

## Измерение характеристик дипольного магнита с градиентом для накопительного кольца ЦКП „СКИФ“

© И.Н. Окунев,<sup>1,2</sup> Г.Н. Баранов,<sup>1,2</sup> С.В. Синяткин,<sup>2</sup> В.Е. Тихонов,<sup>2</sup> В.В. Кобец<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Центр коллективного пользования „Сибирский кольцевой источник фотонов“  
Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,  
630559 Кольцово, Россия

<sup>2</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия  
e-mail: g.n.baranov@inp.nsk.su

Поступило в Редакцию 1 сентября 2025 г.

В окончательной редакции 17 декабря 2025 г.

Принято к публикации 23 декабря 2025 г.

Приведено описание дипольного магнита с градиентом типа BDA и стенда магнитных измерений для источника синхротронного излучения поколения 4+ „СКИФ“. Особенности данного магнитного элемента является наличие градиента в связке с С-образной формой магнита и требованием к однородности интеграла магнитного поля не хуже  $\pm 3 \cdot 10^{-4}$  с учетом градиентного поля. Описаны ключевые особенности процесса измерений, и приведены статистические результаты измерений. Дано описание основным результатам магнитных измерений. Сформулированы основные проблемы и критически важные требования к магниту и измерительному стенду, необходимые для достижения целевых параметров.

**Ключевые слова:** источник синхротронного излучения, эмиттанс, магнитные измерения, яркость синхротронного излучения, дипольный магнит.

DOI: 10.61011/JTF.2026.06.63009.251-25

### Введение

ЦКП „СКИФ“ — источник синхротронного излучения поколения 4+ (рис. 1) [1]. Ускорительный комплекс состоит из линейного ускорителя электронов с энергией 200 MeV, синхротрона-бустера на полную энергию и накопительного кольца. Накопительное кольцо с энергией электронов 3 GeV имеет периметр 476 м. Основные параметры комплекса приведены в табл. 1.

Магнитная структура накопительного кольца ЦКП „СКИФ“ состоит из 16 суперпериодов типа 7BA (7 bend

achromat), схема которых представлена на рис. 2. Каждый суперпериод включает пять ячеек TME (Theoretical Minimum Emittance) [2,3] и две дополнительные ячейки по краям, обеспечивающие зануление дисперсионной функции. Четыре из пяти ячеек TME содержат дипольный магнит с градиентом BDA (Bend Dipole type A) (рис. 3), который вносит значительный вклад в величину эмиттанса — ключевой параметр, определяющий качество синхротронного излучения (СИ). Для достижения заданных характеристик необходимо обеспечить высокую однородность интеграла магнитного поля и интеграла градиента магнитного поля в магнитах BDA. Соответствующие требования приведены в табл. 2.

Все диполи данного типа соединены последовательно и питаются от общего источника тока. Такое решение обеспечивает повышенную стабильность замкнутой ор-

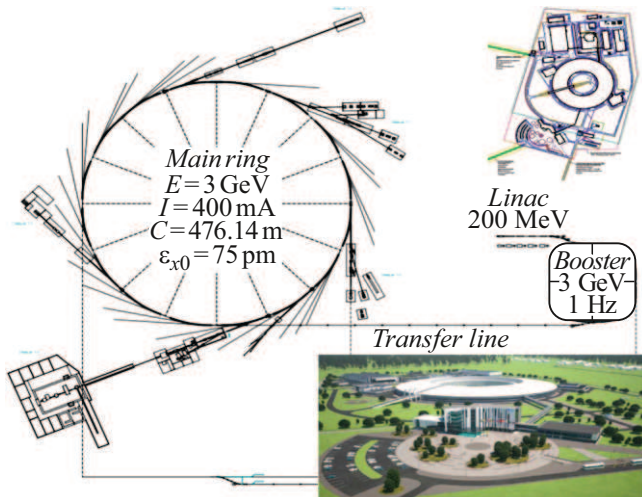


Рис. 1. Схема устройства ЦКП „СКИФ“.

Таблица 1. Основные параметры ЦКП „СКИФ“

Параметр	Величина
Энергия пучка, GeV	3
Симметрия	16
Периметр, м	476.14
Период обращения, $\mu$ s	1.588
Частота обращения, МГц	0.6296
Горизонтальный эмиттанс, pm	73.2
Энергетический разброс	$1 \cdot 10^{-3}$
Потери на оборот, keV	536

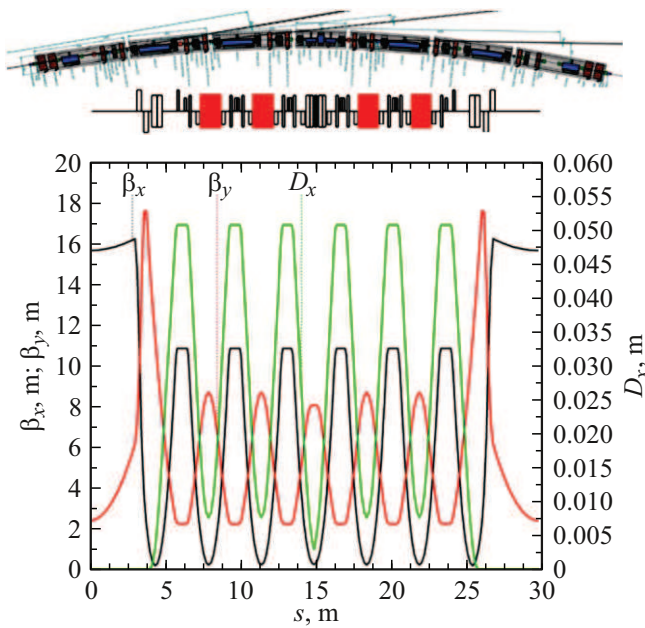


Рис. 2. Суперпериод накопительного кольца. Красным показаны дипольные магниты BDA.

