

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН  
(ИЯФ СО РАН)

А.М. Батраков, О.М. Валов, А.Н. Журавлев,  
В.А. Киселев, В.М. Константинов, А.В. Павленко,  
В.В. Петров, С.В. Синяткин, А.Д. Чернякин

ИМПУЛЬСНЫЕ БАМП-МАГНИТЫ  
ДЛЯ БУСТЕРА ИСТОЧНИКА СИ NSLS-II

ИЯФ 2015-7

Новосибирск  
2015

## Оглавление

1. ВВЕДЕНИЕ.....	5
2. РАСЧЕТЫ ФОРМЫ ПОЛЯ И ГЕОМЕТРИИ МАГНИТ.....	6
2.1. Предварительные 2D расчеты.....	6
2.2. 3D расчеты.....	10
2.3. Влияние вакуумной камеры на качество магнитного поля.....	13
3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАГНИТОВ.....	16
3.1. Изготовление магнитопроводов.....	16
3.2. Изготовление катушек.....	18
3.3. Сборка магнита.....	19
4. МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ.....	21
4.1. Общее описание. Программа измерений.....	21
4.2. Механика измерительной системы.....	21
4.3. Питание магнитов.....	22
4.4. Электроника и программное обеспечение.....	24
4.5. Измерения без вакуумной камеры.....	24
4.6. Измерение поля в магните при различных фазах импульса тока .....	26
4.7. Требования на стабильность поля и идентичность бамп-магнитов .....	28
4.8. Подбор шунтирующей индуктивности.....	29
4.9. Влияние температуры.....	30
4.10. Стабильность.....	31
5. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ БАМП-МАГНИТОВ.....	32
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	34
7. ЛИТЕРАТУРА.....	34

**Импульсные БАМП-магниты  
для бустера источника СИ NSLS-II**

*А.М. Батраков, О.М. Валов, А.Н. Журавлев,  
В.А. Киселев, В.М. Константинов, А.В. Павленко,  
В.В. Петров, С.В. Сияткин, А.Д. Чернякин*

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН  
630090, Новосибирск, Россия

**Аннотация**

Работа посвящена расчетам, проектированию и изготовлению магнитов для коррекции орбиты электронов перед выпуском в бустерном синхротроне источника синхротронного излучения третьего поколения NSLS-II, создаваемого в Брукхейвенской национальной лаборатории (США). Приводятся особенности конструкции и изготовления, результаты магнитных измерений.

*© Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН*



---

## 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. [1].

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 перед выпуском (бамп-магниты).

### **Основные исходные требования к бамп-магнитам**

Система выпуска из бустера включает в себя четыре бамп-магнита для медленного искажения орбиты перед выпуском, два септум-магнита (импульсный и постоянный) и кикер. В конце цикла ускорения до энергии 3 ГэВ делается десятимикросекундная полочка в магнитном поле, чтобы закончился переходной процесс в магнитной системе и пучок затух к равновесной орбите. За 750 мкс до выпуска включаются 4 импульсные бамп-магнита, локально искажающие орбиту на 17 мм, чтобы приблизить пучок на расстояние 3.5 мм до ножа импульсного септума, после чего кикер направляет пучок в апертуру септума

Основные требования к магнитам определяются Технической Спецификацией E-T-SPC-SR-BR-001.

Основные исходные требования к магнитам приведены в Таблице 1.1.

Таблица 1.1

Количество магнитов		4
Форма магнита		H-образный
Энергия инжекции	МэВ	200
Энергия выпуска	ГэВ	3
Максимальный угол поворота	мрад	7.5
Межполюсной зазор	мм	33
Эффективная магнитная длина	м	0.19
Область хорошего поля	мм	$\pm 20$
Неоднородность интеграла магнитного поля в рабочей области, $\Delta B/L/B$		$0.5 \cdot 10^{-3}$
Стабильность магнитного поля $\Delta B/B$		$2 \cdot 10^{-4}$
Длительность импульса тока	мс	$\sim 1.5$

## 2. Расчеты формы поля и геометрии магнита

Расчеты формы магнитного поля проводились с помощью разработанной в ИЯФ программы Mermaid в двух- и трехмерной версиях. Эта программа использовалась ранее при расчетах многих магнитов (например, "теплых" магнитов для LHC в ЦЕРНе, квадруполь и секступоль для источника СИ ALBA в Испании и др.), и результаты находились в хорошем согласии с последующими результатами магнитных измерений. Расчеты бамп-магнитов проводились для постоянного магнитного поля. Учет влияния нержавеющей вакуумной камеры при работе в импульсном режиме выполнен отдельно (см. раздел 2.3).

Расчеты профиля были выполнены в предположении использования стали ThyssenKrupp Stahl M940-50A (<http://www.thyssenkrupp.com>). 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.

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.

Предварительная оценка необходимой ширины полюса (для полюса без шимов) для двухмерной геометрии в соответствии с [2]:

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

где  $H$  – ширина полюса,

$\Delta Z$  – апертура,

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

В нашем случае для вертикальной апертуры 33 мм, области "хорошего" поля  $\pm 20$  мм и однородности в этой области  $\pm 0.5 \cdot 10^{-3}$  получается  $H \cong 10$  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.

На рис. 1 показано сечение магнита, принятое при первоначальных 2D расчетах.

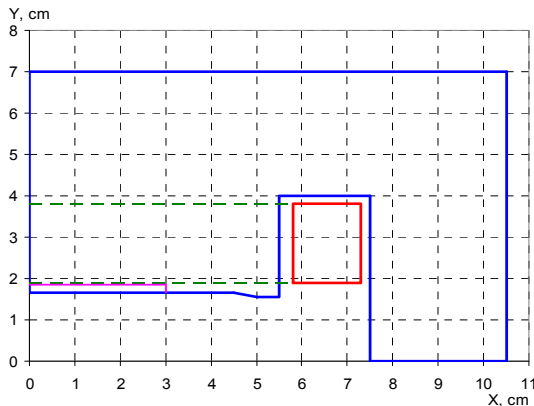


Рис. 1. Сечение магнита, принятое при первоначальных 2D-расчетах (один квадрант). Ширина полюса 11 см, межполюсной зазор 33 мм.

Рис. 2 дает представление о влиянии ширины полюса на однородность поля в случае двухмерного моделирования.

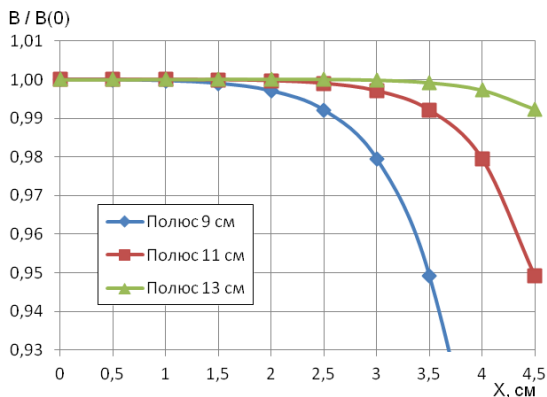


Рис. 2. Бамп-магнит (межполюсной зазор 33 мм). Влияние ширины полюса на однородность поля. 2D счет. Шимов на краях полюса нет.

Шиммирование полюсов существенно улучшает однородность поля (Рис. 3, 4, 5).

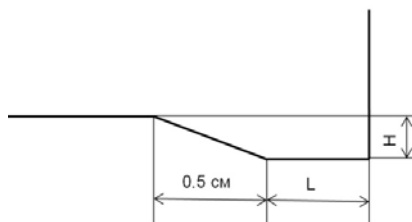


Рис. 3. Типичная форма шима при расчетах. L и H – длина и высота шима. Скос к плоской части полюса всегда принимался равным 0.5 см.

