

УЧРЕЖДЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
(ИЯФ СО РАН)

О.М. Валов, В.М. Константинов, И.Н. Окунев,
В.В. Петров

КОРРЕКТИРУЮЩИЕ МАГНИТЫ
ДЛЯ БУСТЕРА ИСТОЧНИКА СИ NSLS-II

ИЯФ 2014-7

Новосибирск
2014

Оглавление

1. Введение	3
2. Расчеты формы поля и геометрии магнита	4
2.1. Предварительные 2D расчеты	4
2.2. 3D расчеты	8
3. Изготовление магнитов	11
3.1. Изготовление магнитопроводов	12
3.2. Изготовление катушек	13
3.3. Сборка магнита	15
4. Магнитные измерения	19
4.1. Общее описание	19
4.2. Сводка основных результатов магнитных измерений	23
4.2.1. Корректоры типа CX. Статистика ($I = 5 \text{ A}$)	23
4.2.2. Корректоры типа CX1. Статистика ($I = 5 \text{ A}$)	25
4.2.3. Корректоры типа CY. Статистика ($I = 5 \text{ A}$)	28
5. Основные параметры корректоров	30
6. Заключение	31
7. Литература	31
8. Приложение 1. Возможности улучшения области однородности поля	32
9. Приложение 2. Эксперименты с блоком магнита CX1	35

1. Введение

NSLS-II является источником синхротронного излучения третьего поколения, создаваемым в Брукхейвенской национальной лаборатории. Он включает в себя кольцо электронного накопителя на энергию 3 ГэВ, инжекционный линак на энергию 200 МэВ и бустерный синхротрон на энергию от 200 МэВ до 3 ГэВ с током пучка 20 мА для инъекции в основное кольцо.

В январе 2010 г. был объявлен тендер на конструирование, изготовление и запуск бустерного синхротрона. В мае 2010 г. ИЯФ был признан победителем тендера.

Тогда же был выпущен приказ по институту, определяющий состав коллектива для выполнения контракта, а также основные сроки. В октябре 2010 г. был одобрен PDR, а в феврале 2011 г. – FDR.

Данный препринт посвящен расчетам, проектированию и изготовлению магнитов для коррекции орбиты электронов в бустере. Поставка корректоров в BNL началась с конца декабря 2011 года. Последние (резервные) корректоры были отправлены в BNL в начале июля 2012 года.

Основные исходные требования к корректорам

Для коррекции орбиты в бустере используются два типа горизонтальных корректоров с межполюсными зазорами 28 и 45 мм и один тип вертикальных корректоров с зазором 45 мм. Основные исходные требования к магнитам приведены в Таблице 1.1.

Таблица 1.1

Тип корректора		CX	CX1	CY
Количество		12 + 1 запасной	8 + 1 запасной	16 + 1 запасной
Форма магнита		Ш-образный		
Энергия пучка	ГэВ	0.2 ÷ 3.0		
Угол поворота	мрад	1.6	1.1	1.1
Межполюсной зазор	мм	28	45	45
Длина магнита по железу	мм	90		
Полная длина магнита	мм	< 180		
Область хорошего поля	мм	± 20		
Однородность в области хорошего поля		$5 \cdot 10^{-3}$		
Ток источника питания	А	5		
Охлаждение		Воздушное		

2. Расчеты формы поля и геометрии магнита

Расчеты формы магнитного поля проводились с помощью разработанной в ИЯФ программы Mermaid в двух- и трехмерной версиях. Расчеты проводились для постоянного магнитного поля, поскольку вакуумная камера в корректорах выполнена из тонкостенной нержавеющей стали, время ускорения в бустере относительно велико (~ 0.3 с) и вихревыми токами в стенках камеры корректоров при ускорении можно пренебречь. Расчеты профиля были выполнены в предположении использования стали ThyssenKrupp Stahl M940-50A. Оптимизация формы поля обеспечивалась шиммированием полюсов и фасками на торцах магнитов. Окончательную коррекцию предполагалось выполнить после измерений на первом магните. Магниты симметричны относительно вертикальной и горизонтальной плоскостей, поэтому расчеты проводились только для одного квадранта сечения магнита. При этом $X = 0$ соответствует середине магнита.

Первоначально планировалось, что все магниты должны иметь одинаковые межполюсные зазоры, 45 мм. Однако в процессе разработки структуры и конструкции кольца было принято решение уменьшить межполюсный зазор для корректоров CX в полукольцах до 28 мм, оставив зазор 45 мм для магнитов CX1 и CY в прямолинейных промежутках. Оптимизация для магнитов типа CX, CX1 и CY проводилась с учетом того, что форма полюса для них должна быть одна и та же (пластины магнитов штампуются одним и тем же штампом), меняться могли лишь фаски на торце магнита.

При расчетах ток в обмотках задавался в ампер-витках, так как при постоянстве сечения обмотки изменение соотношения между количеством витков и током в витке практически не влияет на результаты расчета.

2.1. Предварительные 2D расчеты

Высота межполюсного зазора корректора сравнима с его длиной; поле, вываливающееся на торце, оказывает существенное влияние на поперечное распределение интеграла поля вдоль оси пучка. Поэтому двухмерные расчеты однородности поля могут использоваться лишь для первоначальной оценки. Окончательные результаты могут быть получены лишь после трехмерного моделирования.

Как указывалось выше, профиль полюса одинаков для всех трех типов магнитов. Оптимизация интеграла поля для магнитов с разными межполюсными зазорами обеспечивается за счет изменения формы выборки на торце.

Предварительная оценка необходимой ширины полюса (для полюса без шимов) для двухмерной геометрии в соответствии с [1]:

$$H = \Delta Z \cdot \left[0.75 - 0.36 \ln \left(100 \cdot \frac{\Delta B}{B} \right) \right] + 2\Delta X$$

где H – ширина полюса,

ΔZ – апертура,

$\frac{\Delta B}{B}$ – требуемая однородность поля в области $\pm \Delta X$

В нашем случае для апертуры 45 мм, области "хорошего" поля ± 20 мм и однородности в этой области $\pm 5 \cdot 10^{-3}$ получается $H \cong 8.5$ см. Аккуратный счет с помощью MERMAID дает более реалистичное значение $\cong 10$ см. Однако в трехмерном случае для коротких магнитов за счет вываливания поля на торце радиальная однородность становится гораздо хуже, что в результате требует увеличения ширины полюса. К тому же, при коррекции орбиты перед выпуском может потребоваться увеличение радиальной области хорошего поля. С другой стороны, шиммирование полюсов может существенно улучшить однородность поля в рабочей области. Рис. 2.1 и 2.2 дают представление о влиянии ширины полюса и шиммирования на однородность поля в случае двухмерного моделирования.

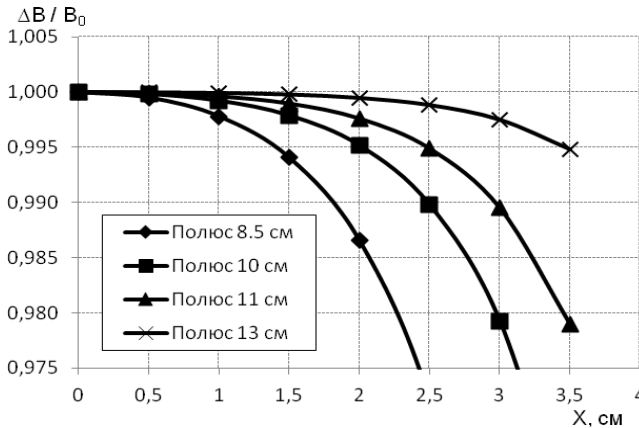


Рис. 2.1. Корректор бустера NSLS-II (межполюсной зазор 45 мм). Влияние ширины полюса на однородность поля. 2D счет. Шимов на краях полюса нет.

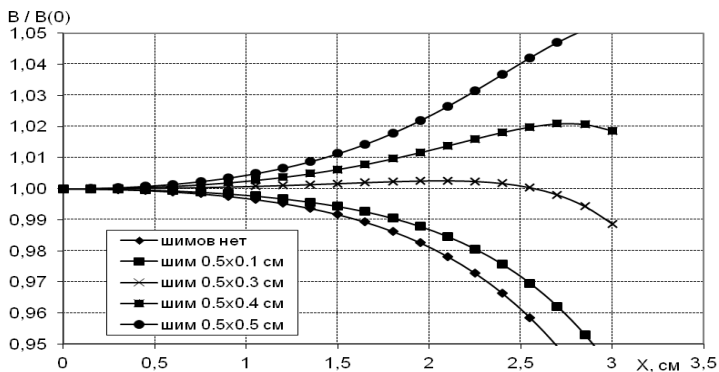


Рис. 2.2. Корректор бустера NSLS-II. Влияние шиммирования на однородность поля. 2D счет. Ширина полюса 8 см. Зазор 45 мм.

Корректор работает в области полей, далеких от насыщения, поэтому форма поля мало меняется от тока в обмотке (Рис. 2.3).

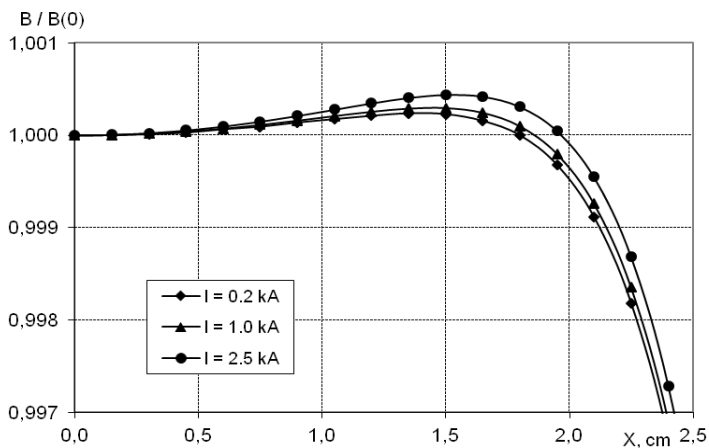


Рис. 2.3. Корректор бустера NSLS-II. Зависимость формы поля от тока. 2D счет. Ширина полюса 8 см. Зазор 45 мм. Шим 0.5x0.27 см

Однородность поля по высоте в рабочей области корректора в двухмерном случае также достаточно хорошая (Рис. 2.4 – 2.7).