Таблица 2. Технические параметры BDA

Наименование параметра	Единица измерения	Величина
Количество		64
Магнитная длина $L_{eff}$	m	1.3
Магнитное поле в центре, $B$	T	0.5536
Градиент, $G$	T/m	-7.92
Угол поворота	degree	4.12033
Радиус поворота магнита	m	18.0773
Область хорошего поля ( $y \times x$ )	mm <sup>2</sup>	$\pm 10 \times \pm 10$
Однородность интеграла поля $\Delta \int B / \int B$	%	$\pm 0.03$
Отклонение интеграла $B$ от номинала	%	$\pm 0.025$
Отклонение интеграла $G$ от номинала	%	$\pm 0.05$
$R$ зазора	mm	15

биты [3], но накладывает строгие требования на идентичность магнитных параметров в пределах серии (табл. 2).

Требования к однородности магнитного поля были определены на основе численного моделирования в программе MADX [4]. Геометрия полюсного профиля оптимизирована с использованием метода конечных элементов для достижения заданных характеристик поля. Конструкция ярма выполнена из пластин электротехнической стали марки M1200-100A, соединенных клеевым слоем.

Дипольный магнит имеет параллельные края и изогнутую форму (сагитта 9.975 mm). На торцах магнита расположены съемные накладки для коррекции однород-

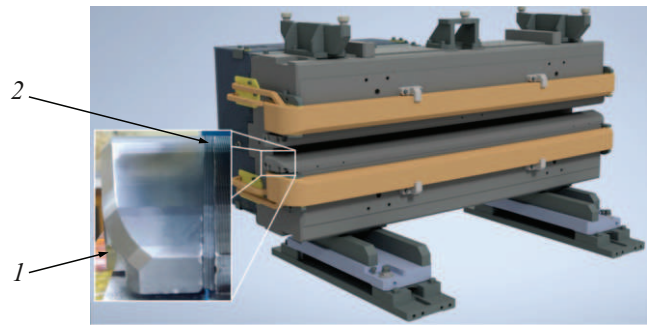


Рис. 3. Дипольный магнит BDA. Справа показан торец магнита с установленной торцевой накладкой из стали АРМКО (1) и дополнительные пластины (2) для корректировки интеграла градиента магнитного поля.

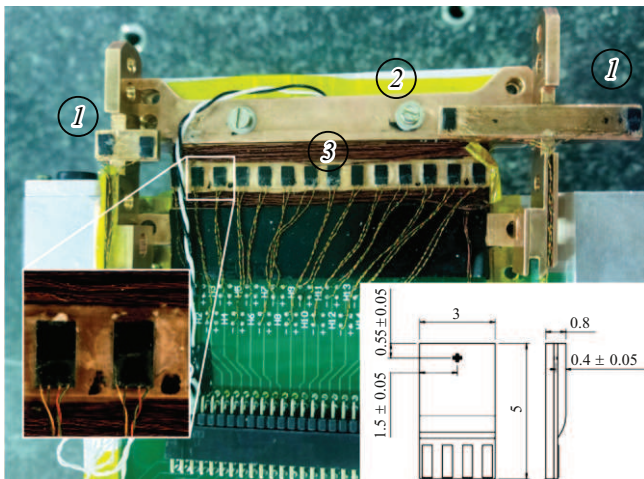
ности интеграла магнитного поля и интеграла градиента магнитного поля (рис. 3). Накладки прикручиваются к ярму таким образом, чтобы увеличить эффективную длину магнита, но не превысить продольные габаритные размеры диполя. Соблюдение габаритных ограничений является критически важным требованием, обусловленным плотной компоновкой магнитных элементов в накопительном кольце.

## 1. Система магнитных измерений

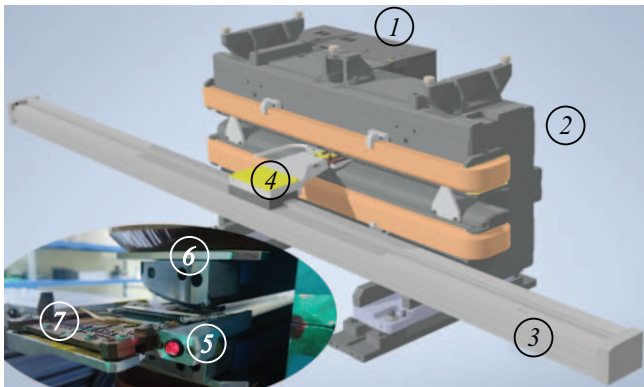
Для измерения индукции магнитного поля разработан стенд магнитных измерений на основе датчиков Холла [5]. В ИЯФ традиционно используются термостабилизированные каретки с набором датчиков Холла и направляющие, которые устанавливаются внутри магнита [6]. Из-за особенности конструкции полюса и сложности изготовления такой направляющей, а также С-образной формы полюса каретка была размещена на линейном приводе, расположенном рядом с диполем на достаточном расстоянии. Такой подход позволяет утверждать, что систематические ошибки измерений одинаковы для всех магнитов серии и не зависят от качества изготовления магнитов и от установки, направляющей в магнит. Дополнительным аргументом в пользу данного подхода послужила недостаточная прочность направляющей, требующейся для измерений магнита, в силу ее габаритов (длина 2 m).

Стенд магнитных измерений состоит из перемещающего устройства, на которое установлена оправка с кареткой, измеряющей электроники на базе VME крейта [7], источника питания, лазертрекера, подставки и системы калибровки. На каретке установлены датчики Холла и отражатели для лазертрекера.

Основа стенда — это медная термостабилизированная каретка с датчиками Холла (рис. 4). В каретке используются корпусированные датчики Холла фирмы Asensor Technology АВ тип HE244 [8]. Каретка имеет 14 горизонтальных и 4 вертикальных датчика Холла.



**Рис. 4.** Каретка с датчиками Холла, вертикальные датчики установлены в позицию для калибровки. Слева снимок датчиков Холла с электронного микроскопа. Справа расположение центра датчика согласно спецификации. 1 — вертикально расположенные датчики Холла (датчики повернуты на  $90^\circ$  и подготовлены к калибровке); 2 — термостабилизированная медная каретка с датчиками Холла; 3 — 14 датчиков Холла для измерения распределения индукции магнитного поля в диполе.



