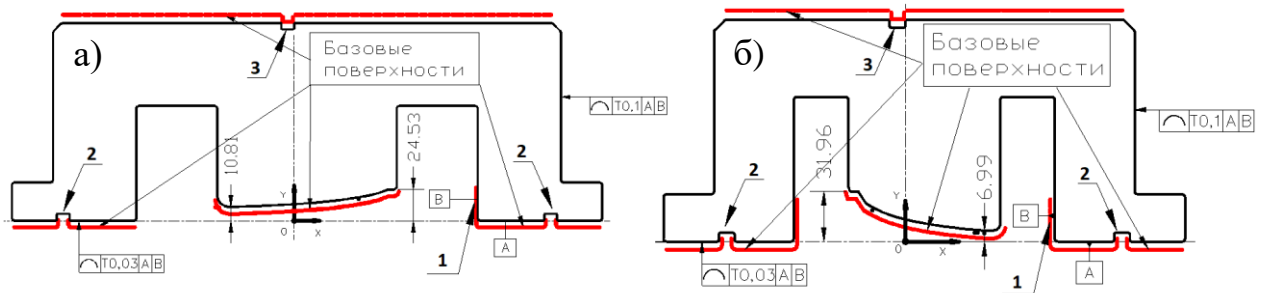


Рис.3.1. Допуски на точность изготовления пластин сердечников диполей *BD* (а) и *BF* (б).

Максимальное отклонение полюса от проектного профиля не должно превышать 15 мкм. Такие же требования заложены на участках с внутренней стороны замыкающего сердечника (1 на Рис.3.1), на которые базируются пластины в стапеле при запекании и формировании сердечника диполя. В профиле пластин имеются пазы (2) для позиционирования верхней и нижней половин сердечника при сборке. Проекция паза (3) на плоскость разъема соответствует расчетной траектории пучка и служит для дополнительной проверки при установке диполей на кольцо. Точность позиционирования пазов (2) и (3) в горизонтальной плоскости сердечников составляет ± 15 мкм. Верхняя базовая поверхность предназначена для позиционирования и прижатия пластин в стапеле при запекании сердечников. Остальные участки профиля должны быть изготовлены с точностью ± 100 мкм.

Для изготовления пластин использовалась сталь M1200-100A толщиной 1 мм в рулонах шириной 490 мм для *BD* диполей и 360 мм для *BF* с изолирующим покрытием Stabolit 70. Толщина покрытия не более 20 мкм. Склеивка пластин происходит под воздействием высоких давления и температуры. В процессе

запекания покрытие размягчается и при сжатии пластин в стапеле они склеиваются. После охлаждения сердечников покрытие затвердевает. Процесс запекания сердечников происходит при механическом давлении от 150 до 300 Н/см² и температуре 190-200°С.

После спекания для придания дополнительной жесткости к сердечнику привариваются планки (1 на Рис.3.2). Далее проводятся измерения ряда размеров, которые заносятся в паспорт контроля качества. На основе измерений определяются пары верхней и нижней половинок диполя. Основным параметром при подборе является одинаковость радиуса изгиба. После определения пары верхняя и нижняя часть совместно обрабатываются для обеспечения параллельности торцевых поверхностей и нужной длины сердечника. Правильность позиционирования торцевых плоскостей относительно центрального сечения обеспечивается равенством расстояний между точками 1 и 3, и 2 и 4 на Рис.3.2.

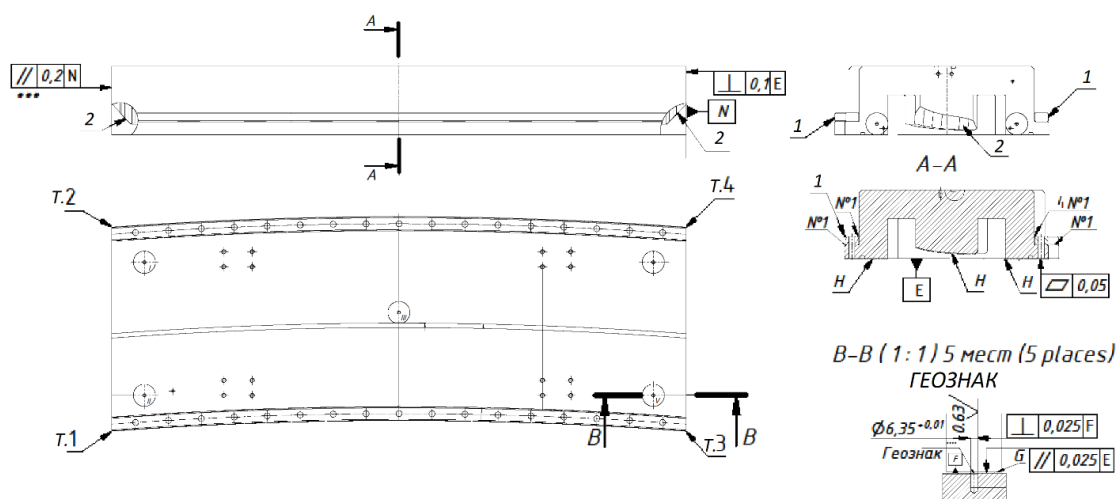


Рис.3.2. Контролируемые параметры сердечника поворотного магнита.

Выводы по отбраковке или коррекции сердечников делаются на основании замеров размеров, показанных на Рис.3.2, Рис.3.3, и значений допусков из Таблицы 3.1. Зафиксированные пары сердечников далее обрабатываются совместно и им присваивается определенный номер диполя.

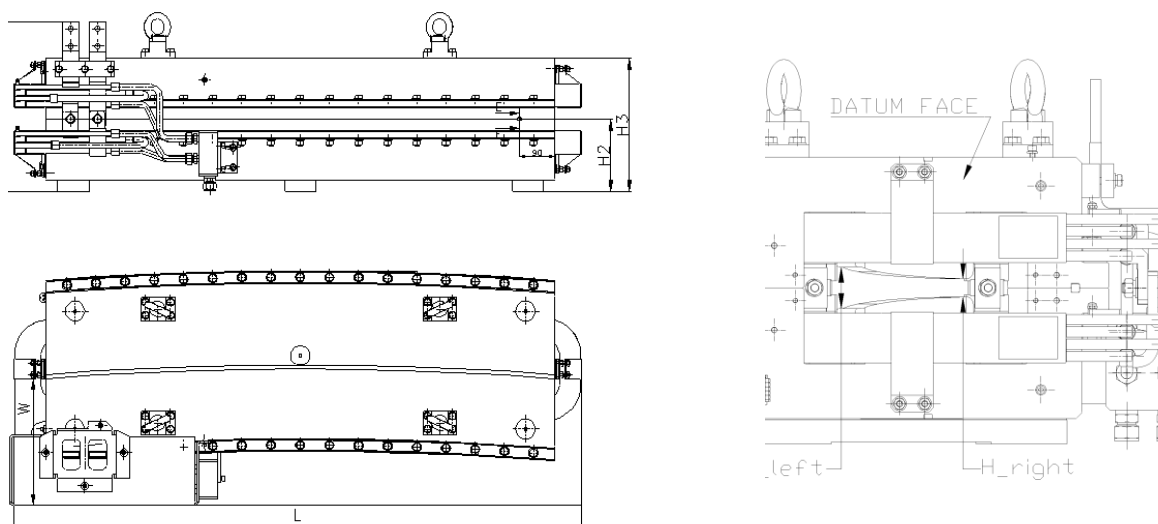


Рис.3.3. Конструкция сердечника поворотного магнита.

Таблица 3.1: Допуски на параметры дипольных магнитов.

Параметр	<i>BD</i> Значение	<i>BF</i> Значение
Длина сердечника L, мм	1298.8±0.5	1239.8±0.5
Зазор между шимами полюса, мм	±0.01	±0.01
Непараллельность поверхностей N, мм	0.1	0.1
Неплоскостность поверхности E на 100 мм, мм	0.05	0.05
Неплоскостность поверхности N на 100 мм, мм	0.05	0.05
Перпендикулярность поверхности N и E, мм	0.1	0.1
Радиус изгиба диполя, мм	8876.8 ± 40	21745 ± 300
Высота сердечника E, мм	1008	1008
Коэффициент упаковки	> 0.98	> 0.98
Вес сердечника, кг	1200	750

Из-за наличия градиентной и секступольной компонент поля особое внимание уделяется изготовлению и измерениям положения площадок под геодезические знаки. Точность изготовления формы каналов под геодезические знаки и перпендикулярность к поверхности их установки составляет ≤ 0.025 мм, что должно обеспечить хорошую повторяемость при выставке магнитных

элементов. Есть так же дополнительное требование на повторяемость сборки/разборки диполей. Точность для межполюсного зазора и положения геознаков относительно полюсов должна быть не хуже 10 $\mu\text{м}$, что должно обеспечиваться технологией производства и сборки диполей.

3.2. Штамповка пластин

Штамповка производилась в Экспериментальном Производстве ИЯФ, имеющем большой опыт изготовления штампов и производства таких работ. Матрица и пуансон изготавливались с учетом требований к размерам и допускам пластины, в частности учитывалось, чтобы заусенец, направленный перпендикулярно к поверхности пластины, не превышал 50 $\mu\text{м}$.

Электротехническая сталь поставлялась в рулонах шириной 490 мм для диполя *BD* и 360 мм для *BF*. Рулон разрезался на карты размером 490 мм×360 мм (*BD*) и 360 мм×330 мм (*BF*), из которых штамповались пластины. Размеры пробных пластин проверялись в ИЯФ с помощью измерительной системы «Оптон» (НММ-965) и позволили провести коррекцию штампа. На Рис.3.4 показаны результаты измерения профиля *BD* и *BF* диполей после коррекции. Профиль промерялся с шагом 5 мм. В области базовых поверхностей и полюса отклонения от заданного профиля составляют не более 10 $\mu\text{м}$.

Всего было отштамповано 87780 пластин для *BD* диполя и 73660 для *BF*. Проводился контроль профиля пластин через каждые 5000 для каждого типа диполей. В случае отклонения более чем на 15 $\mu\text{м}$ базовых поверхностей и формы полюса проводилась коррекция штампа.

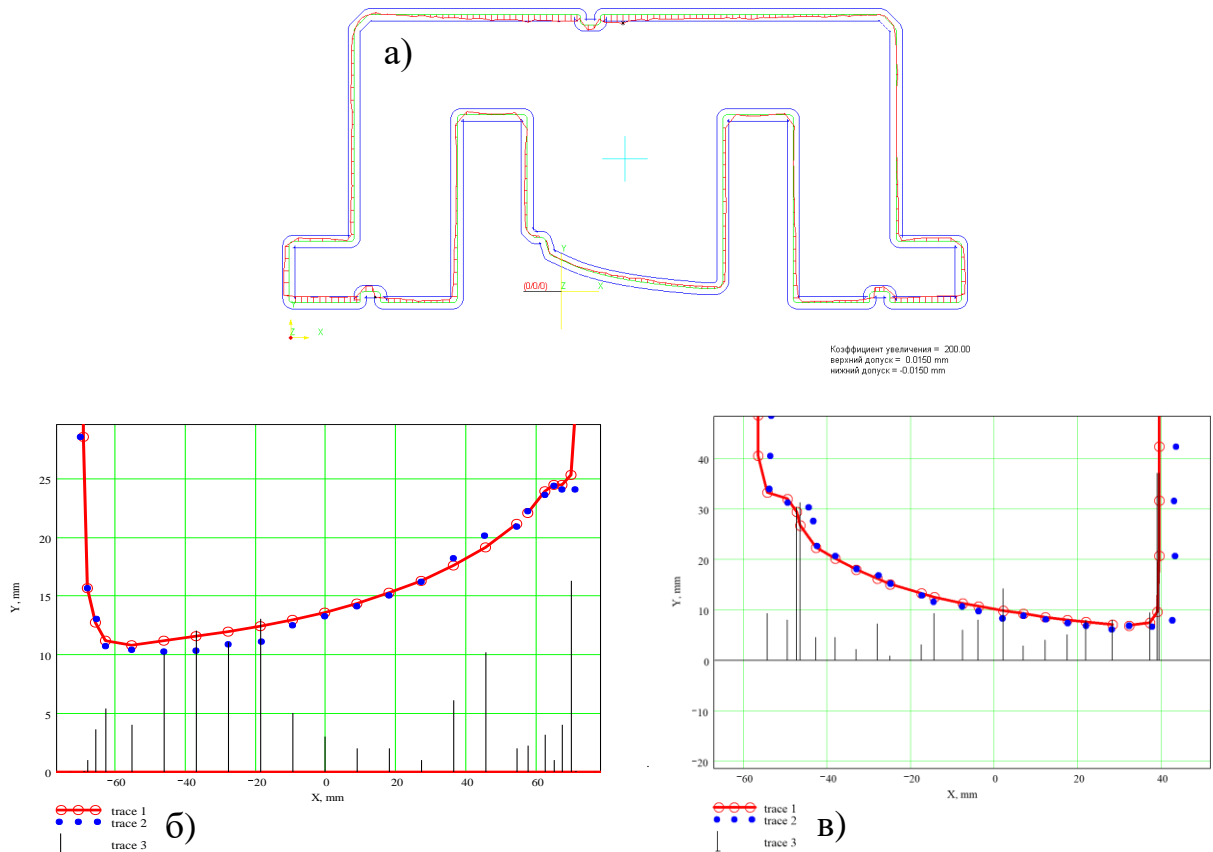


Рис.3.4. Измерения профиля пластины: (а) - профиль BF пластины, (б) - полюсная часть BD диполя, в) - полюсная часть BF диполя.

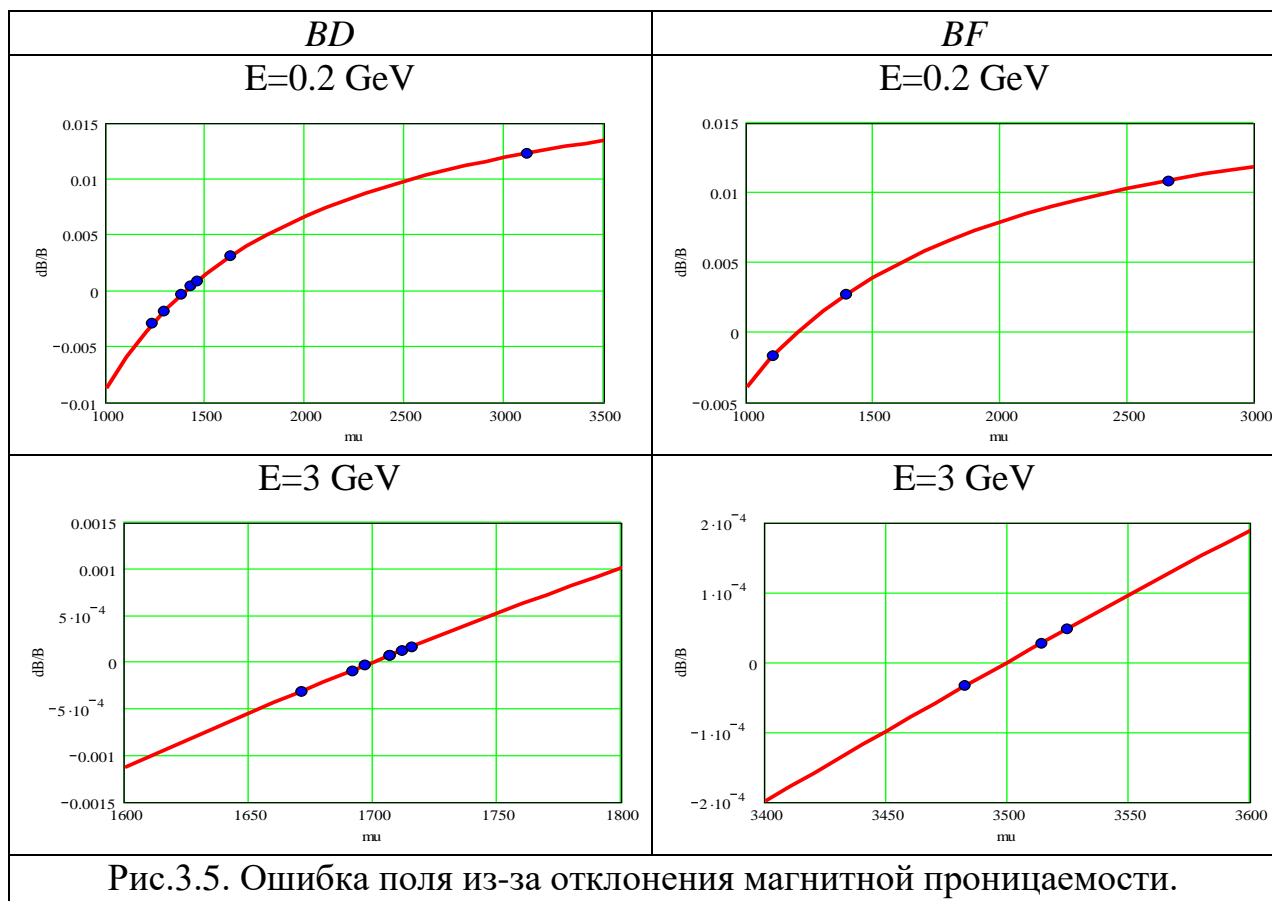
3.3. Сборка сердечника

Магнитные свойства стали различных плавок отличаются. Всего было получено 37 рулонов стали, сформированных из 7 плавок. Сталь была разделена на 4 группы по магнитным свойствам. Отклонение поля dB/B из-за изменения магнитной проницаемости стали $d\mu_{st}/\mu_{st}$ можно оценить по формуле (3.1)

$$\frac{dB}{B} = \frac{l_{st}/\mu_{st}}{h+l_{st}/\mu_{st}} \frac{d\mu_{st}}{\mu_{st}}, \quad (3.1)$$

здесь μ_{st} – средняя магнитная проницаемость вдоль силовой линии, l_{st} – средняя длина силовой линии в железе, h – межполюсной зазор.

На основе полученных характеристик стали наибольшее отклонение магнитного поля от номинала $dB/B = 1.2\%$ (Рис.3.5) наблюдается в области малых полей, соответствующих инжекции пучка в бустер.



Для уменьшения влияния ошибок из-за неоднородности магнитных свойств стали, пластины из разных групп перемешивались. В пакет из 25 пластин отбирались 12 пластин из 1-ой группы, 5 пластин из 2-ой, 3 пластины из 3-ей и 5 пластин из 4-ой группы. Это уменьшает отклонение поля до уровня 10^{-3} относительно среднего.

Запекание половинок сердечника происходило в изготовленных с необходимой точностью стапелях для *BD* и *BF* диполей (на Рис.3.6 показан стапель для диполя *BD*). Стапели обеспечивали нужную форму сердечника, точность базовых поверхностей и нужный коэффициент заполнения железом.

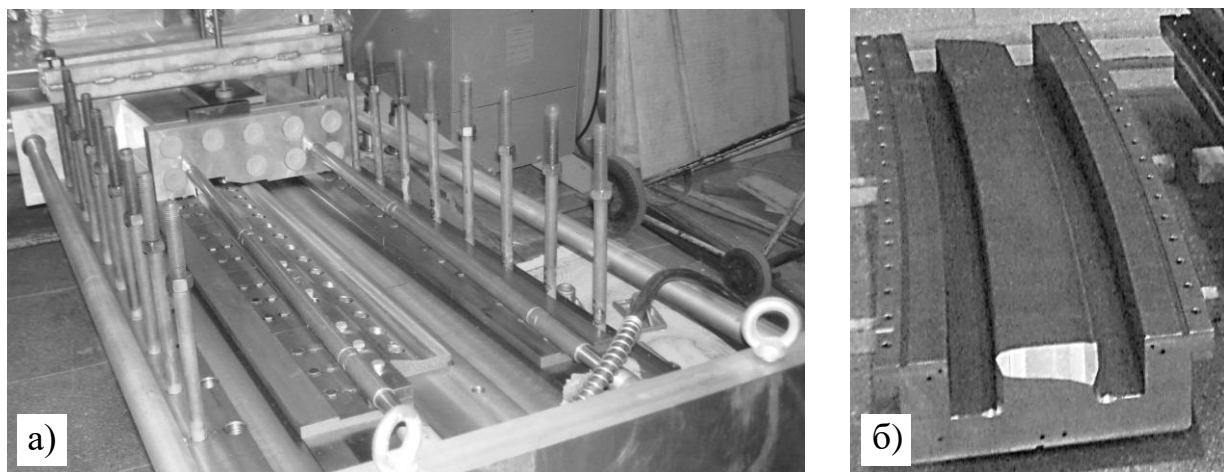


Рис.3.6. Сердечник диполя в стапеле перед запеканием (а). Сердечник после запекания и обработки торцевых фасок (б).

При сборке сердечника в стапеле пластины прижимались к базовым поверхностям соответствующими участками профиля (Рис.3.1). Через каждые 300 мм проводилось промежуточное сжатие пластин. Сердечник целиком сжимался с усилием 100 т, что обеспечивало точность положения соседних пластин не хуже 20 мкм. При сжатии определялись длина сердечника и коэффициент заполнения по формуле:

$$K_{уп} = \frac{M_{изм}}{M_{теор}} = \frac{M_{изм}}{m \cdot (l / \Delta)}, \quad (3.2)$$

где $M_{изм}$ – масса сердечника, $M_{теор}$ – масса сплошного железа, m – измеренная масса одной пластины, l – заданная длина сердечника, Δ – номинальная толщина пластины. При отклонении длины и коэффициента заполнения за допуск, число пластин и сила сжатия менялись с целью коррекции. Длина сердечника измерялась в шести точках, так же контролировался размер диагоналей сердечника. Коррекция размеров проводилась изменением сжатия тарельчатых пружин в диапазоне 0–200 т. В процессе набора контролировались параметры:

- плоскостность верхней и разъемной плоскостей половины сердечника по трем линиям (допуск 0.03 мм на 100 мм, 0.3 мм на всей длине);

- зазор между плоскостью разъема и базовыми поверхностями полюса измеряемый по двум линиям (через каждые 30 мм длины сердечника);
- радиус магнита шаблоном.

После этого стапель с сердечником помещались в печь для запекания по следующему сценарию:

- Подъем температуры от 20°C до 180-200°C за 9 часов со скоростью 20°C/час. В процессе запекания не допускался перепад температуры на размерах сердечника более 1°C.
- Наивысшая температура удерживалась в течение получаса.
- Охлаждение со скоростью 20°C/час за 9 часов.

Далее производилась механическая обработка сердечника, обработка торцевой фаски, и т.д. Для серийных диполей торцевые фаски на полюсе изготавливались после нахождения пары половинок близких по геометрическим параметрам и их сборке в единый сердечник. Коррекция магнитного поля проводилась после магнитных измерений путем изменения межполюсного зазора и положения магнита относительно расчетного (параграф 4.6). Готовая половина сердечника BD диполя показана на Рис.3.6.

3.4. Измерение параметров сердечников

По завершению механических работ проводилось окончательное измерение ключевых размеров сердечника. Межполюсной зазор определялся измерением расстояния между шипами полюса в двух точках сечения (h_{left} , h_{right}) (Рис.3.3). Контроль осуществлялся с точностью 5 мкм через каждые 50 мм от одного торца магнита до другого. В Таблице 3.2 приведено усредненное по всей длине диполей для всех магнитов в BD и BF серии значение зазоров h_{left} , h_{right} в сравнении с требованиями (колонка ТЗ).