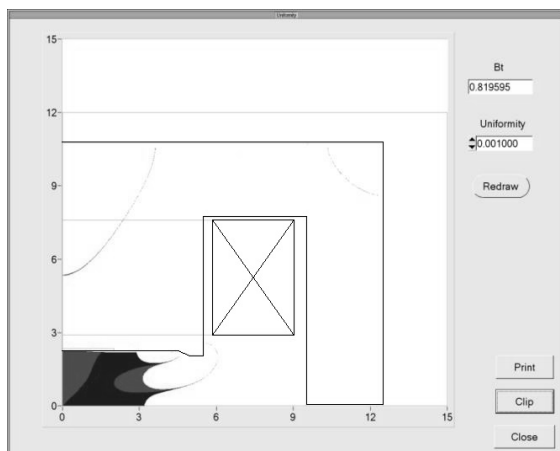


Рис. 2.4. Корректор CX1. 2D счет. Ширина полюса 11 см. Область однородности магнитного поля $\pm 1 \cdot 10^{-3}$.

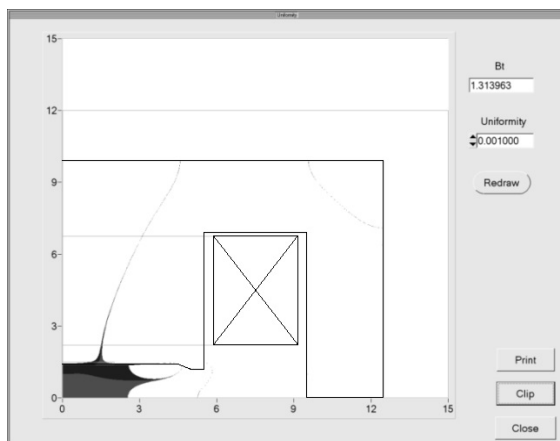


Рис. 2.5. Корректор CX. 2D счет. Ширина полюса 11 см. Область однородности магнитного поля $\pm 1 \cdot 10^{-3}$.

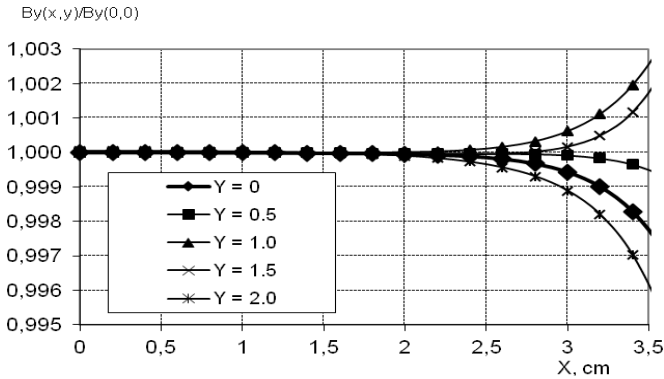


Рис. 2.6. Корректор СХ1. Однородность магнитного поля на разных высотах. 2D счет. Зазор 45 мм. Шим 0.5×0.2 см + скос длиной 0.5 см.

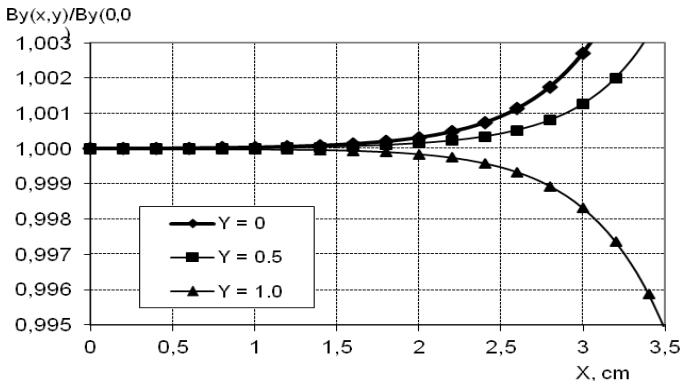


Рис. 2.7. Корректор СХ. Однородность магнитного поля на разных высотах. 2D счет. Зазор 28 мм. Шим 0.5×0.2 см + скос длиной 0.5 см.

2.2. 3D расчеты

На основе приведенных выше оценок были проведены трехмерные вычисления. Межполюсной зазор принимался равным 45 мм для СХ1 и СУ, 28 мм для СХ. Длина магнитопровода 90 мм, ширина полюса 110 мм. Профиль полюса для всех магнитов принимался одинаковым: шим длиной 5 мм, высотой 2 мм с последующим скосом длиной 5 мм к плоской части полюса. В вычислениях предполагалось отсутствие фасок на торце магнита. Основные результаты приведены ниже в соответствующих графиках (Рис. 2.8, 2.9, 2.11, 2.12) и Таблице 2.1.

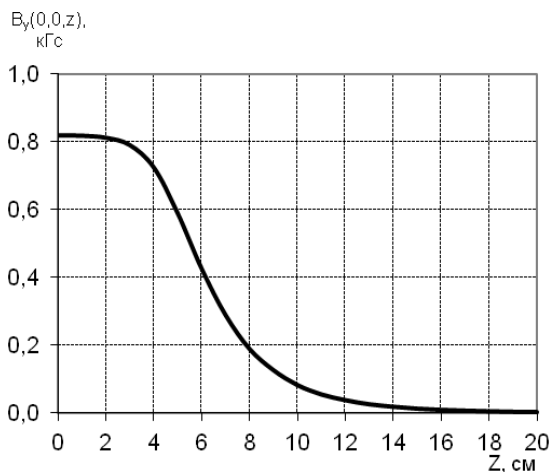


Рис. 2.8. Корректор CX1. Поле вдоль оси пучка. 3D счет. $I = 1.5$ кА-вит. "0" – центр магнита.

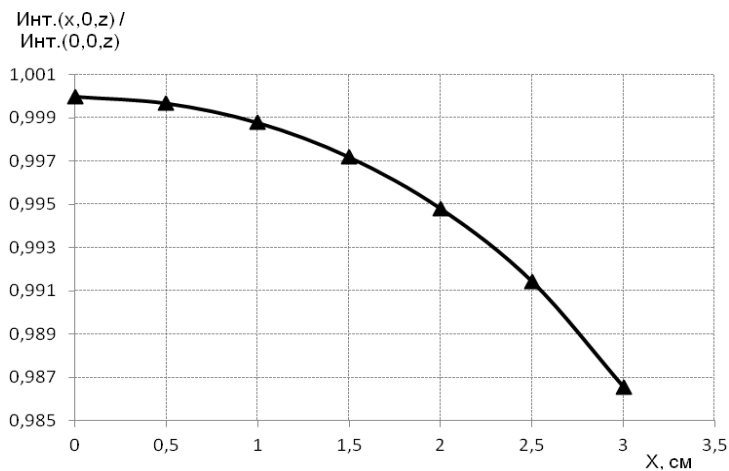


Рис. 2.9. Корректор CX1. 3D счет. Однородность интеграла поля в медианной плоскости.

Шихтовка материала магнитопровода меняет только общий уровень поля, не меняя характера радиального распределения (Рис. 2.10).

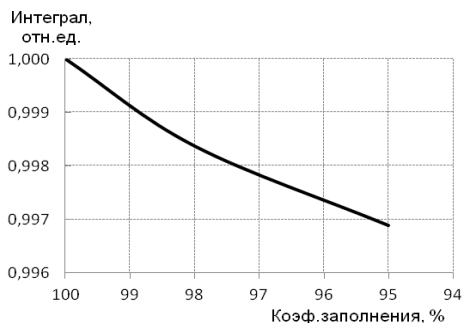


Рис. 2.10. Корректор СХ1. Интеграл поля вдоль оси пучка для разных коэффициентов шихтовки. 3D счет.

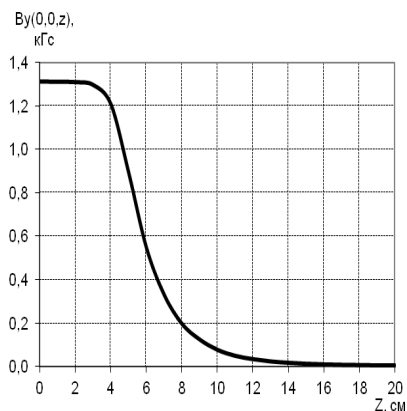


Рис. 2.11. Корректор СХ. Поле вдоль оси пучка. 3D счет. $I = 1.5$ кА-вит. $Z = 0$ – центр магнита.

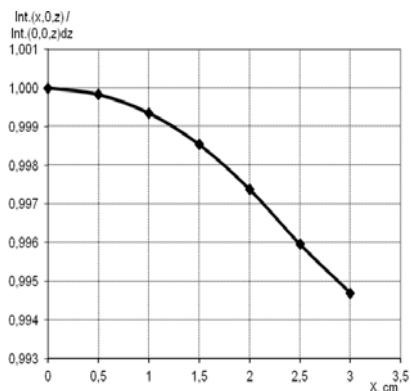


Рис. 2.12. Корректор СХ. 3D счет. Однородность интеграла поля в медианной плоскости.

Таблица 2.1.

Основные расчетные параметры корректоров.

Корректор	Поле в центре магнита, кГс ^{*)}	Интеграл магнитного поля, кГс×см ^{*)}	Эффективная длина, см
CX1	0.8173	10.900	13.34
CY	0.8173	10.900	13.34
CX	1.3127	16.210	12.35

^{*)} При расчетах ток в одной катушке принимается равным $I \times W = 1.5$ кА-вит.

Указанные выше параметры магнитных характеристик были признаны представителями BNL достаточными для начала изготовления корректоров. Предполагалось, что после магнитных измерений на прототипе можно будет, в случае необходимости, внести дополнительные изменения в конструкцию, улучшив однородность за счет фасок на торцах (см. Приложение 1).

3. Изготовление магнитов

Принципиальная конструкция магнитов всех трех типов одинакова. Отличия касаются лишь ориентации магнитов (вертикальная либо горизонтальная) и межполюсных зазоров (28 либо 45 мм). Конструктивно изделие состоит из собственно самого магнита и регулируемой подставки.

Диполь собирается из двух Ш-образных половин с предварительно установленными на них катушками возбуждения. Катушки возбуждения намотаны из медного прямоугольного проводника сечением 1.25×2.8 мм² и пропитаны радиационно-стойким эпоксидным компаундом.

Каждая половина магнитопровода состоит из набора прецизионно отштампованных пластин, изготовленных из холоднокатанной отожжённой низкоуглеродистой стали марки M940-50A фирмы ThyssenKrupp Stahl, Германия толщиной 0.5 мм с покрытием Stabolit 70 (<http://www.thyssenkrupp.com>), склеенных между собой в единый блок.

Такая конструкция позволяет устанавливать вакуумную камеру без проведения сварочных работ и существенной разборки магнита.