**Рис. 5.** Дипольный магнит и перемещающее устройство с кареткой. Слева — каретка на „въезде“ в магнит, правый отражатель находится в процессе измерения лазертрекером (подсвечен красным). 1 — геознаки магнита; 2 — дипольный магнит; 3 — перемещающее устройство FESTO с шариковой направляющей DGE-63-2000-SP-KF-GK; 4 — каретка с оправкой, датчиками Холла и отражателями; 5 — красным подсвечен четвертьдюймовый отражатель для лазертрекера; 6 — накладная часть магнитного полюса из стали марки АРМКО; 7 — медная каретка с датчиками Холла.

Горизонтальные датчики — для измерения магнитного поля, вертикальные — для учета расположения каретки в медиальной плоскости.

Каретка установлена на алюминиевую оправку с базовыми поверхностями для измерений и отражателями для лазертрекера. Оправка закреплена на перемещающее устройство для передвижения внутри магнита (рис. 5).

Перемещающее устройство установлено на ровную поверхность и дополнительно выравнено в пределах  $\pm 0.1 \text{ mm}$  на длине 2 м. Система координат измерительного стенда формировалась с использованием двух отражателей для лазертрекера. По результатам их последовательного перемещения по всей длине перемещающего устройства рассчитывалась система координат с центром в начальной точке перемещения. В полученной системе координат производилась выставка дипольного магнита. Геометрический центр магнита был предварительно измерен с помощью координатной машины, а его координаты паспортизированы для выставки с помощью геодезических знаков. Результаты выставки перемещающего устройства приведены на рис. 6.

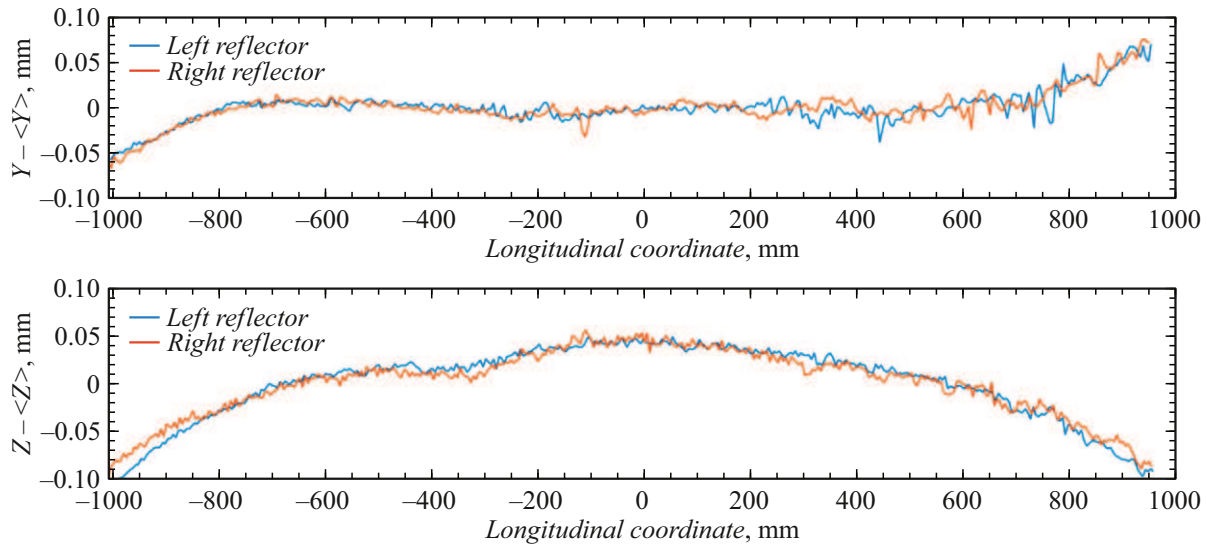
Контроль движения каретки осуществляется с помощью 0.25-дюймового отражателя в пластиковой цилиндрической оправке и лазертрекера (рис. 5). Для измерений координаты отражателя использовался лазертрекер API R — 50 Radian. Погрешность измерения положения лазертрекером составляет  $\pm 0.5 \mu\text{m/m}$ , что дает не более  $\pm 1.5 \mu\text{m}$  на длине 3 м. Погрешность измерения положения каретки в движении  $\pm 10 \mu\text{m}$  плюс  $\pm 0.7 \mu\text{m/m}$ ; при длине перемещающего устройства 2 м погрешность находится в пределах  $\pm 12 \mu\text{m}$ . Для повышения точности измерений лазертрекер был установлен в одну плоскость с отражателями.

Электроника для измерения магнитных полей с помощью датчиков Холла на базе VME разработана в ИЯФ в 2004 г. [7]. В связи с появлением более малошумящих усилителей была модернизирована в 2022 г. и на данный момент имеет шум не более  $\pm 0.01 \text{ G}$ . В состав электроники входит блок термостабилизации, обеспечивающий стабильность температуры в пределах  $\pm 1^\circ$ , блок управления перемещающим устройством и блок управления источником питания. Все данные, поступающие с электроники, сохраняются в электронной таблице для дальнейшей обработки. Процедура измерений с использованием лазертрекера полностью автоматизирована.

