

Сибирское отделение Российской Академии наук  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им.Г.И. Будкера

П.А.Дурнов, В.Х.Лев, С.Ф.Михайлов,  
В.В.Петров, М.Масузава

ОПЫТ КРУПНОСЕРИЙНОГО  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ  
МАГНИТОВ ДЛЯ В-ФАБРИКИ КЕК

ИЯФ 2000 13

Новосибирск  
2000

**Опыт крупносерийного изготовления корректирующих магнитов для В-фабрики КЕК**

*П.А.Дурнов, В.Х.Лев, С.Ф.Михайлов, В.В.Петров*

Институт Ядерной Физики им. Г. И. Будкера  
630090 Новосибирск, Россия

*М.Масузава*

(КЕК, Цукуба, Япония)

**Аннотация**

Для В-фабрики КЕКВ (Цукуба, Япония) изготовлена крупная серия корректирующих магнитов. В работе подробно описывается процесс изготовления и измерений корректоров. Приводятся результаты магнитных измерений с анализом возможных причин разбросов параметров магнитов.

**Abstract**

**Experience of mass scale production  
of КЕК В factory correction magnets**

*P.Durnov, V.Lev, S.Mikhailov, V.Petrov*

Budker Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, Russia

*M.Masuzawa*

КЕК High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba, Japan

A large batch of correction magnets for the КЕКВ В factory (Tsukuba, Japan) has been manufactured at BINP. The process of manufacturing and measuring these magnets is described in detail. The results of magnetic measurements and possible reasons causing the dispersion of magnetic parameters are described.

---

## Введение

В 1996–97 гг. ИЯФ осуществил проектирование и изготовление горизонтальных корректирующих магнитов для В-фабрики КЕКВ (Япония). Работа продолжалась в течение полутора лет. За время работы были изготовлены четыре типа корректоров, общим количеством 831 магнит. Эти магниты были установлены на позитронном кольце (LER) с энергией 3.5 ГэВ и электронном кольце (HER) с энергией 8 ГэВ В-фабрики КЕКВ. Для каждого из колец изготавливалось по два типа магнитов - один тип магнитов для установки на прямолинейном промежутке с ускоряющими резонаторами, другой тип для остальных мест кольца. В соответствии с типами магнитов были утверждены их названия LER\_ARC, LER\_RF, HER\_ARC и HER\_RF. Этими обозначениями мы и будем пользоваться в дальнейшем.

Впервые в институте проводилась столь растянутая во времени работа по изготовлению такой многочисленной партии изделий, которая требовала сохранения стабильности магнитных параметров с высокой абсолютной точностью. Поэтому опыт этой работы, по мнению авторов, может быть полезен в будущем.

## 1. Параметры магнитов

Основные параметры корректирующих магнитов, взятые за основу при проектировании магнитов, приведены в Таблице 1.

Расчёты геометрии магнитов проводились сначала двухмерным вариантом программы MERMAID(2D), а затем трёхмерным вариантом MERMAID(3D).

В данном случае двухмерный расчёт поля оказался недостаточным из-за того, что, во-первых, все четыре типа магнитов имеют большие апертуры относительно их длин, поэтому весьма существенным становится влияние краевых полей на конфигурацию поля в рабочей части, что не может учитывать двухмерная модель; во-вторых, при двухмерном расчёте не учитывается наличие шихтовки железа в магните, что существенно сказывается на результате расчёта, особенно при больших апертурах магнитов.

С помощью математического моделирования были выбраны форма и размеры шимов таким образом, чтобы обеспечить максимальную однородность интеграла магнитного поля вдоль оси пучка в рабочей области магнита.

В процессе проектирования было проведено исследование влияния шихтовки магнитопровода на величину интеграла магнитного поля. Результаты показали, что при малых величинах отношения длины магнита к магнитному зазору весьма существенным становится влияние отличия магнитного сопротивления ярма в продольном и поперечном направлениях на интеграл поля магнита. Такое отличие возникает из-за отличия коэффициента заполнения магнитопровода железом от единицы.

**Таблица 1**

Тип магнита		LER_	HER_	LER_	HER_
		ARC	ARC	RF	RF
Полное число магнитов		392	360	25	54
Энергия частиц	ГэВ	3.5	8	3.5	8
Угол поворота	мрад	1	1	1	1
Интеграл поля	Гс×см	12520	28450	11800	26620
Магнитное поле в центре	Гс	392	1008	323	733
Точность в апертуре ±50мм		±10 <sup>-2</sup>	±10 <sup>-2</sup>	±10 <sup>-2</sup>	±10 <sup>-2</sup>
Длина шихтованного магнитопровода	мм	198	198	190	190
Зазор в центре магнита	мм	128	80	190	190
Полная длина магнита	мм	292	301	292	332
Зазор между шимами	мм	116	73	172	172
Число обмоток		2	2	2	2
Число витков в обмотке		400	648	500	1152
Ток возбуждения	А	5	5	5	5

С помощью программы MERMAID(3D) проводилось также исследование влияния положения возбуждающих катушек на магнитопроводе на параметры магнитного поля корректоров. В данной конструкции магнитов это влияние оказалось пренебрежимо малым, что позволило значительно снизить требования на сборку этой части магнита.