3.1. Изготовление магнитопроводов

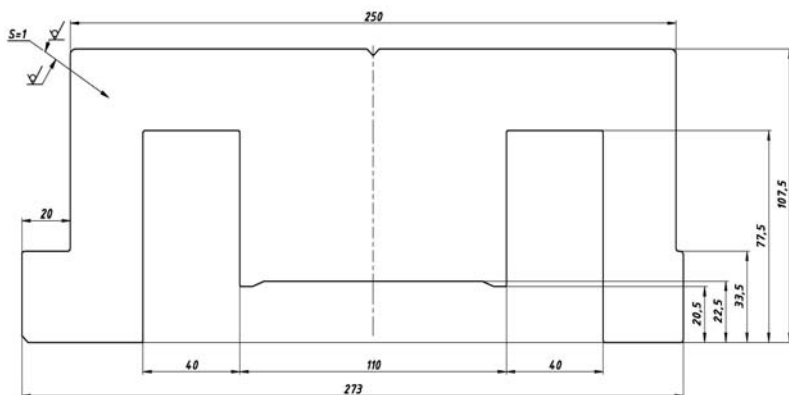


Рис. 3.1. Пластина корректора.

Пластины для корректоров всех типов штамповались одним и тем же штампом. Все магнитопроводы изготавливались идентично. Для изготовления магнитопроводов СХ изменение межполюсного зазора до размера 28 мм (вместо 45 мм, как у СХ1 и СУ) обеспечивается дополнительной специальной фрезеровкой плоскости стыка половинок магнитопроводов, обеспечивающей минимальные размеры заусенцев, закорачивающих изолирующие зазоры между пластинами. Отметим, что данная фрезеровка не оказывает влияния на величину сопротивления изоляции между пластинами в блоке и на величину вихревых токов во время работы (см. Приложение 2.)

Штамп для пластин изготовлен в ИЯФ. Точность изготовления полюсов ± 25 мкм. Для пластин толщиной 0.5 мм величина заусенцев не превышает 50 мкм. В процессе штамповки размеры пластин периодически контролируются координатно-измерительными машинами (OPTON или CONTURA). Партия пластин с отклонениями не допускается к дальнейшей работе. Штамп должен перешлифовываться после 10 – 15 тысяч ударов (в зависимости от качества изготавливаемых пластин).

Поскольку сталь для пластин может поставляться несколькими партиями, хотя формально и с одинаковыми свойствами, пластины из разных партий должны складироваться отдельно и собираться в блок примерно одинаковыми порциями, чтобы обеспечить идентичность всех магнитов. В блоке пластины равномерно перемешиваются. Перед набором пластин в приспособление необходимо каждую пластину промыть (обезжирить) бензино-спиртовой смесью (в соотношении 50:50) и просушить на воздухе.

Сборка магнитопровода осуществляется на специально изготовленном стапеле в рамках жёстких механических допусков. Блоки магнитопроводов

набираются пакетами по 22 пластины, в каждом пакете пластины укладываются заусенцами в одну сторону. Каждый последующий пакет разворачивается относительно предыдущего на 180° вокруг вертикальной оси. Во время сборки постоянно контролируются геометрические размеры, отклонение от прямолинейности и плоскостности поверхностей, формирующих магнитное поле, усилие сжатия шихтованного магнитопровода. Кроме того, необходимо обеспечить отклонение от номинальной длины магнита не более ± 0.2 мм и коэффициент заполнения 98%. Необходимое усилие сжатия обеспечивается и контролируется с помощью динамометрического ключа.

Набор пластин в каждом блоке взвешивается для контроля постоянства коэффициента заполнения. Пластины, собранные в блок в специальном приспособлении и сжатые при помощи специальных пружинных прижимов с усилием сжатия не менее 15 кгс/см^2 , склеиваются в печи по стандартной технологии, принятой в ИЯФ. Внутри печи располагается система термодатчиков, контролирующая равномерность температуры в рабочем объеме печи.

После склейки блок магнитопровода медленно охлаждается до комнатной температуры, затем проходит тщательную проверку на соответствие чертежным размерам: зазор между половинами сердечника, межполюсной зазор, перпендикулярность боковых поверхностей, положение реперных знаков и др. Результаты измерений заносятся в технический паспорт.

После изготовления сердечника проводится дополнительная механическая обработка: сверлятся отверстия для крепления катушек, электрических терминалов, юстировочных приспособлений и др. При этом не допускается никакая дополнительная механическая обработка полюсных поверхностей.

Для обеспечения воспроизводимости параметров после разборки-сборки половинки магнитопровода штифтуются в сборе в продольном и поперечном направлении.

3.2. Изготовление катушек

Катушки для всех трех типов корректоров одинаковы. Они намотаны цельным медным проводом ПСДКТ 1.25×2.8 ГОСТ 7019-80, по 299 витков в каждой катушке (20 слоев по 15 витков в слое, в последнем слое – 14 витков). Провод представляет собой шину прямоугольного сечения размером $1.25 \times 2.8 \text{ мм}^2$ с утоненной изоляцией из стеклянных нитей, наложенных двумя слоями, с подклейкой и пропиткой нагревостойким кремнийорганическим лаком, поэтому дополнительная межвитковая изоляция при намотке катушек не требуется. Испытания в ИЯФ показали хорошую радиационную стойкость такой изоляции [2, 3].

Промежуточная пайка внутри катушки не допускается. Для уменьшения “распушения” катушки во время намотки применяется специальное устройство для натяжения провода.

Послеобмоточная изоляция катушки выполнена стеклолентой размером 0.13×20 мм в один слой без перекрытия.

Катушка мотается на специальной оправке. После намотки катушка пропитывается в вакууме компаундом ЭПК-1 с наполнителем, обеспечивающим повышенную механическую и радиационную стойкость. В качестве наполнителя применяется порошок двуокиси алюминия. Перед пропиткой катушка и эпоксидная смола подвергаются вакуумной сушке и обезгаживанию.

После пропитки измеряются сопротивление и индуктивность каждой катушки, проверяется состояние межвитковой изоляции, а также изоляция катушки относительно земли. Результаты всех измерений должны быть приведены к стандартной температуре, в данном случае, 23°C.

Для проверки межвитковой изоляции катушка включается в цепь колебательного контура, образованного конденсатором, заряженным до высокого напряжения, и катушкой. Частота и декремент затуханий при разряде позволяют судить о количестве витков и качестве изоляции, а отсутствие искажений формы затухающей синусоиды – об отсутствии межвитковых пробоев (см. Рис. 3.2).

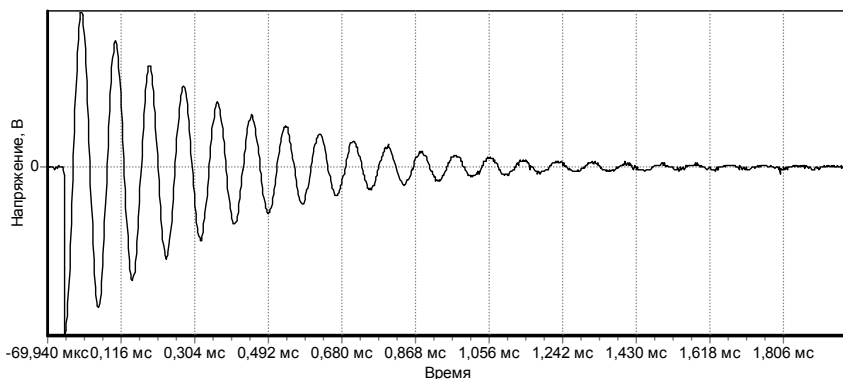


Рис. 3.2. Осциллограмма проверки межвитковых замыканий.

Для проверки изоляции относительно земли ("корпусная изоляция") катушка полностью, за исключением выводов, погружается в ванну с водопроводной водой, обладающей хорошей проводимостью. После 24-часового замачивания измеряется сопротивление между выводами катушки и корпусом ванны (должно быть не менее 20 МОм). Затем на катушку подается постоянное напряжение 2 кВ относительно корпуса ванны и измеряется ток утечки, который должен быть не свыше 100 мкА.

Каждая катушка закреплена на своей половинке магнитопровода с помощью двух тяг, с резьбовыми шпильками и уголковых кронштейнов, расположенных на торцевых поверхностях магнитопровода. Такая конструкция обеспечивает плотную посадку катушки на ярме.

Выводы катушек припаяны к контактам, находящимся на колодках, приклеенных к катушкам, что надежно защищает их от повреждений (Рис. 3.3)



Рис. 3.3. Крепление выводов катушек.

Конструкция верхней и нижней катушек одинакова. В собранном магните нижняя катушка перевернута на 180° относительно верхней. Коммутация катушек между собой осуществляется через клеммник типа WAGO, закрепленный на магнитопроводе. Начало верхней катушки соединяется с началом нижней. Концы катушек образуют начало и конец общей обмотки магнита.

Результаты испытаний катушек заносятся в технический паспорт.

3.3. Сборка магнита

Половинки магнитопровода стягиваются между собой с помощью 6 болтов М8 (по 3 с каждой стороны) через специальные стальные планки.

Для обеспечения идентичности после разборки-сборки магнитопровода собранные с помощью шпилек половинки магнитопровода заштифтованы в трёх местах в плоскости разъёма цилиндрическими штифтами.

Статистика межполюсных зазоров магнитов приведена в Таблице 3.1.

Таблица 3.1

Статистика межполюсных зазоров корректоров

Корректор	CX	CX1	CY
Зазор, номинал, мм	28.05 ± 0.03	45.05 ± 0.03	45.05 ± 0.03
Среднее по всем магнитам данного типа, мм	28.058	45.045	45.049
Стандартное отклонение, мм	0.013	0.004	0.007

Магнит крепится к опорной плите толщиной 18 мм четырьмя винтами М10 из немагнитной стали через промежуточные втулки из немагнитной стали, обеспечивающие предварительную выставку магнита по высоте. Окончательная юстировка по высоте осуществляется тремя регулировочными винтами с контрагайками, расположенными на опорной плите.

Регулировка магнита в горизонтальной плоскости предусмотрена на гирдере.

Магниты окрашены красной краской. Неокрашенными остаются только: полюсные поверхности, места стыка половин магнитопровода и места для юстировочных знаков. Неокрашенные поверхности защищены тонким слоем консистентной смазки.

Магнит в сборе подвергается прогону при максимальном токе в течение не менее 2 часов.

Каждый корректор сопровождается Техническим Паспортом, в котором фиксируются основные параметры и результаты измерений:

- Номера магнитопроводов и катушек, входящих в состав корректора.
- Габариты каждого полусердечника
- Величина межполюсного зазора.
- Параметры каждой катушки: результаты внешнего осмотра, основные размеры, сопротивление катушки, электрическая прочность изоляции, отсутствие межвитковых замыканий.
- Результаты испытаний магнита в сборе: контроль размеров, сопротивление обмотки, индуктивность магнита, изоляция обмотки, результаты двухчасового прогона на номинальном токе.
- Положение отверстий для юстировочных знаков.
- Результаты магнитных измерений: кривые гистерезиса, зависимость интеграла поля от тока, поперечная однородность интеграла поля на разных токах.