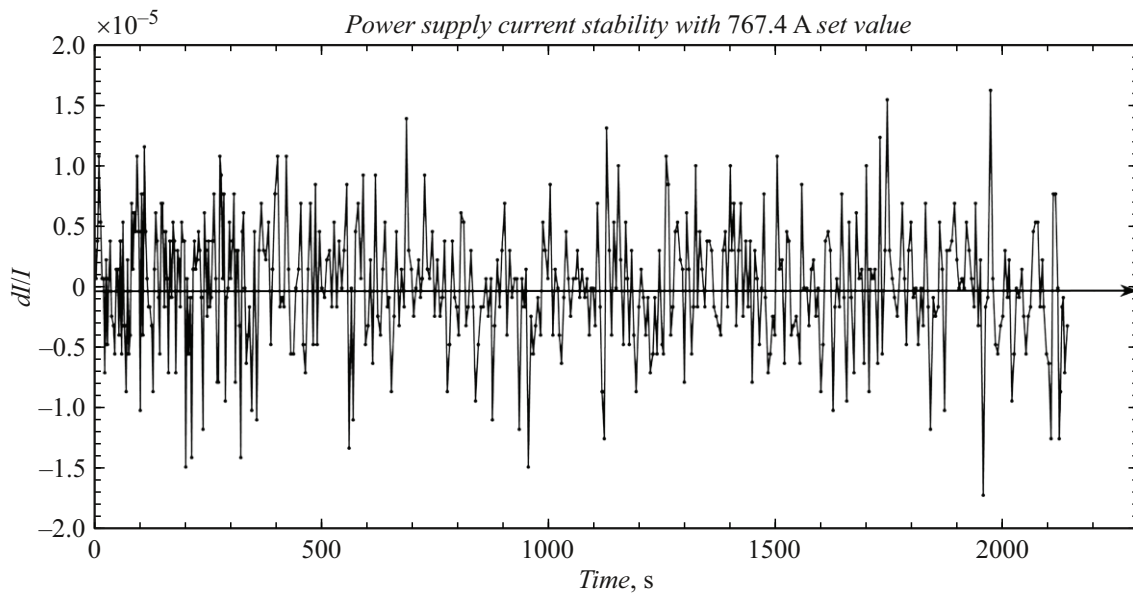
В качестве источника питания используется хорошо зарекомендовавший себя реверсивный источник питания, разработанный в ИЯФ. Он обеспечивает абсолютную стабильность тока  $\pm 2.5 \cdot 10^{-5}$  при токе 1 кА. Рабочий ток дипольного магнита — 767.4 А, время измерения 1800 с, стабильность тока приведена на рис. 7.

Для калибровки датчиков Холла использовался массив из 8 датчиков ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и калибровочного магнита с однородностью магнитного поля  $\pm 5 \cdot 10^{-5}$  в диапазоне от 1 до 16 кГ (рис. 8). Точность измерения однородного дипольного поля  $\sigma \approx 0.15 \text{ ppm} = 1.5 \cdot 10^{-7}$  [9]. Наличие массива датчиков ЯМР позволяет учесть неоднородность магнитного поля и улучшить калибровку.

Кроме измерения зависимостей холловских напряжений от магнитного поля проводились измерения положения магнитного центра датчиков относительно центров отражателей, установленных на каретке. Первый этап измерений проводился с помощью оптического и



**Рис. 6.** Измерение траектории движения каретки по левому и правому отражателю. По вертикали приведена разница между текущим и средним значениями координаты отражателя.



**Рис. 7.** Стабильность тока источника питания при токе 767.4 А.

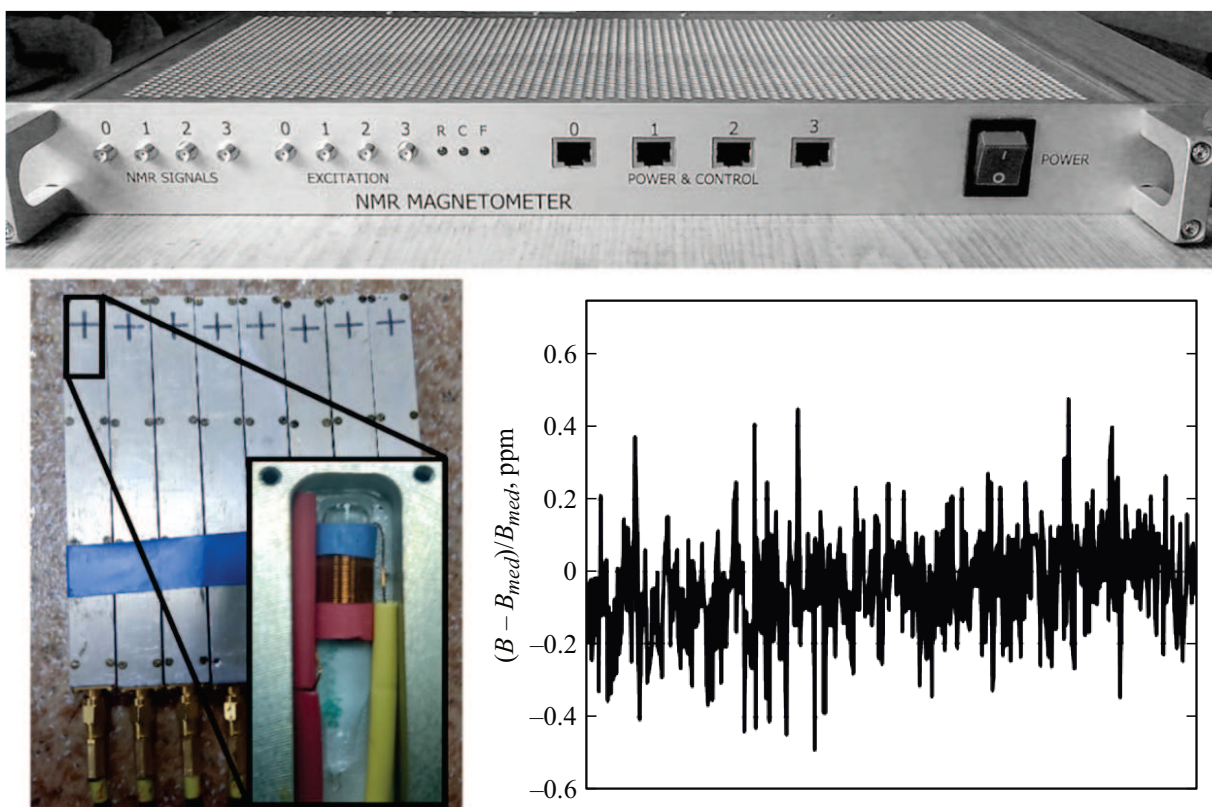
электронного микроскопов, координатно-измерительной машины (КИМ) и лазертрекера. Центры датчиков Холла привязывались с помощью оптических измерений на микроскопе к базовым поверхностям медной каретки, после чего каретка устанавливалась в алюминиевую оправку и выравнивалась с помощью КИМ. Далее производился комплекс измерений на КИМ, позволяющий связать в единую систему КИМ и лазертрекер (рис. 9).