## 2. Конструкция магнитов

Все четыре типа магнитов близки по конструкции и технологии изготовления и отличаются друг от друга только размерами. Конструктивно изделие состоит из собственно самого магнита и регулируемой подставки. На Рис.1 изображён для примера общий вид корректирующего магнита HER\_RF.

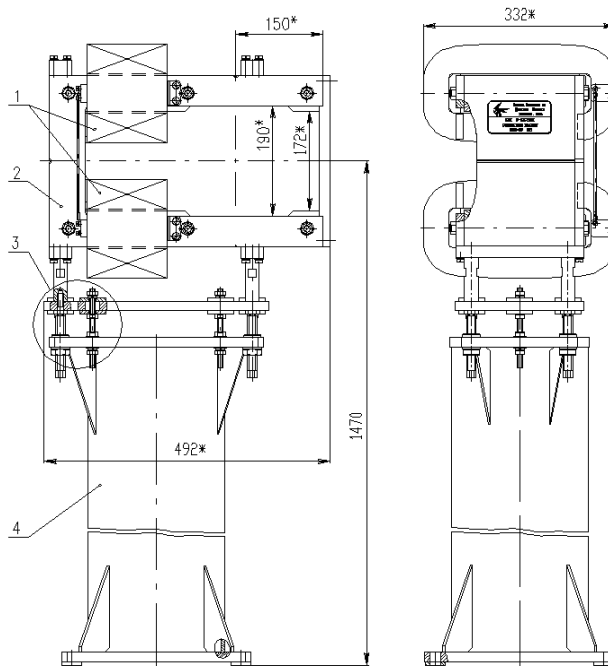


Рис.1. Общий вид магнита типа HER\_RF.

Каждый магнит состоит из шихтованного С-образного магнитопровода [2] и двух возбуждающих обмоток [1]. Магнитопровод собран из

С-образных пластин, полученных штамповкой из листов электротехнической стали 2312 толщиной 0.5 мм, ГОСТ 21427.2—83, на специальных прецизионных штампах (завод ЗВИ, г.Москва и завод СИБТЕКСТИЛЬМАШ, г.Новосибирск). По краям магнитопровода устанавливаются концевые пластины из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Магнитопровод собирается на специальном стапеле и стягивается шестью стальными шпильками.

Обмотки возбуждения магнитов рассчитывались и проектировались, исходя из основных параметров корректирующих магнитов. Были определены геометрия обмоток, число витков и их положение на магнитопроводе для каждого типа корректоров. Исходя из величины тока возбуждения 5А и из геометрии обмоток (основная определяющая величина – толщина обмотки), были выбраны диаметр и тип медного провода, которым мотались обмотки.

Обмотки корректоров всех типов намотаны проводом ПЭВ-2, Ø2.12/2, ГОСТ 7262-78, который имеет максимально допустимую рабочую температуру 105°С. Обмотки пропитаны эпоксидным компаундом ЭПК-4Д-88 с максимальной рабочей температурой 85°С. Перепад температур по толщине обмотки составляет  $\Delta t \leq 10^\circ\text{C}$  для обмоток типа LER и  $\Delta t \leq 15^\circ\text{C}$  для типа HER. Результаты расчётов были подтверждены при испытаниях обмоток с хорошей точностью.

Обмотки мотаются цельным проводом (без промежуточных паяк) на специальном намоточном приспособлении, которое имеет устройство для натяжения провода и датчик измерения полного числа намотанных витков. На стальной керн предварительно укладывается стеклотекстолит ЛЭС 0.15×20 ГОСТ 5937-81 в два слоя, а от боковых щёк приспособления обмотка изолирована специальными прокладками из стеклотекстолита СТЭФ-1 ГОСТ 12652-74 толщиной 0.5 мм. В качестве межслоевой изоляции используется кабельная бумага К-012.

Обычно при намотке такого рода обмоток происходит значительное «распушение», увеличение толщины обмотки, особенно по длинной ее стороне. Поскольку габариты обмотки жёстко ограничены, то для уменьшения распушения применяется устройство для натяжения провода, при котором напряжение в проводе при намотке больше предела текучести материала на 5-8%. Сила натяжения контролируется специальным динамометром и выборочными измерениями. Уменьшение диаметра провода в процессе намотки практически составляет 0.10 – 0.12 мм. После намотки

на наружной поверхности обмотки укладываются ещё два слоя стеклотенты; затем измеряются сопротивление обмотки и её габариты.

Горячая пропитка обмотки осуществляется эпоксидным компаундом методом «Монолит» (технологическая инструкция ПТО.054.008). После пропитки изделие зачищается, покрывается эпоксидным лаком ЭП-730 ГОСТ 20824-81 и отправляется в группу испытания и контроля, где окончательно проверяются геометрические, механические и электрические свойства изделия, а также производится проверка на отсутствие короткозамкнутых витков.

Обмотки жёстко крепятся на магнитопроводе с помощью специальных изоляционных вкладышей так, чтобы обеспечить максимальную теплоотдачу с наружных поверхностей обмоток.