Общий вид корректоров показан на Рис. 3.4 и 3.5.

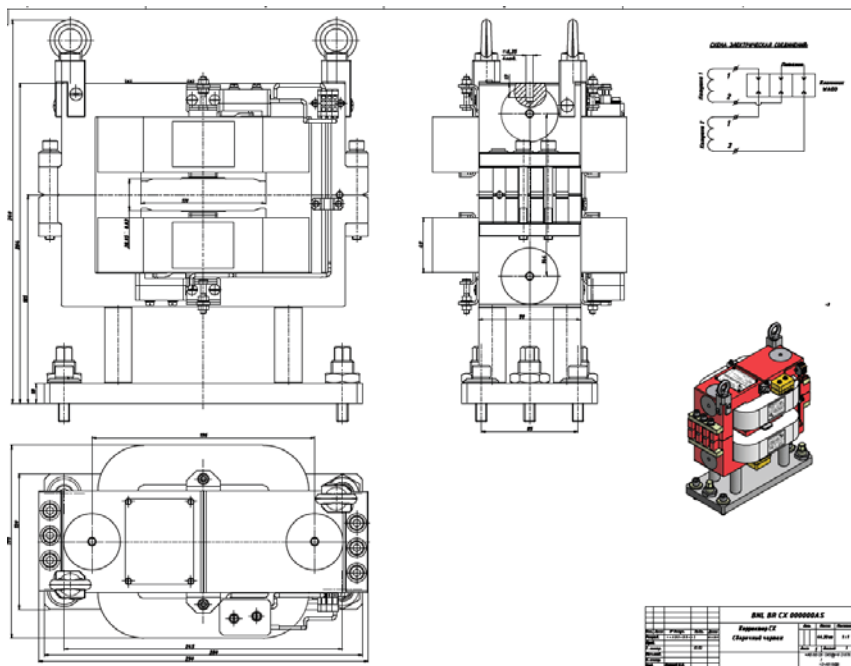
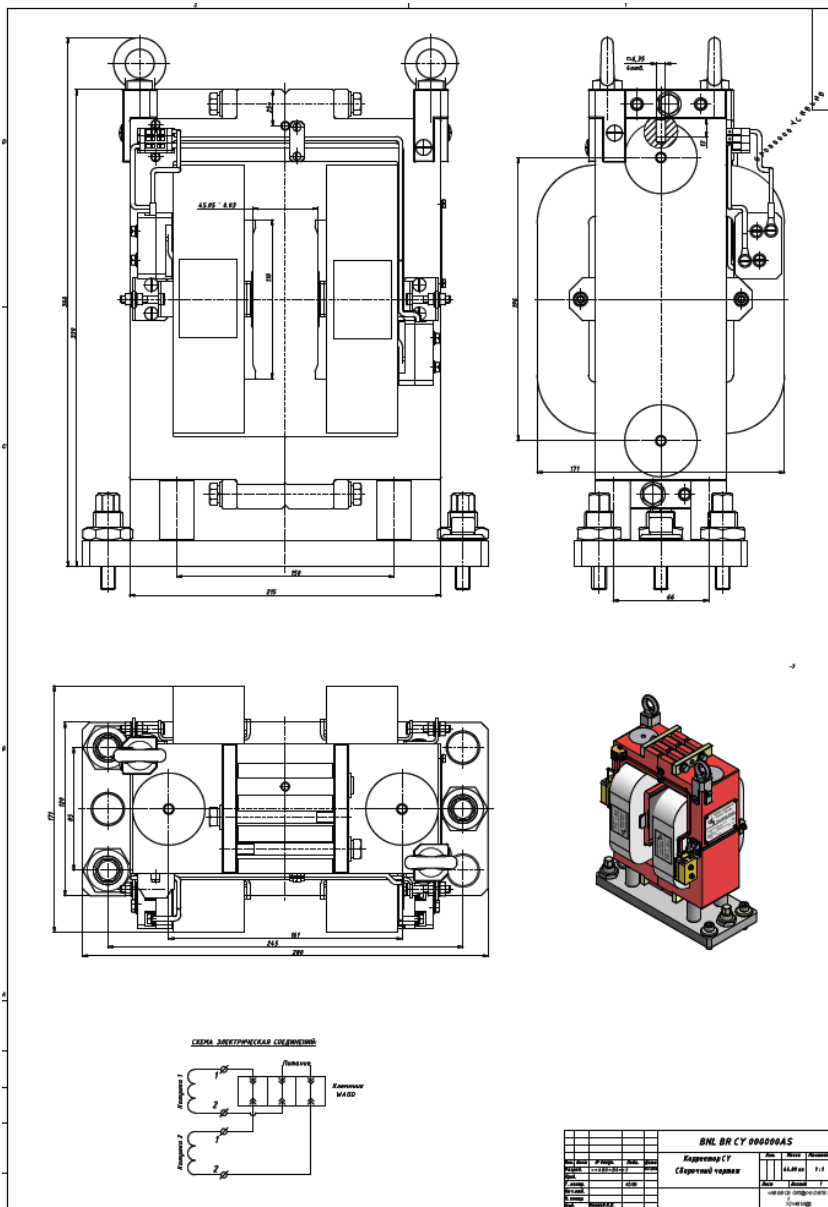


Рис. 3.4. Общий вид корректора СХ
(корректор СХ1 отличается только межполюсным зазором).



ВНЛ ВР СУ 000000AS		№	Велич	Масштаб
Исполн.	Провер.	Дата	Лист	Всего
С.И.И.	С.И.И.	2000	1	1
Корректор СУ		1:1	1:1	1:1
Скрытый чехол		1:1	1:1	1:1
Масштаб	1:1	1:1	1:1	1:1
Масштаб	1:1	1:1	1:1	1:1
Масштаб	1:1	1:1	1:1	1:1
Масштаб	1:1	1:1	1:1	1:1

Рис. 3.5. Общий вид корректора СУ.

4. Магнитные измерения

4.1. Общее описание

Программа стандартных магнитных измерений включала в себя измерение распределения магнитного поля в медианной плоскости с шагом 5 мм в интервале ± 300 мм вдоль оси пучка и ± 40 мм в поперечном направлении при токах возбуждения $I=0$ (остаточное поле), 0.3 А (инжекция), 1 А, 3 А, 5 А – для всех магнитов. Помимо этого, для нескольких случайно выбранных магнитов проводилось измерение распределения магнитного поля на 2 – 3 высотах. Измерения проводились на постоянном токе. Для одного магнита проводились сравнительные измерения при двух полярностях тока возбуждения.

Магнитные измерения всех магнитов проводились на специальном стенде блоком из 19 датчиков Холла, объединенных в пространственную матрицу. Датчики размещены в медном блоке (Рис. 4.1) расстояние между датчиками в перпендикулярном относительно оси пучка направлении ~ 5 мм (расстояния измерены с точностью ~ 15 мкм).

Область измерений в поперечном направлении ± 45 мм. В продольном направлении перемещение блока осуществляется с помощью шагового двигателя. Диапазон перемещения в данном случае был выбран ± 300 мм – далеко за пределом рассеянных полей. Магнит и система перемещения расположены на специальной немагнитной оптической скамье, блок датчиков перемещается внутри алюминиевой направляющей (Рис. 4.2).

Все типы измеряемых магнитов имеют сравнительно малые длины и большие апертуры. Вследствие этого, заметное влияние на величину интеграла магнитного поля оказывают краевые поля. Поэтому необходимо было обеспечить точное измерение малых величин магнитных полей. Для того, чтобы проводить измерения с хорошей относительной точностью (порядка 10^{-3}), необходимо поддерживать измерительную систему в состоянии, обеспечивающем измерения с абсолютной точностью 0.5 Гс, предельной для датчиков Холла. С этой целью ежедневно перед началом измерений в обязательном порядке осуществлялись следующие технические мероприятия:

- прогрев датчиков Холла запитывающим их током в течение не менее 1-2 часов;
- измерение и перезапись нулевых значений датчиков;
- регулярная перекалибровка датчиков в калибровочном магните.



Рис. 4.1. Блок датчиков Холла (верхняя крышка снята).

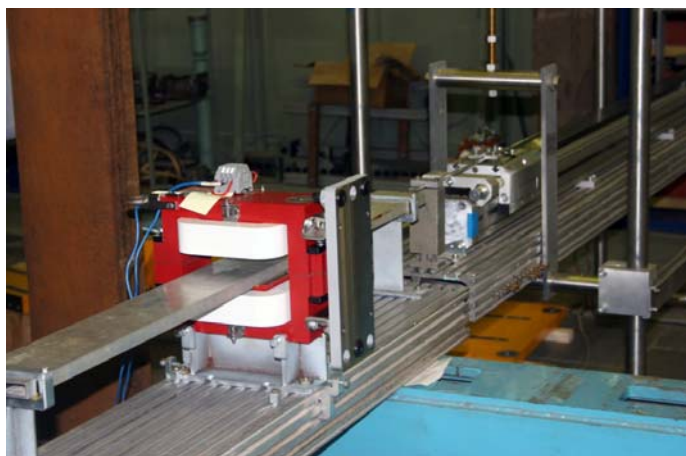


Рис. 4.2. Магнит на стенде в блоке магнитных измерений.

В соответствии с техническим заданием, рабочий ток корректора до 5 А. Перед началом измерений всегда проводился стандартный цикл нормализации магнита, включающий изменение тока от нуля до 6 А и снова до нуля со скоростью 0.2 А/сек и с выдержкой в нуле и на максимальном токе по 20÷30 секунд. Указанная процедура повторялась 5 раз, причем для одного магнита (первого) снималась кривая гистерезиса во время всех пяти циклов, чтобы убедиться в достаточности 5-кратного циклирования. Рис. 4.3, 4.4 показывают динамику изменения поля в процессе шести циклов нормализации.

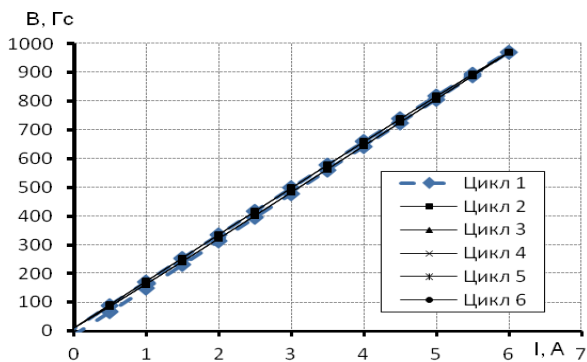


Рис. 4.3. Корректор СХ1. Шестикратное повторение циклов намагничивания. Перед началом первого цикла корректор был замагничен током противоположного знака.