В свою очередь, лазертрекер позволяет измерить координаты центра установленных на алюминиевой оправке отражателей и базовые поверхности оправки и каретки. Таким образом, абсолютное положение координат датчиков было измерено с точностью не хуже  $\pm 25 \mu\text{m}$ .

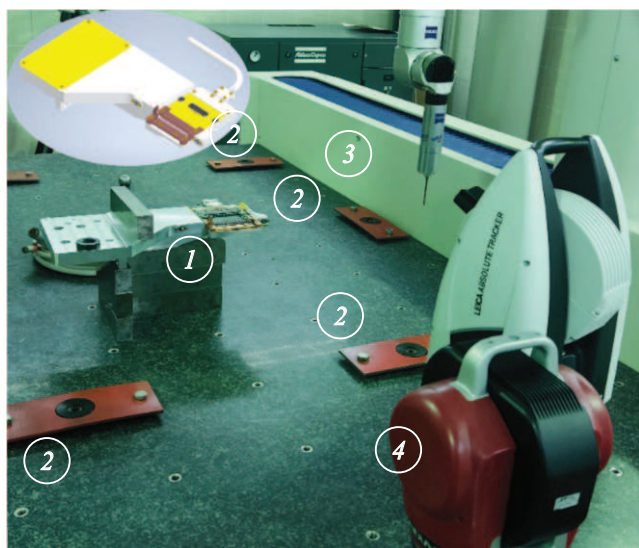
Дополнительно была проведена калибровка положения датчиков Холла с помощью градиентного поля. Данная процедура проводится после измерения зависимости напряжения на сигнальных выводах датчика от индукции магнитного поля. Такая калибровка позволяет вычислить расположение датчиков Холла друг относительно друга с точностью лучше  $\pm 2 \mu\text{m}$ , что дает возможность измерять градиент магнитного поля не хуже  $\pm 0.02\%$ .

## 2. Описание метода измерений

Магнит с помощью лазертрекера позиционируется на стенде магнитных измерений в системе координат



**Рис. 8.** Сверху — ЯМР магнитометр. Слева — линейка датчиков ЯМР. Справа — нормализованные результаты измерений магнитного поля тестового магнита, время одного измерения  $\sim 700$  ms ( $\sigma \approx 0.15$  ppm =  $1.5 \cdot 10^{-7}$ ), измерения проводились в течение 2 min [9].



**Рис. 9.** Процедура привязки координат датчиков Холла к оптическим отражателям. Каретка с датчиками расположена на гранитной плите КИМ совместно с лазертрекером. 1 — каретка с оправкой, датчиками Холла и отражателями; 2 — площадки для установки отражателя 1.5 дюйма; 3 — шуп координатно-измерительной машины; 4 — лазертрекер.

каретки и перемещающего устройства. Таким образом, геометрический центр магнита связывался с положением каретки и датчиков Холла в пространстве. Точность такой привязки складывается из точности измерения геометрической оси, точности привязки, точности измерений лазертрекера (на длине не более 3 m) и точности определения центра датчиков Холла.

После установки магнита проводился цикл нормализации. Цикл нормализации необходим для приведения магнитного элемента в состояние, в котором он будет использоваться на установке, т.е. намагнитить ярмо одинаковым для всех магнитов образом и убрать зависимость магнитного поля от остаточного поля.

Перед началом магнитных измерений проводились измерения напряжений на датчиках Холла при нулевом значении магнитного поля. Измерения данных напряжений требуются для повышения точности измерения абсолютного значения индукции магнитного поля и вычисления градиента. Нулевое магнитное поле обеспечивается с помощью многослойного экрана из пермаллоя. Данная конструкция благодаря своей многослойности позволяет многократно экранировать земное магнитное поле. Остаточная намагниченность такого экрана снимается с помощью отжига в вакуумной печи.

### 3. Результаты магнитных измерений

Магнитные измерения являются основным критерием того, что магнитный элемент соответствует требованиям и может быть использован на ускорителе. Точность измерения с использованием датчиков Холла в рамках описанной работы можно разделить на измерение абсолютного значения магнитного поля и относительную ошибку.

Абсолютное значение магнитного поля в первую очередь определяется процедурой калибровки с использованием ЯМР-магнитометра, измерением остаточного напряжения на датчиках Холла, температурной стабильностью датчиков, и источником питания датчика Холла. В худшем случае расхождение значений магнитного поля, измеренных с помощью датчиков Холла и датчиков ЯМР, составляло 0.5 G после недельного перерыва в работе.

Относительная ошибка измерений определяется из точности определения „магнитного центра“ датчика Холла, стабильности работы электроники и температуры датчиков Холла. Электроника и температура датчиков стабилизированы, поэтому основным источником ошибки является координата „магнитного центра датчика“. Последний определялся с помощью градиентного поля квадрупольного магнита и периодически контролировался с помощью дипольного магнита BDA. Датчики на каретке перемещались в градиентном поле магнита в поперечном направлении. Каждым датчиком измерялось одно и то же поперечное распределение магнитного поля со смещением, равным расстоянию между датчиками. Таким образом, измерив смещение датчиков с помощью лазертрекера и магнитное поле с помощью датчиков Холла, можно вычислить расстояния между датчиками. Точность определения взаимного положения датчиков составляет порядка  $2 \mu\text{m}$ . В задачу вычисления координат входит учет ошибок измерения смещения и стабильности измерения напряжений Холла на датчиках.

Точность работы стенда определялась, в том числе, набором статистики и регулярными калибровками. На рис. 10 представлено распределение однородности интеграла магнитного поля до доработки магнита. Среднее значение магнитного поля по 16 измерениям 0.5535 T, стандартное отклонение  $7 \cdot 10^{-6}$ , ошибка измерения абсолютного значения не более 0.5 G, стандартное отклонение по 16 измерениям  $8 \cdot 10^{-6}$ . Среднее значение интеграла магнитного поля 0.7196 T·m, стандартное отклонение менее  $1 \cdot 10^{-8}$ , абсолютная ошибка измерений менее  $2.5 \cdot 10^{-3}$  G·cm.

Для контроля системы измерений проводилось по 3–4 измерения на энергии 3 GeV (параметры магнита — в табл. 2).