Регулируемая подставка [4] выполнена в виде стальной цилиндрической опоры, базирующейся на стальной пластине. Регулировочный механизм [3], расположенный на верхней плите подставки, обеспечивает геодезическую выставку магнита в пределах  $\pm 20$  мм по высоте и  $\pm 7$  мм в горизонтальной плоскости. Корректирующий магнит устанавливается на регулируемую подставку на четырёх стойках из нержавеющей стали диаметром 24 мм и высотой 50 мм. Таким образом осуществляется разрыв магнитного потока между магнитопроводом и стальной конструкцией регулируемой подставки.

### **3. Технический контроль при изготовлении**

Технический контроль в процессе изготовления магнитов включал в себя целый ряд мероприятий.

Ввиду большого количества изделий с максимально близкими характеристиками на производстве была организована специальная технологическая линия с проверкой эксплуатационных свойств изделий на каждом этапе изготовления.

Перед штамповкой пластин для изготовления магнитопроводов проводилась проверка магнитных характеристик и качества электроизоляционного покрытия рулонов электротехнической стали. Рулоны стали или их части, не удовлетворяющие установленным требованиям, не допускались к штамповке. Во время штамповки проводился непрерывный контроль качества штампа, с периодической перешлифовкой. После штамповки пластины проверялись на отсутствие заусенцев, а также контролировались их механические размеры.

Сборка магнитопровода осуществлялась на специально изготовленном стапеле в рамках жёстких механических допусков. Во время сборки контролировалось число листов шихтовки и полный вес шихтованных пластин, постоянно контролировались геометрические размеры, отклонение от прямолинейности и плоскостности поверхностей, формирующих магнитное поле, усилие сжатия шихтованного магнитопровода. Для магнитопроводов подобного типа рекомендуется обеспечить удельное давление сжатия  $5\div 7$  кг/см<sup>2</sup>. Кроме того, необходимо было обеспечить отклонение от номинальной длины магнита не более  $\pm 0.2$  мм и коэффициент заполнения 98%. Необходимое усилие сжатия обеспечивалось и контролировалось с помощью динамометрического ключа.

После изготовления обмоток магнитов проводились окончательные контрольные испытания. Результаты измерения сопротивления обмотки приводились к стандартной температуре 20°C. Каждая катушка сравнивалась на одинаковость числа витков с эталонной катушкой. Для этой цели был разработан и изготовлен прибор (автор Заруднев Ю.В.), который позволял надёжно контролировать число витков в изготавливаемых катушках с точностью до одного витка. С помощью специально разработанного прибора (автор Литвинов А.А.) проверялось отсутствие короткозамкнутых витков в обмотках.

К каждому магнитопроводу и к каждой обмотке прилагался технический паспорт, где фиксировались результаты контроля параметров на каждом этапе изготовления; на каждом этапе был указан исполнитель и контролёр. Окончательная приёмка каждого изделия проводилась представителем группы контроля и испытаний после комплексной проверки геометрических, механических и электрических свойств изделия.

Комплексный контроль при изготовлении оказался очень эффективным. Подтверждением служит тот факт, что при изготовлении серии корректирующих магнитов четырёх типов и общей численностью 851 шт. (включая 20 запасных магнитов) бракованным оказался только один магнит.

#### **4. Магнитные измерения**

Программа стандартных магнитных измерений включала в себя измерение распределения магнитного поля в медианной плоскости с шагом 10 мм в интервале  $\pm 50$  мм по радиусу и  $\pm 500$  мм вдоль оси пучка при токе возбуждения 5 А – для всех магнитов. Помимо этого, для нескольких



случайно выбранных магнитов из каждой партии в 100 магнитов проводилось измерение распределения магнитного поля в медианной плоскости с шагом 10 мм в интервале  $\pm 50$  мм по радиусу и  $\pm 500$  мм вдоль оси пучка при токе возбуждения от 0 до 7 А с шагом 1 А.

Измерения проводились датчиками Холла, объединёнными в пространственную матрицу. В матрице собраны 11 датчиков, выстроенных поперёк оси измеряемого элемента с интервалом 10 мм. Таким образом, полный захватываемый диапазон за один проход равен 100 мм. Датчики Холла наклеены на медную каретку, выполненную с высокой механической точностью. В течение измерения каретка перемещается (скользит) вдоль оси измеряемого элемента по специальной направляющей. Механическая точность изготовления направляющих в совокупности с точностью знания координат датчиков в каретке обеспечивает привязку датчиков к опорным поверхностям элементов с точностью не хуже 300 мкм.

Все типы измеряемых магнитов имеют малые длины и большие апертуры. Вследствие этого, сильное 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 1 – 2 часов,
- измерение и перезапись нулевых значений датчиков,
- калибровка датчиков с помощью ЯМР на рабочем уровне поля.

Измерения каждого корректора осуществлялись после проведения стандартного нормализационного цикла, состоящего из троекратного медленного подъёма и опускания возбуждающего тока от 0 до 7 ампер. В данном случае такая процедура оказывается достаточной, чтобы, в пределах заданной точности, на магнитные свойства магнитопровода не оказывало влияние предыдущее состояние стали. Изменение верхнего значения тока в цикле нормализации от 5 до 10 ампер изменяет величину поля и интеграл поля в магните на 0.3%. В то же время ширина петли гистерезиса на среднем участке кривой намагничивания достигает  $0.5 \pm 1\%$ , что вынуждает соблюдать неизменную последовательность при регулировке тока (см. Рис.2 и 3).