Таблица 3.2: 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

Средние геометрические размеры сердечников в сравнении с требованиями спецификации (ТЗ) приведены в Таблице 3.3.

Таблица 3.3: Усредненные геометрические размеры сердечников.

Параметр	<i>BD</i>		<i>BF</i>	
	ТЗ	<Изм.> ± σ	ТЗ	<Изм.> ± σ
Длина, мм	1298.8±0.5	1299.0±0.4	1239.8±0.5	1239.7±0.3
Радиус дipoлей, мм	8877±56	8865±20	21745±370	21551±350
Прогиб, мм	< 0.15	0.1	< 0.15	0.15
Коэфф.заполнения, %	> 98	98.3	> 98	98.4

3.5. Катушки поворотного магнита

Полный ток в катушках возбуждения при максимальном магнитном поле составляет 11866 ампер-витков для *BD* диполя и 5170 ампер-витков для *BF* диполя. Оптимизация конструкции магнитопровода оставила под размещение катушек площадь в поперечном сечении профиля пластины около 24 см² для *BD* и 13 см² для *BF* так, что плотность тока 5.2 А/мм² для первого и 4.2 А/мм² для второго диполя. Учитывая, что для естественного (воздушного) охлаждения плотность тока не более ≈1.5-2 А/мм², и имея требование на максимальный нагрев поверхности катушки ΔТ = 6°С в стандартном (импульсном) режиме работы, было решено использовать водяное охлаждение.

Для намотки катушки магнита *BF* была выбрана неизолированная медная шинка HCOF-OK с размерами 16.5×12.5 мм² с каналом охлаждения Ø7.35 мм.

Для BD – 12×12 мм² с каналом $\varnothing 8$ мм. Вся шинка покупалась у компании Outokumpu (Финляндия). Общий вид и сечение катушек показаны на Рис.3.7.

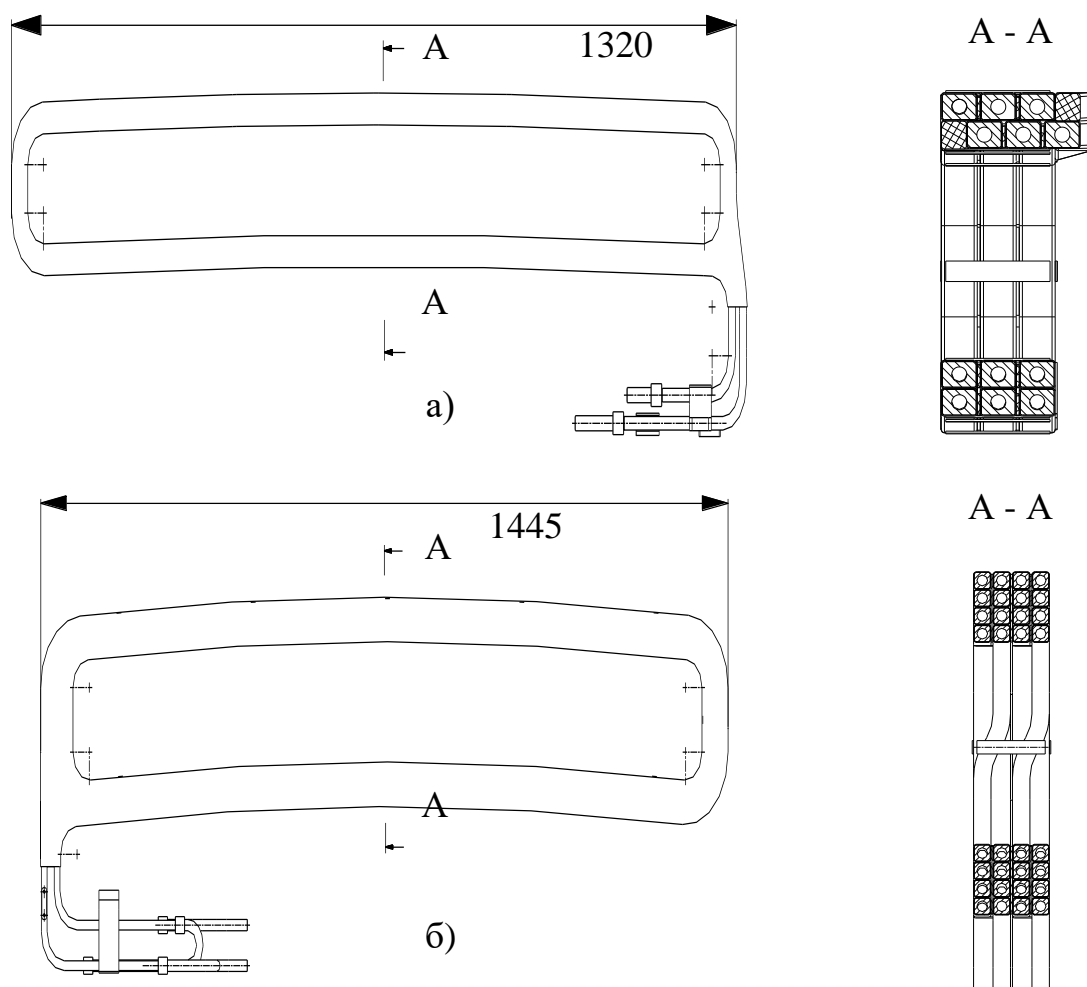


Рис.3.7. Катушка магнитов BF (а) и BD (б).

Во избежание слишком большого перепада давления охлаждающей воды и роста температуры в контуре охлаждения, катушка BD разделена на два контура охлаждения. Для BF достаточно одного контура охлаждения. Катушка BF цельная, имеет три слоя по два витка. Катушка BD разделена на две секции, каждая из которых состоит из двух слоев по четыре витка.

Катушки работают при умеренной радиации и используют изоляцию из армированного стекловолокна, пропитанного эпоксидной смолой. Перед вакуумной пропиткой шинка наматывалась на специальную оправку с обязательной проверкой размеров. Далее катушки пропитывались под

давлением эпоксидным компаундом в формах, который обеспечивал корпусную электрическую изоляцию. Толщина неармированной смолы на поверхности готовой катушки не превышала 0.5 мм. Готовая катушка не должна иметь трещин, пустот и сухих пятен.

Выводы основных катушек (Рис.3.7) являются продолжением шинки с припаянными контактными площадками и штуцерами для шлангов системы охлаждения. Мощность, выделяемая в катушках при максимальном токе и работе в импульсном режиме, составляет 1.1 кВт для диполя *BF* и 4.2 кВт для *BD*. При перепаде давления 4 ат перепад температуры воды между входом и выходом составляет 2.5°C для *BF* и 4.7°C для *BD* соответственно. Для защиты от перегрева использовались термокючи (Thermic LK1 060.05) с температурой срабатывания $60\pm 5^\circ\text{C}$, устанавливаемые непосредственно на медную шинку на выходе каждого водяного контура.

Внутри ярма катушка удерживается расширяющимися клиньями из стеклопластика и немагнитной стали.

3.6. Изготовление катушек поворотных магнитов

Четыре типа катушек, отличающихся формой выводов, изготавливались на намоточном приспособлении. В процессе шинка обматывалась лентой из стеклоткани ЛВСМ 0.15 x 10 мм x мм с 25% перекрытием. Далее устанавливались изоляционные вкладыши из стеклотекстолита, и уже катушка целиком обматывалась стеклолентой для обеспечения требуемой корпусной изоляции. Подготовленные таким образом катушки помещались в герметичную форму, из которой откачивался воздух, под давлением нагнетался эпоксидный компаунд, и форма с катушкой помещалась в печь, где компаунд отвердевал. После извлечения (Рис.3.8) проводилась окончательная обработка катушки, подсоединение штуцеров и контактных площадок.



Рис.3.8. Катушки *BD* и *BF* диполей после запечки.

Важным этапом были электрические испытания, определяющие качество изделия, включая:

- Измерение электрического сопротивления катушки током 1 А при температуре $20\pm 2^\circ\text{C}$. Сопротивление должно укладываться в 1% от среднего значения для всех катушек.
- Измерение индуктивности. Отклонения не должны были превышать 1% от среднего значения для данного типа катушек.
- Испытание паяных и сварных водяных соединений давлением 11 бар в течение 30 минут для каждого контура охлаждения.
- Измерение расхода охлаждающей жидкости для каждой секции при перепаде давления в канале 4.1 бар. Отбраковка осуществлялась при отклонении расхода более чем на $\pm 10\%$ от среднего значения измерений.
- Проверка герметичности канала охлаждения катушки. Отбраковка осуществлялась при изменении давления на вводах более чем на 2% в течение 24 часов при изначальном давлении 10 бар. Данный тест

выполнялся для случайной выборки катушек из серии. Общий объем проверенных катушек составил 25%.

- Измерение сопротивления корпусной изоляции и тока утечки при напряжении 2 кВ в течении 1 минуты. Сопротивление изоляции не должно быть меньше 20 МОм при токе утечки не более 100 мкА.
- Импульсные испытания для определения целостности межвитковой изоляции путем подключения на клеммы катушки конденсатора с напряжением 250, 500 и 1000 В. Если изоляция не нарушена, форма спадающего в резонансном контуре напряжения для разных напряжений должна совпадать.
 - Дипольные магниты в сборе индивидуально испытывались в условиях высокой температуры при $U = 2$ кВ в течение 8 часов. Катушки, которые имели следы разрушения или значительные изменения в сопротивлении корпусной и межвитковой изоляции в повторных тестах, отбраковывались.

3.7. Поворотные магниты в сборе

Поворотные магниты для бустерного синхротрона NSLS II в собранном виде показаны на Рис.3.9.

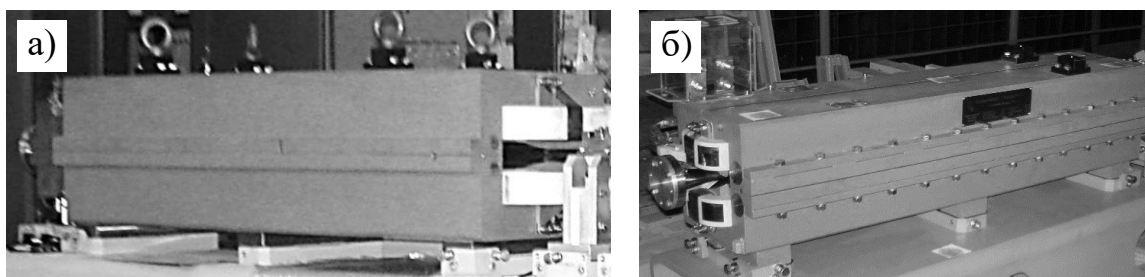


Рис.3.9. Готовые диполи: *BD* (а), *BF* (б).

Коммутация основных катушек осуществляется неохлаждаемыми соединительными тоководами. Электрическое сопротивление и индуктивность катушек дипольных магнитов: 19.5 мОм и 9.6 мГн для диполя *BD* и 3.8 мОм и 1.1 мГн для диполя *BF*, соответственно. Схема коммутации катушек по воде – параллельная, выход и вход катушек подсоединяются к общим входному и выходному коллекторам. Измеренный расход воды в сборе составил 16 л/мин (при $\Delta P = 6$ ат).

3.8. Требования на точность выставки магнитов

Согласно результатам Главы 1, представленным в Таблице 1.2, точность позиционирования магнита относительно равновесной траектории должна быть не хуже ± 150 мкм в поперечном направлении, ± 0.5 мм в продольном, с допуском на вращение относительно продольной оси ± 0.2 мрад. Для привязки верхней и нижней половин сердечника в поперечном направлении в пластинах предусмотрены точно отштампованные канавки, куда закладываются штифт прямоугольного сечения. В плоскости разъема половин делается отверстие под цилиндрический штифт, обеспечивающий требуемую точность их позиционирования при процедурах сборки и разборки магнитов. В верхней части пластины имеется канавка, показывающая геометрическую ось балки. Отклонение поверхностей канавок от базовых не превышает 15 мкм.

Для постановки магнита в проектное положение на его верхней поверхности предусмотрены пять площадок ($\varnothing 50$ мм с отверстием $\varnothing 6.35$ мм) для геодезических знаков (меток): две их пары площадок находятся на концах диполя и одна в центре. Плоскостность площадок и перпендикулярность канала отверстия к поверхности обеспечивается с точностью лучше 25 мкм (Рис.3.2). Положение площадок измерялось с помощью системы «Оптон»; данные

заносились в паспорта диполей и использовались во время магнитных измерений для привязки карты магнитного поля к геознакам и последующей выставки диполей в кольцо.

В нижней части сердечника имеются три базовые плоскопараллельные пластины с резьбовыми отверстиями для крепления магнита к подставке (girder), показанной на Рис.3.10. Между ними и сердечником имеются пластины из нержавеющей стали для разрыва магнитного потока.

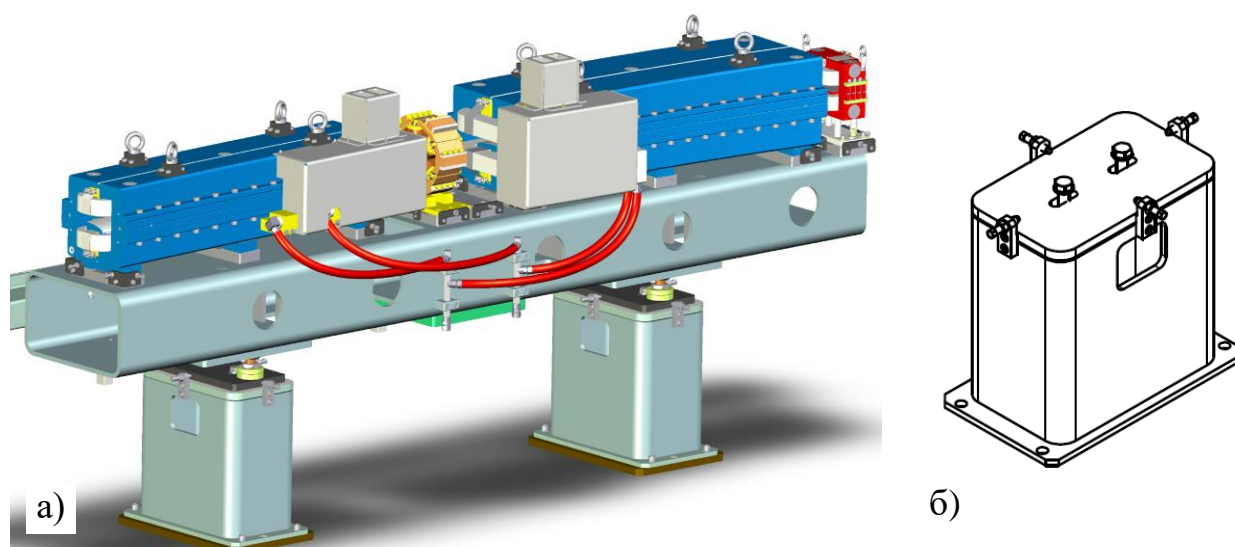


Рис.3.10. Подставка с магнитными элементами (а) и опора подставки (б).

Подставки и их опоры изготавливаются из прямоугольной стальной трубы сечением $500 \times 300 \text{ мм}^2$ с толщиной стенки 16 мм. На подставке длиной около 3.5 метров размещаются диполи BF и BD , корректор, секступольная линза и вакуумная камера с датчиками положения пучка. Относительная точность выставки магнитов на подставке лучше $\pm 50 \text{ мкм}$. После установки сборки в тоннель при необходимости положение всей подставки слегка корректировалось с помощью подвижек в опорах в диапазоне $\pm 25 \text{ мм}$.

Глава 4. Магнитные измерения

Измерения магнитного поля поворотных магнитов с совмещенными функциями проводились с помощью набора датчиков Холла, размещенных по оси x , и перемещаемых как целое на специальной каретке вдоль магнита [21]. Результаты измерений [13] приведены в области полей $0.0638 \div 1.183$ Т (для BD) и $0.026 \div 0.483$ Т (для BF). Выполнен анализ и сравнение с результатами моделирования магнитных полей. Для напоминания параметры диполей приведены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1: Параметры дипольных магнитов.

Параметры диполей	BF	BD
Число	28	32
Эффективная магнитная длина	1.24 м	1.30 м
Угол поворота	3.2673°	8.3911°
Вертикальный зазор	± 14 мм	± 13 мм
Магнитное поле на инжекции	0.03068 Т	0.07516 Т
Магнитное поле на выпуске	0.46021 Т	1.12734 Т
Градиент поля K_1	0.82 м^{-2}	-0.55509 м^{-2}
Секступольная компонента поля K_2	3.6 м^{-3}	-4.3 м^{-3}
Область хорошего поля	$\pm 12 \times \pm 20$ мм	
Качество поля, $\Delta B/B_0$	$\pm 1 \cdot 10^{-3}$	

4.1. Методика магнитных измерений

Орбита в магните представляет собой дугу окружности, и правильно было бы перемещать каретку с датчиками Холла по дуге так, чтобы датчики размещались радиально, обеспечивая совпадение систем координат пучка и измерений. Однако изготовить изогнутую направляющую для каретки с высокой

точностью сложно, и, пользуясь тем, что сагитта на длине магнита невелика, мы решили проходить магнит прямолинейно, снимая, тем самым, прямоугольную карту поля размером 1500×76 мм² (Рис.4.1). Продольный размер измеряемой карты поля превышал длину магнитов более чем на шесть межполюсных зазоров, что обеспечивало определение магнитных параметров с необходимой точностью с учетом области спада поля. Далее находилась орбита пучка и компоненты поля пересчитывались из измерительной декартовой системы в сопровождающую.

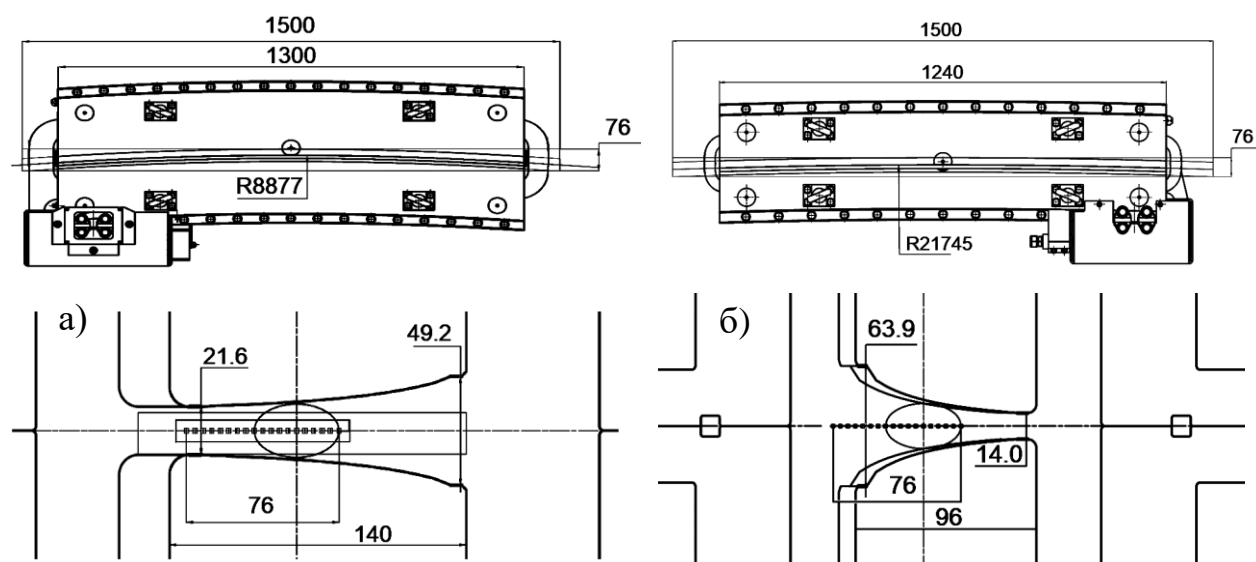


Рис.4.1. Размещение датчиков Холла в дипольных магнитах: *BD* (а) и *BF* (б).

Были разработаны два набора (для *BF* и *BD*) измерительных систем, одна из которых показана на Рис.4.2. Система состоит (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 (не показан).

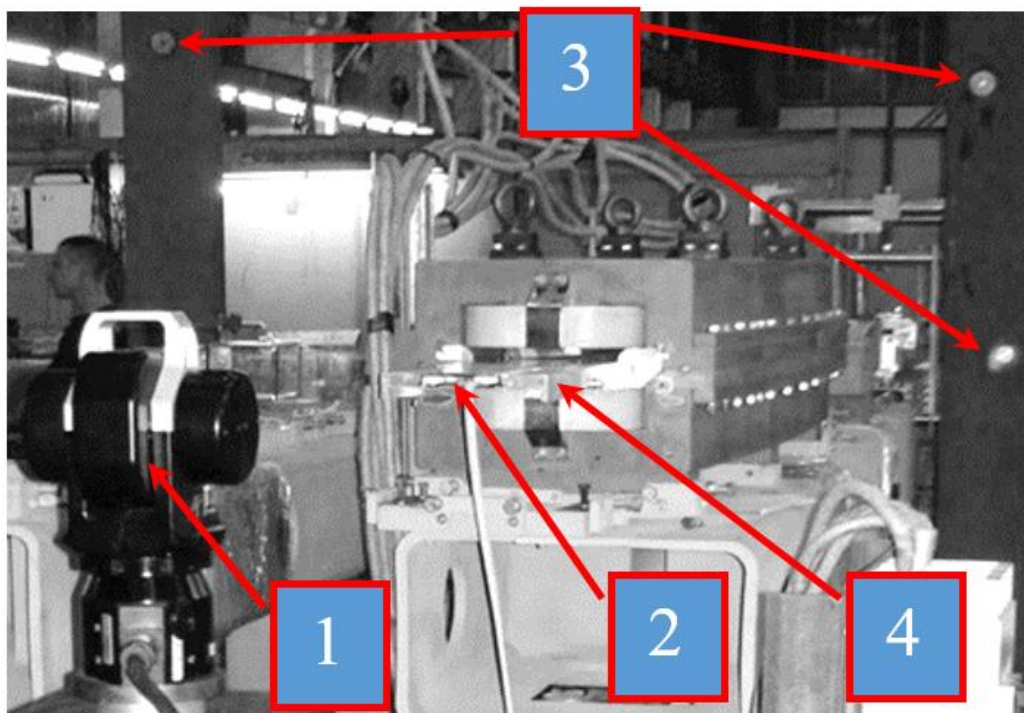


Рис.4.2. Измерительная система на основе датчиков Холла.

В термостабилизированной каретке использовалось 20 датчиков Холла (Рис.4.3, а). Расстояние между датчиками составляло 4 мм. Каретка с датчиками Холла перемещалась с шагом 5 мм в прямолинейной направляющей (Рис.4.3, б) с помощью шагового двигателя.