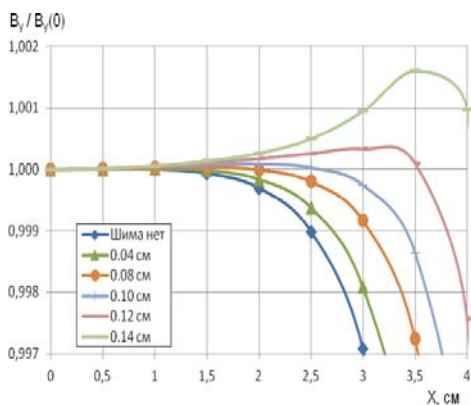


Рис. 4. Влияние высоты шима на радиальную однородность поля. 2D счет.  $Y = 0$ . Длина плоской части шима 0.5 см.



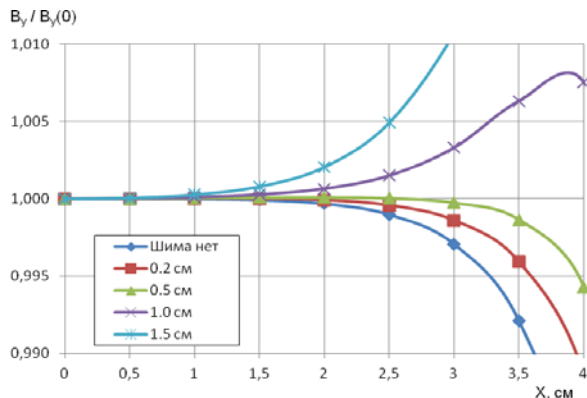


Рис. 5. Влияние длины шима на радиальную однородность поля. Высота шима 1.0 мм. 2D счет.

Магнит работает в области полей, далеких от насыщения, поэтому форма поля мало меняется от тока в обмотке (Рис. 6).

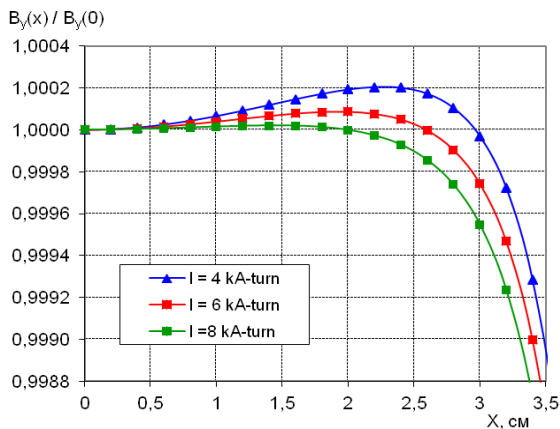


Рис. 6. Радиальная однородность поля при разных токах. 2D счет.  $Y = 0$ . Полус 11 см, зазор 3.3 см, шим  $0.5 \times 0.1$  см + скос 0.5 см к плоской части полюса.

Однородность поля по высоте в рабочей области магнита в двухмерном случае также достаточно хорошая, насыщения магнитопровода в рабочем диапазоне полей нет (Рис. 7, 8).

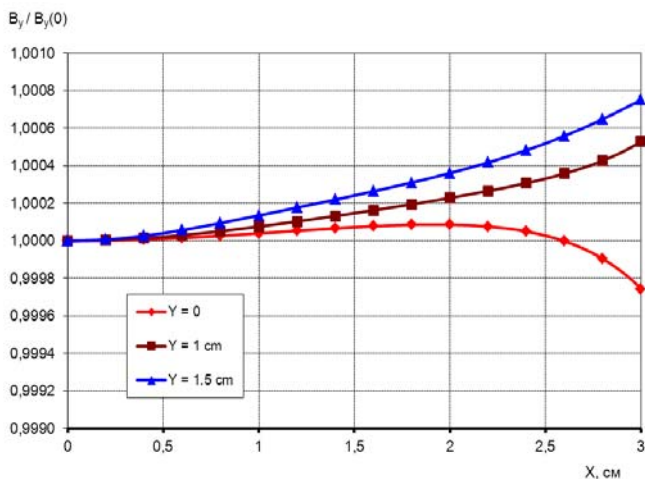


Рис. 7. Радиальная однородность поля по высоте. 2D счет. Полос 11 см, зазор 3.3 см, шим  $0.5 \times 0.1$  см + скос к полюсу 0.5 см.

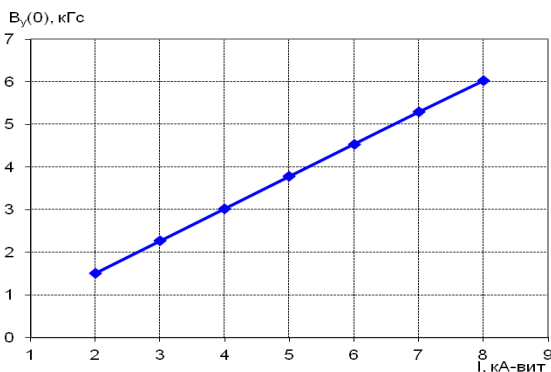


Рис. 8. Расчетная кривая намагничивания бамп-магнита. 2D счет. Проектный рабочий ток в одной катушке 6 кА-вит.

## 2.2. 3D расчеты

На основе приведенных выше оценок были проведены трехмерные вычисления. Межполюсной зазор принимался равным 33 мм. Длина магнитопровода 140 мм, ширина полюса 110 мм. Профиль полюса: шим длиной 5 мм, высотой 1 мм с последующим скосом длиной 5 мм к плоской части полюса. Основные результаты приведены ниже в соответствующих графиках (Рис. 9 - 11).

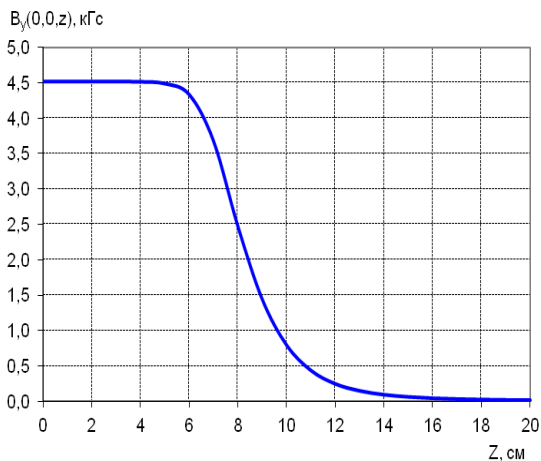


Рис. 9. Бамп-магнит. Поле вдоль оси пучка. 3D счет.  $I = 6$  кА-вит.  $Z = 0$  – середина магнита. Фасок на торце магнита нет. Полная расчетная эффективная длина магнита  $L_{эф} = 17.1$  см

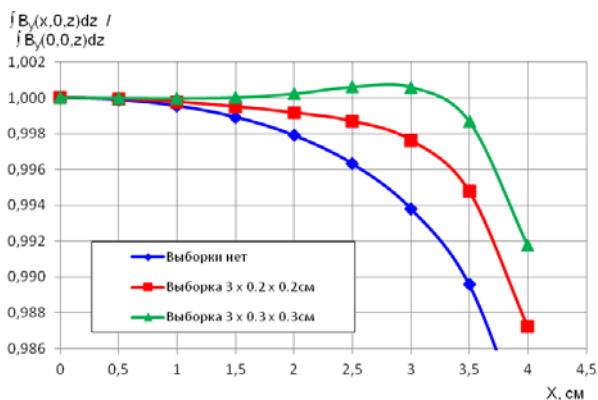


Рис. 10. Бамп-магнит. 3D счет. Влияние выборки на торце магнита на радиальную однородность интеграла поля в медианной плоскости. Цифры на графике означают: "ширина выборки в полюсе (от оси)" $\times$ "высота выборки" $\times$ "глубина выборки".