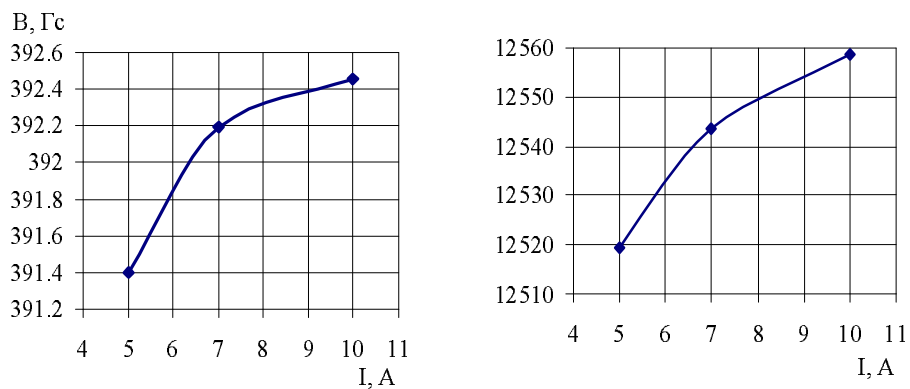


Рис. 2. Поле в центре и интеграл поля вдоль оси пучка для магнита типа LER\_ARC ( $I=5$  A) в зависимости от верхнего значения тока в стандартном цикле нормализации.

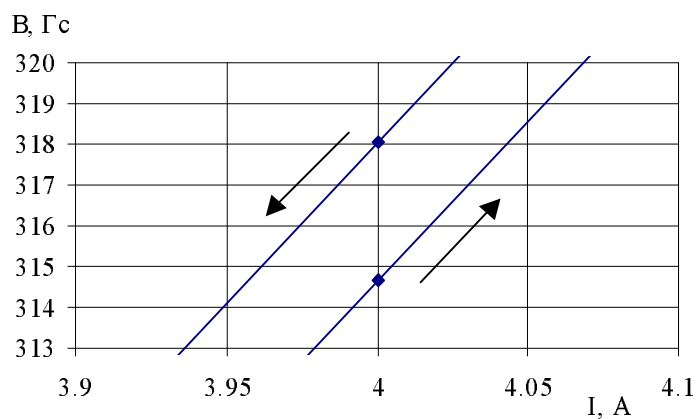


Рис.3. Корректор LER\_ARC. Средний участок кривой стандартного цикла ( $I_{\max} = 9$  A).

Измерения корректирующих магнитов проводились в течение длительного промежутка времени, около 1 года. За время многочисленных измерений происходило постепенное намагничивание стального основания измерительной системы и окружающих стальных конструкций рассеянными полями измеряемых магнитов; особенно резко это чувствовалось после того, как на этой же измерительной системе проводились измерения других

магнитных элементов, обладающих довольно сильными рассеянными полями. Для устранения этого эффекта приходилось принимать специальные меры, о которых будет сказано ниже.

Таким образом была обеспечена необходимая высокая абсолютная точность и повторяемость измерений в течение длительного времени на достаточно большой серии магнитов.

## 5. Результаты измерений

Перед началом серийного производства были изготовлены по 2 прототипа магнитов типа LER\_ARC и HER\_ARC, на которых были проверены основные технологические решения и проведены магнитные измерения. Прототипы изготавливались в двух вариантах, с концевыми пластинами из стали Ст3 (магнитной) и из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, поскольку расчет формы магнитного поля делался для случая с стальными концевыми пластинами, а заказчик в конце концов остановился на варианте с нержавеющей концевыми пластинами, хотя в последнем случае эффективность магнита оказывается на 6.2% ниже, а радиальная однородность интеграла поля вдоль оси пучка на 0.3% хуже, как видно из Рис. 4.

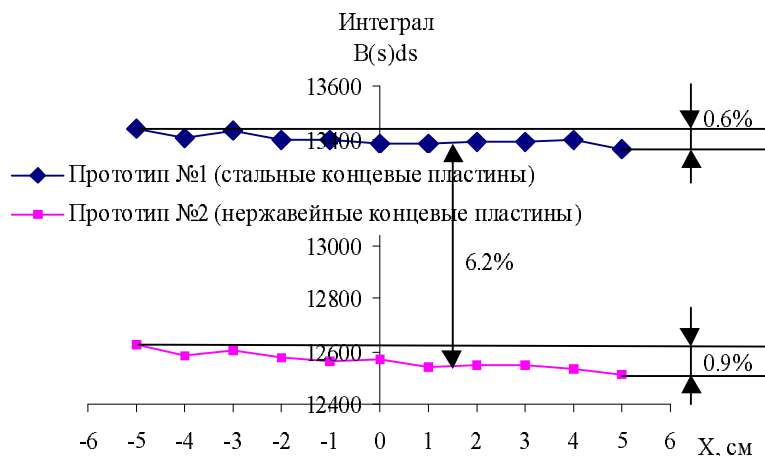


Рис. 4. Прототипы корректоров КЕК типа LER\_ARC. Радиальное распределение интеграла магнитного поля ( $I = 5$  А).