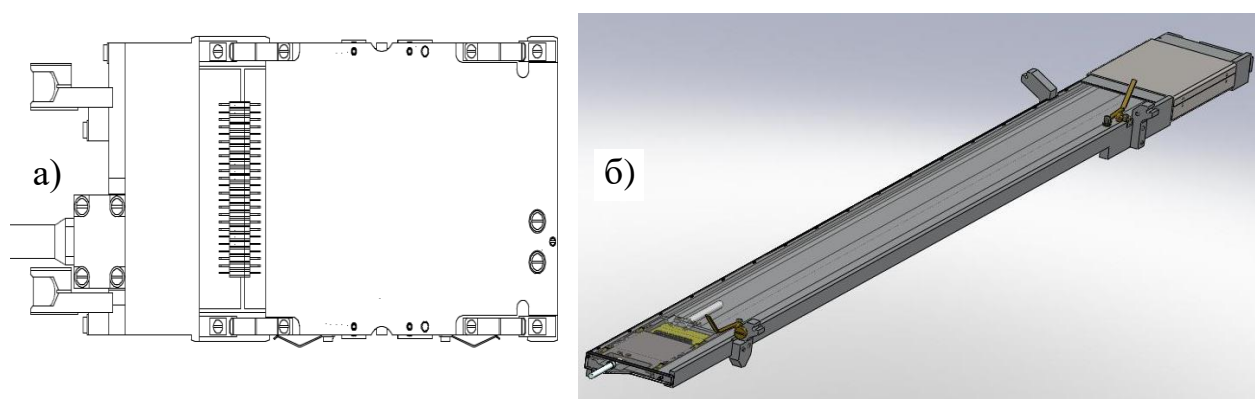


Рис.4.3. Каретка с датчиками Холла (а) и направляющая (б).

Точная привязка магнитной оси диполей к положению датчиков Холла осуществлялась с помощью геодезической системы. Система состояла из

уголковых отражателей, лазерного трекера, геодезических знаков дипольного магнита и дополнительной сети геодезических знаков. Уголковые отражатели располагались на каретке с датчиками Холла. Координаты датчиков были измерены лучше, чем ± 20 мкм относительно положения отражателей. Пять геодезических знаков, расположенных на дипольном магните, обеспечивали привязку геометрической оси диполей к положению элемента в кольце бустера. Привязка положения уголковых отражателей с геодезическими знаками, расположенными на базовых поверхностях дипольных магнитов, осуществлялась с помощью лазерного трекера и дополнительной сети геодезических знаков. Точность определения положения каретки с датчиками Холла была лучше, чем ± 75 мкм. Геодезическая система позволяла измерять положение датчиков Холла при каждом шаге шагового двигателя. При обработке магнитных измерений вносились поправки на положение датчиков относительно геометрической оси диполей взятые из геодезических измерений. Это позволило привязать карту магнитных полей к геометрической оси диполя с точностью не хуже ± 75 мкм.

На основе скорректированной карты магнитных полей проводилось математическое моделирование движения (трекинг) частиц (Приложение Б). По результатам моделирования вычислялись параметры магнита (угол поворота, интеграл поля, компоненты поля и т.д.), а также требуемые координаты размещения диполя. При значительном отклонении характеристик от номинальных, магнит дорабатывался.

4.2. Оценка точности измерения измерительной системы

На точность измерений влияют следующие типы ошибок. Первый связан с точностью определения положения элементов измерительной системы:

- датчиков Холла друг относительно друга;
- датчиков Холла относительно геодезических знаков каретки;
- геодезических знаков дипольного магнита относительно геодезических знаков каретки.

Это систематические ошибки для одного магнита, однако при привязке геодезических знаков ошибка может меняться от магнита к магниту.

Ко второму типу можно отнести ошибки аппаратуры измерения:

- стабильность источника тока, питающего дипольный магнит;
- стабильность питания измерительной электроники;
- разрядность аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) блока обработки сигнала датчиков Холла.

Эти ошибки могут иметь как систематический характер, так и статистический. К систематическим ошибкам можно отнести изменение нулевого показания датчиков Холла (АЦП), отклонение заданного тока источниками питания дипольного магнита и электроники измерительной системы, изменения, связанные с температурой. Статистические ошибки вызваны нестабильной работы источников питания, шумом электроники и внешними помехами.

Третий тип погрешностей связан с неоднородностью намагничения стали ярма магнитов. В случае различных циклов размагничивания (замагничивания) диполей, или в случае бросков тока питания, магнитные параметры элементов будут иметь отличия в области малых полей. Для исключения данных ошибок необходимо иметь идентичные циклы размагничивания как для серии магнитных измерений, так и при дальнейшей работе ускорителя.

Другим возможным вкладом в точность измерений параметров диполей является конечный продольный размер карты магнитных поля. На основе

моделирования была сделана оценка такой погрешности. Результаты представлены на Рис.4.4. При длине области измерения 150 см относительная ошибка в интеграле поля составляет не более $5 \cdot 10^{-4}$, ошибка в интеграле градиента не более $5 \cdot 10^{-4}$, для секступольной интегральной компоненты не более $2 \cdot 10^{-3}$.

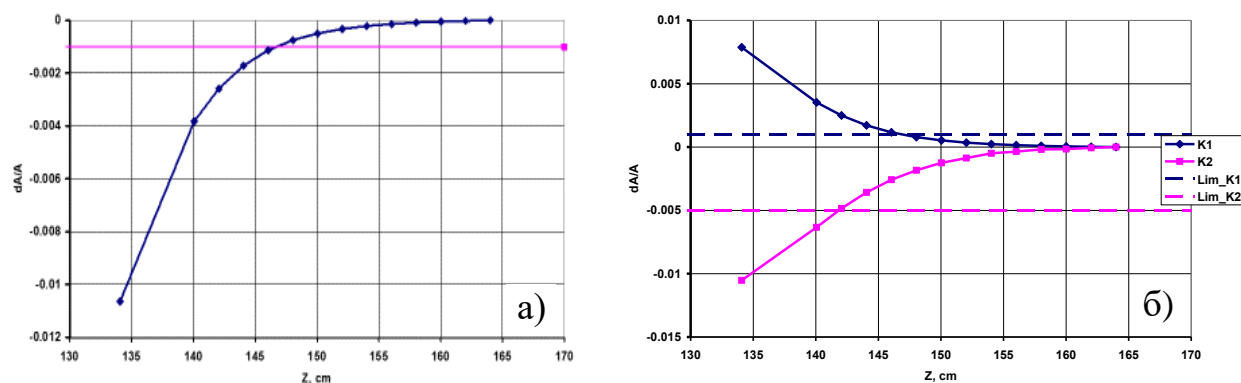


Рис.4.4. Относительные отклонения интегральной дипольной компоненты (а), градиентной K_1 и секступольной K_2 (б) в зависимости от продольного размера карты поля.

Для определения точности измеренных параметров диполей из-за ошибок выставки, позиционирования датчиков Холла и ошибок связанных со стабильностью источников питания было проведено моделирование. В расчетную карту полей были введены статистические и систематические ошибки измерения датчиков Холла. По выборке 1000 событий для каждого типа ошибок были получены параметры поля. Систематическая ошибка вносилась в весь ряд измерений для одного датчика Холла. Статистическая ошибка для каждого измерения датчиком Холла случайна. В обоих случаях вероятность ошибки имеет гауссово распределение со стандартным отклонением σ , ограниченное на уровне $\pm 3\sigma$. В Таблице 4.2 показаны результаты моделирования для магнита BD при токе возбуждения, соответствующему энергии 3 ГэВ.

Таблица 4.2: Результаты моделирования ошибок магнитных измерений.

Тип		1	2	3	4	5	6	Σ
Параметр	$A_{\text{ном}}$	$\sigma_A/A_{\text{ном}}$						
B, T	1.1288	6.0E-06	6.0E-06	8.8E-05	1.6E-04	0	0	1.8E-04
G, T/m	-5.561	4.0E-05	2.0E-05	6.0E-04	2.0E-04	1.5E-04	3.0E-05	6.5E-04
S, T/m ²	-43.1	1.0E-03	4.0E-04	1.0E-02	5.0E-03	2.9E-03	5.0E-05	1.2E-02
L_{eff} , m	1.3	4.0E-06	6.0E-06	7.0E-05	1.7E-04	6.6E-06	2.9E-05	1.9E-04
$\int B(s)ds$, Tm	1.4674	4.0E-06	0	4.0E-05	2.5E-05	6.6E-06	2.9E-05	5.6E-05

Пояснения к Таблице 4.2: $A_{\text{ном}}$ – номинальное значение параметра, $\sigma_A/A_{\text{ном}}$ – отношение среднего квадратичного значения ошибки к номинальному значению, столбцы 1-6:

1. Систематическая ошибка 0.1 Гс в измерении датчика Холла. Может присутствовать из-за погрешности нуля электроники при калибровке датчиков.
2. Статистическая ошибка 0.1 Гс в измерении датчика из-за шума электроники.
3. Систематическая ошибка в поперечном горизонтальном положении датчиков в каретке 0.02 мм. Определяется точностью измерения положения датчиков Холла друг относительно друга.
4. Статистическая ошибка в поперечном горизонтальном положении датчиков в каретке 0.05 мм из-за механической точности направляющей.
5. Систематическая ошибка измерения продольного положения датчиков в каретке 0.02 мм.

6. Статистическая ошибка измерения продольного положения датчиков в каретке 0.05 мм из-за неравномерности движения каретки направлении без учета поправок от геодезической системы.

Согласно результатам моделирования, в Таблице 4.2 наибольший вклад в ошибку измерения дипольной компоненты магнита ($\sigma_B/B = 1.6 \cdot 10^{-4}$) вносит статистическая ошибка $\sigma_x = 0.05$ мм в радиальном направлении. Наибольший вклад в ошибку интегральной градиентной ($\sigma_G/G = 6.0 \cdot 10^{-4}$) и секstupольной ($\sigma_S/S = 1.1 \cdot 10^{-2}$) компонент вносит систематическая ошибка определения относительного положения датчиков в горизонтальном направлении ($\sigma_x = 0.02$ мм). Стоит отметить что данные вклады в ошибку измерения не зависят от тока возбуждения магнита.

На энергии инжекции для ошибок в столбцах 1 и 2 Таблицы 4.2 относительная ошибка определения параметров диполей увеличится в 15 раз. Суммарная точность измерения поля ухудшится: для дипольной компоненты с $1.8 \cdot 10^{-4}$ до $2.2 \cdot 10^{-4}$, для градиентной компоненты с $6.5 \cdot 10^{-4}$ до $9.3 \cdot 10^{-4}$, для секstupольной компоненты с $1.2 \cdot 10^{-2}$ до $2.0 \cdot 10^{-2}$. Точность определения эффективной длины магнита и интеграла поля изменится с $1.9 \cdot 10^{-4}$ до $2.2 \cdot 10^{-4}$ и с $5.6 \cdot 10^{-5}$ до $8.2 \cdot 10^{-5}$, соответственно.

Так же были сделаны оценки влияния выставки каретки относительно диполя на измеряемые параметры магнита. В случае продольного сдвига диполя и поворота медианной плоскости каретка относительно плоскости диполя на 1 мрад изменения измеряемых параметров диполя незначительны. При ошибке выставки в поперечном направлении изменения параметров можно оценить по формулам:

$$\frac{\Delta B_y}{B} = \frac{G \cdot \Delta x}{B} + \frac{S(\Delta x^2 - \Delta y^2)}{2 \cdot B} + o(x, y), \quad \frac{\Delta G}{G} = \frac{S(\Delta x - \Delta y)}{G} + o(x, y). \quad (4.1)$$

Согласно (4.1) и результатам моделирования, при сдвиге центра магнита на 0.1 мм в горизонтальном направлении параметры диполя изменятся

следующим образом: $\Delta B/B = -4.9 \cdot 10^{-4}$, $\Delta G/G = 7.2 \cdot 10^{-3}$. Моделирование, также, показывает, что секступольная компонента поля изменится как $\Delta S/S = 2 \cdot 10^{-3}$, а эффективная магнитная длина и интеграл поля уменьшатся на $\Delta L/L = 3 \cdot 10^{-5}$ и $\Delta I/I = -5.0 \cdot 10^{-4}$, соответственно. Полученные допуски позволяют с хорошей точностью определить дипольную и градиентную компоненту поля и с удовлетворительной точностью секступольную компоненту.

В Таблице 4.3 и 4.4 представлены итоговые требования на точность магнитных измерений и параметров каретки с датчиками Холла.

Таблица 4.3: Допустимые ошибки в измерении интегральных компонент поля.

Дипольная $\Delta B/B$	$4 \cdot 10^{-4}$
Квадрупольная $\Delta G/G$	$8 \cdot 10^{-4}$
Секступольная $\Delta S/S$	$5 \cdot 10^{-3}$

Таблица 4.4: Требования измерительную систему с датчиками Холла.

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

4.3. Измерительная система на основе датчиков Холла

Система состоит из следующих компонент [21]:

- Измерительная каретка с датчиками Холла;
- Регистрирующая электроника и система питания датчиков Холла;
- Направляющая и система ее выставки в апертуре магнита;
- Геодезическая система привязки каретки к диполю;
- Система механического перемещения каретки.

Схематическое изображение каретки с датчиками и другими элементами показано на Рис.4.5. Пояснения к схеме даны в тексте.

Двадцать датчиков Холла (обозначены 1 на Рис.4.5) расположены в плоскости вдоль одной линии через 4 мм. До установки на каретку, проводился предварительный отбор датчиков по величине температурного коэффициента чувствительности и его одинаковости. Параметры отобранных датчиков также показаны на Рис.4.5.

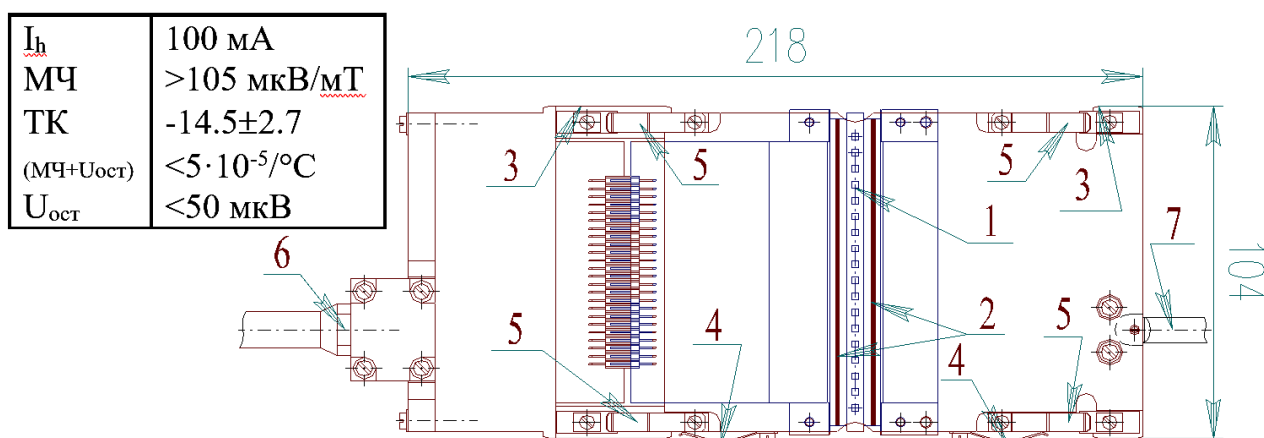


Рис.4.5. Каретка с датчиками Холла и характеристики датчиков. Здесь МЧ-магнитная чувствительность, I_h – ток питания, $U_{ост}$ – остаточное напряжение, ТК – температурный коэффициент.

Ширина и толщина каретки 104 мм и 14.5 мм. На ее боковой базовой стороне располагаются механизмы скольжения (3 на Рис.4.5), с противоположной стороны расположены пружины (4), обеспечивающие

прижим к боковой базовой поверхности направляющей. Сверху каретка прижимается к нижней поверхности направляющей с помощью подпружиненных опор (5).

Размер чувствительной зоны датчика Холла составляет 0.1×0.05 мм². Расстояние между усредненными положениями чувствительных областей датчиков измерялось при помощи оптического микроскопа. Изначально датчики поставлялись на матрицах по 5 штук на каждой. Датчики размещены в горизонтальной плоскости вдоль линии на расстоянии 4 мм между друг другом. Точность пространственного позиционирования датчиков не хуже ± 20 мкм.

Для стабилизации температуры каретки установлены датчики температуры. Калибровка датчиков Холла осуществлялась с помощью ЯМР (точность 10^{-6}) в специальном калибровочном магните в диапазоне от 0.1 Т до 2 Т [34]. При калибровке учитывалось распределение магнитного поля калибровочного магнита. В результате калибровки была измерена зависимость напряжения датчика Холла от величины перпендикулярной компоненты поля в диапазоне от 0.1 Т до 2 Т с относительной точностью не хуже $5 \cdot 10^{-5}$.

Перемещение измерительной каретки осуществлялось шаговым двигателем, ее продольная позиция определялась по числу шагов шагового двигателя и геодезической системой с относительной точностью ± 20 мкм.

Обмотки измеряемых магнитов запитывались источником ИСТ-2 с максимальным током 2.2 кА и напряжением 30 В. Временная нестабильность источника по току $\delta I_{\text{пит}} \leq 5 \cdot 10^{-5}$, соответственно погрешность в величине магнитного поля составляет $\leq 5 \cdot 10^{-5}$.

Измерительная электроника системы разработана в ИЯФ в стандарте VME [35]. Ее параметры позволяют получить относительную точность измерения поля на уровне ± 10 мТ, что для полей на уровне 0.2 до 1.5 Т, составляет ~ 50 до $7 \cdot 10^{-6}$.

Относительная точность измерения магнитных полей использовавшейся системой на основе датчиков Холла и вклад в точность измерения различных погрешностей для поля 1.5 Т представлены в Таблице 4.5.

Таблица 4.5: Точность измерительной системы на основе датчиков Холла.

Погрешность	σ_B/B
Температурная нестабильность датчиков Холла	$4 \cdot 10^{-5}$
Шумы измерительной электроники	$7 \cdot 10^{-6}$
Нестабильность источника питания датчиков Холла	10^{-5}
Нестабильность источника питания магнита	$5 \cdot 10^{-5}$
Суммарная относительная погрешность измерения	$6.5 \cdot 10^{-5}$

При определении интегральных по длине параметров относительная погрешность σ_I/I определяется числом шагов N , погрешностью измерения поля на каждом шаге σ_B и погрешностью определения величины шага σ_l . Для оценки относительной точности измерения интеграла поля σ_I/I можно использовать следующее выражение:

$$\frac{\sigma_I}{I} = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \left(\frac{\sigma_l}{l} + \frac{\sigma_B}{B} \right). \quad (4.2)$$

В случае постоянной длины измеряемой области L и постоянной ошибке при совершении шага σ_l можно представить выражение (4.2) как:

$$\frac{\sigma_I}{I} = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \left(\frac{N \cdot \sigma_l}{L} + \frac{\sigma_B}{B} \right). \quad (4.3)$$

Согласно (4.3) можно определить оптимальное количество шагов. На Рис.4.6 представлена зависимость ошибки интеграла поля от числа шагов сделанных шаговым двигателем при картировании поля. Линия 1 соответствует $\sigma_l = 10$ мкм, $l = 5$ мм, $L=1.5$ м и $\sigma_B/B = 6.5 \cdot 10^{-5}$. Видно, что лучшая точность достигается при малом числе шагов. При ухудшении точности измерения поля

в 10 раз (линия 2, Рис.4.6) наилучшая точность достигается при числе шагов $N = 150$.

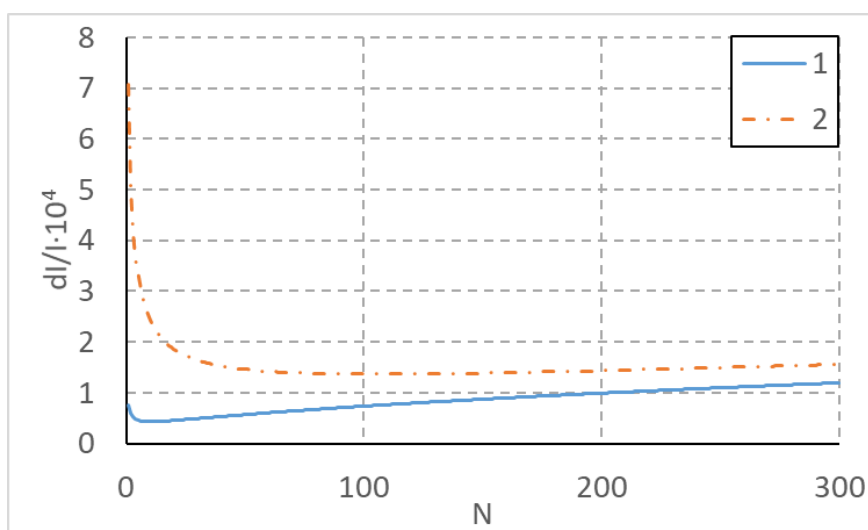


Рис.4.6. Зависимость ошибки измерения интеграла поля от числа шагов двигателя.

Для учета вклада краевых полей, как и для определения качества поля внутри магнита, измерения должны содержать большое число шагов по длине. В результате измерений получалась прямоугольная карта поля с координатами точек, полученными геодезической системой [21].

На Рис.4.7 показаны поправки положения каретки, измеренные геодезической системы. Максимальное горизонтальное отклонение от проектного значения составляет 90 мкм, для вертикального значения 0.3 мм. Наибольший вклад в ошибку измерения вертикальной компоненты поля создается горизонтальной ошибкой выставки каретки. Так, без учета геодезических измерений ошибка в измерении магнитного поля $\Delta B/B \approx G \cdot \Delta x/B$ может достигать для $BD \cdot 5 \cdot 10^{-4}$ и для $BF - 1.8 \cdot 10^{-3}$.

Обработка полученных карт осуществлялась программой, написанной в вычислительной среде *Mathcad* [36]. На основе моделирования движения частиц в измеренном поле рассчитывались основные магнитные

характеристики диполей (Приложение Б): распределение поля вдоль траектории равновесной частицы, однородность поля в центральном сечении, интегральная однородность поля, эффективная магнитная длина, интегральные дипольная, квадрупольная, секступольная и октупольная компоненты.

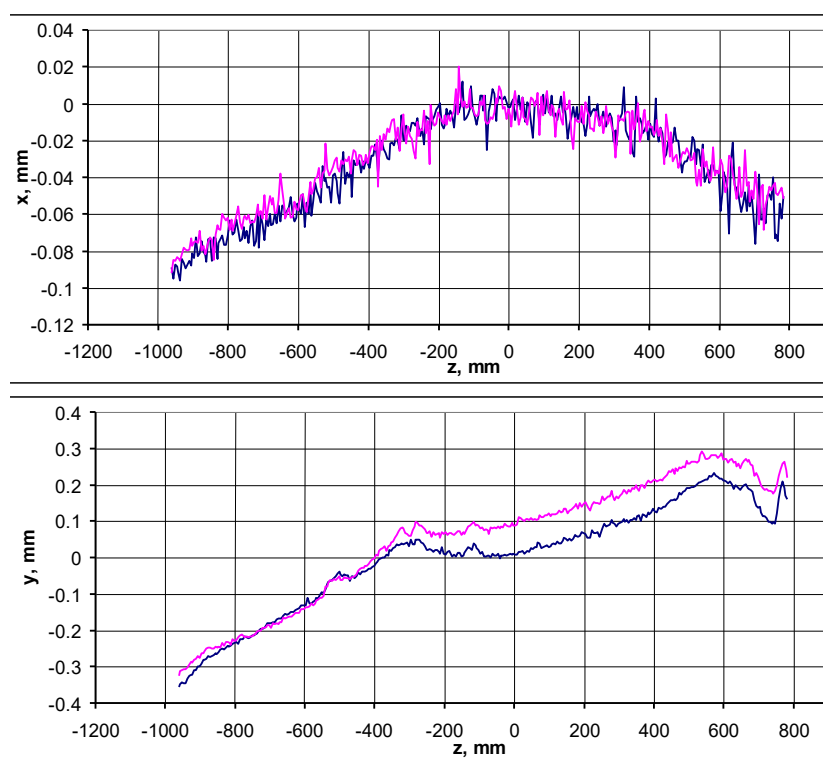


Рис.4.7. Поправки в положении датчиков Холла.

