

P9-2025-8

В. М. Амосков и др.

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ БЛОКОВ ПОСТОЯННЫХ
МАГНИТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ТРАНСПОРТИРОВКИ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
МОДЕЛЕЙ

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

Контроль параметров блоков постоянных магнитов
для создания прецизионных элементов систем транспортировки
заряженных частиц с использованием пространственных
вычислительных моделей

Основная цель работы — создание квадрупольной линзы (КЛ) на постоянных магнитах (ПМ) для системы вывода пучка циклотрона ДЦ-140. Рассматриваются особенности разработки методики входного контроля ПМ с использованием математических моделей прецизионной магнитной системы линзы. Для предложенной конструкции КЛ разработаны элементы методики входного контроля ПМ и изготовлены приспособления и оборудование, необходимые для его проведения. Выполнен входной контроль партии ПМ; на основе полученных данных уточнена конфигурация линзы и расположение ПМ. Проведена сборка трех образцов КЛ: технологического (прототип), основного и контрольного.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2025

Inspection of Geometric and Magnetic Parameters
of PM-Based Quads in Precision Transport System
for Accelerator Application

The study is focused on performance of permanent magnet-based quadrupoles (PMQ) used for beam transportation and focusing in the DC140 cyclotron. An inspection procedure is examined, which combines 3D field simulation and measurement for geometric and magnetic parameters of PM units. The results are used to guide practical measurement technique and instrumentation decisions. A set of supplied PM units has been measured and an optimum intramagnet PMQ configuration has been determined. As a result, the prototype, reference, and test magnets have been assembled.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2025

В. М. Амосков¹, Т. В. Глушенкова¹, Г. Г. Гульбеян², Н. С. Знаменщикова¹,
И. А. Иваненко², В. Д. Казанцев¹, Н. Ю. Казаринов², И. В. Калагин²,
М. В. Капаркова¹, Н. А. Крылова¹, В. П. Кухтин¹, Е. А. Ламзин¹,
М. С. Ларионов¹, А. А. Макаров¹, А. Н. Неженцев¹, Д. А. Овсянников³,
Д. А. Овсянников¹ (мл.), Н. Ф. Осипов², М. В. Семенова⁴, С. Е. Сычевский¹,
А. А. Фирсов¹, Н. А. Шатиль¹

¹ Акционерное общество «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴ ООО «ВАЛТАР МАГНИТ», Королев, Россия

ВВЕДЕНИЕ

Работа выполнялась на основании договора «Создание квадрупольной линзы на постоянных магнитах для канала системы вывода пучка циклотрона ДЦ-140».

В настоящее время в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ, Дубна) ведутся работы по созданию циклотронного комплекса ДЦ-140, предназначенного для решения широкого круга прикладных задач [1, 2]. В процессе вывода из циклотрона ионный пучок проходит область с резко спадающим краевым магнитным полем. Для компенсации горизонтальной дефокусировки в системе вывода ДЦ-140 в области высокого уровня поля будет использован пассивный магнитный канал, а в области низкого уровня поля — квадрупольная линза на постоянных магнитах (ПМ). Линза устанавливается в канале вывода пучка в каркасе дуанта циклотрона. Необходимость использования ПМ в линзе обусловлена относительно малой величиной рассеянного поля циклотрона, что препятствует созданию компенсирующего градиента магнитного поля с помощью стальных магнитных масс.

Таким образом, основная цель работы состоит в создании квадрупольной линзы на постоянных магнитах (PMQ) с неизменным во времени распределением поля [3]. В конструкции таких систем целесообразно применение высококоэрцитивных постоянных магнитов, которые характеризуются долговременной стабильностью магнитных свойств, отсутствием внутренних источников тепловыделения, удобством и надежностью эксплуатации. Обсуждаемая квадрупольная линза представляет собой конструкцию, выполненную из немагнитного материала, в которой размещены постоянные магниты, создающие в рабочей области (некорректируемое) магнитное поле требуемой конфигурации.

Предварительные 2D численные исследования позволили осуществить выбор такой конструкции квадрупольной линзы на основе постоянных магнитов квадратного сечения, представленного на рис. 1 [4, 5], конфигурация которой обеспечивает требуемые параметры и характеристики поля в канале системы вывода пучка из циклотрона ДЦ-140 [1, 4–6]. Назовем эти теоретически одинаковые по своим параметрам (геометрической форме, размерам, направлению и величине вектора намагничивания, а также температурным коэффициентам и др.) постоянные магниты базовыми блоками ПМ.