Магнитные измерения показали хорошее совпадение с расчетами трехмерной программой MERMAID(3D). На Рис.5 и 6 приведены результаты расчетов и измерений для корректоров HER\_RF и HER\_ARC.

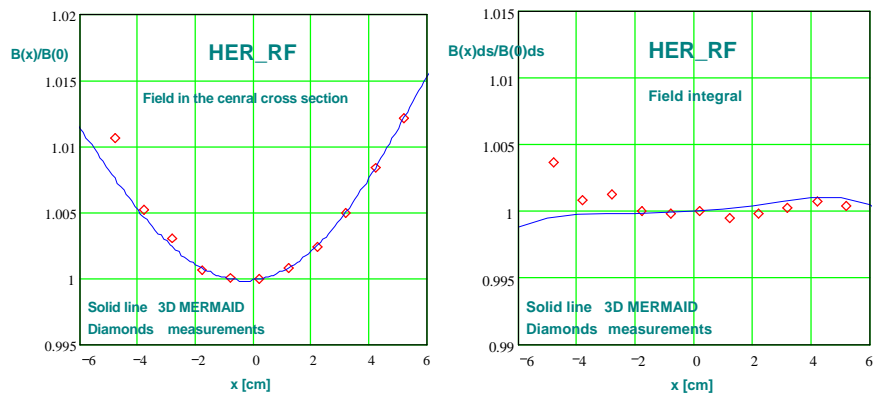


Рис. 5. Магнит HER\_RF. Поле в центре и интеграл магнитного поля.

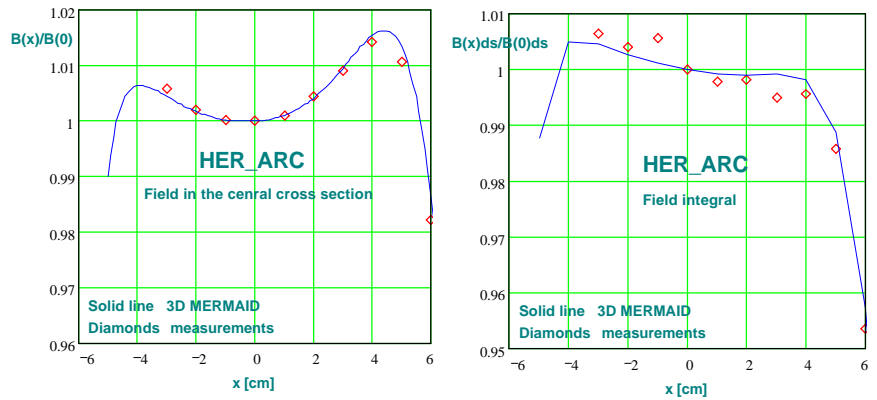


Рис. 6. Магнит HER\_ARC. Поле в центре и интеграл магнитного поля.

Как видно, однородность интеграла поля лучше однородности поля в центре магнита, что подтверждает обоснованность использования трехмерной программы. Небольшое расхождение между расчетом и измерениями вблизи обмотки ( $X < 0$ ) является результатом некоторого

упрощения принятой формы обмотки при расчетах (прямоугольная вместо эллиптической в реальности), сделанного в целях сокращения времени расчетов, без существенной потери точности.

На Рис. 7 и 8 приведены кривые намагничивания для всех четырех типов корректоров, из которых видно, что в рабочем диапазоне токов ( $I \leq 5$  А) эффект насыщения не превышает 2%.

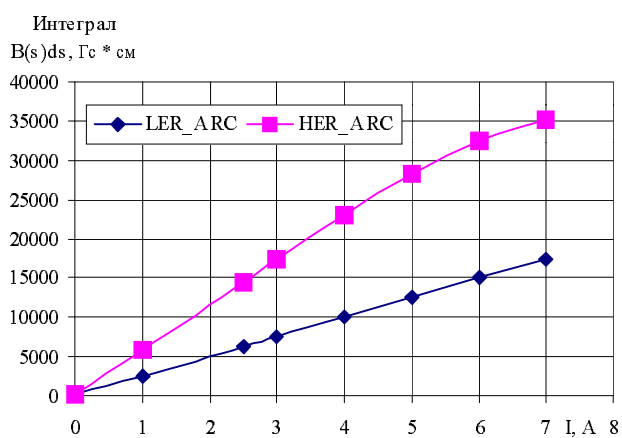


Рис. 7. Кривые намагничивания корректоров LER\_ARC и HER\_ARC.

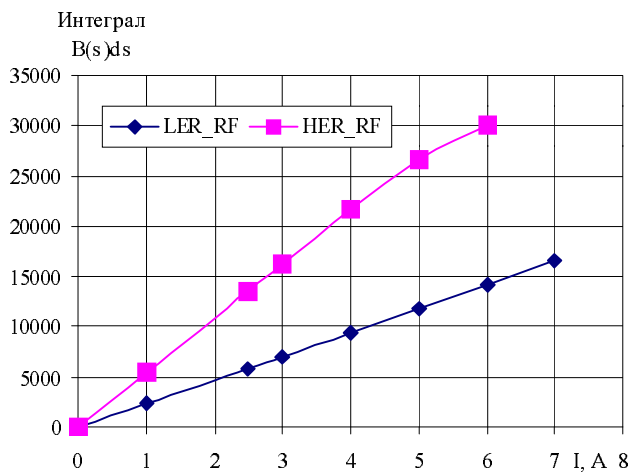


Рис. 8. Кривые намагничивания корректоров LER\_RF и HER\_RF.