4.4. Результаты магнитных измерений

Измерения дипольных магнитов синхротрона NSLS II [13], [21] производились с использованием компьютерной программы *WinHall*, разработанной в ИЯФ [35]. Для прототипов магнитов измерения проводились на одиннадцати уровнях тока возбуждения катушек, а для серийных диполей – на шести, так, что отношение максимального поля к минимальному – 15. На Рис.4.8 показано интегральное распределение полей для одного из серийных *BF* и *BD* магнитов для различных уровней полей. При проектировании диполей оптимизация профиля полюса и торцевых фасок проводилась для энергии 3 ГэВ

[20]. Из-за различия расчетных и реальных магнитных характеристик стали ярма и наличия остаточных полей, измерения слегка отличаются ($<5 \cdot 10^{-4}$) от расчетной кривой, соответствующей энергии 3 ГэВ.

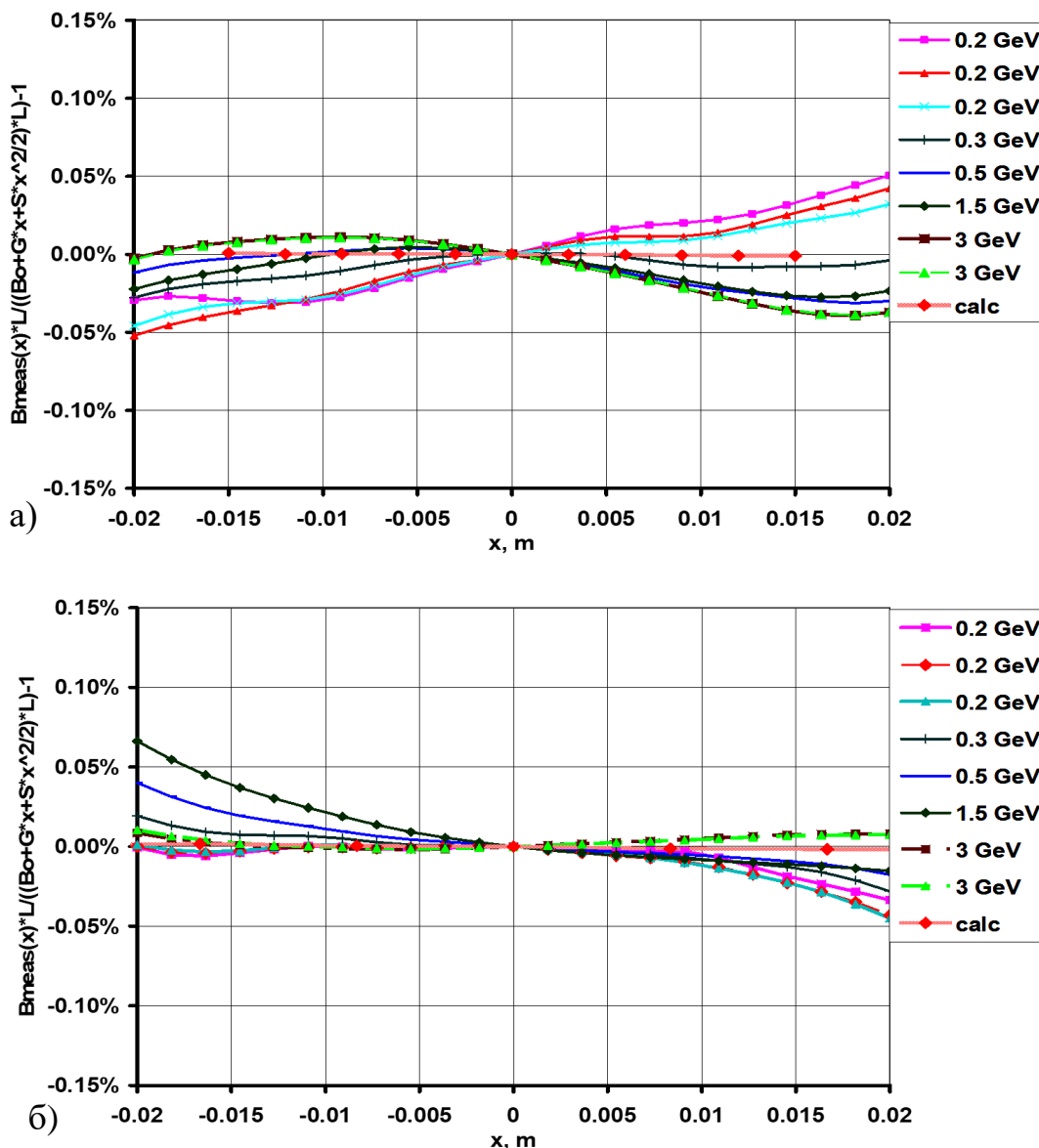


Рис.4.8. Интегральное распределение неоднородности поля BF (а) и BD (б) магнитов для различных уровней энергии кольца. Расчетная кривая помечена «calc».

Для работы бустера с параметрами, близкими к расчетным, важен оптимальный цикл размагничивания. Первоначально предполагалось, что достаточно изменять ток питания в пределах полей «инжекция-выпуск». Однако

измерения показали в этом случае сильную нелинейную зависимость поля от тока на малых уровнях поля (Рис.4.9, кривые «old cycle»). Величина остаточных полей в центре магнита составляла 18 Гс для BF и 26 Гс для BD .

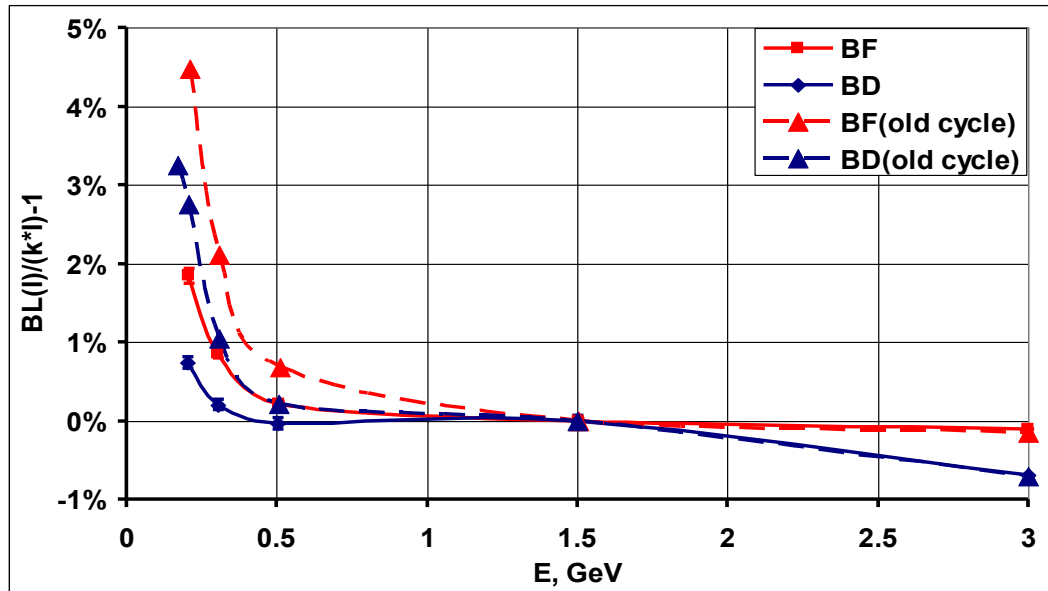


Рис.4.9. Нелинейность интеграла магнитного поля от тока для BF и BD диполей.

Оптимизированный цикл предполагает понижение тока в элементах до нулевого значения (Рис.4.9), и для него максимальная нелинейность интеграла магнитного поля от тока составляет 1.8% для BF - и 0.7% для BD -магнитов. Требуемый интеграл магнитного поля на энергии 3 ГэВ был получен за счет коррекции поперечной выставки диполей. О способе коррекции интеграла поля изложено в разделе 4.5. На Рис.4.10 представлена ошибка угла поворота диполей от энергии. Ниже на графиках приведены усредненные значения параметров диполя и среднеквадратичный разброс для всей серии BD и BF диполей в зависимости от энергии частиц. Максимальные ошибки наблюдаются в области малых полей. Это объясняется точностью измерительной системы и дисперсией магнитных свойств стали диполей.

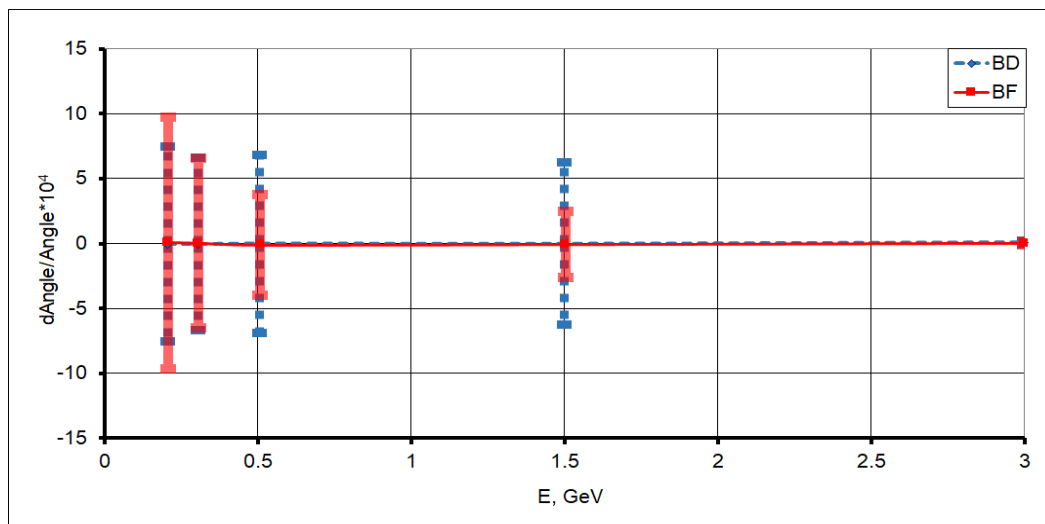


Рис.4.10. Среднеквадратичное отклонение интеграла магнитного поля для различных энергий кольца.

В сравнении со старым циклом размагничивания новый цикл дает меньшую нелинейность градиента и секступольной компоненты поля от тока в области малых полей (Рис.4.11, Рис.4.12).

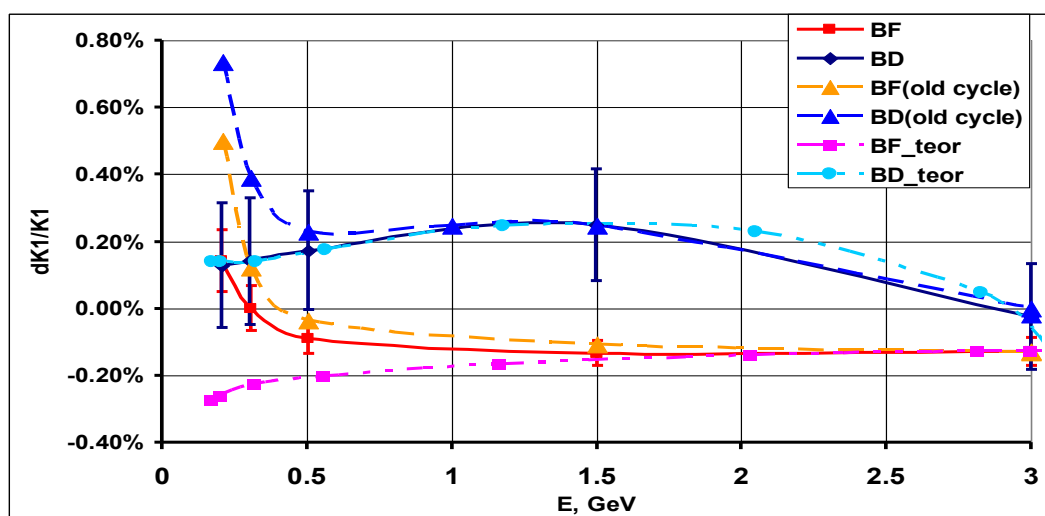


Рис.4.11. Отклонение градиента интеграла поля от номинального параметра BD и BF магнитов. «Old cycle»- кривые для исходного цикла, «teor» – кривая моделирования.

Для BF диполей ошибка в интегральных параметрах из-за остаточных полей составляет: для градиента – 0.4%, для секступольной компоненты поля – 3.3%. В случае BD магнита $\Delta K_1/K_1 = 0.6\%$ и $\Delta K_2/K_2 = 5.1\%$ для квадрупольной и

секступольной компоненты поля соответственно. На Рис.4.11 показано изменение градиента интеграла поля от энергии синхротрона. Расчетная зависимость интегрального градиента имеет хорошее согласие с измеренными данными, соответствующим новому циклу размагничивания элементов. Оценка относительной среднеквадратичной точности измерения интеграла градиента поля на энергии 3 GeV для BF магнита составляет $\pm 7 \cdot 10^{-5}$, для BD $\pm 5 \cdot 10^{-5}$. Относительная точность измерения градиента для энергии инжекции в 15 раз хуже. Относительная точность воспроизведения интеграла градиента, определенная качеством изготовления диполей, составляет для BF магнита $\pm 4 \cdot 10^{-4}$, для BD - $\pm 1.6 \cdot 10^{-3}$.

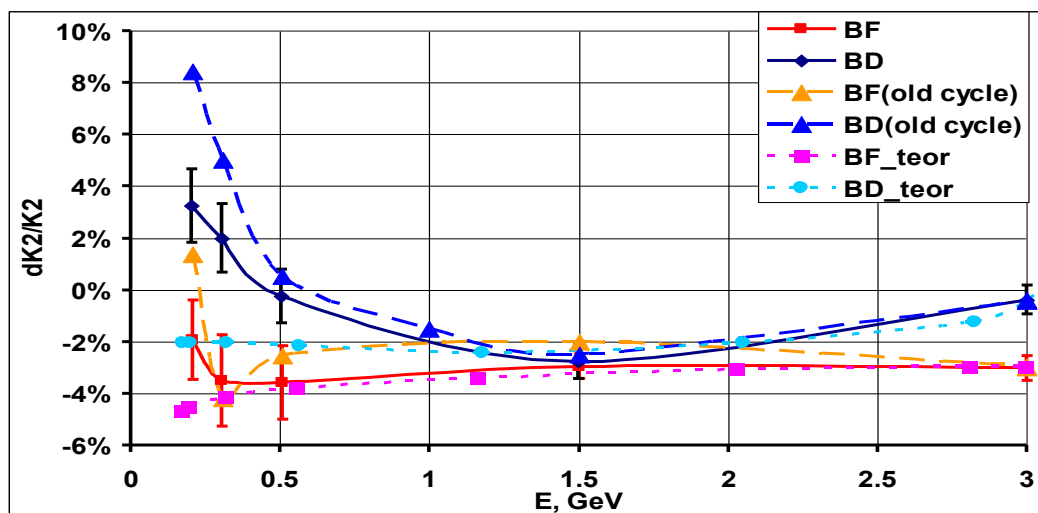


Рис.4.12. Отклонение секступольной компоненты интегрального поля от номинального параметра BD и BF магнитов. «Old cycle»- кривые для исходного цикла, «teor» – кривая моделирования.

Изменение интеграла секступольной компоненты поля от энергии показано на Рис.4.12. Расчетная и экспериментальная зависимости хорошо согласуются для высокой энергии. В области инжекции отклонение секступольной компоненты от расчета определяется остаточными полями. Относительная среднеквадратичная точность измерения интеграла секступольной компоненты поля на энергии 3 GeV для BF магнита составляет $\pm 8 \cdot 10^{-4}$, для BD $\pm 6 \cdot 10^{-4}$. Ошибки интеграла секступольной компоненты поля

связанные с точностью изготовления магнита составляют $\pm 4 \cdot 10^{-3}$ для BF и $\pm 5 \cdot 10^{-3}$ для BD .

Изменение эффективной длины магнита от энергии незначительно и показано на Рис.4.13. Наибольшее отклонение $4 \cdot 10^{-4}$ для BD связано с насыщением железа. Относительная точность продольного размера ярма $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ для BF и $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ для BD .

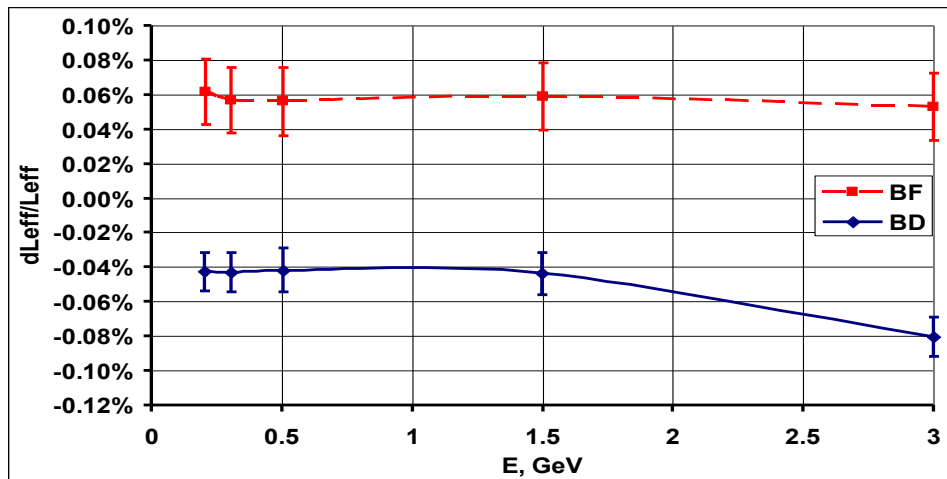


Рис.4.13. Изменение эффективной магнитной длины от энергии кольца.

На Рис.4.14 показаны графики поперечного распределения поля диполей в центральном сечении за вычетом расчетных градиентной и секступольной компонент на энергии 3 ГэВ. Максимальное отклонение поля от номинального (отмеченного «calc» на Рис.4.14) составляет не более $4 \cdot 10^{-4}$ и объясняется точностью изготовления полюса и торцевых фасок.

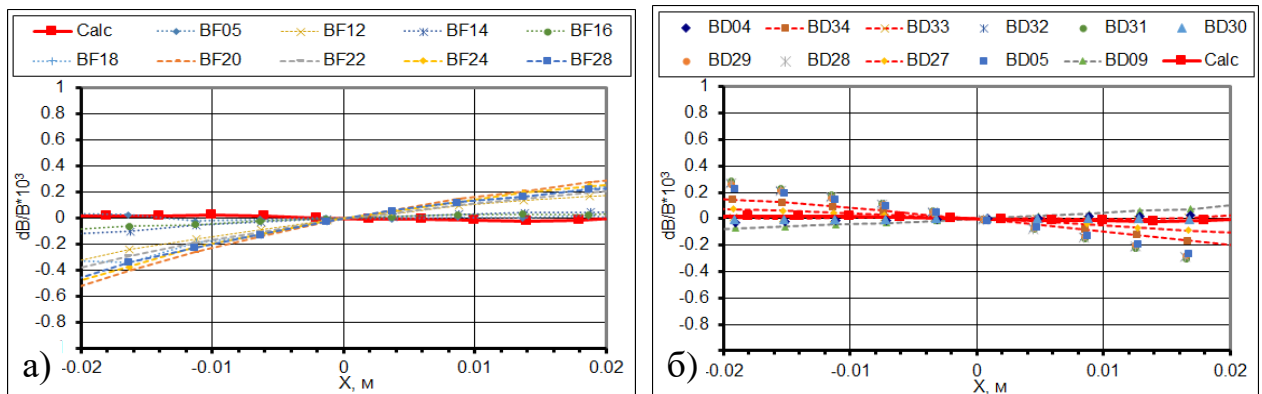


Рис.4.14. Распределения однородности магнитного поля в центральном сечении для выборки поворотных магнитов BF (а) и BD (б) ($E = 3$ ГэВ).

Интегральная неоднородность поля магнитов как функция поперечной координаты показана на Рис.4.15 для энергии выпуска пучка из бустера. Как и раньше, расчетные градиентная и секступольная компоненты вычтены.

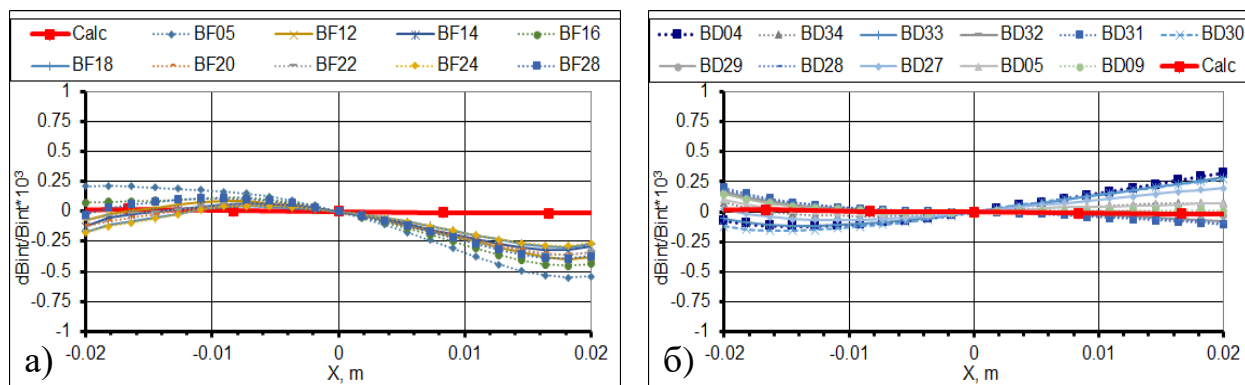


Рис.4.15. Распределения интегральной однородности магнитного поля для выборки поворотных магнитов *BF* (а) и *BD* (б) ($E = 3$ ГэВ).

Моделирование динамики пучка в Главе 1 показало, что после коррекции орбиты и восстановления бетатронной рабочей точки приведенная неоднородность незначительно влияет на размер динамической апертуры и обеспечивает высокую эффективность захвата и ускорения пучка. Максимальное отклонение интеграла поля от требуемого значения составляет $5 \cdot 10^{-4}$ для *BF* диполей и $3 \cdot 10^{-4}$ для *BD*, что, согласно Таблице 4.3, сопоставимо с точностью магнитных измерений.

В Таблицах 4.6 и 4.7 представлены усредненные значения параметров диполей, полученные с помощью обработки результатов магнитных измерений. Стандартные отклонения определялись по каждому типу магнитов. Согласно таблицам, наибольший относительный разброс параметров приходится на область малых полей.