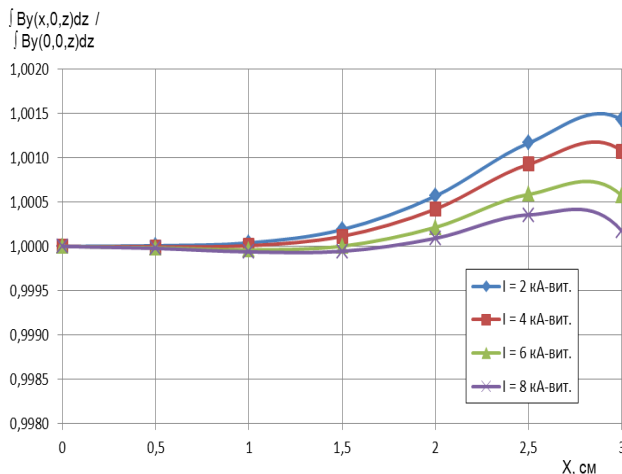


Рис. 11. Бамп-магнит. Радиальная однородность интеграла магнитного поля в зависимости от тока (проектный ток 6 кА-вит.). 3D счет. Выборка на торце магнита  $3 \times 0.3 \times 0.3$  см.

Дополнительной коррекцией выборок на торце магнита можно добиться существенного улучшения однородности поля. Например, сделав двойную выборку  $(0 \dots 3) \times 0.3 \times 0.3$  см +  $(3 \dots 4) \times 0.1 \times 0.1$  см, можно обеспечить однородность интеграла поля в медианной плоскости лучше  $2 \cdot 10^{-4}$  (рис. 12).

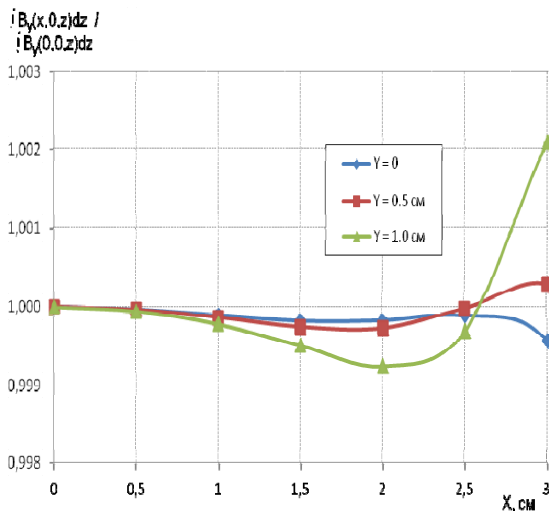


Рис. 12. Бамп-магнит. 3D счет. Коррекция однородности интеграла поля выборками на торце. Двойная выборка  $(0 \dots 3) \times 0.3 \times 0.3$  см +  $(3 \dots 4) \times 0.1 \times 0.1$  см

Шихтовка материала магнитопровода меняет, в основном, только общий уровень поля, не меняя существенно характера радиального распределения.

В результате моделирования определились окончательные параметры магнитов:

- Межполюсной зазор 33 мм
- Ширина полюса 110 мм
- Длина магнитопровода вдоль оси пучка 140 мм
- Количество токонесущих катушек 2
- Количество витков в катушке 4
- Амплитуда тока в катушке 5.8 кА-вит
- Интеграл магнитного поля, соответствующий
- углу поворота пучка 7.5 мрад с энергией 3 ГэВ  $7.5 \cdot 10^4$  Гс·см
- Эффективная длина 17.1 см

Указанные выше параметры магнитных характеристик были признаны представителями BNL достаточными для начала изготовления магнитов – без коррекции на торцах. Предполагалось, что после магнитных измерений на первом магните можно будет, в случае необходимости, внести дополнительные изменения в конструкцию, улучшив однородность за счет фасок на торцах (см. рис. 12).

### 2.3. Влияние вакуумной камеры на качество магнитного поля

Вакуумная камера бамп-магнитов выполнена из тонкостенной стали (0.5 мм), имеет форму эллипса с полуосями 10×30 мм. Для повышения механической прочности через 23 мм припаяны вертикальные ребра жесткости толщиной 2 мм.

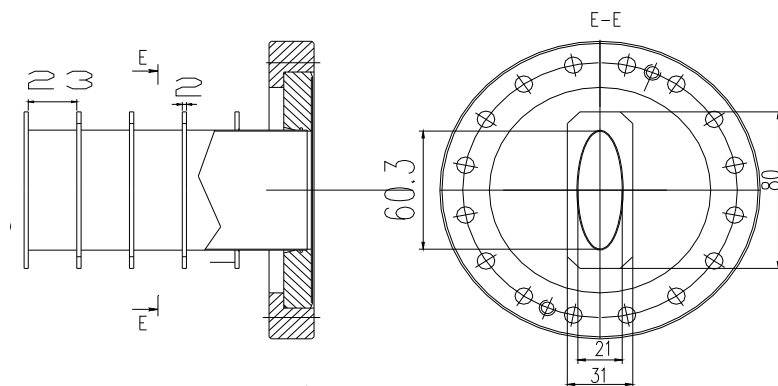


Рис. 13. Схема вакуумной камеры бамп-магнита.



Рис. 14. Вакуумные камеры бамп-магнитов.

Наличие металлической вакуумной камеры в бамп-магните приводит к тому, что в процессе нарастания тока в камере индуцируются вихревые токи, создающие секступольную компоненту магнитного поля и, как следствие, изменение хроматизма кольца.

Для вакуумной камеры, с толщиной стенки  $d$ , проводимостью  $\chi$ , находящейся в магнитном зазоре  $h$ , величина секступольной компоненты оценивается выражением [3]:

$$\frac{d^2 B}{dX^2} = 2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot \chi \cdot d}{h} \cdot \frac{dB_y}{dt}.$$

Здесь  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{т}}$ ,  $\chi = 1.3 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ .

Для численного расчета влияния вакуумной камеры с ребрами жесткости, была использована программа ANSYS.

Длительность импульса тока выбиралась такой, чтобы секступольная компонента поля не приводила к заметным изменениям хроматизма кольца в процессе введения поля в бамп-магните.

Ниже (рис. 15, 16) приведены результаты вычислений для импульса тока синусоидальной формы, длительностью  $\tau = 1500$  мкс. В максимуме тока, соответствующему времени  $t = 750$  мкс, осуществляется выпуск из бустера.

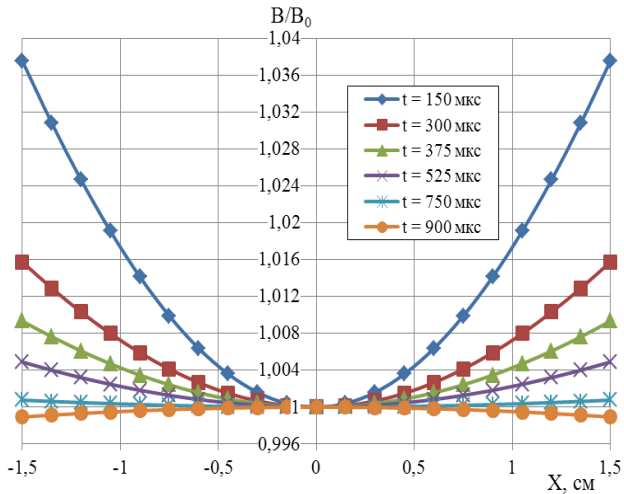


Рис. 15. Неоднородность поля в вакуумной камере магнита в различные моменты времени.

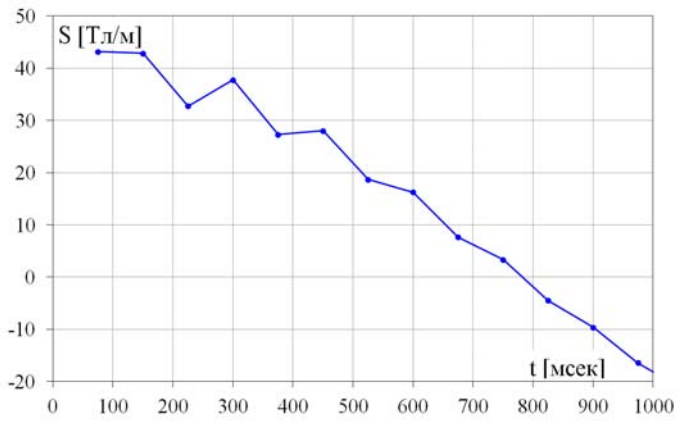


Рис. 16. Интегральная величина секступольной компоненты в бамп-магните в различные моменты времени.