Результатом измерений является карта поля дипольного магнита (рис. 11), таблица тока и таблица координат датчиков в пространстве. С помощью трекинга определяется магнитный центр диполя, угол поворота,

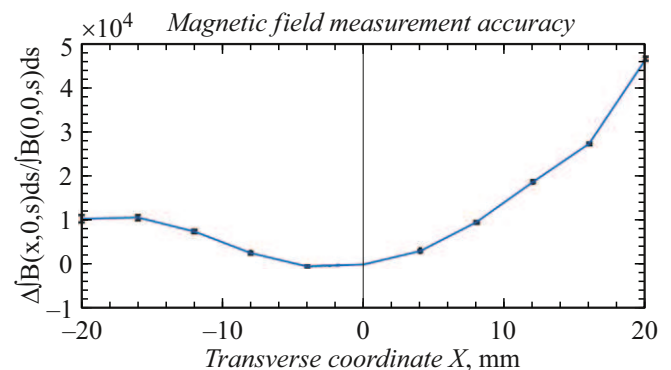


Рис. 10. Распределение однородности интеграла магнитного поля до доработки магнита.

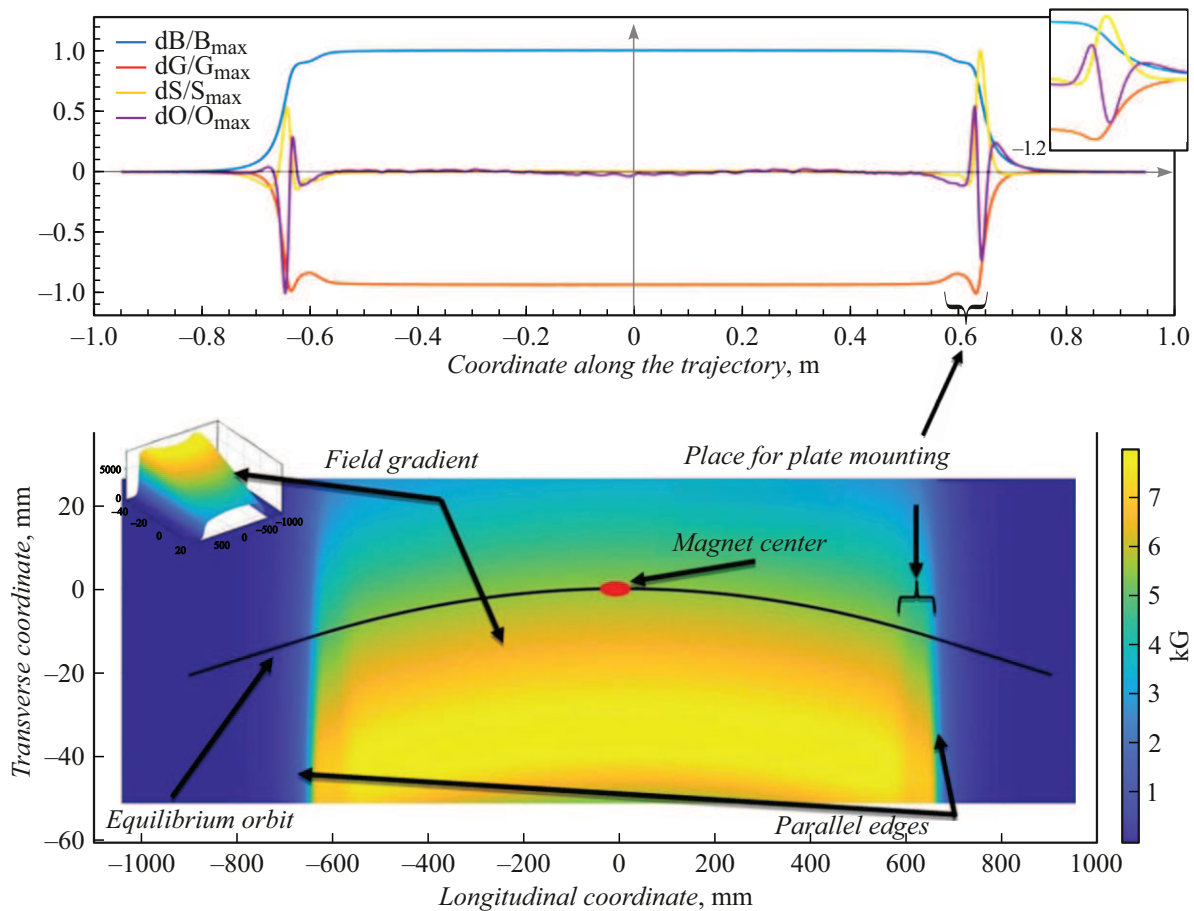
интеграл градиента, зависимость угла поворота от тока. Критерием нахождения магнитного центра является равенство интегралов дипольной и квадрупольной компонент поля при „старте“ частицы из середины магнита [10].

Вся эта процедура позволяет правильно установить магнит в здании накопителя и обеспечить стабильную работу установки.

Ярмо магнита состоит из пластин толщиной 1 mm и имеется допуск на сборку магнита. Например, высота зазора имеет допуск  $\pm 50 \mu\text{m}$ , что соответствует отклонению  $\pm 0.3\%$  абсолютной величины интеграла поля. Из-за этих особенностей значения интегралов индукции и градиента индукции магнитного поля могут выходить за пределы требуемого значения от магнита к магниту. Поэтому перед измерением характеристик магнита, описанных выше, необходимо было доработать диполь. Для доработки дипольного магнита в его конструкции предусмотрен ряд „ручек“. Обеспечение однородности интеграла магнитного поля производилось с помощью накладки из стали АРМКО (рис. 3 и 5). Для подбора величины интеграла магнитного поля и интеграла градиента магнитного поля использовались пластины (рис. 3) и задавалась координата центра магнита в радиальном направлении. В дополнение к этому имелась возможность регулировки высоты зазора магнита с помощью тонкой прокладки из каптона (толщиной от 0.02 до 0.15 mm).

Форма накладки определяется из измеренных распределений интегралов дипольного и квадрупольного полей. Для настройки обоих компонент изменялась длина накладки и угол фаски (пример приведен в работе [10]). Форма накладки одинакова для всей серии магнитов.