Оценку ошибки параметров диполей, связанную с погрешностями изготовления магнитов можно получить из столбцов, соответствующих

максимальному полю. Так относительная точность производства магнитов BD (BF) 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.

Таблица 4.6: 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 ²	-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 ³	-0.4 \pm 7.0	-2.1 \pm 11	-7.5 \pm 11	-55.2 \pm 20	-72.6 \pm 47

Таблица 4.7: 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 ²	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 ³	-7.7 \pm 5.3	-2.3 \pm 7.8	4.4 \pm 12	11.9 \pm 19	7.2 \pm 26

В целом результаты моделирования хорошо совпадают с результатами измерений. Из-за совмещенных компонент магнитного поля необходима точная координатная привязка измеряемой магнитной оси и геодезических знаков, установленных на ярме магнита. Кроме того, для минимизации погрешностей, связанных с реальным процессом изготовления магнитов, крайне желательно производство и оптимизация прототипов, на которых отрабатывается довольно сложная конфигурация корректирующих торцевых фасок. Для малых отклонений в параметрах диполей в разделе 4.6 показан относительно простой способ коррекции качества поля.

4.5. Выставка диполей

Как уже не раз подчеркивалось, из-за наличия комбинации различных компонент поля необходима точная пространственная выставка диполей в тоннеле. Для привязки магнитной оси диполей к геодезическим знакам, расположенным на базовых поверхностях магнитопровода, использовалась та же система геодезической выставки (лазерный трекер и набор знаков), что и для проведения магнитных измерений. Выставка геознаков осуществлялась на номинальных полях, соответствующих энергии выпуска. Поперечное положение определяется из следующих условий:

$$dB \cdot L = \left(G \cdot dx + \frac{S \cdot dx^2}{2} \right) \cdot L, \quad (4.4)$$

$$dx = -(G - \sqrt{G^2 + 2 \cdot S \cdot dB}) / S \approx dB \cdot L / (G \cdot L),$$

где $dB \cdot L$ – отклонение интеграла магнитного поля от требуемой величины; dx – необходимая поправка положения диполя в поперечном направлении для выставки диполя на кольце. Результирующие поправки для горизонтального положения диполей показаны на Рис.4.16.

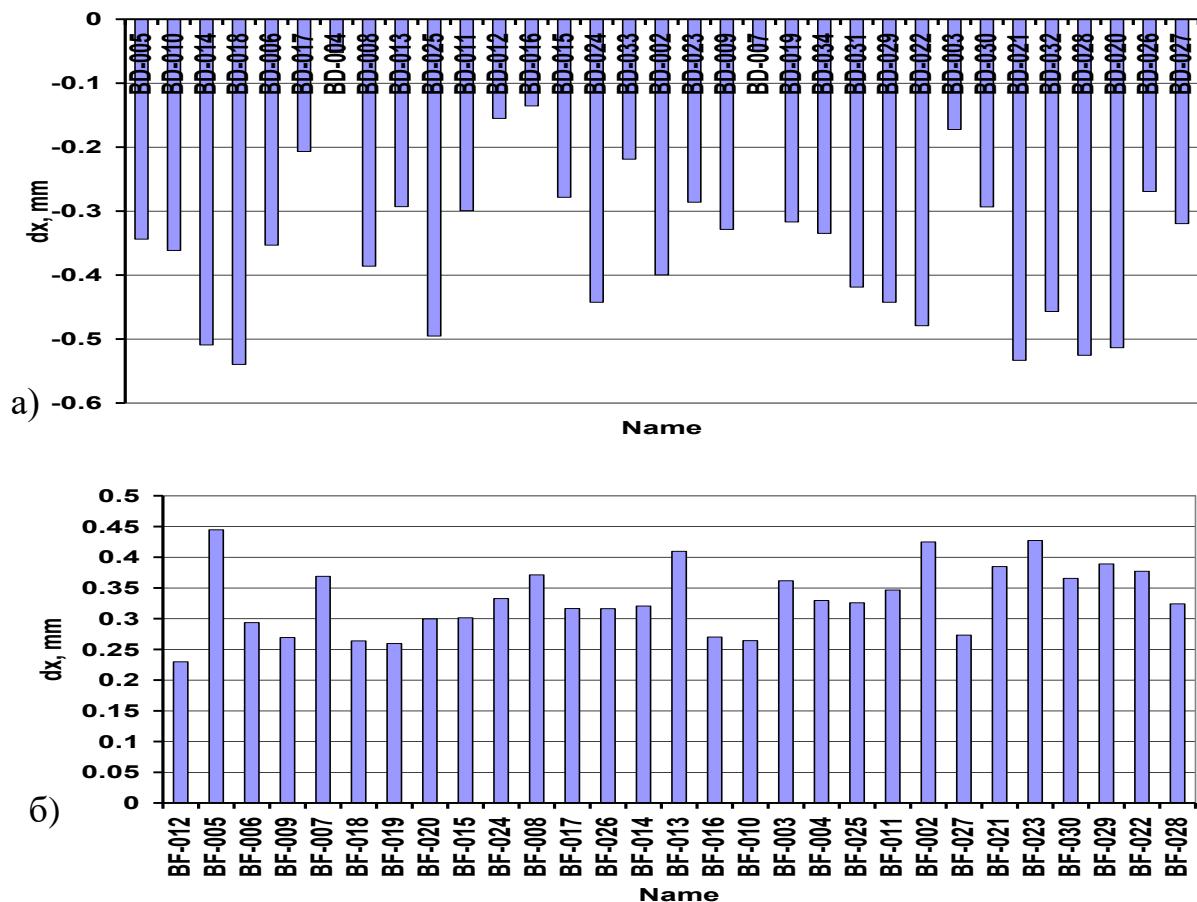


Рис.4.16. Коррекция выставки диполей *BD* (а) и *BF* (б) в кольце.

4.6. Коррекция параметров

Расчеты оптики и динамики предъявляют высокие требования к погрешностям интегральных значений дипольного поля и его градиента. Интеграл поля, как было показано в предыдущем параграфе, можно корректировать небольшим смещением магнита по радиусу. Коррекция интеграла градиента поля производилась изменением межполюсного зазора магнита, и, поскольку при этом изменялся и интеграл поля, последующим горизонтальным смещением магнита, как это описывалось выше.

Межполюсной зазор изменялся с помощью прокладок из коптона (полиимида), размещаемых на поверхности соединения верхней и нижней половин ярма. Исходная, расчетная толщина коптона была выбрана 50 мкм.

Зависимость поля от величин относительного изменения зазора и поперечного смещения магнита имеет вид:

$$B_y(x) = B_0 \cdot (1 + dh/h) + dB + (G_0 \cdot (1 + dh/h) + dG) \cdot (x + dx) + \frac{S_0 \cdot (x + dx)^2}{2}, \quad (4.5)$$

где индексом «0» обозначены расчетные поле, градиент и секступольная компонента. Выражения для коррекции зазора и выставки диполя выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} dx &\approx \frac{B_0 \cdot dG - G_0 \cdot dB}{G_0^2 - B_0 \cdot S} \\ dh/h &\approx \frac{G_0 \cdot dG - S_0 \cdot dB}{G_0^2 - B_0 \cdot S} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Так при ошибках в поле $dB/B = -2 \cdot 10^{-3}$ и $dG/G = 1 \cdot 10^{-3}$ коррекция зазора составляет для магнита BF $dh/h = -50$ мкм, а для BD $-dh/h = +22$ мкм. При этом величина необходимого горизонтального смещения $dx = 220$ мкм для BF и $dx = -240$ мкм для BD .

4.7. Импульсные магнитные измерения

Изменение магнитного поля во времени при подъеме энергии, как уже обсуждалось в Главе 1, приводит к возникновению вихревых токов в вакуумной камере, которые искажают магнитное поле. Для учета влияния вакуумной камеры и её заземления были проведены импульсные магнитные измерения [22]. Для этого был разработан стенд, который обеспечивал измерение мультипольных компонент магнитного поля в области ± 2 см относительно равновесной орбиты в течение цикла ускорения с шагом по времени 50 мс. Измерения проводились с вакуумной камерой и без нее для оценки влияния на параметры диполей. Измерительный датчик представлял собой пять многовитковых катушек (Рис.4.17), расположенных на основе из

стеклопластика. Расстояние между центрами катушек 7 мм, ширина – 4 мм, длина – 1600 мм. Каждая катушка была высотой 2 мм и имела 14 витков, которые обеспечивали достаточный уровень сигнал при стандартном цикле тока возбуждения катушек магнита (Рис.4.18).

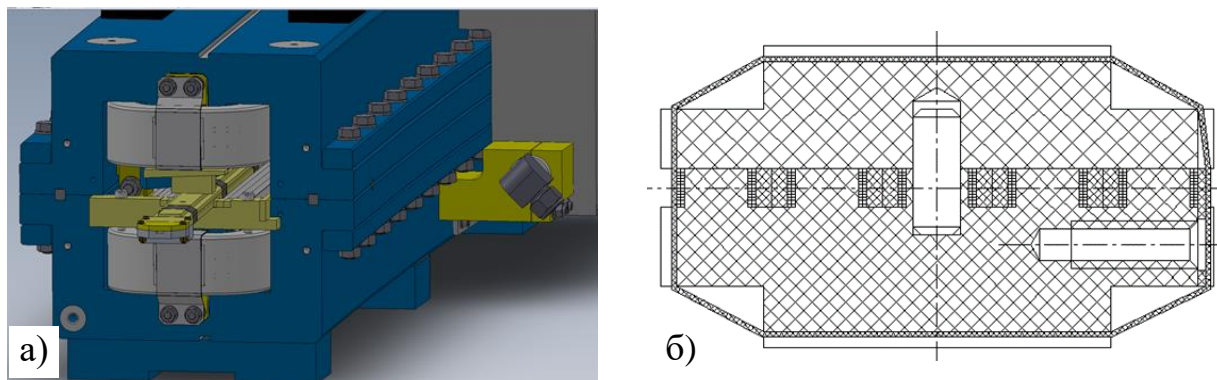


Рис.4.17. Магнит с установленными измерительными катушками (а) и поперечное сечение блока измерительных катушек (б).

На Рис.4.18 показана типичная осциллограмма измерительного сигнала. Видно, что при энергии инъекции сигнал имеет большую шумовую компоненту, вызванную особенностью конструкции источника питания, но при интегрировании обеспечивается приемлемая точность, позволяющая надежно определять характеристики магнитного поля.

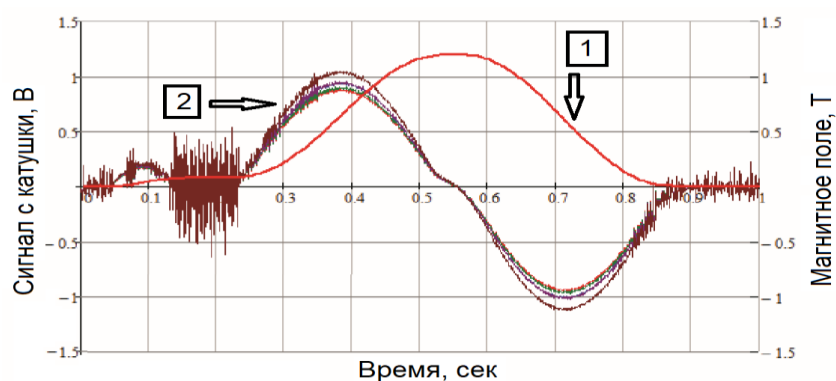


Рис.4.18. Магнитное поле в *BD* диполе (1) и сигналы с измерительных катушек (2).

На Рис.4.19 показано изменение градиентной и секступольной компонент магнитного поля из-за влияния вакуумной камеры. Результаты имеют хорошее согласие с моделированием, соответствующим кривой «teor» на Рис.4.19.

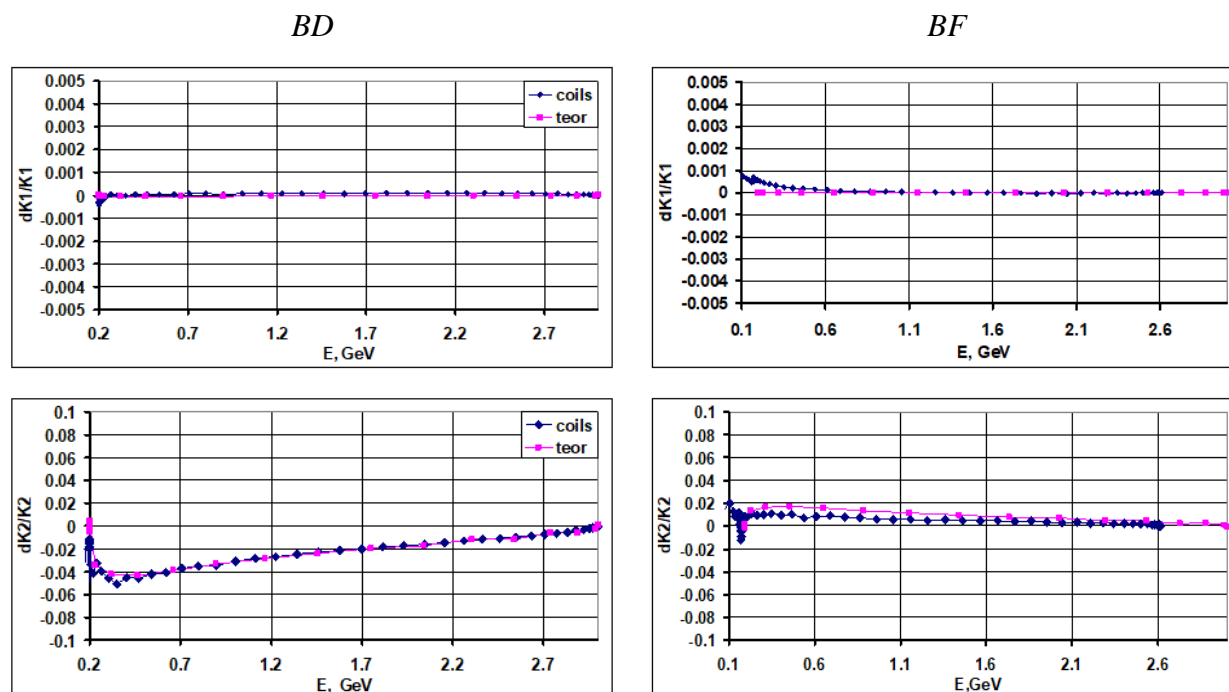


Рис.4.19. Влияние вакуумной камеры на параметры BD и BF диполей:
 $dK1/K1$ – изменение градиентной компоненты поля;
 $dK2/K2$ – изменение секступольной компоненты поля.

Для секступольной компоненты дипольного магнита BD отклонение составляет -5% (в районе ≈ 0.4 ГэВ); для BF отклонение этой компоненты не превышает 2% . Дипольная и градиентная компоненты меняются одинаково, и нормированный градиент K_1 не отклоняется от требуемой величины.

Важной особенностью рассматриваемых магнитов с совмещенными функциями, работающих в импульсном режиме, является наличие ненулевого тока, протекающего через поперечное сечение вакуумной камеры (Рис.4.20), который индуцируется неоднородным магнитным полем и приводит к появлению дополнительных компонент магнитного поля в течении цикла. Рис.4.20 показывает основной ток в обмотках диполя (характеризующий цикл ускорения), расчетный ток, протекающий через заземление вакуумной камеры

[19] и его измеренное значение. Видно, расчеты имеют хорошее согласие с результатами измерений.

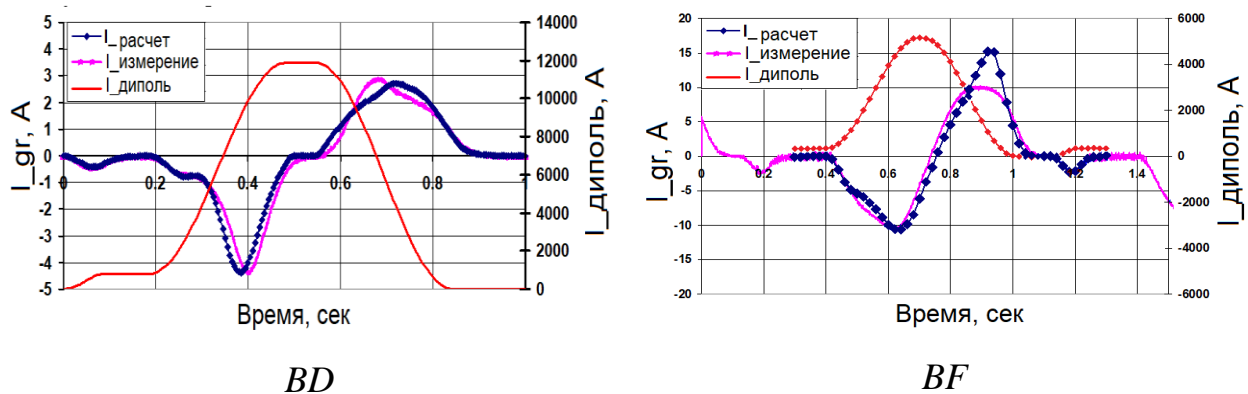


Рис.4.20. Ток I_g протекающий через заземление вакуумной камеры и ток возбуждения катушки магнита I_d во время цикла ускорения.

На Рис.4.21 показано влияние заземления вакуумной камеры. Заземление осуществлялось с обоих торцов дипольных магнитов.

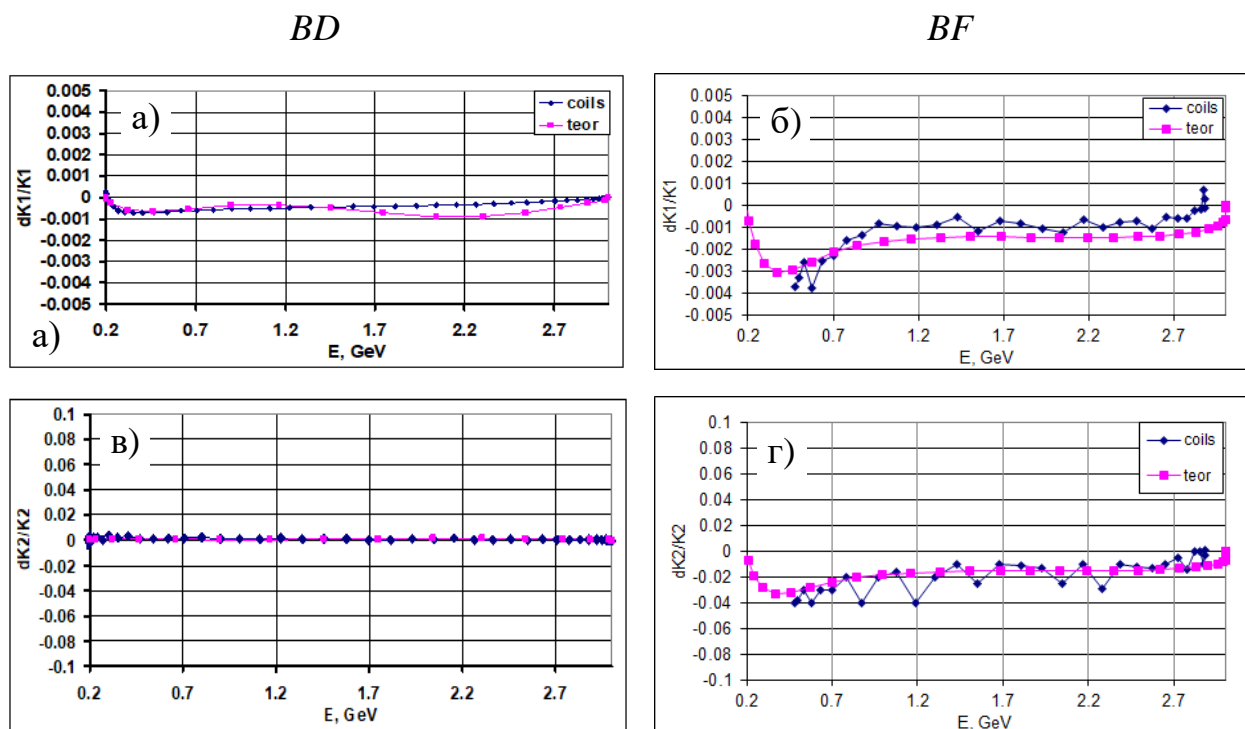


Рис.4.21. Влияние “заземления” вакуумной камеры на параметры BD и BF диполей: (а,б) – изменение градиентной компоненты поля; (в,г) – изменение секступольной компоненты поля.

Согласно Рис.4.21 результаты моделирования и измерений хорошо совпадают. Наблюдается существенное отклонение градиента магнита $BF \Delta G/G \approx 3 \cdot 10^{-3}$ относительно проектных значений, что согласно результатам моделирования ошибок в Главе 1, приведет к пересечению параметрического резонанса. Заметно изменяется и секступольная компонента поля BF . Это объясняется большим, по сравнению с BD , градиентом и смещением вакуумной камеры относительно центра полюса. Измеренный эффект был скомпенсирован в процессе ускорения с помощью коррекции бетатронных частот и хроматизма отдельно стоящими квадрупольными и секступольными линзами.

4.8. Квадрупольные и секступольные линзы

В кольце синхротрона имеется 24 квадрупольных и 16 секступольных линз (Рис.4.22). Они достаточно слабые, и их влияние на оптику и динамику синхротрона невелико, поэтому в этом параграфе опишем их кратко.

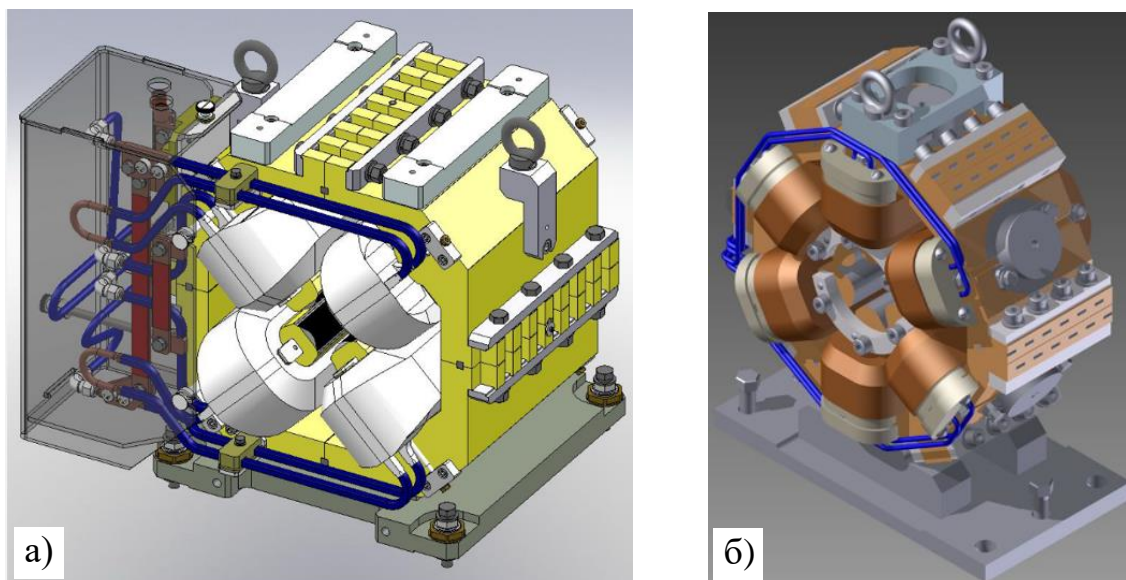


Рис.4.22. Внешний вид квадрупольной (а) и секступольной линз (б).