Рабочие поля в апертуре магнитов относительно невелики, не выше 1 кГс для HER\_ARC и 0.4 кГс для LER\_ARC. Это приводит к некоторым специфическим особенностям при измерении большой серии магнитов. На Рис.9 показан статистический разброс результатов измерений для корректоров типа LER\_ARC. Из рисунка виден постепенный спад значений результатов, особенно четко заметный на первой партии измерений (первые 150 магнитов). Это происходило в результате постепенного намагничивания стального основания измерительной системы и окружающих стальных конструкций, поскольку корректирующие магниты ставились для измерений всегда в одно и то же место, для проведения измерений магниты включались всегда в одну и ту же полярность. Поля остаточного намагничивания по величине сравнимы с величиной краевых полей магнитов и противоположны им по знаку. Поэтому, с течением времени, они приводят к постепенному спаду измеряемого интеграла поля.

С целью контроля уровня остаточных магнитных полей периодически проводилось измерение интеграла и распределения магнитного поля отдельного эталонного корректирующего магнита через каждые пятьдесят измерений. Если при этом отклонение магнитных параметров от опорного первоначального значения было выше допустимого, то проводилось намагничивание основания измерительной системы специально разработанным токовым циклом с помощью двух намотанных на это основание катушек. Указанную процедуру приходилось делать также после того, как измерения корректирующих магнитов перемежались измерениями других магнитных элементов с достаточно сильными полями. Поэтому на Рис.9 можно увидеть скачкообразные изменения в интеграле магнитного поля, которые вызваны перемагничиванием основания измерительной системы.

При изготовлении магнитопроводов столь крупной партии корректоров использовалось большое количество рулонов электротехнической стали. Вся сталь перед использованием проходила тестовый контроль, показавший наличие разброса в кривых намагничивания стали в рулонах из разных партий, хотя эти параметры оказались и лучше предписываемых ГОСТом, поскольку действующий ГОСТ 21427.2-83 регламентирует лишь минимальное значение индукции в стали при заданном токе намагничивания. Обычно, для обеспечения однородности параметров магнитов, пластины из каждого рулона равномерно распределяются по всем магнитам. В данном случае, учитывая относительно жесткие требования к параметрам корректирующих магнитов, не было необходимости проводить такую процедуру, хотя это приводит к дополнительному статистическому разбросу в параметрах корректоров.

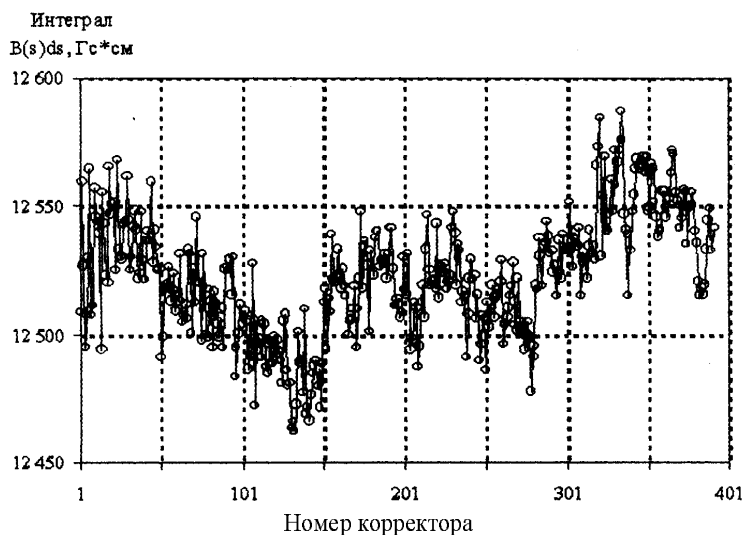


Рис. 9. Статистика интеграла поля корректоров типа LER\_ARC.

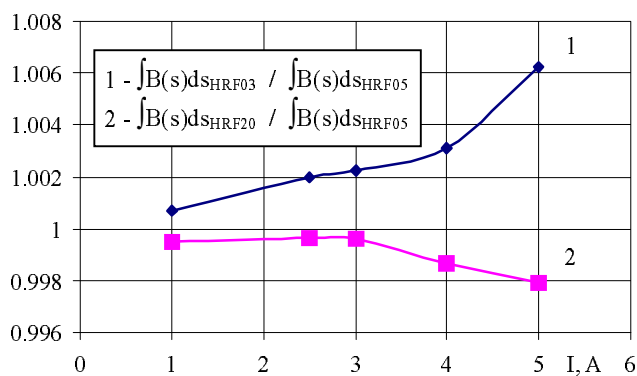


Рис. 10. Влияние разброса в кривых намагничивания стали 2312 на параметры магнитов.