Исходно, в синхротроне BNL хроматизм с помощью встроенной в поворотные магниты секступольной компонентой поля устанавливается достаточно большим,  $CY \approx 2$ ,  $CX \approx 1.2$ , и положительным, поэтому добавка квадратичной нелинейности за счет вакуумной камеры бамп-магнитов не приводит к занулению хроматизма или его переходу в отрицательную область, с потерей устойчивости движения электронов (рис. 17), вплоть до выпуска пучка в момент  $t = 750$  мкс.

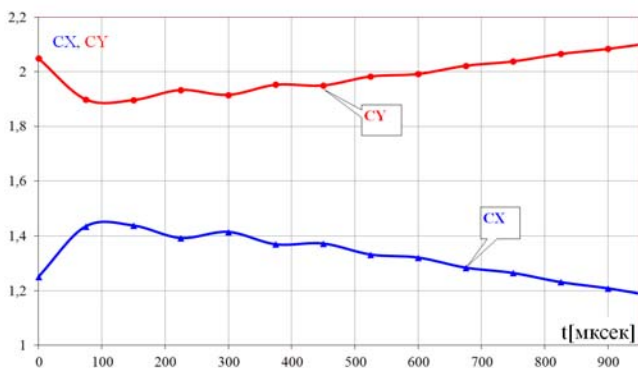


Рис. 17. Изменение хроматизма кольца при введении поля в бамп-магните.

### 3. Изготовление магнитов

Конструктивно изделие состоит из собственно самого дипольного 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  $3.15 \times 11.2 \text{ мм}^2$  и пропитаны радиационно-стойким эпоксидным компаундом.

Каждая половина магнитопровода состоит из набора прецизионно отштампованных пластин, изготовленных из холоднокатанной отожжённой низкоуглеродистой стали марки М940-50А 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

Штамп для пластин изготовлен в ИЯФ. Точность изготовления полюсов  $\pm 25 \text{ мкм}$ . 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) (рис.18).

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.

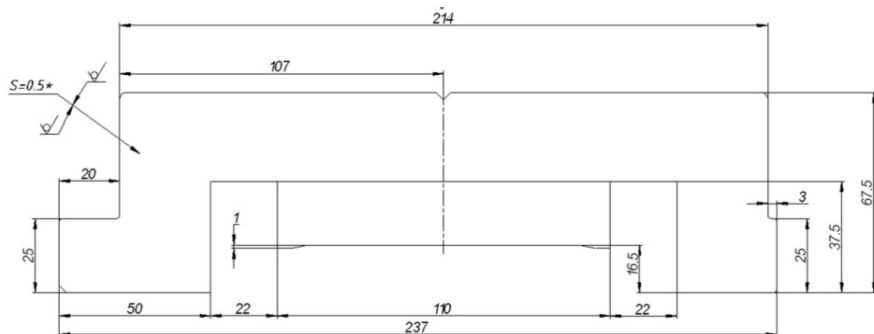


Рис. 18. Пластина бамп-магнита.

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  $180^\circ$  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  $\pm 0.2$  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  $15 \text{ кгс/см}^2$ , 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, межполюсный 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 магнитов намотаны цельным медным проводом ПСДКТ 3.15×11.2 ГОСТ 7019-80, по 4 витка в каждой. Провод представляет собой шину прямоугольного сечения размером 3.15×11.2 мм<sup>2</sup> 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 [4], [5].

Выбранная форма катушек, по расчету, обеспечивает при питании импульсным током 1.5 кА длительностью 1.5 мс, с частотой повторения 1 Гц нагрев не более 10°С, причем нижняя катушка будет на несколько градусов холоднее.

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

Заодно с катушкой монтируется специальный измерительный виток из фольгированного стеклотекстолита, позволяющий точно контролировать поле в магните во время работы (рис. 19).

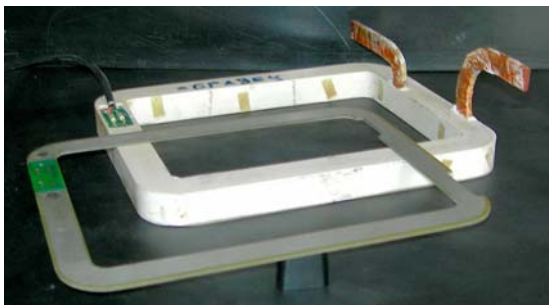


Рис. 19. Катушка бамп-магнита в сборе и, отдельно, встроенный измерительный виток в катушку.

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

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 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 угловых кронштейнов, расположенных на торцевых поверхностях магнитопровода. Такая конструкция обеспечивает плотную посадку катушки на ярме.

Конструкция верхней и нижней катушек одинакова. В собранном магните нижняя катушка перевернута на 180° относительно верхней. Коммутация катушек между собой осуществляется перемычкой и двумя шинами, выполненными из шинки того же сечения, что и катушки. Перемычка и шины имеют промежуточное крепление к магнитопроводу через изолирующие прокладки, обеспечивающие их неподвижность. 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.

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 бамп-магнита показан на Рис. 20.

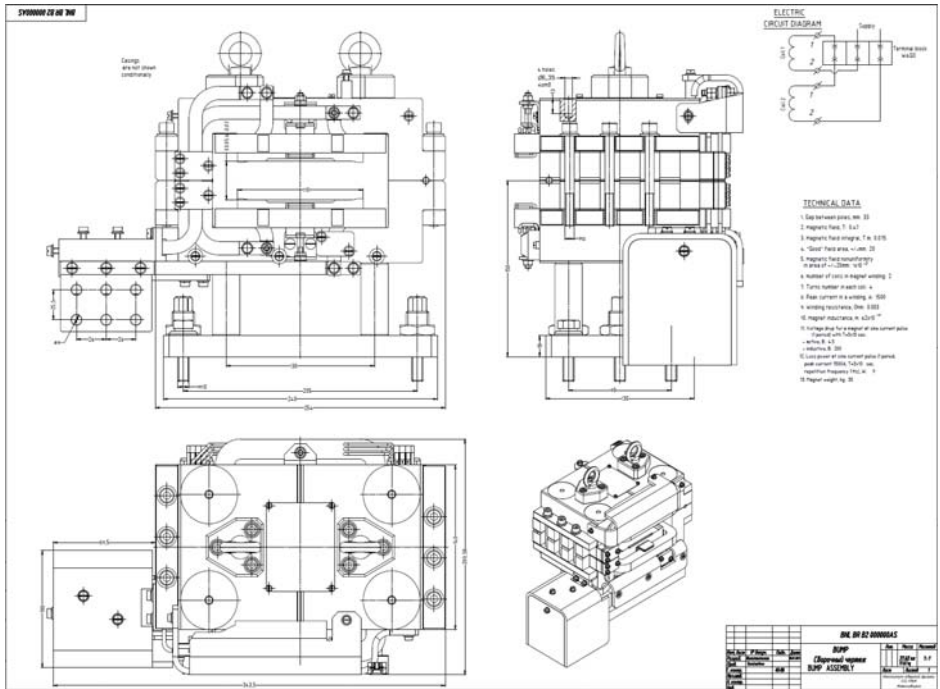


Рис. 20. Общий вид бамп-магнита.