Количество устанавливаемых пластин определялось индивидуально для каждого магнита. Шаг по длине пластин —  $25 \mu\text{m}$ , начиная с  $250 \mu\text{m}$ . Тем самым контролировался интеграл градиента магнитного поля. Центр магнита в поперечном направлении определялся из условия обеспечения угла поворота магнита, что равносильно требованию к интегралу дипольного поля.



**Рис. 11.** Продольные распределения нормированных отклонений компонент поля и измеренная карта дипольного магнита. Сверху —  $dB/B_{\max}$  (диполь),  $dG/G_{\max}$  (квадруполь),  $dS/S_{\max}$  (секступоль),  $dO/O_{\max}$  (октуполь). Снизу — измеренная карта поля дипольного магнита.

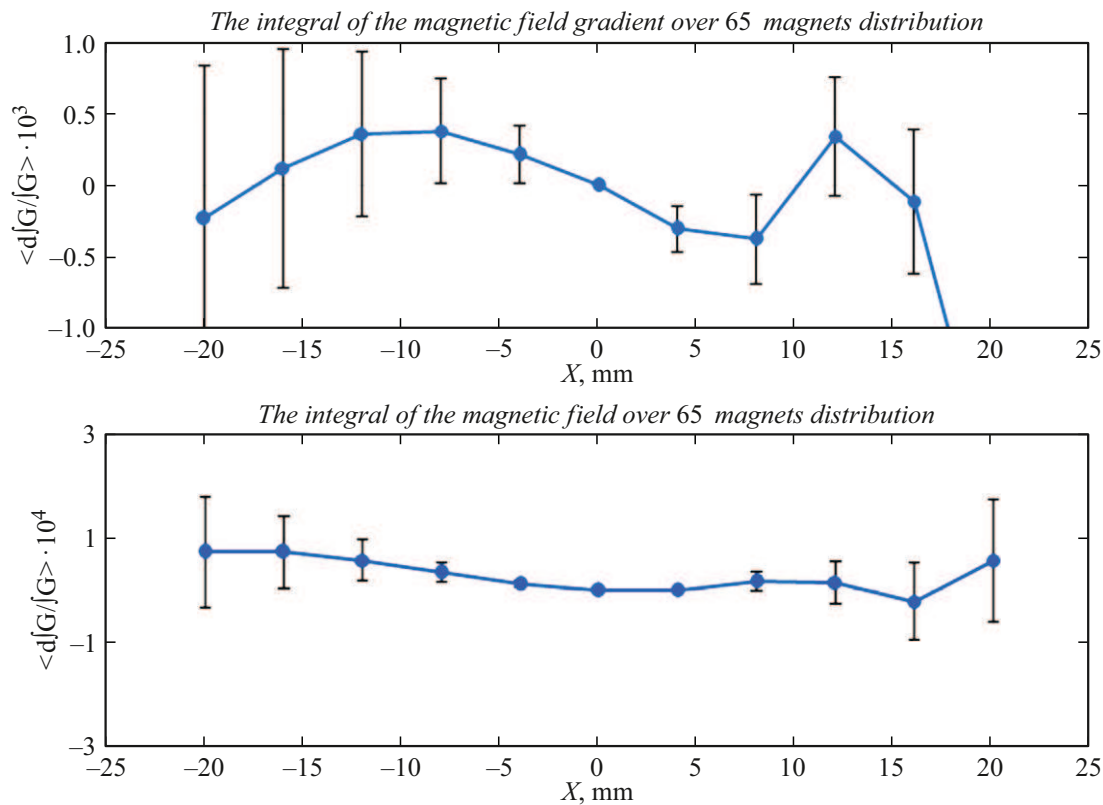
Измерения карты поля проводились в пошаговом режиме. Каретка с датчиками Холла перемещалась в продольном направлении на заданный шаг (0.5–1 cm), производились измерения координат каретки и параллельно измерялось поперечное распределение индукции магнитного поля.

Ключевыми параметрами, которые должны строго соответствовать оптической модели, являются угол поворота частиц (или интеграл магнитного поля при заданной энергии), радиус поворота (или эффективная длина магнита), а также интеграл градиента магнитной индукции. Точное соответствие угла и радиуса поворота проектным значениям для частиц с заданной энергией обеспечивает замкнутость орбиты пучка, предотвращает потери частиц из-за столкновений с вакуумной камерой и непосредственно влияет на величину эмиттанса, особенно при наличии градиентной составляющей поля. Не менее важно соблюдение заданного интеграла градиента магнитного поля, поскольку он определяет правильную фокусировку пучка и соответствие оптических функций расчетным значениям (рис. 2).

После того, как магнит доработан и соответствует всем критериям, необходимо провести цикл измерений для системы управления ускорителем. Чтобы понять поведение дипольного магнита вблизи рабочего поля и составить правильный цикл нормализации, измерялись карты поля еще в семи точках по току.

Стандартный цикл измерений, описанный в разд. 2, предварялся большим объемом нестандартных измерений и экспериментов, позволяющем отработать приведенную методику и доработать как стенд, так и дипольный магнит. На основе магнитных измерений были доработаны торцевые накладки. Это позволило обеспечить однородность интегралов дипольной и квадрупольной составляющей индукции магнитного поля. Доработка потребовала трех итераций и была выполнена на небольшой выборке в 16 магнитов. Также проводилась отработка методики добавления пластин и выбора минимального значения интеграла градиента так, чтобы не потребовалось проводить фрезерные работы на самом ярме.

По результатам измерения после доработки магнитов была составлена кусочно-постоянная модель магнита



**Рис. 12.** Сверху — распределение интеграла градиента магнитного поля от поперечной координаты. Снизу — распределение однородности интеграла магнитного поля диполя от поперечной координаты.

для использования при моделировании динамики пучка, максимально приближенной к реальности [11].