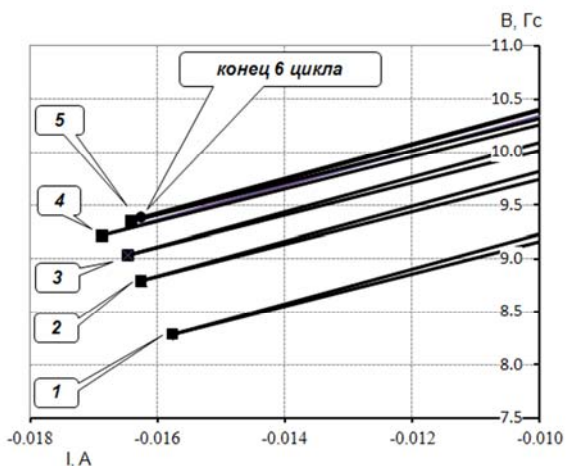


Рис. 4.4. Корректор СХ1. Остаточное поле после последовательного повторения циклов намагничивания (нижняя точка циклирования). Цифры около кривых означают конец соответствующего цикла намагничивания и начало следующего цикла.

В процессе измерений на разных уровнях полей ток всегда изменялся от меньшего к большему. При необходимости перехода к меньшим значениям тока процедура всегда проводилась через подъем до 6 А и опускание до нуля с последующей уставкой требуемого тока. Этот порядок необходимо всегда соблюдать, так как ненулевая ширина петли гистерезиса, зависящая к тому же от межполюсного зазора магнита, может вносить неопределенность в результаты измерений. (Рис. 4.5 и 4.6).

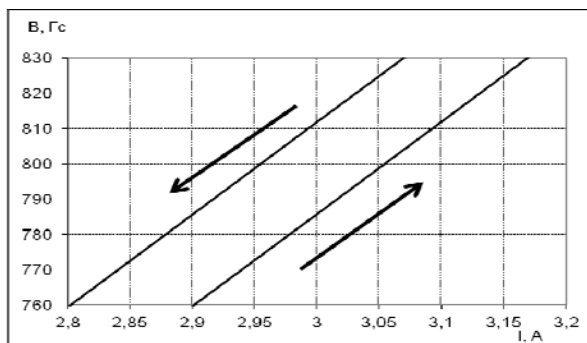


Рис. 4.5. Корректор СХ01. Ширина петли гистерезиса в середине цикла.

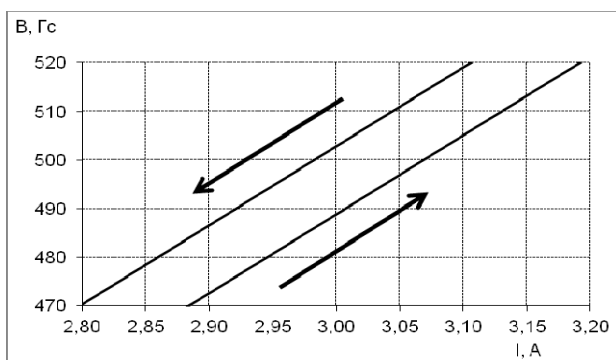


Рис. 4.6. Корректор СУ01. Ширина петли гистерезиса в середине цикла.

Для исключения влияния рассеянных полей от массивных стальных предметов перед постановкой магнита на измерительный стенд проводилось измерение распределения рассеянного поля вдоль направляющей – без магнита. В дальнейшем это учитывалось при обработке результатов.

Измерения серийных магнитов проводились в медианной плоскости ($Y = 0$), для некоторых – дополнительно на $2\div 3$ высотах.

Для всех магнитов снималась карта поля: в 5 точках по току: 0 (остаточное поле), 0,3 А (инжекция), 1 А, 3 А, 5 А. Для этих же точек строился интеграл поля в плоскости поворота пучка.

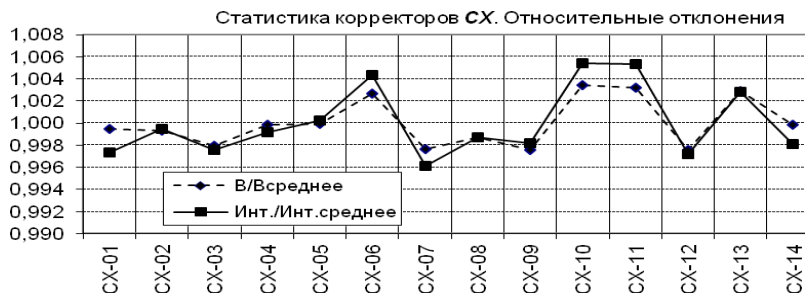
Для одного магнита измерения повторялись на другой полярности тока. Точность измерений не хуже 10^{-3} .

Ниже приводятся основные результаты магнитных измерений корректоров.

4.2. Сводка основных результатов магнитных измерений

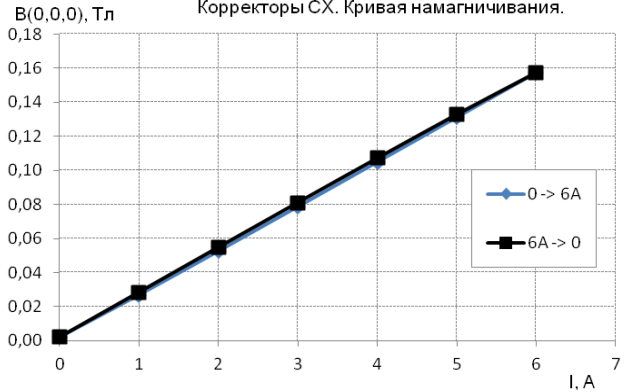
4.2.1. Корректоры типа СХ. Статистика ($I = 5 \text{ A}$)

Номер корректора	$V(0,0,0)$, Гс	$V/V_{\text{среднее}}$	Интеграл поля $(0,0,z)$, Гс*см	Инт/Инт _{сред.}	Эффективная длина, см
СХ-01	1309.98	0.9995	16146	0.9973	12.325
СХ-02	1309.78	0.9993	16180	0.9994	12.353
СХ-03	1307.94	0.9979	16150	0.9976	12.348
СХ-04	1310.47	0.9998	16175	0.9991	12.343
СХ-05	1310.57	0.9999	16193	1.0002	12.356
СХ-06	1314.15	1.0027	16260	1.0044	12.373
СХ-07	1307.54	0.9976	16126	0.9961	12.333
СХ-08	1309.03	0.9987	16168	0.9987	12.351
СХ-09	1307.48	0.9976	16159	0.9981	12.359
СХ-10	1315.17	1.0034	16277	1.0054	12.376
СХ-11	1314.83	1.0032	16276	1.0054	12.379
СХ-12	1307.51	0.9976	16144	0.9972	12.347
СХ-13	1314.49	1.0029	16235	1.0028	12.351
СХ-14	1310.46	0.9998	16158	0.9981	12.330
Среднее	1310.67	1.0000	16189	1.0000	12.352
Ст.отклон.	2.85	0.0022	51.46	0.0032	0.0164
Относит.	0.0022	0.0022	0.0032	0.0032	0.0013

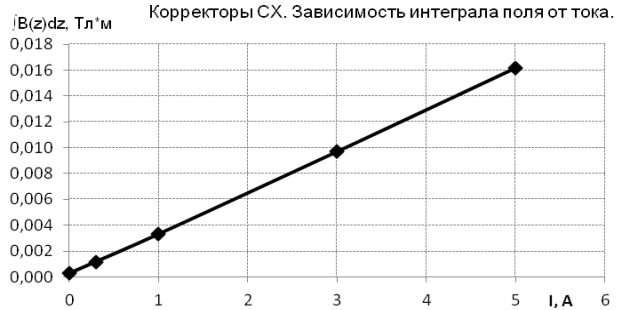


Корректоры типа СХ. Среднее по 14 магнитам

I, A	B (I), Тл
0	0.0020
1	0.0268
2	0.0525
3	0.0786
4	0.1048
5	0.1311
6	0.1573
5	0.1327
4	0.1071
3	0.0810
2	0.0548
1	0.0284
0	0.0020



I, A	Интеграл поля по оси пучка, Тл*м
0	0.00026
0.3	0.00117
1	0.00331
3	0.00970
5	0.01619



X, mm	Инт.(x,0,z)dz отн.ед.
30.2	0.9936
25.2	0.9951
19.8	0.9968
15.4	0.9977
9.9	0.9989
5.3	0.9995
0.0	1.0000
-5.0	0.9995
-10.2	0.9992
-14.8	0.9980
-20.6	0.9970
-24.7	0.9953
-29.9	0.9941

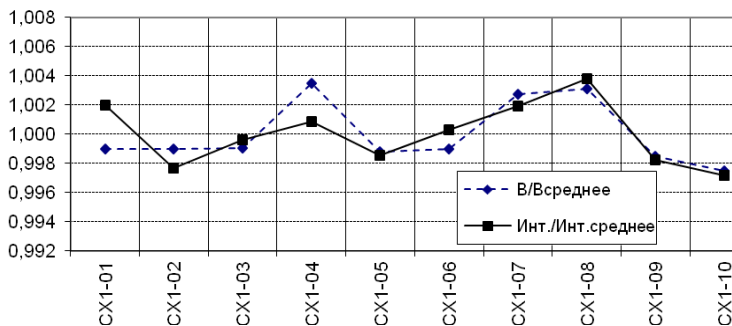


Эффективная длина $L_{\text{эф}} = 0.123 \text{ м}$.