Параметры линз приведены в Таблице 4.8. Столбцы «проект» и «модель» обозначают проектное значение и то, которое получилось по результатам магнитных измерений и использовалось в модели кольца.

Таблица 4.8: Основные параметры квадрупольной и секступольной линз.

Параметр	Проект	Модель
Квадрупольная линза		
Количество	24	24
Ток (А)	167	161.269
Длина (м)	0.3	0.30525
G (Т/м)	20.425	20.115
Секступольная линза		
Количество	16	16
Ток (А)	5	5
Длина (м)	0.12	0.12
B'' (Т/м ²)	400	376.98

На Рис.4.23 показаны сводные результаты измерения всех квадрупольных линз кольца. Максимальное отклонение приведенного градиента от расчетного оказалось $|\Delta K_1/K_1| < 0.3\%$.

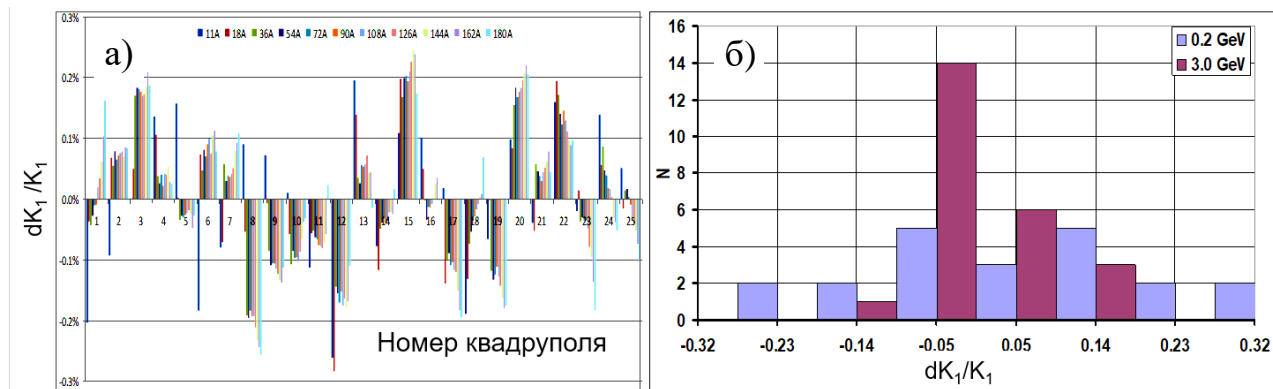


Рис.4.23. Результаты магнитных измерений квадрупольных линз бустерного синхротрона. (а) отклонение приведенного градиента для разных токов возбуждения. (б) гистограмма, показывающая количество линз в зависимости от отклонения приведенного градиента для инжекции и выпуска пучка.

График на Рис.4.24 показывает относительное отклонение градиента линзы от линейного поведения в зависимости от тока возбуждения (петля гистерезиса). Зависимость нелинейная для малых и больших токов (энергий).

Первое объясняется неравномерностью намагничивания ярма магнитов, второе – значительным насыщением.

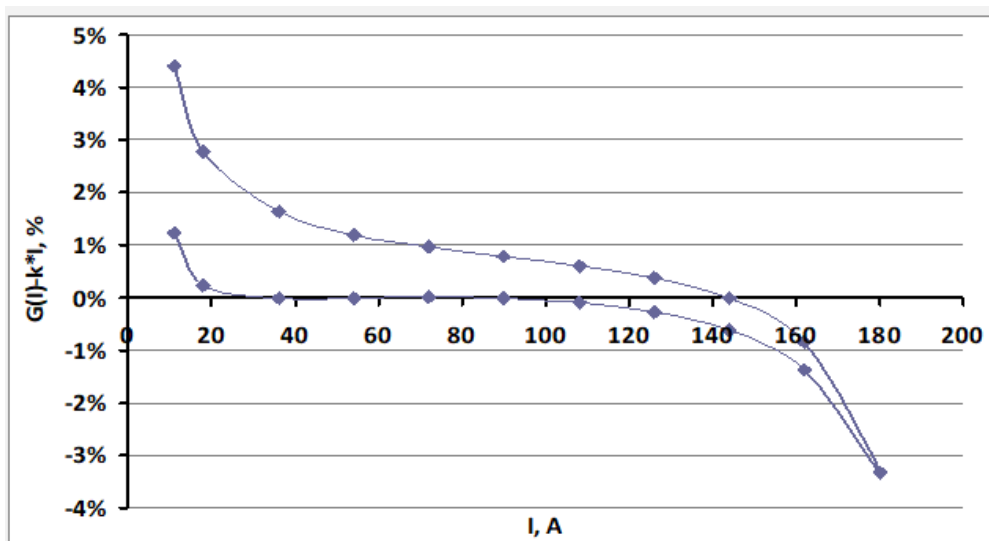


Рис.4.24. Зависимость относительного измерения центрального градиента квадрупольной линзы от тока возбуждения. Нижняя ветвь графика соответствует увеличению энергии, верхняя – уменьшению.

Гистограмма, показывающая число секступольных линз в зависимости от относительного отклонения нормализованной второй производной поля приведена на Рис.4.25. Отличие поведения второй производной поля от линейного в зависимости от тока возбуждения показана на Рис.4.26.

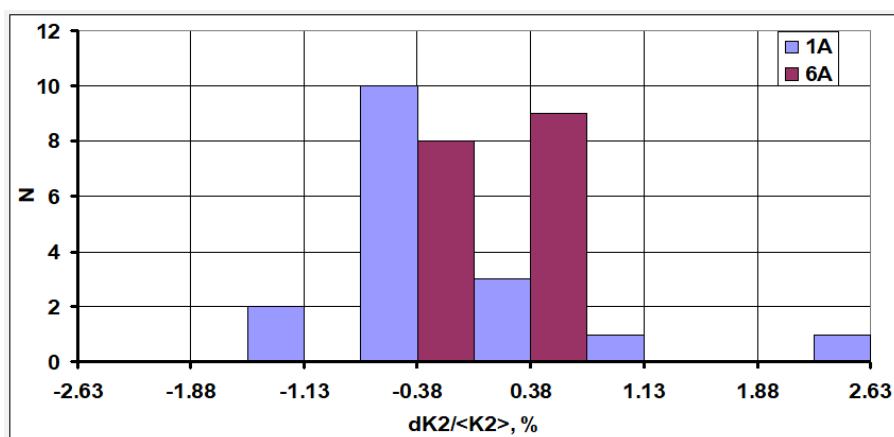


Рис.4.25. Количество секступольных линз в зависимости от отклонения нормализованной второй производной поля для тока, соответствующего (1 А) и (6 А).

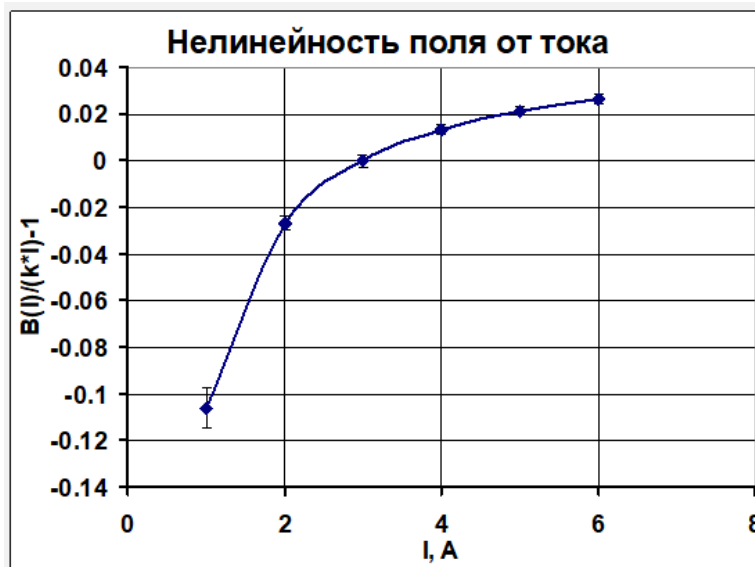


Рис.4.26. Нелинейность поля секступольной линзы, как функция тока возбуждения.

Таблица 4.9 показывает, что все квадрупольные и секступольные линзы удовлетворяют требованиям, предъявляемым к качеству магнитного поля со стороны динамики пучка.

Таблица 4.9: Среднеквадратичное отличие интеграла градиента ансамбля квадрупольных и секступольных линз.

	Требование	200 МэВ	3 ГэВ
Квадрупольные линзы			
$\Delta K_1/K_1 \times 10^3$	5.0	2.3	0.87
Секступольные линзы			
$\Delta K_2/K_2 \times 10^2$	5.0	2.1	0.25

Глава 5. Запуск бустерного кольца NSLS-II

До сентября 2012 года все оборудование синхротронного кольца было доставлено в Брукхейвенскую национальную лабораторию. Сборка бустера была осуществлена до 2013 года [16], [23]. На Рис.5.1 представлен арка бустерного синхротрона установки NSLS-II.



Рис.5.1. Арка бустера NSLS-II.

В 2013 году были проведены дополнительные испытания инжектора: испытание всех систем с эмуляцией пучка, усовершенствование высокоуровневых программ, тестирование и улучшения систем управления. Разрешение на запуск инжекционного комплекса было получено в ноябре 2013 года. В декабре был получен захват в ВЧ сепаратрису и к концу декабря пучок был ускорен до 3 ГэВ. В феврале 2014 года параметры бустерного синхротрона были доведены до проектных [17], [18]. Быстрые и эффективные запуск и получение проектных параметров являются прямым следствием результатов работы, описываемой в диссертации, которые обсуждаются в этой главе.

5.1. Коррекция выставки магнитов

На основе магнитных измерений и геодезической съемки оборудования бустера в тоннеле была разработана реалистичная модель ускорителя. На

последующих этапах запуска и настройки бустера магнитная структура кольца уточнялась на основе измерений замкнутой орбиты пучка, искажения оптических функций и бетатронных частот. Были введены поправки к расчетным координатам магнитных элементов и датчиков положения пучка, оценено изменение периметра кольца. На Рис.5.2 представлены отклонения от проектных координат магнитных элементов полученные из геодезической съемки (данные «Геодезия») и уточненные данные с помощью оптической модели (данные «Модель»). Поправки, полученные из модели, показаны на рисунках как dX , dY – линии.

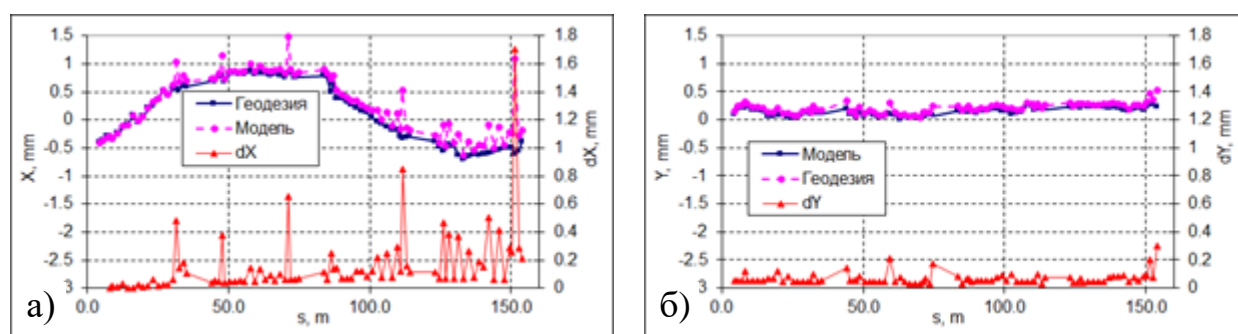


Рис.5.2. Выставка магнитных элементов вдоль кольца согласно геодезическим измерениям (“Геодезия”) и оптической модели (“Модель”): горизонтальная плоскость (а), вертикальная плоскость (б).

В Таблице 5.1 показаны результаты коррекции исходных геодезических данных полученных из модели магнитной структуры. Согласно таблице, стандартное отклонение по всем элементам за исключением семейств линз QD и QG не превышает для горизонтальной плоскости 75 мкм и для вертикальной 42 мкм. Для дипольных магнитов систематическое отклонение геометрической оси от магнитной составляет для диполя BD : $\Delta X = 81$ мкм, $\Delta Y = 51$ мкм и для диполя BF : $\Delta X = 150$ мкм, $\Delta Y = 68$ мкм. Среднеквадратическое отклонение по семействам BD и BF так же находятся в допусках, предъявляемых на стадии проектирования, и составляют для BD : $\sigma_X = 60$ мкм, $\sigma_Y = 12$ мкм и для BF : $\sigma_X = 140$ мкм, $\sigma_Y = 35$ мкм. Из моделирования следует, что периметр кольца

отличается от расчетного на 3.1 мм, что соответствует об отклонении энергии при фиксированной частоте резонаторов $2.1 \cdot 10^{-3}$.

Таблица 5.1: Расчетные систематические и среднеквадратичные поправки к выставке элементов.

Name	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
Total	92*	68	75*	42

5.2. Система впуска и выпуска

Впуск в бустер осуществляется из линейного ускорителя с энергией 200 МэВ. Возможны два режима впуска пучка в бустер:

- Однооборотный впуск одного сгустка с зарядом 0.5 нКл или последовательности от 80 до 150 сгустков, с интервалом между сгустками 2 нс с общим зарядом 15 нКл.
- Режим накопления. В этом случае новая порция, которая удваивает заряд в каждом сгустке, добавляется через 100 мс.

Для реализации однооборотного впуска и накопления в длинной прямолинейной секции установлены четыре быстрых ферритовых магнитикера [10] и импульсный септум-магнит с пассивным медным экраном. Вакуумная камера кикеров является керамической. На внутренней поверхности камеры нанесено покрытие TiN толщиной 5 мкм в виде полос шириной 3.4 мм

с шагом 3.4 мм. Для септум-магнита вакуумная камера изготовлена из тонкостенной нержавеющей стали.

Система выпуска из бустера состоит из четырех медленных магнитов («бамп»-магнитов) для локального искажения орбиты, септум-магнита с токовым ножом, септум-магнита с постоянным током возбуждения обмотки и кикера. Согласно технической спецификации общее угловое отклонение пучка, вызванное нестабильностью выпускной системы, не должно превышать 20% от углового размера пучка. Это означает, что стабильность магнитов системы выпуска должна быть лучше, чем 0.02%. Пульсации по всей плоской вершине импульса кикера (300 нсек) должны составлять менее 0.5%.

На Рис.5.3 показана форма импульса магнитного поля в кикерах, определенная из измерения положения пучка на флуоресцентных экранах в бустере и канале выпуска из бустера. Измеренные данные имеют хорошее согласие с расчетными данными [10].

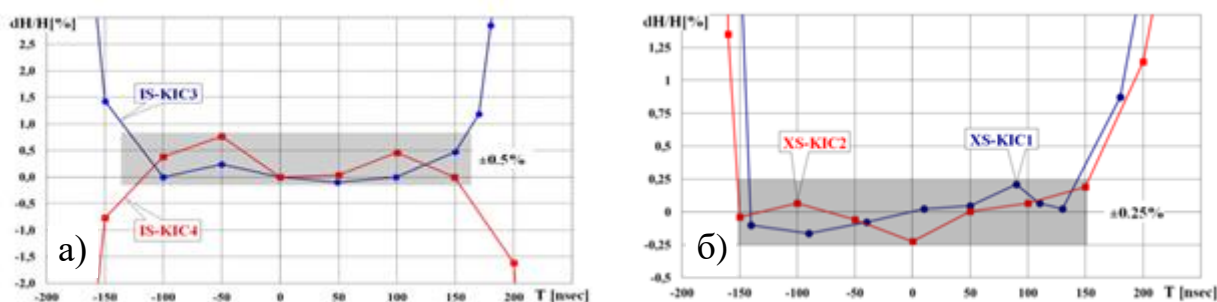


Рис.5.3. Форма импульса кикера на впуске (а) и выпуске (б).

Результаты измерений влияния магнитного поля, создаваемого «бамп»-магнитами во время выпуска, представлены на Рис.5.4. Во время импульса «бамп»-магнитов (кривая «Pulser SIN» в условных единицах, Рис.5.4,а) происходит экранирование магнитного поля вакуумной камерой, что объясняет отличие формы сигналов «Pulser SIN» и «XS_PKU1». Рис.5.4,б показывает максимальное искажение равновесной орбиты для горизонтального движения – dX и для вертикального движения – dY . Максимальная амплитуда на азимуте

ножа составляет 17 мм, что соответствует отклонению 9.5 мм на азимуте пикапов для горизонтального движения. Максимальные искажения орбиты вне промежутка выпуска составляют не более 50 мкм, что говорит о хорошей согласованности между собой бамп-магнитов.

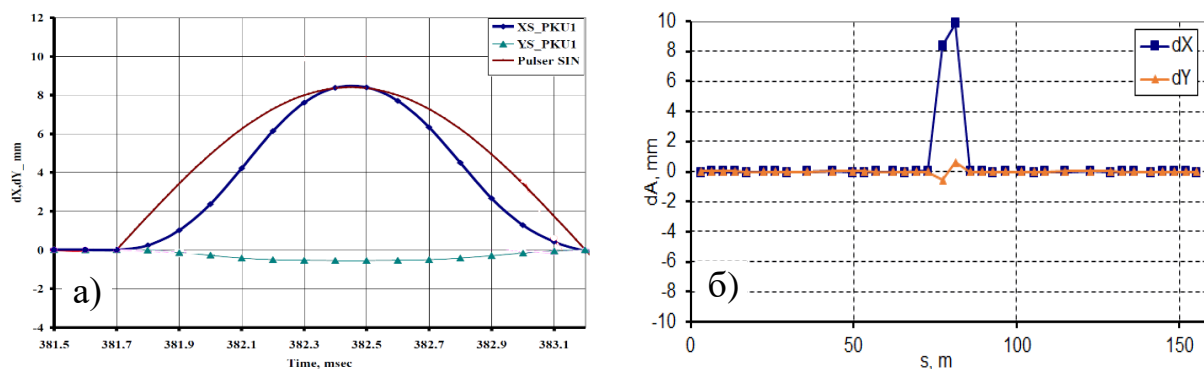


Рис.5.4. Влияние бамп-магнитов на замкнутую орбиту бустера: (а) изменение орбиты на датчике положения пучка РКU1 в течении импульса; (б) максимальное искажение орбиты вдоль кольца.

5.3. Измерение и коррекция равновесной орбиты пучка

После уточнения модели магнитной структуры была проведена глобальная коррекция равновесной орбиты пучка в течении процесса ускорения. Интервал, в течение которого проходила коррекция оптики и орбиты составлял 400 мс, что соответствовало 4000 точек кривой импульса тока, задаваемой компьютером. На оставшемся интервале времени был введен профиль изменения поля в виде спадающей синусоиды для корректирующих магнитов. Это позволило улучшить повторяемость оптики от цикла к циклу и обеспечить стационарный режим работы бустера за короткий промежуток времени после его включения.

Для повышения эффективности захвата и ускорения была проведена совместная оптимизация орбиты в промежутках впуска и выпуска частиц как каналов, так и бустера. Это позволило повысить эффективность захвата с 30% до 70%. На Рис.5.5 показано измеренное искажение орбиты («Измерение») до и после коррекции орбиты для энергии пучка 3 ГэВ. Согласно графикам,

искажение орбиты до коррекции орбиты лежит внутри области ожидаемых значений (кривые σ_x и σ_y) оценка которых была проведена в Главе 1. Искражение орбиты после коррекции является приемлемым, незначительно превышая допуск. Среднеквадратичное искажение орбиты по всем пикапам после коррекции уменьшается с 0.94 мм до 0.36 мм по радиусу и с 0.67 мм до 0.20 мм по вертикали. Стоит отметить, что коррекция орбиты осуществлялась с сохранением требуемой координаты и угла на азимуте выпуска пучка.

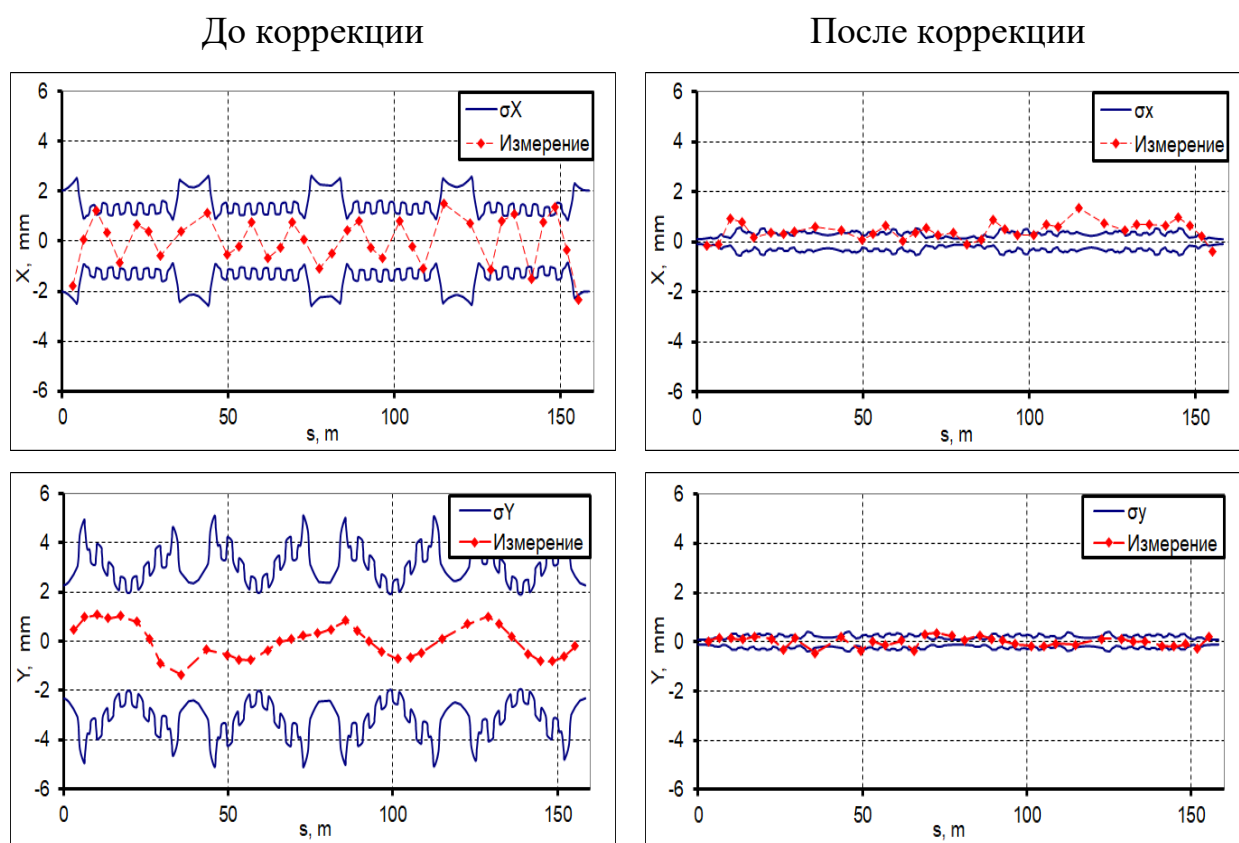


Рис.5.5. Измеренное искажение орбиты на энергии 3 ГэВ и ожидаемые отклонения орбиты (σ_x , σ_y) согласно моделированию ошибок до и после коррекции орбиты.