На Рис.10 показано, для примера, отношение интегралов магнитных полей в зависимости от тока для двух корректоров HER\_RF №№03 и 20 к интегралу магнитного поля корректора HER\_RF №05, который имеет некое среднестатистическое значение для этой серии корректоров. Видно, что на номинальном токе 5 А наличие эффекта разброса в величине магнитной проницаемости приводит к расхождению в магнитных параметрах

корректирующих магнитов до 0.8%. Об этом же говорит и тот факт, что статистический разброс параметров магнитов типа LER меньше, чем у магнитов типа HER, поскольку влияние насыщения железа в последнем случае оказывается выше.

Помимо этого, в процессе измерений также было обнаружено, что некоторые концевые пластины из нержавеющей стали имеют несколько отличную от единицы магнитную проницаемость, что приводит к дополнительному размытию статистического разброса магнитных параметров корректоров.

## 6. Обсуждение результатов

При изготовлении и проведении магнитных измерений приходилось учитывать влияние всех указанных факторов и принимать необходимые меры для того, чтобы обеспечивать при изготовлении статистический разброс магнитных параметров корректоров в требуемом диапазоне  $\pm 1\%$ . В Приложениях 1÷ 4 приведена статистика магнитных полей, полученная на основе магнитных измерений.

Анализ полученных результатов показывает, что разброс магнитных параметров (поле в центре, интеграл поля, эффективная магнитная длина) определяется несколькими основными причинами.

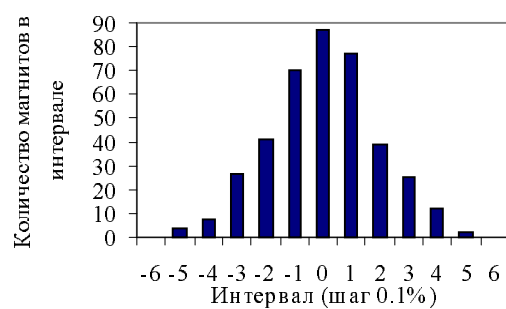
1. Разброс величины магнитной проницаемости на больших полях для различных партий электротехнической стали, который приводит к увеличению статистического разброса в магнитных параметрах корректирующих магнитов до 0.8%.
2. Разброс, в пределах допустимого, геометрических параметров магнитов в процессе изготовления (зазор, длина, положение катушки) увеличивает статистический разброс на 0.2%.
3. Разброс магнитной проницаемости материала концевых пластин из нержавеющей стали в пределах  $\mu=1.01-1.02$  приводит к дополнительному статистическому разбросу интеграла поля до 0.1%.
4. Постепенное намагничивание стального основания измерительной системы вносит небольшую систематическую ошибку в измерения. Учет этого эффекта оказывается особенно существенным для работающих при сравнительно невысоких полях коротких магнитов, апертура которых сравнима с их длиной.

В настоящее время все корректирующие магниты поставлены заказчику, установлены и успешно работают на коллайдере КЕКВ.

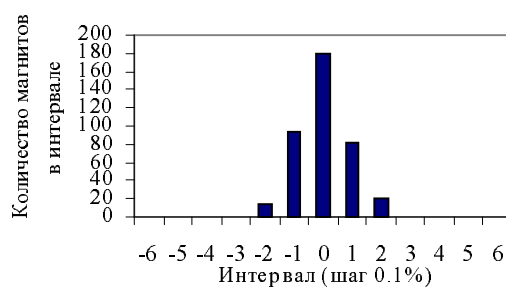


## Приложение 1

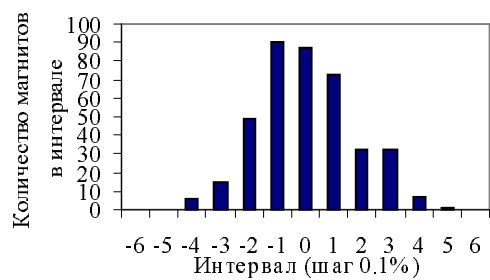
### Статистика параметров корректоров LER\_ARC



Распределение по интегралу магнитного поля.



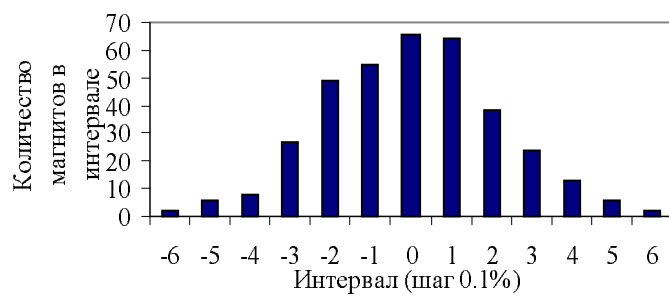
Распределение по полю в центре магнита.



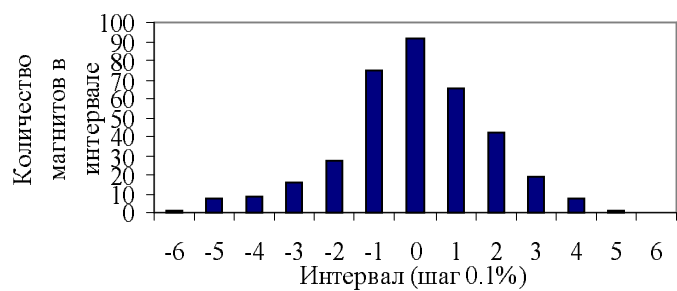
Распределение по эффективной длине.