4.2.2. Корректоры типа CX1. Статистика ($I = 5 \text{ A}$)

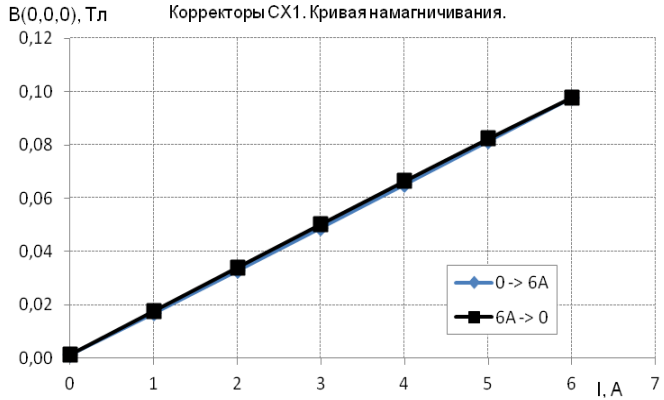
Номер корректора	$V(0,0,0)$, Гс	$V/V_{\text{среднее}}$	Интеграл поля $(0,0,z)$, Гс*см	Инт/Инт _с ред.	Эффективная длина, см
CX1-01	814.80	0.9990	10914	1.0020	13.395
CX1-02	814.81	0.9990	10867	0.9976	13.337
CX1-03	814.85	0.9990	10888	0.9996	13.362
CX1-04	818.44	1.0034	10902	1.0009	13.320
CX1-05	814.63	0.9988	10877	0.9986	13.352
CX1-06	814.77	0.9989	10896	1.0003	13.373
CX1-07	817.87	1.0027	10913	1.0019	13.344
CX1-08	818.18	1.0031	10934	1.0038	13.364
CX1-09	814.39	0.9985	10873	0.9982	13.352
CX1-10	813.59	0.9975	10862	0.9972	13.351
Среднее	815.63	1.0000	10893	1.0000	13.355
Ст.отклон.	1.79	0.0022	23.40	0.0021	0.02
Относит.	0.0022	0.0022	0.0021	0.0021	0.0015

Статистика корректоров CX1. Относительные отклонения

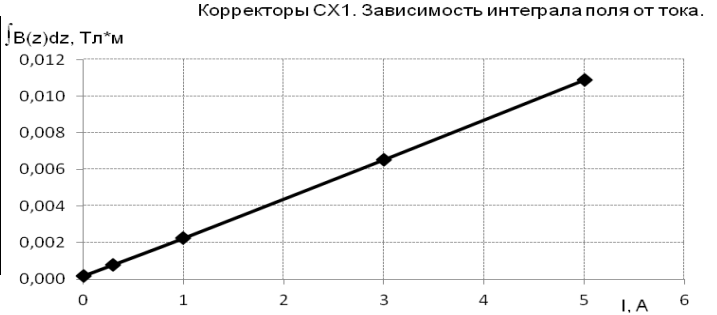


Корректоры типа СХ1. Среднее по 10 магнитам

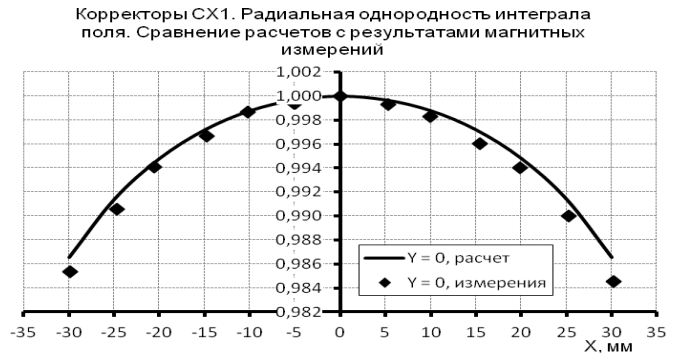
I, А	B (I), Тл
0	0.0012
1	0.0168
2	0.0328
3	0.0490
4	0.0652
5	0.0816
6	0.0979
5	0.0824
4	0.0665
3	0.0503
2	0.0340
1	0.0176
0	0.0012



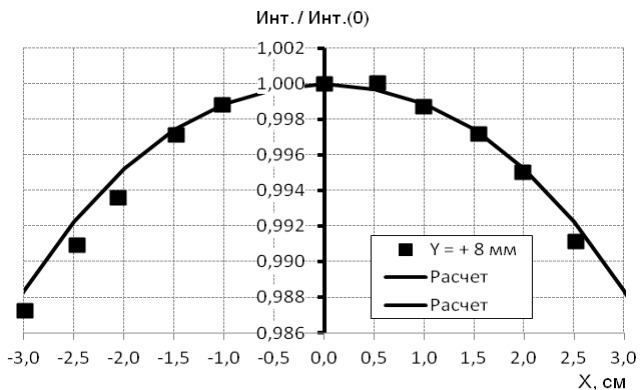
I, А	Интеграл поля по оси пучка, Тл*м
0	0.00018
0.3	0.00079
1	0.00224
3	0.00653
5	0.01089



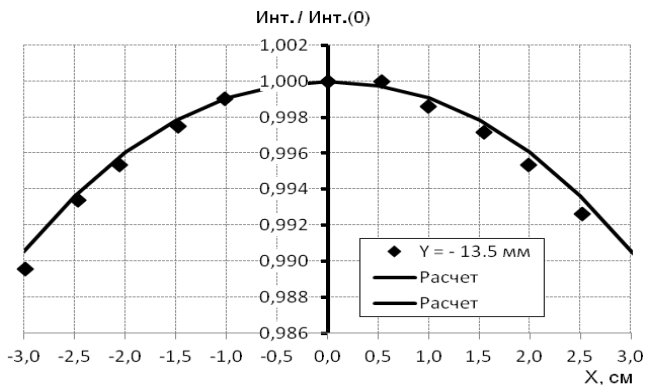
X, mm	Инт.(x,0,z)dz отн. ед.
30.2	0.9845
25.2	0.9900
19.8	0.9941
15.4	0.9960
9.9	0.9983
5.3	0.9993
0.0	1.0000
-5.0	0.9994
-10.2	0.9987
-14.8	0.9967
-20.6	0.9941
-24.7	0.9906
-29.9	0.9854



Эффективная длина $L_{эф} = 0.134$ м.



Корректор CX1. Однородность интеграла поля на высоте 8 мм.

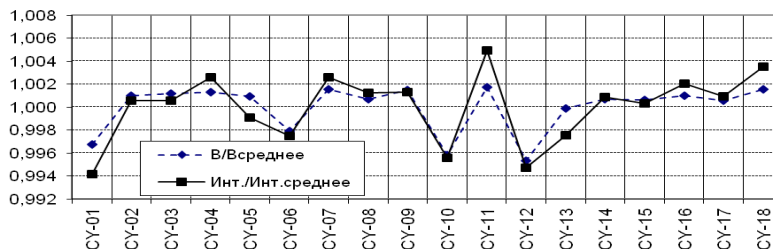


Корректор CX1. Однородность интеграла поля на высоте 13.5 мм..

4.2.3. Корректоры типа СУ. Статистика ($I = 5 A$)

Номер корректора	$V(0,0,0)$, Гс	$V/V_{\text{среднее}}$	Интеграл поля $(0,0,z)$, Гс*см	Инт/Инт _{сред.}	Эффективная длина, см
СУ-01	815.70	0.9967	10875	0.9942	13.332
СУ-02	819.19	1.0010	10945	1.0006	13.361
СУ-03	819.36	1.0012	10945	1.0005	13.358
СУ-04	819.45	1.0013	10967	1.0026	13.383
СУ-05	819.12	1.0009	10929	0.9991	13.342
СУ-06	816.65	0.9979	10911	0.9975	13.361
СУ-07	819.61	1.0015	10967	1.0026	13.381
СУ-08	818.95	1.0007	10952	1.0012	13.373
СУ-09	819.61	1.0015	10953	1.0013	13.364
СУ-10	814.95	0.9958	10890	0.9955	13.363
СУ-11	819.80	1.0017	10992	1.0049	13.409
СУ-12	814.53	0.9953	10881	0.9947	13.359
СУ-13	818.30	0.9999	10912	0.9976	13.335
СУ-14	818.91	1.0007	10948	1.0009	13.369
СУ-15	818.88	1.0006	10942	1.0003	13.362
СУ-16	819.18	1.0010	10961	1.0020	13.380
СУ-17	818.82	1.0006	10949	1.0009	13.372
СУ-18	819.62	1.0015	10977	1.0035	13.393
Среднее	818.37	1.0000	10938.7	1.0000	13.37
Ст.отклон.	1.69	0.0021	32.94	0.0030	0.02
Относит.	0.0021	0.0021	0.0030	0.0030	0.0014

Статистика корректоров СУ. Относительные отклонения

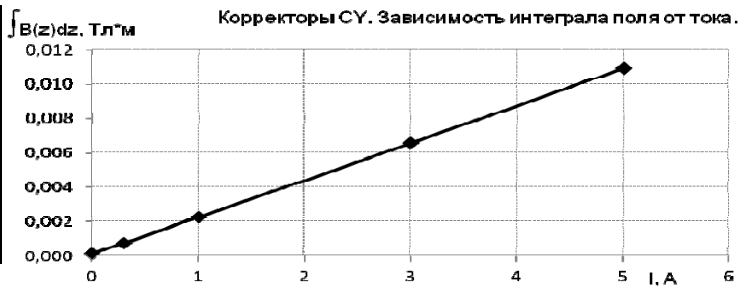


Корректоры типа СУ. Среднее по 18 магнитам

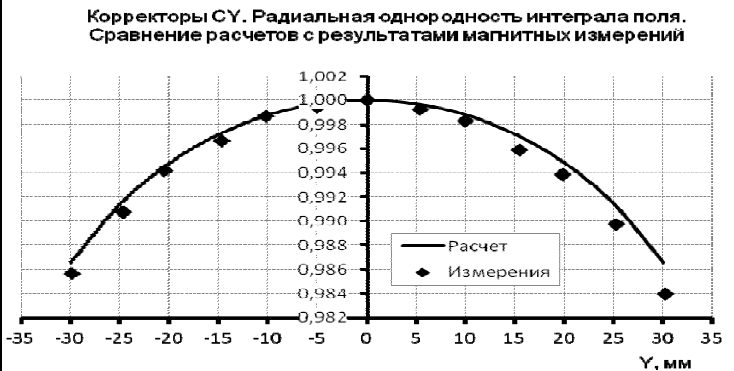
I, А	B (I), Тл
0	0.0010
1	0.0168
2	0.0329
3	0.0491
4	0.0655
5	0.0818
6	0.0982
5	0.0825
4	0.0664
3	0.0502
2	0.0338
1	0.0174
0	0.0010



I, А	Интеграл поля по оси пучка, Тл*м
0	0.00015
0.3	0.00078
1	0.00225
3	0.00657
5	0.01094



X, мм	Инт.(x,0,z)dz отн.ед.
30.2	0.9840
25.2	0.9898
19.8	0.9939
15.4	0.9959
9.9	0.9983
5.3	0.9993
0.0	1.0000
-5.0	0.9994
-10.2	0.9987
-14.8	0.9967
-20.6	0.9942
-24.7	0.9907
-29.9	0.9857



Эффективная длина $L_{эф} = 0.134$ м

5. Основные параметры корректоров

В результате расчетных, конструкторских и технологических работ определены следующие параметры корректоров.

Таблица 5.1.