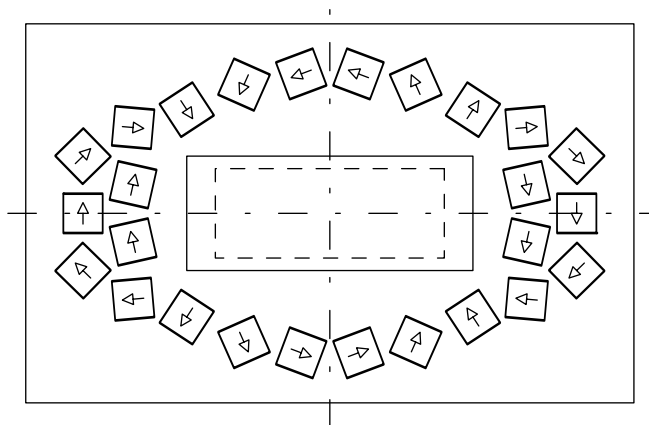


Рис. 1. Сечение квадруполь из двадцати шести постоянных магнитов для оптимальной конфигурации РМҚ. Магниты — сечением 11×11 мм с намагниченностью 1,1402 Тл. Стрелками показаны направления намагниченностей. Пунктиром обозначена рабочая область 64×25 мм. Сплошные линии: апертура 80×32 мм, внешние габариты 170×106 мм

Конструирование прецизионных магнитных систем, например, таких как системы транспортировки заряженных частиц ускорителей, магниторезонансных томографов, инжекторов и анализаторов частиц термоядерных установок, обычно базируется на 3D вычислительных моделях. Характерная величина требуемой точности формирования поля $\Delta B/B$ лежит в диапазоне 10^{-3} – 10^{-5} и может быть достигнута только с использованием детальных математических моделей.

В случае применения в качестве источников поля токонесущих катушек в сочетании с ферромагнитными сталями (особенно для так называемых закрытых систем, т.е. таких систем, в которых магнитное поле в рабочей области формируется замкнутым магнитопроводом) решающий вклад в ошибки формирования поля вносят неточности изготовления полюсов и магнитопровода, укладки проводников, описания магнитных свойств сталей, а также точности сборки. Для случая открытых систем, т.е. таких систем, поле в которых формируется в основном токонесущими проводниками и/или постоянными магнитами (в работе рассматривается именно такой случай), необходимо принимать во внимание и разброс параметров, составляющих эти системы базовых блоков постоянных магнитов.

Отдельно следует отметить, что конструкции магнитных систем мультипольных электромагнитов достаточно хорошо разработаны [7] и могут быть адаптированы для конкретного случая путем решения прямой задачи определения поля по его заданным источникам. В этом случае решение обратной задачи (определение источников поля по требованиям к его распределению в выбранных подобластях) может быть необходимо для расчета

деталей из магнитомягких сталей — шиммов, форма и размеры которых позволяют «откорректировать» отклонение распределения созданного поля от требуемого распределения. Это отклонение вызывается не только неточностями изготовления и сборки, но и неточностями определения нелинейных зависимостей магнитной проницаемости от индукции. Существенную позитивную роль в настройке системы играет и возможность вариации величины токов в катушках.

Сложнее дело обстоит с закрытыми системами, базирующимися только на ПМ. Такие системы, в частности, в силу значительной экономии энергопотребления, эффективно могут быть применены в источниках синхротронного излучения [8–10]. К ним, однако, предъявляются весьма высокие требования в части точности формирования распределений поля. В таких магнитных системах эффективное решение дает подбор магнитных и термомагнитных шунтов.

Открытые системы, использующие только ПМ, требуют тщательного учета параметров каждого блока ПМ, составляющих эту систему, поскольку только эти постоянные магниты являются единственными источниками магнитного поля. К таким системам относится рассматриваемая квадрупольная линза.

Предварительная оптимизация параметров линзы базировалась на решении обратной задачи магнитостатики — определении размеров, локализации, величины и направления вектора намагничивания и ряда других параметров на основании требований к градиенту магнитного поля в рабочей области линзы [4–6]. Анализ результатов моделирования показал, что разброс параметров изготавливаемых промышленностью блоков ПМ существенно влияет на точность формирования поля; повышение требований к качеству магнитов (уменьшение разброса параметров) выходит за рамки технологических и финансовых возможностей.

Таким образом, процедура формирования поля систем на основе блоков ПМ должна включать в себя этапы входного контроля параметров ПМ, группировки этих магнитов по измеренным параметрам для дальнейшей оптимизации магнитной системы (описание алгоритма группировки выходит за рамки данной статьи), синтеза магнитной системы с использованием осредненных индивидуальных данных о каждом блоке постоянных магнитов. Этим задача входного контроля параметров конкретных блоков ПМ отличается от задачи определения свойств материалов ПМ. В данной работе обсуждаются особенности реализации процедуры определения параметров блоков ПМ.