Компоненты магнитного поля, приведенные на рис. 11, рассчитаны на равновесной орбите [10] и наглядно демонстрируют поведение магнитного поля на траектории. В данном случае под равновесной орбитой понимается траектория электрона с энергией 3 GeV, рассчитанная с помощью трекинга. Жестким условием трекинга является обеспечение угла поворота (табл. 2), остальные параметры (интеграл магнитного поля или радиус, градиент и пр.) дорабатываются, например, механически так, чтобы обеспечить данное требование и допуски, приведенные в табл. 2. Несмотря на наличие секступольной, октупольной и других компонент магнитного поля их интеграл, как и вклад в динамику пучка, не превышает требования к однородности магнитного поля  $\pm 0.03\%$ .

На карте поля хорошо виден градиент поля (рис. 11). Явно просматриваются места установки накладок и поведение магнитного поля вблизи них. Картинка демонстрирует, что магнит является диполем с параллельными краями. Данные графики показывают, насколько эффективны торцевые накладки в качестве „удлинителей“ для интеграла магнитного поля. Для данного магнита наблюдается снижение амплитуды дипольного поля и его градиента примерно на 10% в области торцевых накладок. В тесных условиях накопительного кольца

источника СИ такое решение абсолютно оправдано и является рекомендацией к использованию.

На рис. 12 представлена статистика отклонений магнитного поля от расчетных значений для всех магнитов. Отклонения рассчитывались по следующей формуле:

$$\frac{d \int B}{\int B} = \frac{\int B_{measured}(x, s) ds - (B + G_{nom} \cdot x) \cdot L_{eff}}{B}, \quad (1)$$

где  $B_{measured}(x, s)$  — измеренные значения магнитного поля;  $B$ ,  $G_{nom}$ ,  $L_{eff}$  — магнитное поле, градиент и длина магнита из технического задания (табл. 2);

$$\frac{d \int G}{\int G} = \frac{\int \partial B_{measured}(x, s) / \partial x ds - G_{nom} \cdot L_{eff}}{G_{nom}}. \quad (2)$$

## Заключение

В ходе выполнения работ по изготовлению 64 дипольных магнитов с градиентным полем был выявлен ряд технологических и метрологических проблем, требующих особого внимания. Основной сложностью стало обеспечение точности изготовления ярма и воспроизводимости межполюсного расстояния при сборке. На практике наблюдались отклонения до  $800 \mu\text{m}$  (четырёхкратное превышение допустимых  $\pm 200 \mu\text{m}$ ), что, хотя и поддается коррекции путем

доработки интегральных характеристик поля и градиента, однако существенно увеличивает временные затраты на производство.

Критически важным для получения достоверных результатов измерений оказался процесс подготовки магнитов. Для стабилизации характеристик магнит выдерживается в течение 24 h при рабочей температуре на поверочной плите с отклонением от плоскостности не более  $\pm 20 \mu\text{m}$ . Особое внимание уделяется креплению торцевых накладок с помощью штифтов. Такая фиксация позволяет получить однозначную зависимость эффективной длины и интеграла градиента индукции магнитного поля от добавленной толщины пластины при регулировке в пределах  $\pm 3 \text{ mm}$  на сторону.

Материалы торцевых накладок требуют специального подбора, так как их конструкция приводит к более интенсивному магнитному насыщению по сравнению с основным ярмом, что наглядно демонстрируется на рис. 11. Прецизионные измерения требуют жесткого соблюдения температурного режима ( $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ), что позволяет достигать точности на порядок выше предъявляемых к магниту требований.

Для обеспечения стабильности измерительной системы используется реперный магнит, особенно важный при длительных простоях оборудования. Процедура привязки магнитных центров датчиков Холла к оптическим центрам отражателей остается чрезвычайно трудоемкой и требует наличия эталонных магнитов с однородным полем.

Особую актуальность сохраняет проблема измерений градиентных полей датчиками Холла. Для решения этой задачи требуются новые разработки, способные обеспечить стабильность измерений на порядок выше существующей и точность определения магнитного центра до  $0.1 \mu\text{m}$ .

Все магниты серии были доработаны и измерены в соответствии с требованиями спецификации.

## Финансирование работы

Работа была выполнена при частичном финансировании в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП „СКИФ“ ИК СО РАН (FWUR-2025-0004).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] А.В. Бухтияров, В.И. Бухтияров, А.Н. Журавлев, К.В. Золотарев, Я.В. Зубавичус, Е.Б. Левичев, Н.А. Мезенцев, А.Д. Николенко, П.А. Пиминов, И.Н. Чуркин. Кристаллография, **67** (5), 690 (2022). DOI: 10.31857/S0023476122050022

- [2] G. Baranov, A. Bogomyagkov, I. Morozov, S. Sinyatkin, E. Levichev. Phys. Rev. Accelerator and Beams, **24**, 120704 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704
- [3] Г.Н. Баранов, П.А. Дергач, К.Ю. Карюкина, В.А. Павлюченко, Е.Б. Левичев. ЖТФ, **93** (11), 1653 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.11.56498.153-23
- [4] Электронный ресурс. MAD-X. Режим доступа: <https://mad.web.cern.ch/mad/>
- [5] E. Ramsden. *Hall-effect sensors: theory and applications* (Elsevier, Amsterdam, Boston, 2006)
- [6] I. Okunev, A. Batrakov, V. Kobets, I. Morozov. IEEE Transactions on Appl. Supercond., **26** (4), 7440817 (2016).
- [7] А.М. Батраков. *Аналого-цифровая аппаратура автоматизированных систем контроля и управления экспериментальными физическими установками* (Канд. дисс., 01.04.20: 2011 — Н), 229 с.
- [8] Электронный ресурс. HE244 Datasheet. Режим доступа: <https://asensor.eu/onewebmedia/Datasheet-HE244X.pdf>
- [9] Г.В. Карпов. Автометрия, **51** (1), 70 (2015).
- [10] С.В. Сияткин. *Магнитная система бустерного синхротрона с энергией 3 ГэВ для источника синхротронного излучения NSLS — II* (Канд. дисс., 01.04.20: Новосибирск, 2020), 130 с.
- [11] Г.Н. Баранов. *Многополюсный гибридный вигглер для генерации жесткого интенсивного синхротронного излучения на накопителе ВЭПП-4М* (Канд. дисс., 01.03.18: Новосибирск, 2022), 125 с.