На Рис.5.6 показаны необходимые силы корректоров (линия «1»), необходимые для коррекции орбиты на энергии 3 ГэВ. Линия «2» показывает ожидаемые силы корректоров согласно моделированию. Максимально возможные силы корректоров для данной энергии показаны линией «3». Средняя сила корректоров необходимая для коррекции орбиты составляет: для горизонтальной 0.127 мрад и для вертикальной 0.087 мрад. Силы корректоров

находятся в пределах ожидаемых значений, что говорит о соответствии качества производства магнитных элементов техническому заданию.

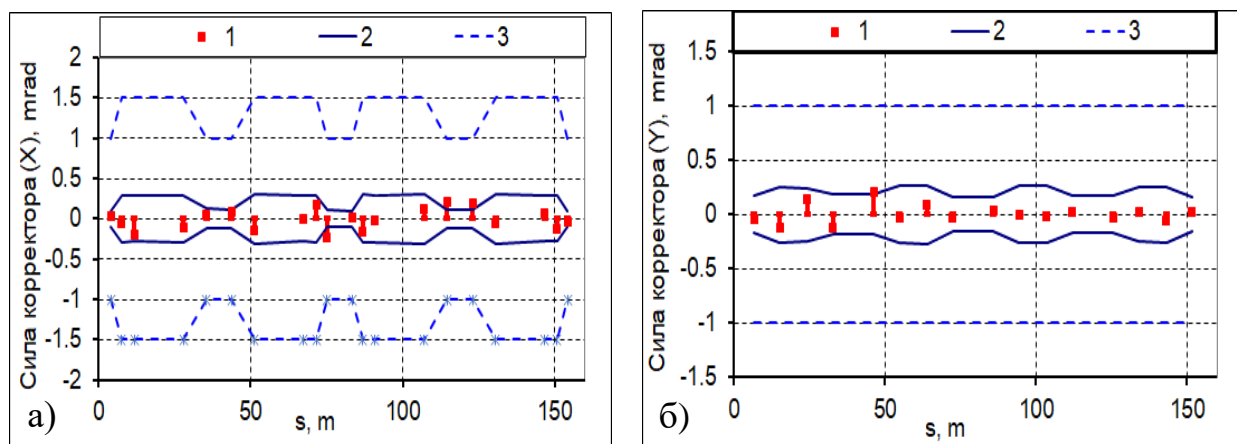


Рис.5.6. Сила корректоров на энергии 3 ГэВ для коррекции радиальной (а) и вертикальной (б) орбиты.

5.4. Измерения и коррекция настройки бетатронных частот

Другая важная задача настройки эффективного ускорения пучка в бустере – это измерение и коррекция бетатронных частот в процессе ускорения. В ИЯФ была разработана система измерения бетатронных частот [37], которая обеспечивает до 500 измерений частот с интервалом в 1 мс во время ускорения. Оптические функции и бетатронные настройки корректировались во всем интервале подъема энергии пучка (Рис.5.7). Коррекция позволила уменьшить потери пучка во время ускорения до уровня ниже 5%.

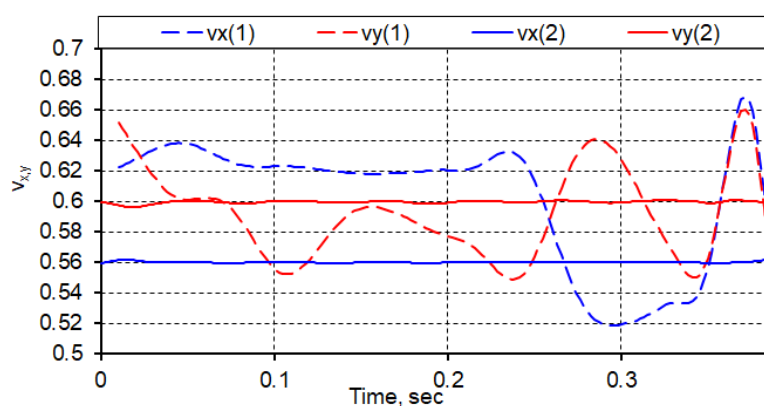


Рис.5.7. Бетатронные частоты: (1) – до коррекции; (2) – после коррекции

Коррекция бетатронных частот (5.1) осуществлялась на основе линейной матрицы преобразования координат, полученной из уточненной модели кольца.

$$\begin{pmatrix} dI_{QF} \\ dI_{QD} \\ dI_{QG} \end{pmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} d\nu_x \\ d\nu_y \\ \Delta \left(\frac{\beta_{y_{max}}}{\beta_{x_{max}}} \right) \end{bmatrix} \cdot \frac{E}{E_0}, [A] \quad (5.1)$$

где $M = \begin{bmatrix} 3.242 & 0.261 & 0.038 \\ -1.201 & -2.082 & 0.780 \\ -3.291 & -4.054 & 0.798 \end{bmatrix}$ – матрица, приведенная для энергии

$E_0 = 0.2$ ГэВ; E – энергия на которой осуществляется коррекция бетатронных частот $d\nu_{x,y}$ посредством введения токовых добавок dI в квадрупольные линзы QF , QD , QG ; $\Delta \left(\frac{\beta_{y_{max}}}{\beta_{x_{max}}} \right)$ – перераспределение горизонтального и вертикального геометрического акцептанса.

Так же была получена линейная матрица для коррекции остаточного хроматизма кольца. Зависимость между необходимой коррекцией хроматизма $dC_{x,y}$ и током возбуждения I катушек секступольных линз SF и SD имеет следующий вид (5.2):

$$\begin{pmatrix} I_{SF} \\ I_{SD} \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} dC_x \\ dC_y \end{pmatrix} \cdot \frac{E}{E_0}. \quad (5.2)$$

Здесь $M = \begin{pmatrix} 0.078 & 0.040 \\ 0.236 & 0.040 \end{pmatrix}$ приведена для энергии $E_0 = 0.2$ ГэВ; E – энергия на которой осуществляется коррекция хроматизма бетатронных частот $dC_{x,y}$.

Кроме того, была проведена дополнительная настройка оптических функций транспортной линии линейного ускорителя, что привело к увеличению эффективности захвата и ускорения частиц до ~95% (Рис.5.8).

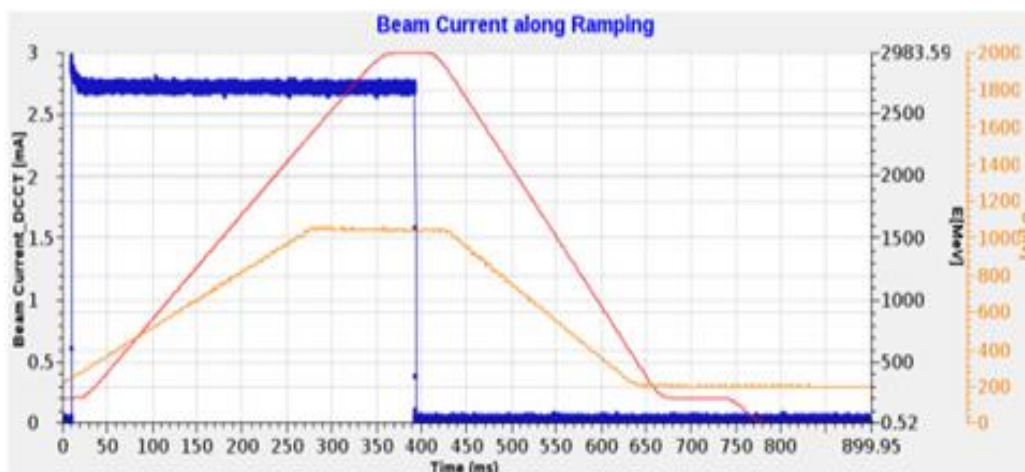


Рис.5.8. Эффективность ускорения частиц.

5.5. Измерения оптических функций кольца

Оптические функции измерялись посредством возбуждения когерентных колебаний циркулирующего пучка с помощи впускного кикера. Пооборотные измерения положения пучка проводились в процессе ускорения. На Рис.5.9 показаны результаты измерения горизонтальной (а) и вертикальной (б) бета-функций (кривая «измерение») на энергии выпуска пучка частиц из бустера. Сплошными кривыми ограничена область ожидаемых оптических функций. Видно хорошее согласие с теоретической оценкой биений вертикальной бета-функции. Наблюдается некоторое расхождение между оценкой и измерением горизонтальной бета-функции в прямолинейных промежутках. Скорее всего, это связано с отличием конструкции датчиков положения пучка в арках кольца и прямолинейных промежутках. Следствием этого является небольшое отличие нелинейных характеристики датчиков, что привело к ухудшению точности измерения оптических функций.

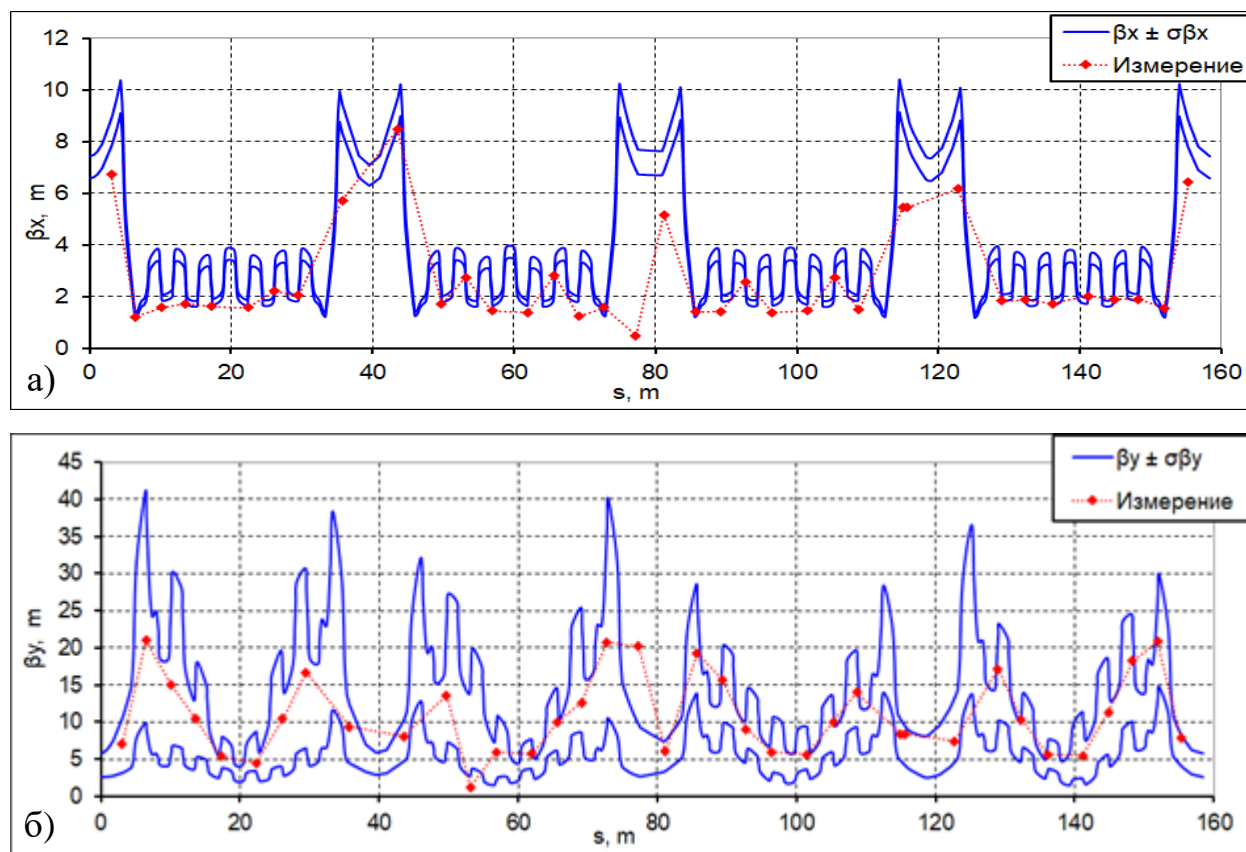


Рис.5.9. Горизонтальные (а) и вертикальные (б) оптические функции кольца.

5.6. Измерение эмиттанса пучка

В ходе запуска бустера проводились измерения эмиттанса пучка, как функции от энергии в процессе 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. Параметры Твисса в точке излучения были определены с помощью измерения оптических функций как $\beta_x = 5.8$ м, $\beta_y = 23.8$ м и $\eta_x = 0.1$ м. На энергии выпуска измеренный эмиттанс составил: $\epsilon_x = 33$ нм и $\epsilon_y = 4$ нм. На Рис.5.10 представлены результаты расчета и измерений эмиттанса пучка в процессе ускорения в бустере. При моделировании учитывались процессы радиационного затухания и квантовой раскачки. Согласно техническому заданию, начальный эмиттанс

пучка, получаемый из линейного ускорителя принимался равным $150 \text{ нм}\cdot\text{рад}$ для радиального и вертикального движения.

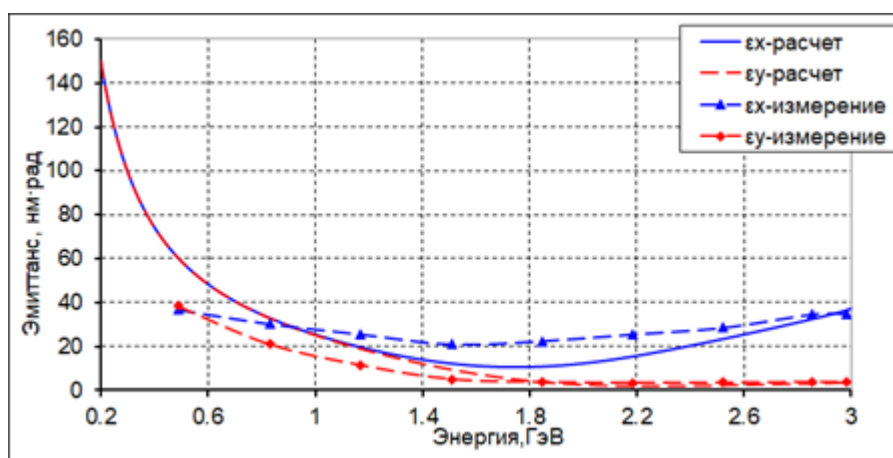


Рис.5.10. Изменение эмиттанса пучка от энергии.

Для проверки полученных значений была проведена дополнительная оценка эмиттанса пучка по его изображению на люминофорном датчике в канале выпуска с учетом известных оптических функций канала. Пример измерения распределения частиц на люминофорном датчике показан на Рис.5.11. Датчик размещен сразу после магнита-септума.

Согласно измерениям, эмиттанс для радиального направления близок к расчетному значению и составляет: в горизонтальном направлении $\epsilon_x \approx 38 \text{ нм}\cdot\text{рад}$, в вертикальном направлении: $\epsilon_y \approx 6 \text{ нм}\cdot\text{рад}$.

Оба независимых измерения эмиттанса пучка в синхротроне показывают хорошее согласие (с учетом точности измерения) как друг с другом, так и с расчетным значением. Наблюдается отличие между ожидаемой (расчетной) величиной бетатронной связи ($\kappa < 5 \%$) и измеренной ($\kappa \approx 10 \%$). Однако, поскольку это различие не влияет на эффективность работы бустера и процесса инжекции, специальных мер коррекции не принималось.

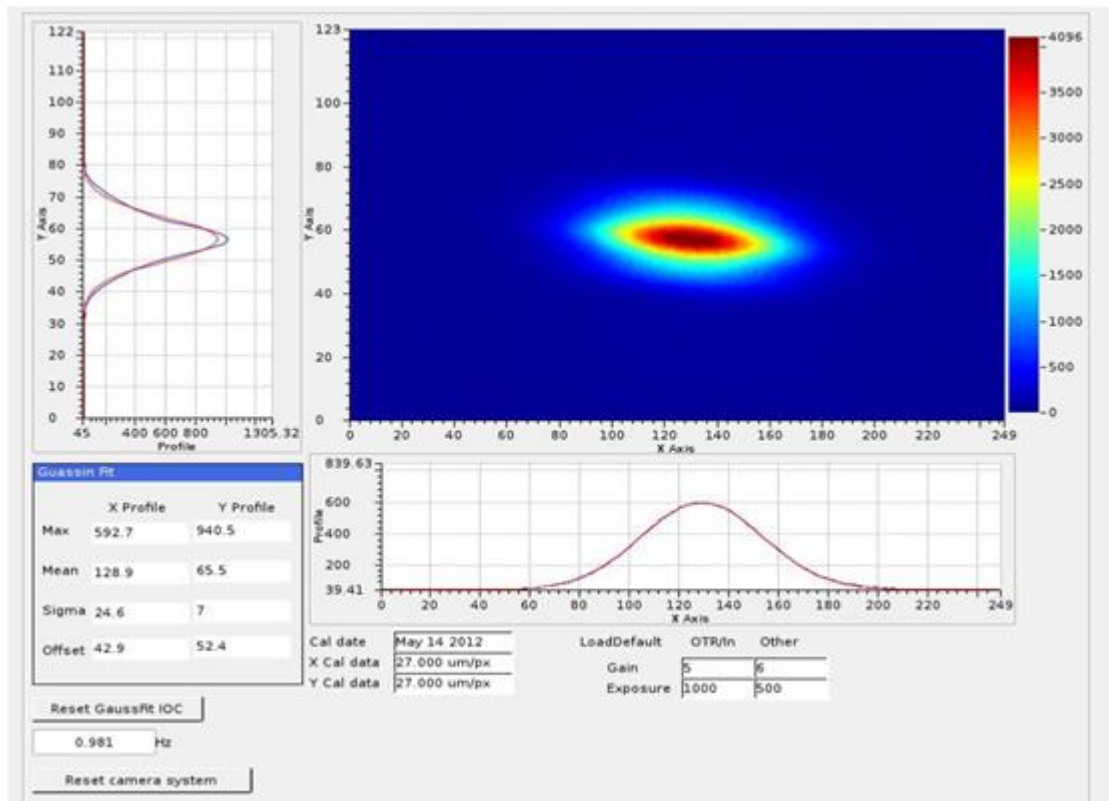


Рис.5.11. Изображение пучка на датчике VF2 после DC септума. Внизу, слева размеры пучка в пикселях (1 пиксель = 27 мкм). $\beta_x \approx 9.5$ м, $\eta_x = -0.35$ м, $\beta_y = 6$ м.

Заключение

В результате проделанной работы был проведен расчет оптики и динамики синхротрона-бустера для источника СИ NSLS-II. Оптимизация параметров и использование современных технологий создания магнитов ускорителя позволили при энергии пучка 3 ГэВ получить в достаточно компактном синхротроне горизонтальный эмиттанс около 30 нм. Малый эмиттанс важен для достижения высокой степени эффективности инжекции пучка в основное кольцо. Кроме того, 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». Особое внимание уделялось точности и достоверности магнитных измерений и геодезической привязки магнитной оси элементов к геодезическим знакам. Это вызвано наличием совмещенных функций в дипольных магнитах, необходимых для получения малого эмиттанса пучка при небольшой длине синхротрона. В результате работы были разработаны и изготовлены с требуемым качеством основные магнитные элементы бустера (28 поворотных магнитов BF типа и 32 магнитных элементов BD типа), квадрупольные и секступольные линзы, корректоры, импульсные магниты и т.д.

На основе результатов магнитных измерений была проведена коррекция выставки дипольных магнитов с учетом минимизации искажения орбиты пучка и биения оптических функции из-за отклонения параметров дипольных магнитов от требуемых значений. Создана уточненная (реалистичная) модель магнитной структуры, учитывающая изменения параметров магнитов в течение ускорения пучка. На основе этой модели была выполнена коррекция бетатронных частот и остаточного хроматизма кольца в процессе ускорения,

определены необходимые зависимости задаваемых в магниты токов от энергии пучка (таблицы «режимов» для ускорения), позволившие получить минимальные потери интенсивности при подъеме энергии. Магнитные измерения обеспечили достаточную точность для описания модели кольца и позволили сделать вывод о качестве производства магнитов. В целом точность изготовления дипольных магнитов с учетом сделанных дополнительных коррекций отвечает предъявленным требованиям.

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 30 мА.

Полученные в работе 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.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю Е.Б. Левичеву, осуществлявшему непосредственное руководство работами по созданию бустерного синхротрона для Брукхейвенской Национальной Лаборатории, в рамках которых была выполнена представленная работа, за огромный вклад в выполнение данной работы, а также за ценные замечания,

полезные дискуссии и консультации на различных этапах написания текста диссертации. Автор также признателен сотрудникам ИЯФ СО РАН принимавшим непосредственное участие в работах по созданию магнитных элементов и бустерного синхротрона: С.М. Гурову, В.А. Киселеву, А.В. Суханову, Е.С. Рувинскому, И.Н. Окуневу, А.М. Батракову и многим другим. За совместное обсуждение результатов и обмен информацией при проведении данной работы автор выражает признательность сотруднику БНЛ Т. Шафтану.

Отдельно хотелось бы поблагодарить О.Н. Бобровникову за помощь в подготовке диссертационных документов и текста диссертации.

Приложение А. Мультипольное разложение магнитного поля

В вакууме, когда нет проводников с током, стационарное магнитное поле можно рассматривать как потенциальное, и его индукция может быть записана как градиент скалярного магнитного потенциала

$$\vec{B} = -\nabla\varphi_m, \quad (\text{A.1})$$

$\vec{B} = \mu_0\vec{H}$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\text{Г/м}$. Комбинируя (А.1) с условием равенства нулю дивергенции поля $\text{div}\vec{B} = 0$, можно получить уравнение Лапласа на скалярный потенциал

$$\nabla^2\varphi_m = 0. \quad (\text{A.2})$$

Если длина магнита существенно больше, чем его апертура, поле внутри двумерное (за исключением коротких областей на краях) и скалярный потенциал не зависит от продольной координаты.

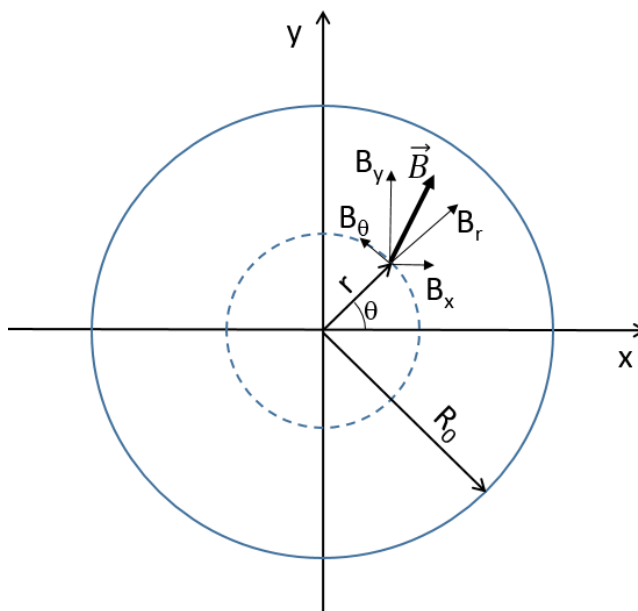


Рис.А.1. Система координат для решения уравнения Лапласа.