Тип корректора		CX	CX1	CY
Количество магнитов		12+1	8+1	16+1
Максимальная энергия пучка	ГэВ	3		
Межполюсной зазор	мм	28	45	45
Амплитуда магнитного поля	Тл	0.13	0.08	0.08
Интеграл магнитного поля	мТл*м	16	11	11
Угол поворота	мрад	1.7	1.1	1.1
Эффективная магнитная длина	м	0.12	0.13	0.13
Область хорошего поля	мм	± 20		
Однородность в области хорошего поля		5·10 ⁻³		
Полная длина магнита вдоль оси пучка	мм	< 200		
Длина ярма	мм	90		
Тип ярма		Ш-образный, ламинированный		
Материал ярма		Сталь М940-50А ThyssenKrupp Stahl		
Толщина пластин	мм	0.5		
Количество катушек		2		
Число витков в катушке		299		
Частота повторения	Гц	1 (2) ^{*)}		
Длительность импульса тока	с	0.5		
Амплитудное значение тока	А	5		
Материал проводника		Медный провод 1.25×2.8 ГОСТ 7019-80		
Активное сопротивление магнита	Ом	1.65		
Индуктивность магнита	Гн	0.4	0.25	0.25
Активное падение напряжения	В	8.5	8.5	8.5
Реактивное падение напряжения	В	12.5	8	8
Средняя мощность при амплитуде тока 5А и частоте повторения 1 Гц	Вт	10 (20) ^{*)}		
Вид охлаждения		воздушное		
Перепад температур при амплитуде тока 5А и частоте повторения 1 Гц	°С	8 (15.4) ^{*)}		
Вес магнита	кг	35.5	36.5	36.5

^{*)} Цифры в скобках соответствуют частоте повторения 2 Гц. Форма импульса тока – полуволна синусоиды.

6. Заключение

По результатам магнитных измерений заказчик (лаборатория BNL) был удовлетворен качеством корректоров и отказался от необходимости дальнейших улучшений, связанных с коррекцией фасок на торцах магнитов, которые, согласно расчетам, могут обеспечить повышение однородности поля примерно на порядок (см. Приложение 1).

К середине июля 2012 года все корректоры, включая резервные, были отправлены в BNL, где были смонтированы и принимали участие в успешном запуске бустерного синхротрона NSLS-II.

По результатам запуска бустера была показана необходимость правильного циклирования в процессе работы не только основных дипольных магнитов, но и корректоров. Синхротроны подобного класса очень чувствительны к остаточному полю в магнитных элементах, особенно в момент инжекции. Величины магнитного поля в основных элементах в это время $\sim 200 \div 400$ Гс. Из-за большого числа корректоров и остаточного поля в них $\sim 10 \div 20$ Гс при неправильном циклировании возникает дополнительный интеграл магнитного поля, что приводит к потере или понижению КПД инжекции и ускорения.

Литература

- [1] G.E. Fischer. Iron Dominated Magnets. // SLAC-PUB-3726, July 1985 (M).
- [2] В.В. Петров, Ю.А.Пупков. Испытания в ИЯФ радиационной стойкости материалов, используемых при создании магнитных систем ускорителей. // Препринт ИЯФ 2010-1, Новосибирск, 2010.
- [3] V.V. Petrov, Yu.A. Pupkov. BINP Testing of Radiation Resistance of the Materials Used for Production of Accelerator Magnetic Systems. // Budker INP 2011-13, Novosibirsk, 2011

Приложение 1.

Возможности улучшения области однородности поля

Принятая форма полюсов корректоров удовлетворяет поставленным требованиям по однородности. Однако, в принципе, можно было спроектировать магниты с более однородным полем, что не было сделано ранее из-за ограниченных сроков на проектирование и изготовление пластин.

Эффективность работы магнита определяется интегралом поля вдоль орбиты, поэтому в процессе счета оптимизировалась именно эта величина. Как уже говорилось ранее, одно из существенных требований – профиль полюса магнитов с разными межполюсными зазорами должен быть одинаковым, т.к. в целях уменьшения стоимости проекта пластины должны изготавливаться одним штампом. Оптимизация радиальной однородности интеграла для магнитов с разными зазорами достигается лишь за счет коррекции фасками на торце.

Рис. П.1.1 и П.1.2 демонстрируют влияние формы шима на однородность интеграла поля в корректоре типа СХ1.

Выборки на торце магнита помогают существенно улучшить однородность поля (Рис. П.1.3). В частности, выборка шириной ± 2 см относительно середины полюса, высотой 3 мм и глубиной 3 мм позволяет обеспечить однородность интеграла поля до $2 \cdot 10^{-4}$ в диапазоне ± 20 мм и $2 \cdot 10^{-3}$ в диапазоне ± 25 мм (Рис. П.1.4).

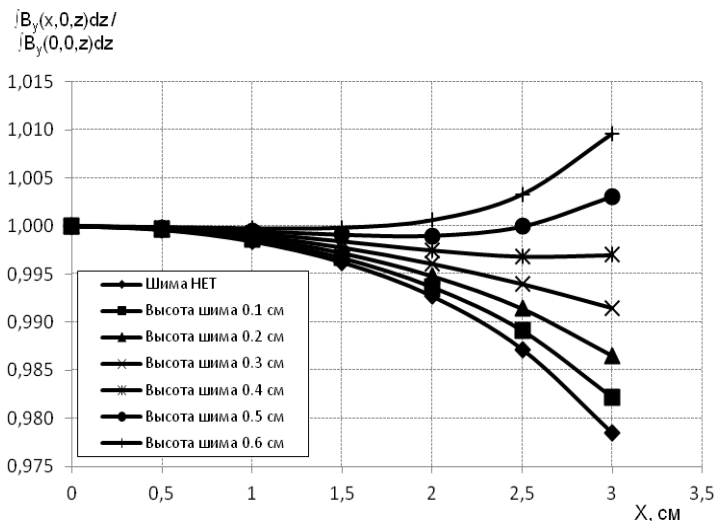


Рис. П.1.1. Корректор СХ1. 3D счет. Влияние высоты шима на полюсе магнита на однородность интеграла поля в медианной плоскости. Длина шима 0.5 см. Фасок на торце магнита нет.

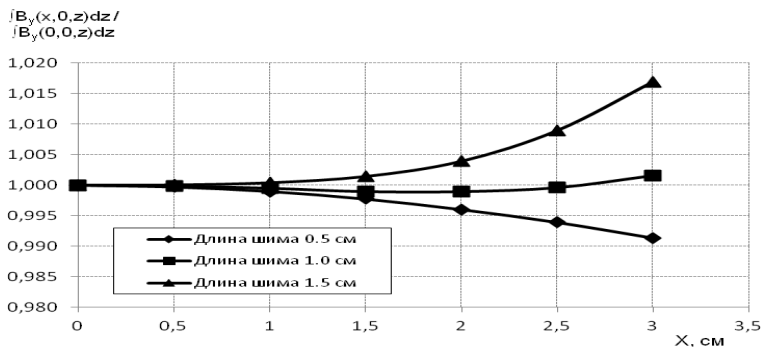


Рис. П.1.2. Корректор CX1. 3D счет. Влияние длины шима на полюсе магнита на однородность интеграла поля в медианной плоскости. Высота шима 0.3 см. Фасок на торце магнита нет.

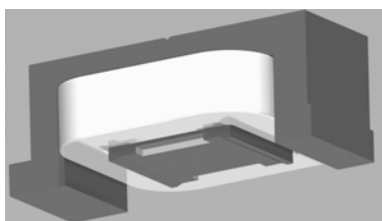


Рис. П.1.3. Магнит с шимами и выборкой в полюсе на торце. Модель для 3D-счета.

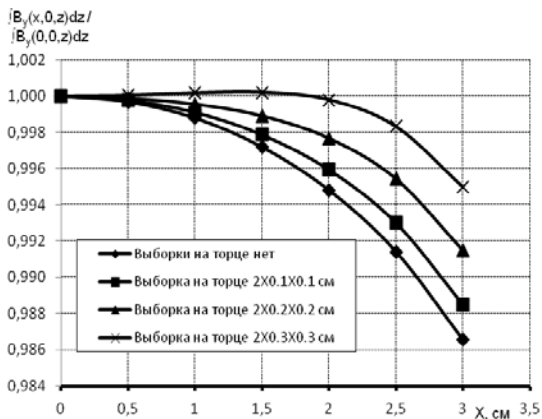


Рис. П.1.4. Корректор CX1. 3D счет. Влияние выборки на торце магнита на однородность интеграла поля в медианной плоскости. Цифры на графике означают: "ширина выборки в полюсе (от оси)" × "высота выборки" × "глубина выборки".

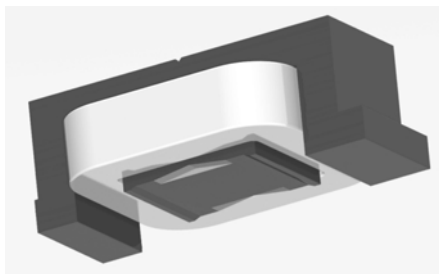


Рис. П.1.5. Магнит с шимами и выборкой в полусе на торце в виде клина.
Модель для 3D-счета.

Сделав выборку на торце в виде клина (Рис. П.1.5) и меняя ее глубину, можно еще больше расширить область радиальной однородности интеграла поля в медианной плоскости. Выборка глубиной 3 мм, начальной высотой в центре полюса 3 мм с последующим уменьшением до нуля на протяжении 3 см позволяет получить однородность интеграла поля до $2 \cdot 10^{-4}$ в диапазоне ± 30 мм и $1 \cdot 10^{-3}$ в диапазоне ± 35 мм (Рис. П.1.6).

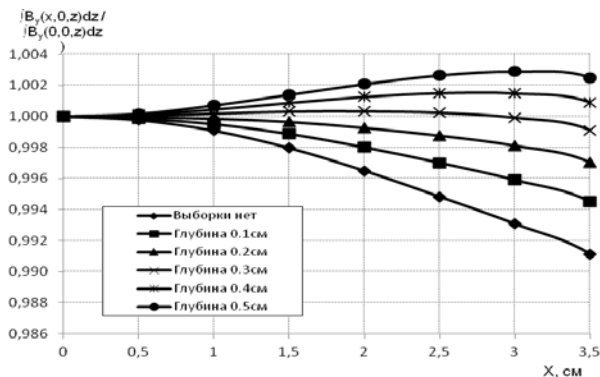


Рис. П.1.6. Корректор СХ1. 3D счет. Влияние глубины клинообразной выборки в полусе на торце магнита на однородность интеграла поля в медианной плоскости. Шим 0.5×0.33 см + скос 0.5 см в направлении $X=0$.

Уменьшение абсолютной величины интеграла при этом будет незначительным, $\sim 1\%$.