## 4. Магнитные измерения

### 4.1. Общее описание. Программа измерений

Программа стандартных магнитных измерений включала в себя:

- Измерение зависимости поля от тока  $B = f(I)$ , при десяти уровнях амплитуды тока  $I = 150 \div 1600$  А.
- Измерение распределения поля по радиусу с помощью интегральной катушки, при трех значениях вертикальной координаты  $Y = 0$ ,  $Y = 10$  мм,  $Y = -10$  мм. По результатам измерений определиться – нужно или нет делать торцевую фаску.
- Измерение распределения поля по радиусу с помощью интегральной катушки в различных фазах питающего импульса –  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  и  $90^\circ$  с камерой и без камеры.
- Выравнивание интегралов поля всех четырех бампов с точностью не хуже  $2 \cdot 10^{-3}$ .

Цикл магнитных измерений всех бампов, выполняется при одних и тех же параметрах генератора. Стабильность амплитуды тока (поля) в процессе измерений должна быть не хуже  $2 \cdot 10^{-4}$ . Точность измерения интегральных параметров  $(BL) \sim 2 \div 3 \cdot 10^{-4}$ . Требование на интегральную неоднородность поля  $d(BL)/(BL) \leq \pm 10^{-3}$  в диапазоне  $X = \pm 20$  мм.

### 4.2. Механика измерительной системы

Магнитные измерения всех магнитов проводились на специальном стенде. Магнит и система позиционирования индуктивного датчика располагались на немагнитной оптической скамье (рис. 21).

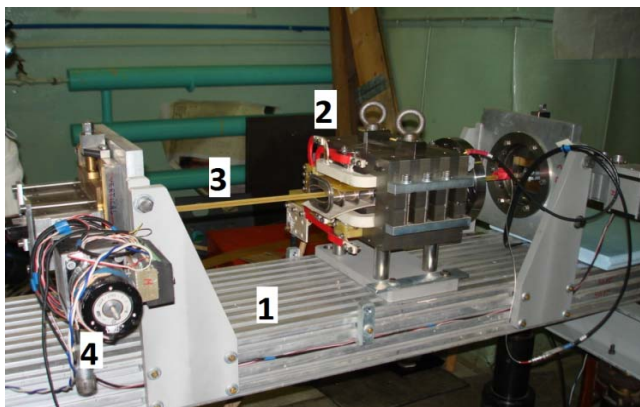


Рис. 21. Бамп-магнит на стенде магнитных измерений.

1 – оптическая скамья, 2 – магнит, 3 – датчик, 4 – шаговый двигатель.

Для измерения поперечного распределения первого интеграла магнитного поля в бамп-магните применялась узкая и вытянутая вдоль продольной оси магнита тестовая катушка, рис. 22 . Длина катушки 60 см, число витков 20, расстояние между витками 1.5 мм.

В качестве дополнительного контроля использовались встроенные в бамп-магнит датчики поля. Для того, чтобы исключить уходы параметров генератора, в центре одного из последовательно включенных магнитов помещался калибровочный датчик, на показания которого нормировались все измерения.



Рис. 22. Катушка измерителя магнитного поля.

#### 4.3. Питание магнитов

Исходно был выбран вариант питания четырех бамп-магнитов от одного генератора. Генератор, совместно с нагрузкой, представляет собой обычный RLC контур, параметры которого приведены на рисунке 23.

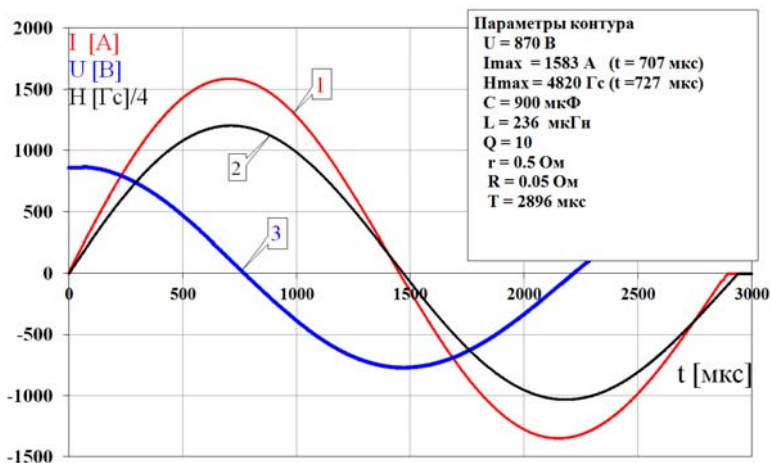


Рис 23. Параметры контура и формы импульсов: 1 – ток, 2 – поле с встроенного датчика, 3 – напряжение на конденсаторе.

Магниты включаются последовательно (рис. 24).



Рис. 24. Включенные последовательно и запитанные от одного генератора бамп-магниты в измерительном отсеке. Четвертый магнит – на оптической скамье (рис. 21).

В первом магните вставлен калибровочный датчик, на который нормируются все измерения.

Магниты по своим оптическим характеристикам могут заметно отличаться, поэтому для выравнивания их интегральных полей с точностью  $\text{dB/V} \leq 2 \cdot 10^{-3}$  параллельно каждому из магнитов подключается шунтирующий дроссель (рис. 25).

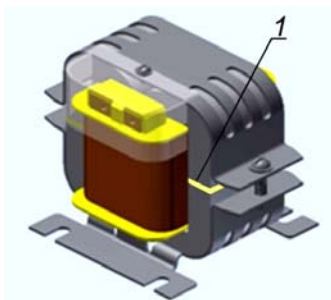


Рис. 25. Шунтирующий дроссель. 1 – изоляционная вставка.

Дроссель выполнен в виде обмотки, помещенной между двух половинок Ш-образного трансформаторного железа. Индуктивность дросселя регулируется с помощью калиброванных изоляционных прокладок, помещаемых между двумя половинками железа. Диапазон регулирования индуктивности дросселя составляет  $L_{\text{дросселя}} = (100 \div 1000) L_{\text{магнита}}$ . Для того,

чтобы форма импульса тока не искажалась при подключении дросселя, постоянные времени  $\tau = L/R$  дросселя и магнита сделаны одинаковыми.

#### **4.4. Электроника и программное обеспечение**

Все импульсные магнитные измерения проводились на стенде. В состав стенда импульсных измерений входят 4 цифровых интегратора VsDC2 [6], обеспечивающие восемь синхронных измерительных каналов, универсальный контроллер источников питания SEAC124, подсистема синхронизации на основе сPCI модулей DL200 и Ф-16, а также контроллера шагового двигателя. Этот набор электроники подключается к управляющему компьютеру посредством различных интерфейсов связи. Измеряемый магнитный элемент располагается на специальной подставке, оснащенной двухкоординатной системой позиционирования измерительной катушки.

Такой набор оборудования позволяет с достаточной гибкостью реализовать широкий спектр измерительных процедур, выполняемых под управлением программы. Наличие многоканальной системы регистрации позволяет, помимо сигнала с измерительной катушки, контролировать различные дополнительные параметры, в том числе величину полей с встроенных катушек, значение питающего магнит тока и т.д.

Возможность плавной перестройки времени окончания интегрирования относительно момента запуска импульсного источника позволяет регистрировать поперечное распределение в различных фазах генерируемого магнитного поля.

Осциллографический режим работы интеграторов позволяет регистрировать формы индукционных сигналов. Эта информация оказывается полезной не только с точки зрения процесса настройки измерительной системы, когда необходимо выставить момент окончания интегрирования в максимуме магнитного поля, но и несет полезную информацию с точки зрения магнитных измерений, например, об относительной фазе поля и тока или о фазовой задержке между полем внутри проводящей вакуумной камеры и за ее пределами.

Возможность плавной перестройки времени окончания интегрирования относительно момента запуска импульсного источника позволяет регистрировать поперечное распределение в различных фазах генерируемого магнитного поля.

#### **4.5. Измерения без вакуумной камеры**

На рис. 26 и 27 представлены зависимость амплитуды поля в магните от тока (от напряжения на емкости генератора) и распределение интеграла магнитного поля по радиусу на различных высотах – без вакуумной камеры.