Вводя полярные координаты (r, θ) , как это показано на Рис.А.1, разделяя переменные и потребовав, чтобы потенциал был периодической по θ функцией

для некоторого радиуса R_0 , можно найти решение (А.2) в виде ряда по степеням радиуса r . Тогда радиальная и азимутальная компоненты поля определяются через соответствующие производные потенциала:

$$B_r(r, \theta) = -\frac{\partial \varphi_m}{\partial r} = \sum_{n=1}^{\infty} C(n) \left(\frac{r}{R_0}\right)^{n-1} \sin[n(\theta - \alpha_n)],$$

$$B_\theta(r, \theta) = -\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_m}{\partial \theta} = \sum_{n=1}^{\infty} C(n) \left(\frac{r}{R_0}\right)^{n-1} \cos[n(\theta - \alpha_n)], \quad (\text{А.3})$$

где $C(n)$ и α_n – константы. Для заданного радиуса r поле $B_r(r, \theta)$ имеет n максимумов и n минимумов, и их положение по азимутальному углу совпадает с положением полюсов магнитного $2n$ -полюсника, создающего данное поле. У дипольного магнита $n = 1$ и два полюса, у квадрупольного магнита (линзы) $n = 2$ и четыре полюса и т.д. Параметр α_n определяет ориентацию полюсов относительно оси x .

Поскольку уравнения движения частиц, описывающие бетатронные колебания, записываются в декартовой системе, магнитное поле также должно быть записано в декартовых координатах, что несложно сделать, используя Рис.А.1 и уравнения (А.3)

$$B_x(r, \theta) = B_r \cos \theta - B_\theta \sin \theta = \sum_{n=1}^{\infty} C(n) \left(\frac{r}{R_0}\right)^{n-1} \sin[(n-1)\theta - n\alpha_n],$$

$$B_y(r, \theta) = B_r \sin \theta + B_\theta \cos \theta = \sum_{n=1}^{\infty} C(n) \left(\frac{r}{R_0}\right)^{n-1} \cos[(n-1)\theta - n\alpha_n], \quad (\text{А.4})$$

или, используя $z = x + iy = r \cdot \exp(i\theta)$, в комплексном виде

$$\vec{B}(z) = B_y(x, y) + iB_x(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} C(n) e^{-in\alpha_n} \left(\frac{z}{R_0}\right)^{n-1}. \quad (\text{А.5})$$

В практических целях последнее выражение удобно представить в виде суперпозиции магнитных $2n$ -полюсников, которые, в зависимости от

ориентации полюсов относительно оси x , принято называть «нормальными» (*normal*) и «повернутыми» (*skew*) согласно

$$C(n)e^{-in\alpha_n} = (\textit{normal}) + i(\textit{skew}) =$$

$$C(n) \cos(n\alpha_n) - iC(n) \sin(n\alpha_n) = B_n + iA_n. \quad (\text{A.6})$$

Соответственно, выражение (A.5) может быть записано через нормальные- и *skew*-мультиполи в виде

$$\vec{B}(z) = \sum_{n=0}^{\infty} (B_n + iA_n) \left(\frac{z}{R_0}\right)^n, \quad (\text{A.7})$$

где

$$B_n = \frac{R_0}{n!} \left(\frac{\partial^n B_y}{\partial x^n}\right)_{x=y=0}, \quad A_n = \frac{R_0}{n!} \left(\frac{\partial^n B_x}{\partial x^n}\right)_{x=y=0}. \quad (\text{A.8})$$

Выражения (A.8) дают абсолютное значение мультипольных коэффициентов, зависящее от тока возбуждения магнита. Однако для описания «качества» магнитного поля – его отклонения от проектного значения для разных точек (x, y) – удобнее пользоваться их отношением к некоторому опорному полю, под которым, как правило, понимают поле основного (расчетного, идеального) мультиполя B_0 : диполя для поворотного магнита, квадруполь для фокусирующей линзы и т.п.:

$$\vec{B}(z) = B_0 \sum_{n=0}^{\infty} (b_n + ia_n) \left(\frac{z}{R_0}\right)^n = B_0 \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{B_n}{B_0} + i\frac{A_n}{B_0}\right) \left(\frac{z}{R_0}\right)^n. \quad (\text{A.9})$$

Поля берутся на некотором радиусе в апертуре магнита (например, это может быть радиус границы устойчивого движения – динамической апертуры, или радиус измерения поля и т.д.). Для современных магнитов характерные значения $b_n, a_n \sim 10^{-4}$. В литературе распространено обозначение такого уровня качества магнитного поля $10^{-4} = 1$ и (*unit*).

В заключении этого раздела необходимо сделать некоторые замечания о мультипольном разложении трехмерного поля магнита ускорителя с учетом краев. Прямой учет краевого поля можно найти в [1-4]. Однако следует заметить, что, как правило, длина магнита много меньше длины волны бетатронных колебаний, и при изучении движения частицы в магнитном поле ускорителя важны интегральные значения, а более мелкая (в продольном направлении) структура поля не оказывает заметного влияния на динамику.

Воспользуемся уравнением Лапласа (А.2) в декартовой системе координат (ось s – продольная)

$$\nabla^2 \varphi_m(x, y, s) = \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial s^2} = 0, \quad (\text{A.10})$$

и проинтегрируем его от s_1 до s_2

$$\int_{s_1}^{s_2} \left(\frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial s^2} \right) ds = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \int_{s_1}^{s_2} \varphi_m ds + \int_{s_1}^{s_2} \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial s^2} ds. \quad (\text{A.11})$$

Обозначим

$$J_{\varphi m}(x, y) = \int_{s_1}^{s_2} \varphi_m ds,$$

тогда, согласно (А.10)

$$\frac{\partial^2 J_{\varphi m}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 J_{\varphi m}}{\partial y^2} = - \left. \frac{\partial \varphi_m}{\partial s} \right|_{s_1}^{s_2} = B_s(x, y, s_2) - B_s(x, y, s_1). \quad (\text{A.12})$$

Если продольное поле равно нулю в s_1 и s_2 (а это так, если пределы интегрирования выбраны на некотором расстоянии до и после магнита), то интеграл по продольной координате от скалярного магнитного потенциала удовлетворяет двумерному уравнению Лапласа, как и сам потенциал. Следовательно, выводы о качестве поля не изменятся, если вместо мультиполей брать их интегральные значения.

Приложение Б. Моделирование движения заряженных частиц в магнитном поле

Моделирование движения частицы в поле магнита («трекинг») использует выражение для силы Лоренца

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} = q(\vec{E} + [\vec{v} \times \vec{B}]) = q[\vec{v} \times \vec{B}], \quad (\text{Б.1})$$

где q – заряд частицы, \vec{B} – индукция магнитного поля, \vec{v} – скорость частицы. Магнитное поле представлено массивом значений в декартовой системе координат полученных либо моделированием, либо измеренных датчиками Холла. Поскольку нас интересует траектория равновесной частицы (орбита), лежащая в медианной плоскости, используется только вертикальная компонента магнитного поля B_z . Для определения поля между узлами сетки применяется бикубическая интерполяция [38]. С помощью трекинга находится траектория равновесной частицы в «измерительной» декартовой системе координат (XY). Затем компоненты поля пересчитываются в сопровождающую систему координат (X'Y'), привязанную к найденной орбите, как это показано на Рис.Б.1. Вертикальная ось Z для обеих систем отчета совпадает.

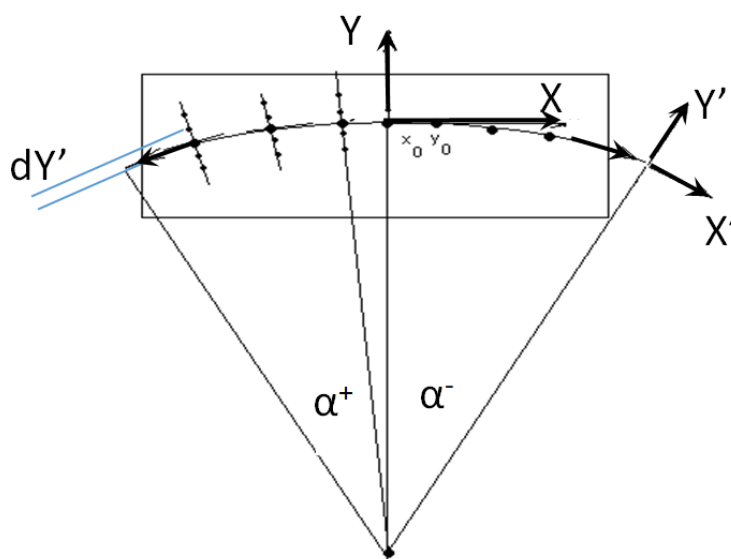


Рис.Б.1. Системы координат.

Распределение поля вдоль орбиты описывается короткими секторными магнитами длиной l_i с ненулевыми мультиполями («слайсами»), что позволяет иметь полное представление об интегральных характеристиках поля и их изменении вдоль траектории пучка. Так, угол поворота равен

$$\alpha = \frac{1}{B\rho} \int_{-L/2}^{L/2} B_z(s) ds = \frac{1}{B\rho} \sum_i B_{zi} l_i, \quad (\text{Б.2})$$

а интегральное значение n -го мультиполя –

$$K_n L_{eff} = \frac{1}{B\rho \cdot n!} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{d^n B_z(s)}{dy^n} ds = \frac{1}{B\rho \cdot n!} \sum_i \frac{d^n B_z(s)}{dy^n} l_i. \quad (\text{Б.3})$$

Алгоритм определения характеристик магнитного поля можно описать следующим образом:

(1) Находится равновесная орбита и энергия частицы, при которых полный угол поворота соответствует требуемому значению. Для этого из предполагаемого центра магнита запускаются в противоположных направлениях частицы e^+ и e^- , как показано на Рис.Б.2. Трекинг каждой частицы, который заканчивается достаточно далеко за пределами магнита, определяет углы поворота как

$$tg \alpha = \frac{|v_y^\infty|}{|v_x^\infty|}. \quad (\text{Б.4})$$

где $v_{x,y}^\infty$ – проекция скорости частицы на оси декартовой системы координат (XY). Полный угол поворота определяется как $\alpha = \alpha^+ + \alpha^-$, и он, как правило, не равен заданному значению α_{spec} , что требует несколько итераций коррекции энергии согласно

$$E_n \approx E_{n-1} \frac{\alpha_{n-1}}{\alpha_{spec}}. \quad (\text{Б.5})$$

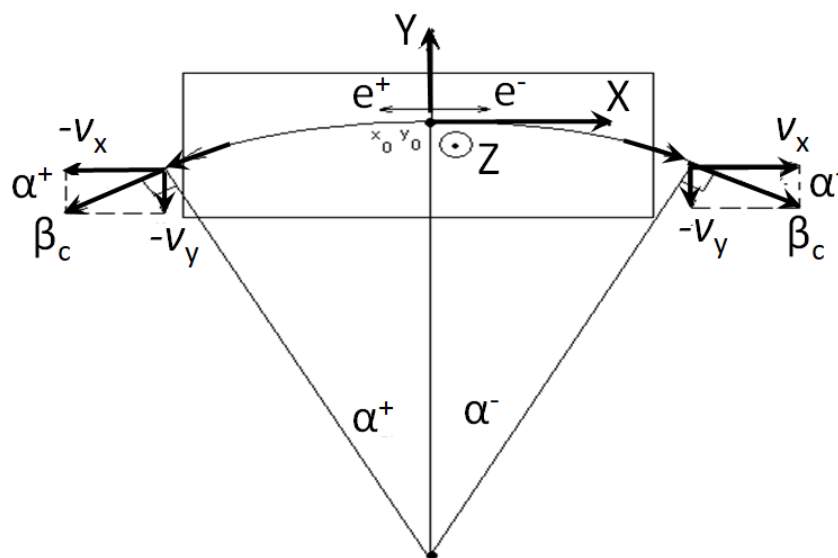


Рис.Б.2. К определению характеристик магнита в сопровождающей системе координат.

Итеративным способом находится и истинный центр магнита в продольном направлении (обозначенный на Рис.Б.1 и Рис.Б.2 как x_0, y_0) согласно

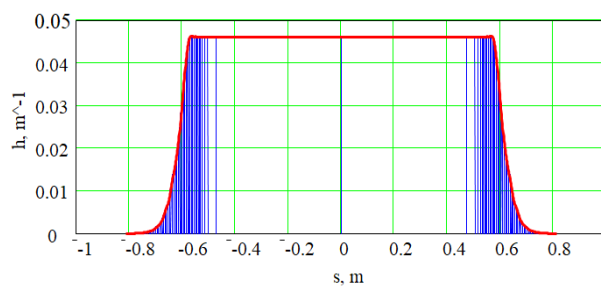
$$x_n = x_{n-1} + \frac{1}{2B_{z0}} \left(\int_{x_0}^{-\infty} B_z(s) ds - \int_{x_0}^{+\infty} B_z(s) ds \right), \quad (\text{Б.6})$$

где B_{z0} – поле в центре магнита.

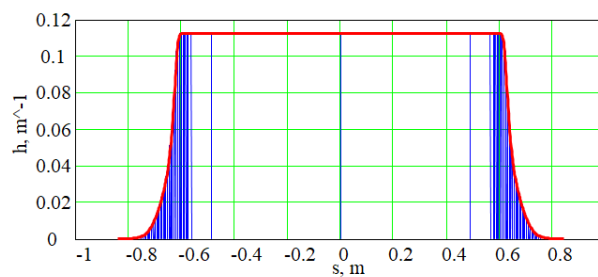
(2) По измеренным в медианной плоскости значениям поля в каждой точке орбиты (x_{0i}, y_{0i}) зависимость $B_z(y', x_{0i})$ аппроксимируется полиномом, с помощью которого вычисляются мультипольные коэффициенты разложения поля. Шаг вдоль орбиты может быть изменен в зависимости от участка магнита.

В результате получается последовательность секторных магнитов с мультипольными компонентами, усредненными по длине слайса, и удовлетворяющим соотношениям (Б.2) и (Б.3). Эта последовательность используется программой MAD для моделирования движения частиц.

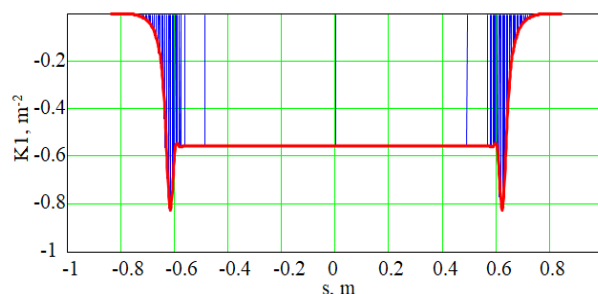
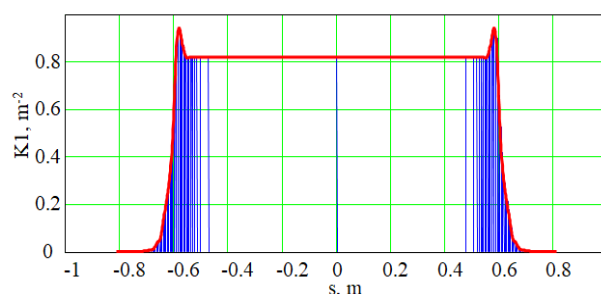
BF



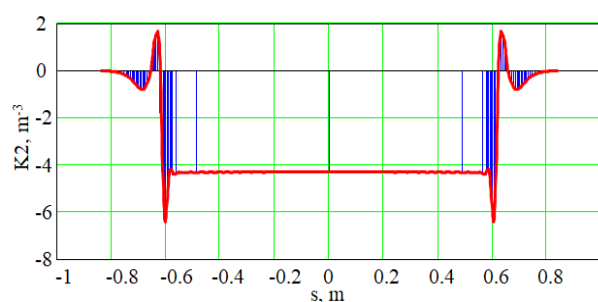
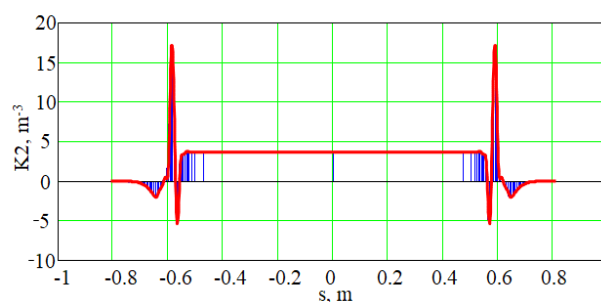
BD



Аппроксимация дипольного поля



Аппроксимация градиента поля



Аппроксимация секступольной компоненты поля

Рис.Б.3. MAD модель.

Пример модели магнита для MAD, включающая кусочно-постоянные элементы (слайсы), содержащие дипольную, квадрупольную и секступольную компоненты, показан на Рис.Б.3. Мультиполи более высоких порядков (нелинейности) при необходимости вводятся в модель в виде «тонких» элементов (с нулевой длиной, но ненулевым интегралом).

Список литературы

- [1] M. Pont, E. Boter, M. Lopes. Magnets for the storage ring ALBA. // *Proceedings of EPAC 2006*, Edinburgh, Scotland, 2006.
- [2] M.Johansson et al. Design of the MAX-IV/SOLARIS 1.5 GeV storage ring magnets. // *Proceedings of IPAC2011*, San Sebastian, Spain, 2011.
- [3] S.C. Leemann, J. Ahlback, A . Andersson, M. Eriksson, M. Johansson, L.-J. Lindgren, M. Sjostrom, E. Wallen. Status of the MAX IV storage rings. // *Proceedings of IPAC'2010*, Kyoto, Japan, 2010.
- [4] A. Morita, A. Noda, M. Inoue, etc. A compact proton synchrotron with combined-function lattice dedicated for cancer therapy. // *Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference*, New York, USA, 1999.
- [5] F. Willeke et al. Status of NSLS-II. // *Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference*, New York, 2011.
- [6] T.Shaftan et all. Status of the NSLS-II Injection System Development. // *IPAC,10*, Kyoto, 2010.
- [7] S. Gurov, S. Sinyatkin, et al. Status of NSLS-II booster. // *Problems of Atomic Science and Technology*, т. 4, № 80, 2012.
- [8] Анчугов О.В., Блинов В.Е., Богомятков 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., Сияткин С.В. Эксперименты по физике

пучков заряженных частиц на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М. // *ЖЭТФ*, т. 136, № 10, 2009.

- [9] 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.
- [10] Д. А. Шведов, О. В. Анчугов, В. А. Киселев, А. А. Корепанов, С. В. Синяткин. Быстрые магнитные кикеры инжекции-экстракции для бустера-синхротрона NSLS-II. // *ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА*, № 3, p. 16–21, 2015.
- [11] 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.
- [12] S.M. Gurov et al. NSLS-II BOOSTER. // *Physics Procedia*, № 84, pp. 74-81, 2016.
- [13] 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.
- [14] Wang G.M., Shaftan T. et al. NSLS II INJECTOR INTEGRATED TESTING. // *IPAC 2013*, Shanghai, 2013.

- [15] Wang G.M., Smaluk V.V., Karnaev S.E., Sinyatkin S.V. et al. NSLS II COMMISSIONING TOOLS. // *IPAC 2013*, Shanghai, 2013.
- [16] V.A. Kiselev et al. THE NSLS-II BOOSTER DEVELOPMENT AND COMMISSIONING. // *IPAC 2014*, Dresden, 2014.
- [17] Wang G.M., Shaftan T. et al. NSLS II BOOSTER EXTENDED INTEGRATION TEST. // *IPAC 2015*, Richmond, 2015.
- [18] A. Akimov et al. NSLS-II injector commissioning and initial operation. // *Proceedings of IPAC2015*, Richmond, VA, USA, 2015.
- [19] S.Gurov, V.Kiselev, S.Sinyatkin. Current induced in vacuum chamber during NSLS-II booster ramp. // *Proceedings of PAC2013*, Pasadena, CA USA, 2013.
- [20] S.Sinyatkin et al. Design of NSLS-II booster dipole magnets with combine functions. // *IPAC'13*, Shanfhai, 2013.
- [21] S.Sinyatkin et al. Magnetic measurement of NSLS-II booster dipole magnets with combine functions. // *IPAC'13*, Shanghai, 2013.
- [22] 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.
- [23] S.Gurov et al. Status of NSLS-II Booster. // *IPAC'13*, Shanghai, May 2013.
- [24] S. Moaveni. Finite Element Analysis Theory and Applications with ANSYS. // Pearson, 2008.
- [25] A. Dubrovin. User's guide MERMAID: Magnet design in two and three dimensions. // Novosibirsk: SIM Limited, 1994.

- [26] Alexander Wu Chao, Maury Tinger. Handbook of Accelerator Physics and Engineering. // World Scientific Publishing, 1999, pp. 263-264.
- [27] Hans Grote, F. Christoph Iselin. The MAD program. User's reference manual. // CERN, Geneva, 1996.
- [28] D.Einfeld, E.Levichev, P.Piminov. EFFECT OF MAGNETIC MULTIPOLES ON THE ALBA DYNAMIC. // EPAC, Genoa, 2008.
- [29] S.Y.Lee. A multipole expansion for the field of vacuum chamber eddy currents. // NIM A300, pp. 151-158, 1991.
- [30] J.-F. Ostiguy. Eddy current induced multipoles in the main injector. // LAL, № MI-0037, October 4, 1990.
- [31] I.Churkin, O.Kiselev, V.Korchuganov, A.Ogurtsov, A.Philipchenko, L.Schegolev, K.Schreiner, S.Sinyatkin, A. Steshov, V.Ushakov, M.Kuroda, Y.Tsuchida. Bending Magnets for the SAGA Storage Ring. // *Nuclear Instruments & Methods*, т. А 543, pp. 47-50, 2005.
- [32] P. Budz, I. Churkin, V. Duerr, J. Kolbe, R.M. Klein, D. Kramer, E. Rouvinskiy, E. Semenov, S. Sinyatkin, A. Steshov, G. Ulm, G. Wusterfeld et al. The magnets of the Metrology Light Source in Berlin-Adlershof. // *Nuclear Instruments & Methods*, т. А 575, pp. 42-45, 2007.
- [33] Европейская Металлургическая Компания. Марки покрытия Stabolit. // https://emk24.ru/wiki/spetsialnye_stali/elektrotekhnicheskie_stali_izolyatsiya_stabolit_7084018/.
- [34] Л. Б. Протопопов И.Я. Магнитные измерения датчиками Холла. // ИЯФ, 2000.

- [35] A.Batrakov et al. The new VME-based system for magnetic measurements with hall sensors. // Novosibirsk: Budker INP 2007-32, 2007.
- [36] Д. Кирьянов. Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0. // Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2012.
- [37] E.Bekhtenev et al. Fast Tune Measurement System. // *RUPAC'12*, Saint-Petersburg, September 2013.
- [38] Д. Рассел. Бикубическая интерполяция. // ООО «Книга по Требованию», 2013.