Аналогично для корректора типа СХ выборка шириной ± 2 см относительно середины полюса, высотой 1.7 мм и глубиной 1 мм позволяет обеспечить однородность интеграла поля до $1 \cdot 10^{-4}$ в диапазоне ± 25 мм и $7 \cdot 10^{-4}$ в диапазоне ± 30 мм (Рис. П.1.7).

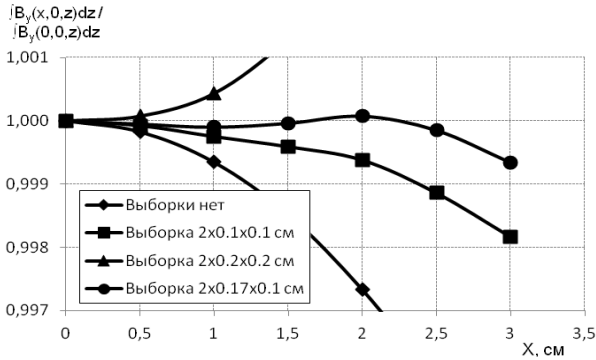


Рис. П.1.7. Корректор СХ. 3D счет. Влияние выборки на торце магнита на однородность интеграла поля в медианной плоскости. Цифры на графике означают: "ширина выборки в полюсе (от оси) × "высота выборки" × "глубина выборки".

Приложение 2.

Эксперименты с блоком магнита СХ1

Задача: выяснить, можно ли делать все блоки магнитопроводов одинаковыми, а затем блоки, предназначенные для магнитов типа СХ1, обрезать по плоскости соприкосновения половин магнитопроводов до получения межполюсного зазора 28 мм, необходимого для корректоров типа СХ. В этом случае можно будет реально использовать один и тот же штамп для изготовления пластин магнитов корректоров типа СХ и СХ1.

Во-первых, необходимо было решить, при каком способе обрезания пластины в блоке меньше всего закорачиваются? Рассматривались несколько вариантов:

- Фрезеровка плоскости стыка половин магнитопроводов торцевой фрезой.
- Шлифовка плоскости стыка вдоль пластин.
- Шлифовка поперек пластин.
- Обработка пескоструйкой после шлифовки.
- Обработка плоскости стыка на фрезерном станке резцовой фрезой типа "балеринка".

В результате проведенных экспериментов было найдено, что последний вариант является оптимальным, поэтому все нижеописанные эксперименты проводились именно с такими блоками.

1. Проверка сопротивления изоляции между пластинами полусердечника магнита СХ в исходном состоянии, после изготовления.

Имеем 2 блока, условно №1, №2 (Рис. П.2.1).

- Толщина пластин 0.5 мм.
- Площадь пластины $18989 \text{ мм}^2 \approx 190 \text{ см}^2$.
- Толщина блоков вдоль по пучку $L \approx 90 \text{ мм} \Rightarrow \approx 180$ пластин в блоке.
- Эффективная ширина области смыкания половин магнитопровода обратного ярма пластины (с учетом выступов для скрепления половин) $H = 2 \times 40 = 80 \text{ мм}$.

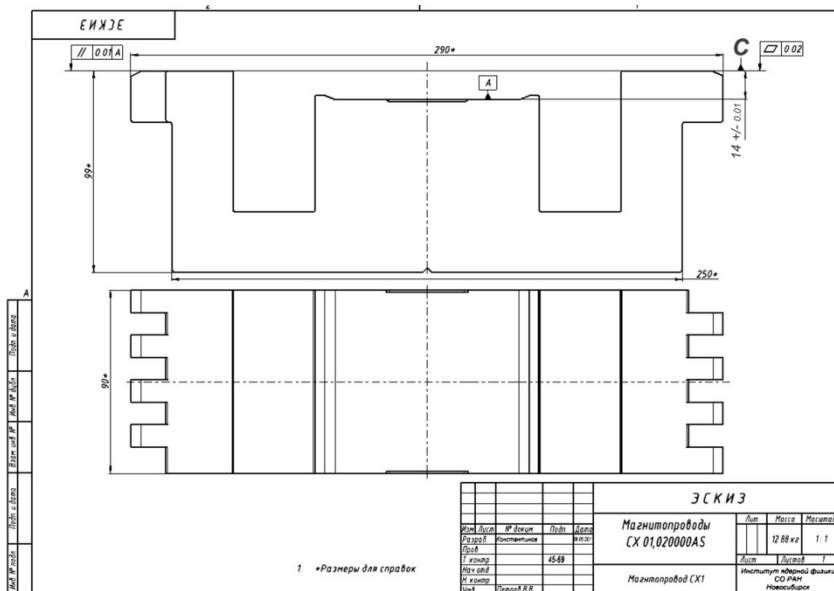


Рис. П.2.1. Схема блока магнитопровода.

Блоки магнитопроводов набираются пакетами по 22 пластины, в каждом пакете пластины укладываются заусенцами, образующимися после штамповки, в одну сторону. Каждый последующий пакет разворачивается относительно предыдущего на 180° вокруг вертикальной оси (см. Рис. П.2.2).

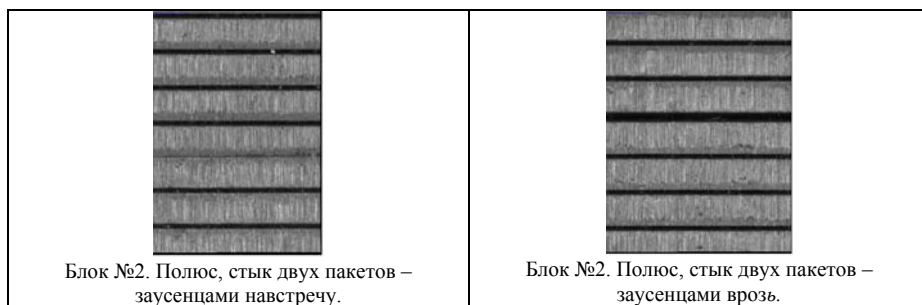


Рис. П.2.2. Фото полуса блока №2 в исходном состоянии, до обработки. Видна разница в границах между пакетами пластин, собранных заусенцами врозь и навстречу.

Определение сопротивления между боковыми поверхностями блоков проводилось путем измерения тока при приложении постоянного напряжения между боковыми поверхностями (Таблица П2.1).

Таблица П.2.1. Исходные сопротивления блоков до обработки

Номер блока	Напряжение между боковыми поверхностями блока U, В	Ток I, А	Сопротивление R, Ом
1	10	0.1	100
	30	0.27	111
2	30	0.08	375

Разброс в сопротивлениях блоков объясняется, по-видимому, случайными флуктуациями величин заусенцев при штамповке пластин.

2. Блок №2 – обработали на фрезерном станке поверхность С резцовой фрезой типа "балеринка"

1) Режим обработки:

- Скорость вращения – 355 об/мин.
- Подача – 50 мм/мин.
- Радиус окружности, по которой вращается резец ~ 100 мм.
- Глубина обработки ~ 0.4 мм.

2) **Фото поверхности после обработки (Рис. П.2.3):**

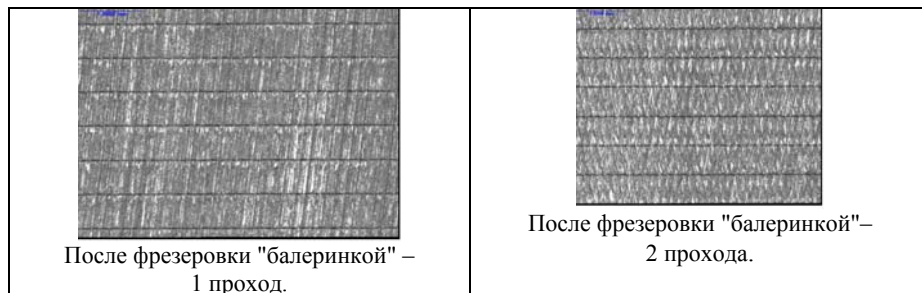


Рис. П.2.3. Фото полюса блока №2 после обработки.

Видно, что одна из половин поверхности С обработана дважды, т.к. радиус окружности вращения резца больше половины расстояния между половинами поверхности С.

3) **Проверка сопротивления изоляции между пластинами после обработки (Таблица П.2.2):**

Таблица П.2.2.

Номер блока	Напряжение между боковыми поверхностями блока U, В	Ток I, А	Сопротивление R, Ом	R _{среднее} , Ом
2	15	3	5	4.5
	18	4	4.5	
	25 ÷ 26	6.5	3.9	

Уменьшение сопротивления обусловлено коротками между заусенцами пластин после обработки резцом.

3. **Оценка влияния сопротивления между пластинами в блоке**

Считаем, что ток течет, в основном, по поверхности, обработанной резцом, т.к. сопротивление до и после обработки изменяется больше чем на порядок.

Для оценки возьмем наименьшее из измеренных сопротивлений блоков (вдоль по поверхности, обработанной резцом): $R_{пер} \approx 4 \text{ Ом}$

Суммарная площадь обработанной поверхности, по которой течет ток:

$$S = H \times L = 7200 \text{ мм}^2 = 72 \text{ см}^2.$$

Удельное сопротивление стали $\rho = 0.12 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$.

Сопротивление 1 см^2 этой поверхности *вдоль по направлению тока*:

$$R_{1\text{см}^2} = R_{\text{шп}} \times \frac{H}{L} \approx 3.6 \text{ Ом}.$$

Для сравнения, в этих же условиях сопротивление 1 см^2 нержавеющей стали толщиной 1 мм ($\rho_{\text{нерж}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$):

$$R_{\text{нерж}1\text{см}^2} = 10^{-3} \text{ Ом} \Rightarrow \text{разница больше трёх порядков !!!}$$

Эффективная толщина пленки с заусенцами:

$$\delta \approx 0.03 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$$

Вихревой ток в этой пленке при проектных амплитуде и скорости изменения тока оказывается пренебрежимо малым, существенно меньше 1 мА , и не оказывает влияния на искажение поля в корректоре.

Таким образом, блоки магнитопроводов СХ можно изготавливать с использованием специальной фрезеровки блоков СХ1 до нужного размера.

О.М. Валов, В.М. Константинов, И.Н. Окунев, В.В. Петров

**Корректирующие магниты
для бустера источника СИ NSLS-II**

O.M. Valov, V.M. Konstantinov, I.N. Okunev, V.V. Petrov

**Steering magnets
for the booster of the SR source NSLS-II**

ИЯФ 2014-7

Ответственный за выпуск А.В. Васильев

Работа поступила 22.05. 2014 г.

Сдано в набор 23.05. 2014 г.

Подписано в печать 23.05. 2014 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 2,5 печ.л., 2.0 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 7

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11