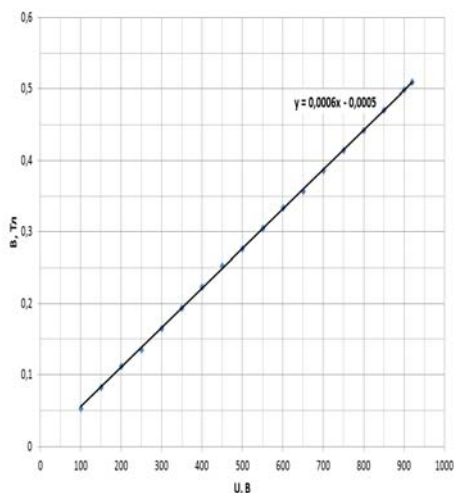


Рис. 26. Магнитное поле в магните в зависимости от напряжения на емкости.

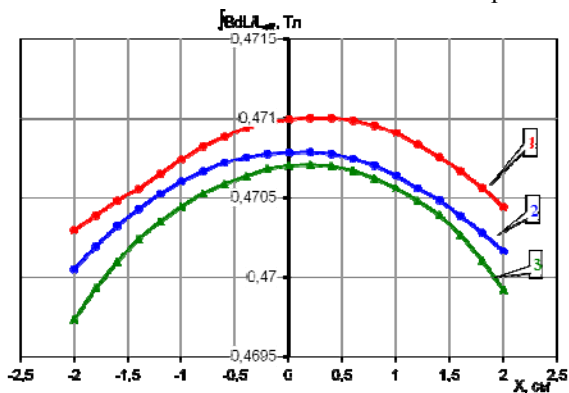


Рис. 27. Распределение интеграла магнитного поля по радиусу на различных высотах ( $\pm 10$  мм от центра) без вакуумной камеры 1 –  $Y = -10$  мм, 2 –  $Y = 10$  мм, 3 –  $Y = 0$ .

Смещение оптического центра магнита, относительно геометрического, на 2 мм вправо, обусловлено вкладом токоподвода и межвитковой коммутации тока на торце магнита.

На рис. 28 показано сравнение расчетной однородности интеграла магнитного поля с измеренной (введена поправка на смещение оптического центра). Полученные результаты измерений показали хорошее совпадение с расчетами. Они свидетельствуют о вполне удовлетворительном качестве магнитного поля бампа, поэтому торцевую фаску решено было не делать.

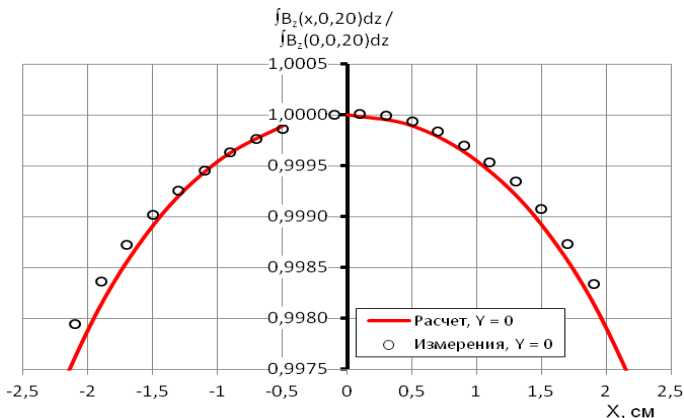


Рис. 28. Радиальная однородность интеграла магнитного поля. Сравнение расчета с измерениями. Вакуумная камера снята.

#### 4.6. Измерение поля в магните при различных фазах импульса тока

Были выполнены измерения бамп-магнитов без камеры и с собственной вакуумной камерой. Конструктивно камеры в разных магнитах несколько отличались – положением торцевых фланцев, или их отсутствием со стороны входа или выхода пучка.

Измерения без вакуумных камер дают различие в геометрических длинах. Измерения по фазам дают представление о частотных характеристиках железа. В частности, на приведенном ниже рисунке 29 видно, что зависимость от фазы практически не заметна.

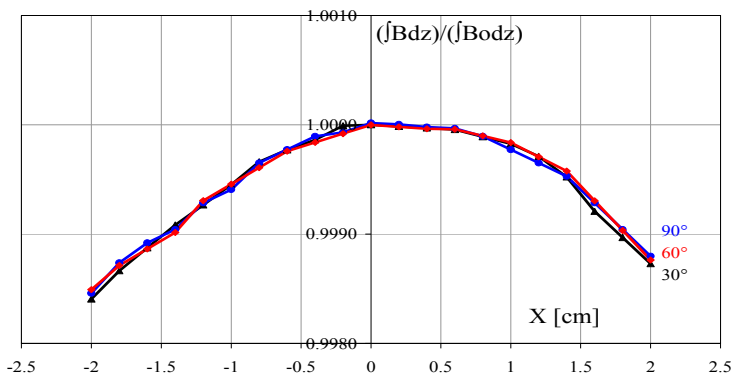


Рис. 29. Распределения интеграла поля по радиусу, нормированные на интеграл поля в центре магнита при различных фазах импульса тока (без вакуумной камеры)

Сравнивая результаты расчета неоднородности поля в вакуумной камере магнита в различные моменты времени (рис. 15) с результатами измерений при различных фазах импульса тока (рис. 30), можно отметить хорошее количественное их совпадение.

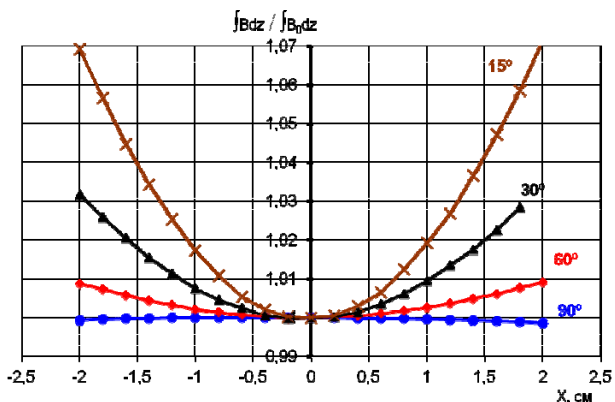


Рис. 30. Распределения интеграла поля по радиусу, нормированные на интеграл поля в центре магнита при различных фазах импульса тока (с вакуумной камерой).

Наличие отрицательной квадратичной нелинейности в поле магнита в отсутствие вакуумной камеры в сочетании с положительной, вносимой вакуумной камерой, приводит к тому, что лучшая однородность поля достигается при фазе импульса тока  $\varphi \approx 85^\circ$  (рис. 31). Этим обстоятельством можно было бы воспользоваться, если бы нелинейность поля при  $90^\circ$  не удовлетворяла техническому заданию.

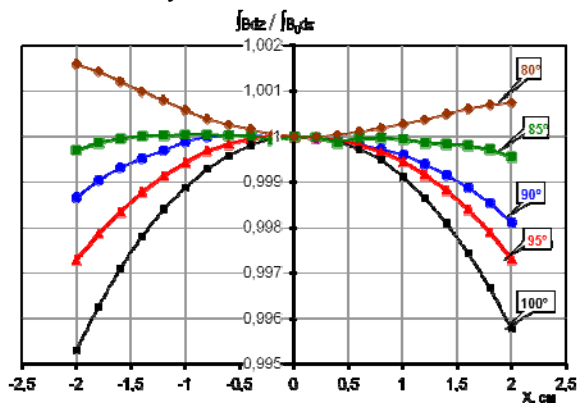


Рис. 31. Распределения интеграла поля по радиусу, нормированные на интеграл поля в центре магнита при различных фазах импульса тока

#### 4.7. Требования на стабильность поля и идентичность бамп-агнитов

Требования, предъявленные к стабильности элементов, участвующих в выпуске пучка из бустера (кикер, импульсный септум, постоянный септум и бамп-магниты), достаточно высоки. Сформулированы они из условия, что остаточный угол и координата на выпуске не должны превышать 20% от углового и координатного размеров эмиттанса ускоренного пучка.