## Приложение 2

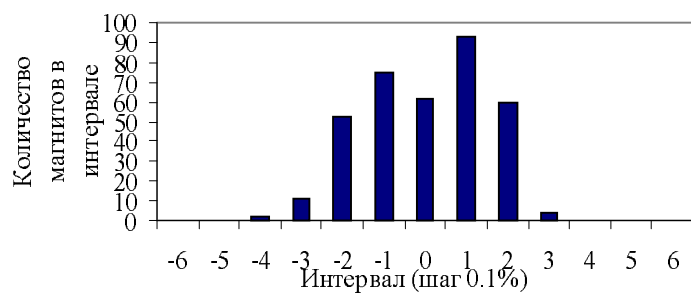
### Статистика параметров корректоров HER\_ARC



Распределение по интегралу магнитного поля.



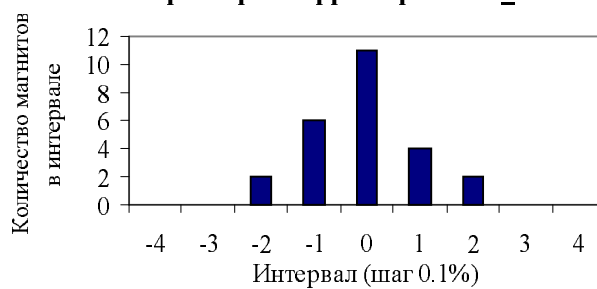
Распределение по полю в центре магнита.



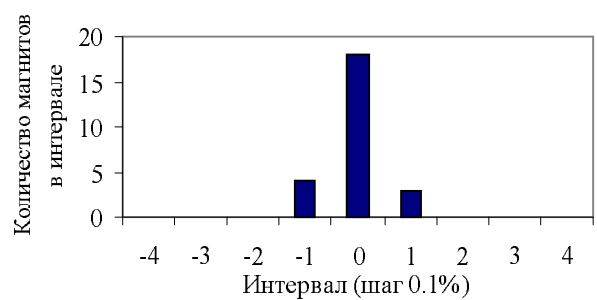
Распределение по эффективной длине.

## Приложение 3

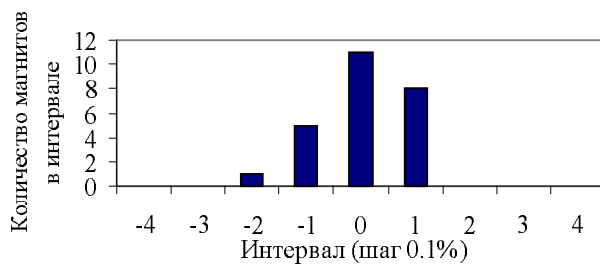
### Статистика параметров корректоров LER\_RF



Распределение по интегралу магнитного поля.



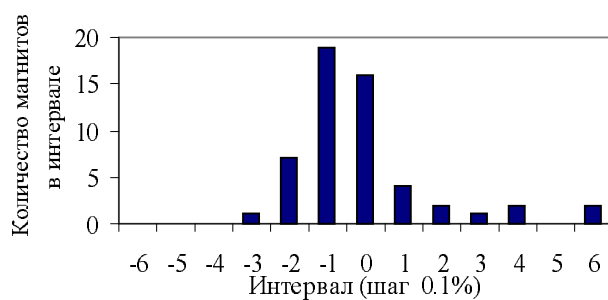
Распределение по полю в центре магнита.



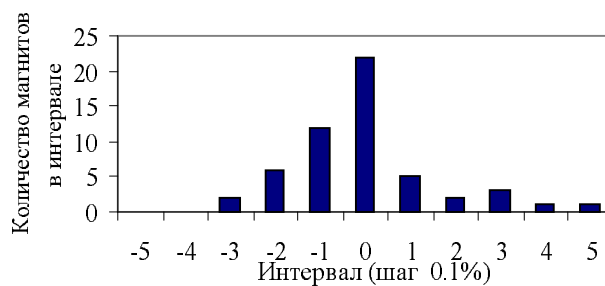
Распределение по эффективной длине.

## Приложение 4

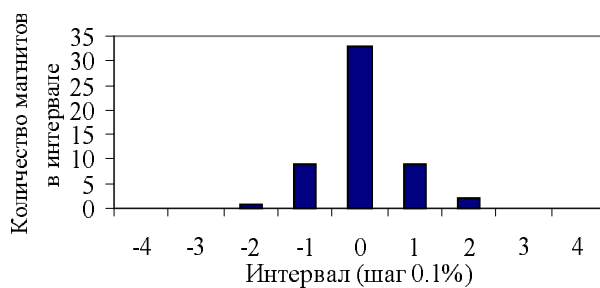
### Статистика параметров корректоров HER\_RF



Распределение по интегралу магнитного поля.



Распределение по полю в центре магнита.



Распределение по эффективной длине.