Параметры пучка на выпуске:

$$\sigma_x = 0.45 \text{ мм}, \sigma_{x'} = 0.084 \text{ мрад}.$$

Для каждого из четырех элементов, участвующих в выпуске, требование на стабильность координаты и угла на выпуске составит:

$$dX \leq 0.45 \times 0.2/2 = 0.045 \text{ мм}, dX' \leq 0.084 \times 0.2/2 = 0.0084 \text{ мрад}.$$

Для того, чтобы сформулировать требования к полю бамп-магнитов, численно было рассчитано искажение равновесной орбиты в момент выпуска пучка, вызванное изменением поля на 1% в одном или нескольких бамп-магнитах. Результаты расчетов приведены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1. Изменение координаты и угла на входе в импульсный септум-магнит при отклонении поля в бамп-магнитах на 1%.

B1	B2	B3	B4	dX [мм]	dX' [мрад]
dB/B [%]					
1	0	0	0	-0.0023	0.05
0	1	0	0	0.08	-0.043
0	0	1	0	0.018	0.043
0	0	0	1	0.07	-0.049
1	0	0	1	0.07	0.001
0	1	1	0	0.102	0
1	1	1	1	0.168	0

Сравнивая требования на стабильность  $dX \leq 0.045$  мм,  $dX' \leq 0.0084$  мрад с приведенными в таблице величинами, можно сформулировать следующие требования, предъявляемые к бамп-магнитам:

- 1) Стабильность напряжения на источнике питания четырех, последовательно включенных, бамп-магнитов должна быть не хуже чем  $dU/U \leq 5 \cdot 10^{-4}$ .
- 2) Разброс интегральных полей бампов должен быть не более  $d(BL)/BL \leq 2 \cdot 10^{-3}$ .
- 3) Точность позиционирования каждого из бампов по продольной координате не хуже 1 мм.

#### 4.8. Подбор шунтирующей индуктивности

Из требования к идентичности бамп-магнитов следует, что разброс интегральных полей магнитов должен быть не более  $d(BL)/BL \leq 2 \cdot 10^{-3}$ . Измерения показали, что после установки вакуумных камер в бамп-магниты разброс интегральных полей в них (рис. 32), оказался больше требуемого, в основном, из-за разного расположения торцевых фланцев.

Для выравнивания интегралов поля бамп-магнитов, в качестве базового был взят четвертый бамп-магнит, а к трем другим были подключены шунтирующие дроссели. Индуктивность дросселя изменялась с помощью калиброванных прокладок так, чтобы интеграл поля в данном магните

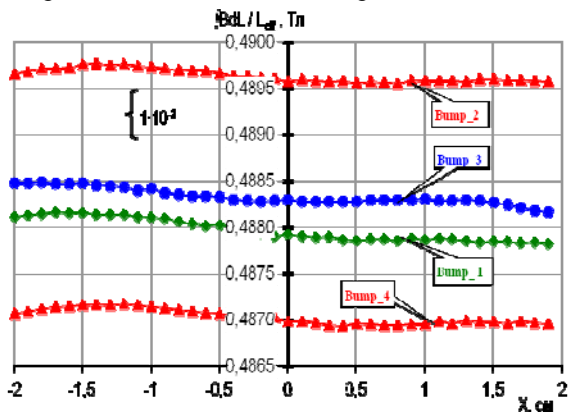


Рис. 32. Интеграл поля в четырех магнитах с вакуумной камерой.

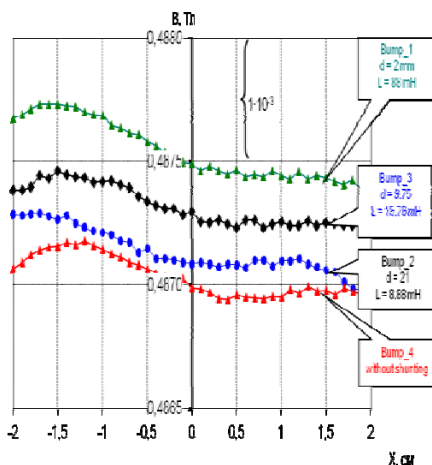


Рис. 33. Интеграл поля в четырех бамп-магнитах с вакуумной камерой и шунтирующим дросселем.

совпадал с интегралом поля в четвертом с точностью лучшей, чем  $2 \cdot 10^{-3}$ . Результаты подгонки приведены на рисунке 33. Все интегралы полей оказались в диапазоне  $\pm 0.75 \cdot 10^{-3}$ . На этом же рисунке указаны использованные толщины  $d$  изоляционных вставок и получившаяся при этом индуктивность дросселя  $L$ .

#### 4.9. Влияние температуры

Магнит выполнен без водяного охлаждения, поэтому необходимо было проверить его температурный режим в процессе стационарной работы. С этой целью на магните и генераторе были установлены температурные датчики. Далее, после включения генератора в рабочем режиме с частотой 1 Гц, в течение 40 минут, измеряли температуру магнита, генератора и заряжающей емкости. Результаты измерения приведены на рис. 34. Как видно из рисунка, магнит за один час выходит на стабильный температурный режим с постоянной времени  $\tau \cong 700$  сек.

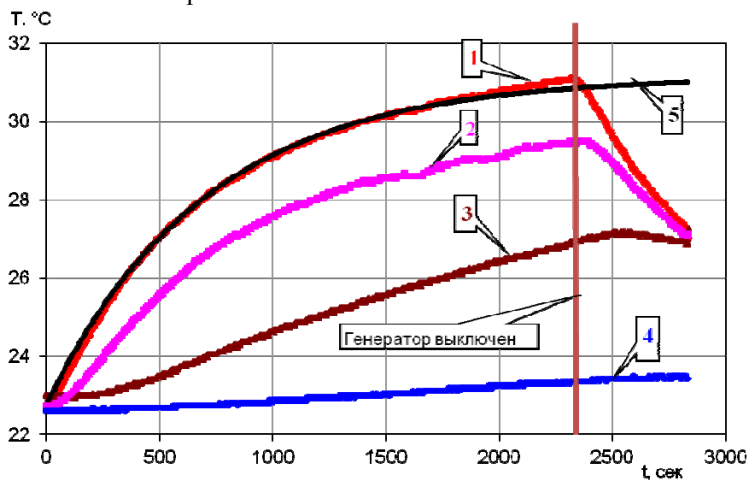


Рис. 34. Изменение температуры.

1 – на верхней катушке магнита, 2 – на нижней катушке магнита, 3 – на генераторе, 4 – на емкости, 5 – подгонка экспоненциальной кривой с постоянной времени 700 сек.

В процессе испытаний измерялись поля с встроенных датчиков и калибровочного датчика, расположенного в центре магнита. Неожиданными оказались результаты измерения поля встроенным датчиком (1, рис. 34), так как прогрев контура приводит к увеличению омического сопротивления разрядного контура, и ток (поле) должны, казалось бы, уменьшаться, а не расти.

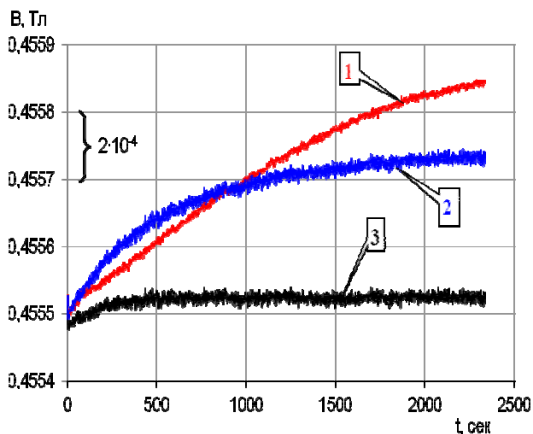


Рис. 35. Поле, измеренное во время захода.

1 – поле с встроенной катушки, 2 – поле с встроенной катушки, нормированное на поле в центре магнита, 3 – поле с учетом температурного коэффициента расширения встроенного датчика  $K = 6 \cdot 10^{-5} 1/С^\circ$ .

Причина такого поведения оказалась простой. При прогреве во время работы меняются геометрические размеры магнита – длина, высота и ширина зазора, а также габариты обмотки возбуждения. Встроенный датчик, изготовленный из фольгированного стеклотекстолита СТЭФ, у которого коэффициент линейного расширения больше, чем у металла, приклеен к обмотке возбуждения, при нагреве его площадь также увеличивается и, естественно, наводимое на нем напряжение. Чтобы исключить изменение параметров контура, связанное с изменением температуры генератора и магнита, сигнал с встроенного датчика был отнормирован на сигнал с датчика в центре магнита (не подверженного нагреву). В полученной кривой (2, рис. 35) содержится лишь информация о температурной зависимости сигнала с встроенного датчика. Если учесть изменение температуры датчика и ввести коэффициент линейного расширения эпоксидной смолы, армированной стекловолокном,  $K = 6 \cdot 10^{-5} 1/С^\circ$ , то показания датчика становятся близкими к константе (3, рис. 35).

Все бамп-магниты, при постановке на синхротрон BNL, были оснащены температурными датчиками, что позволяет в случае необходимости вводить коррекцию в показания с встроенных датчиков поля.

#### 4.10. Стабильность

После установки магнитов в кольцо бустера был проведен длительный заход на стабильность. На рисунке 36 приведены лишь результаты двухчасовой работы генератора с частотой 1 Гц.

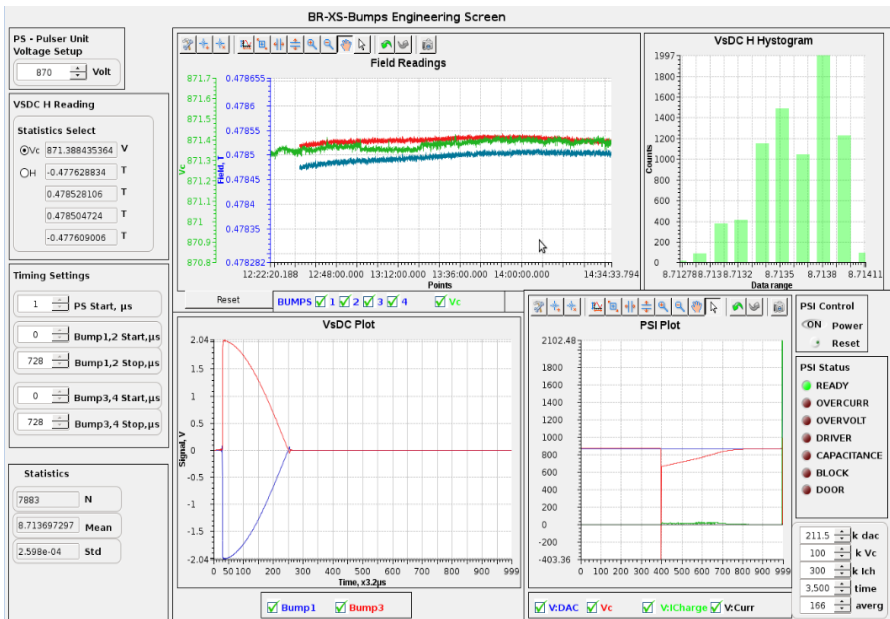


Рис. 36. Операторское окно для управления генератором бамп магнитов.

На левом верхнем рисунке с частотой 1 Гц выводятся результаты измерения напряжения в вольтах на емкости генератора, поле в Теслах, измеренное двумя встроенными датчиками. Масштабы шкал (слева на рисунке) для напряжения и поля выбраны так, что одна вертикальная клетка соответствует уходу параметра на  $1 \cdot 10^{-4}$ . Справа сверху – гистограмма стабильности напряжения на емкости за указанный период. Слева внизу – осциллограммы напряжения с измерителями поля, от момента включения генератора до момента выпуска пучка (конец интегрирования). Справа внизу – контроль параметров генератора – зарядный ток, напряжение и пр.

Полученные в процессе длительных испытаний результаты по стабильности поля заметно лучше, чем были определены в техническом задании.

## 5. Основные параметры бамп-магнитов

В результате расчетных, конструкторских и технологических работ определились нижеследующие параметры магнитов (таблица 5.1).



Таблица 5.1. Основные параметры бамп-магнитов.

Количество магнитов		4
Максимальная энергия пучка	ГэВ	3
Межполюсной зазор	мм	33
Амплитуда магнитного поля	Тл	0.45
Интеграл магнитного поля	Тл×м	0.075
Угол поворота пучка	мрад	7.5
Эффективная магнитная длина	м	0.17
Область хорошего поля	мм	± 20
Неоднородность в области хорошего поля		$1 \times 10^{-3}$
Полная длина магнита вдоль орбиты	мм	< 200
Длина магнитопровода вдоль орбиты	мм	140
Тип магнитопровода		Н – образный, шихтованный
Материал магнитопровода		EBG-nominal steel M940-50A
Толщина пластин	мм	0.5
Количество катушек		2
Число витков в катушке		4
Частота повторения импульсов	Гц	1 ( 2 ) <sup>*)</sup>
Длительность импульса (синусоида)	с	$3 \times 10^{-3}$
Амплитуда тока $I_{\max}$	А	1500
Материал проводника		Шина ПСДКТ 3.15×11.2 ГОСТ 7019-80
Активное сопротивление обмотки магнита	Ом	0.003
Индуктивность магнита	Гн	$62 \times 10^{-6}$
Активное падение напряжения	В	4.5
Реактивное падение напряжения	В	200
Средняя рассеиваемая мощность	Вт	10 ( 20 ) <sup>*)</sup>
Тип охлаждения		Воздушное
Полный вес магнита	кг	39

\*) Данные в скобках соответствуют частоте повторения 2 Гц. Форма импульса предполагается синусоидальной (1 период).

## 6. Заключение

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

К середине июля 2012 года все магниты были отправлены в BNL, где были смонтированы в кольце ускорителя. В феврале 2014 года был осуществлен успешный запуск синхротрона и получены проектные параметры пучка на выпуске [7]. Все системы бустера работали в соответствии с проектными требованиями. Коэффициент прохождения пучка через бустер около 93%.

## 7. Литература

- [1] T. Shaftan et al., NSLS-II Booster Design, NSLS-II Tech. note 0061 (2009).
- [2] G.E. Fischer. Iron Dominated Magnets, SLAC-PUB-3726, July 1985 (M).
- [3] A.Chao, M.Tigner. Accelerator Physics and Engineering. World Scientific. 2006. p.295
- [4] В.В.Петров, Ю.А.Пупков. Испытания в ИЯФ радиационной стойкости материалов, используемых при создании магнитных систем ускорителей, Препринт ИЯФ 2010-1, Новосибирск, 2010.
- [5] 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
- [6] А.М. Батраков, П.В. Вагин, И.В. Ильин, А.В. Павленко, Д.С. Шичков. Прецизионные многофункциональные интеграторы VsDC2 и VsDC3; Препринт ИЯФ 2012-31, Новосибирск, 2012.
- [7] S. Gurov et al., Commissioning of NSLS-II Booster. 5th International Particle Accelerator Conference, Dresden, June, 15-20, 2014.

А.М. Батраков, О.М. Валов, А.Н. Журавлев,  
В.А. Киселев, В.М. Константинов, А.В. Павленко,  
В.В. Петров, С.В. Сияткин, А.Д. Чернякин

**Импульсные БАМП-магниты  
для бустера источника СИ NSLS-II**

ИЯФ 2015-7

Ответственный за выпуск А.В. Васильев

Работа поступила 7.07. 2015 г.

---

Сдано в набор 7.07. 2015 г.

Подписано в печать 8.07. 2015 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 2,2 печ.л., 1,7 уч.-изд.л.

Тираж 80 экз. Бесплатно. Заказ № 7

---

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