Следует отметить, что обсуждаемая методика измерения магнитных свойств постоянных магнитов соответствует рекомендациям раздела 4.2 ГОСТ 25639-83 «Магниты литые постоянные» в отношении проверки магнитных параметров. При этом необходимо также учитывать, что указанный стандарт предусматривает возможность использования альтернативных методов измерения с достаточной точностью, не противоречащих его положениям. Указанный нормативный документ, хотя и устанавливает методику проведения измерений, не уделяет внимания автоматизированным

методам, что требует особых методологических и технических решений для обеспечения необходимой точности измерений и эффективности процесса. Кроме того, предлагаемая реализация измерений не противоречит требованиям ГОСТ 8.268-77 «Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик магнитотвердых материалов».

Данная работа посвящена методике проведения контроля характеристик конкретных блоков ПМ с целью проверки соответствия заявленным свойствам, что требует специфических решений. Однако основные методологические принципы и техническая база измерений заимствованы из указанного стандарта, несмотря на то обстоятельство, что он фокусируется на контроле свойств материалов ПМ.

В АО «НИИЭФА» на основании оптимизационных расчетов была разработана конструкция квадрупольной линзы с требуемыми параметрами при условии задания идентичных свойств блоков ПМ. Актуальным, как указывалось выше, является вопрос обеспечения достаточно высокой точности формирования градиента магнитного поля в рабочей области линзы [4–6]. Дальнейшие исследования, разработки и изготовление базировались на учете реальных геометрических и магнитных характеристик ПМ и анализе их влияния на формирование поля в РМҚ.

В работе [5] приведены полученные численно распределения квадрупольного поля с градиентом 9 Тл/м и его отклонения в поперечном сечении рабочей области 60×25 мм, соответствующие конкретным параметрам выбранной магнитной системы. Максимальное отклонение поля в рабочей области от требуемого значения не превышает 1 %, среднее отклонение — 0,1–0,2 %.

В общем случае ошибку формирования поля (градиента поля) РМҚ определяют следующие составляющие [5]:

1. Отклонение расчетного поля от требуемого поля, обусловленное конструктивными и техническими ограничениями РМҚ и параметрами ПМ. Это отклонение находится расчетным путем в предположении заданных/оптимизированных параметров магнитной системы.

2. Отклонение реального поля в рабочей области от расчетного поля, обусловленное неточностями изготовления и сборки магнитной системы и ее элементов, а также разбросом параметров ПМ, выпускаемых промышленностью.

На основании общих соображений [5] расчетные отклонения поля должны быть минимальными для того, чтобы увеличить диапазон допусков на изготовление элементов РМҚ и ее сборку и, как следствие, уменьшить жесткость технологических требований на этапе производства. Исходя из заданной величины погрешности формирования градиента поля линзы, которая не превышает 1 %, было принято, что допустимая величина расчетного отклонения градиента поля не должна превышать 0,1 %. Погрешность расчетов ограничена величиной 0,01 %.

На основании результатов входного контроля приобретенной партии постоянных магнитов проведена корректировка магнитной системы с учетом измеренных параметров ПМ.

В соответствии с техническим заданием изготовлено три образца РМҚ:

- технологический образец — для отработки технологии изготовления и сборки;
- основной образец — для передачи заказчику;
- контрольный образец для периодических измерений с целью исследований зависимости свойств линзы от времени, связанных с так называемым эффектом старения постоянных магнитов.

1. ТРЕБОВАНИЯ К КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛИНЗЕ

Конструкция РМҚ должна обеспечивать совместимость с конструкцией канала вывода пучка в циклотроне и не должна ограничивать откачку газов для работы в вакууме. Для установки линзы в каркасе предусмотрено специальное посадочное место с системой юстировки и крепления.

Эксплуатационные параметры РМҚ представлены в табл. 1.

Таблица 1. Эксплуатационные параметры РМҚ

Параметр	Значение
Рабочая температура в режиме эксплуатации, °С	30–40
Максимальная температура в режиме наладки, °С	70
Уровень вакуума, Торр	10^{-7}

По результатам проведенного анализа [4–6] были сформулированы требования к магнитной системе РМҚ на постоянных магнитах и ее компонентам:

- квадрупольное поле — с градиентом 8,1 Тл/м;
- погрешность линейной аппроксимации поля в рабочей области не больше $\pm 1\%$;
- рабочая область 64×25 мм;
- апертура 80×32 мм;
- эффективная длина $L_{\text{эфф}} = 299,3$ мм;
- габаритная длина 320 мм;
- внешние поперечные габаритные размеры 242 мм (170 мм) $\times$ 106 мм.

Базовой конфигурацией для проектирования РМҚ является система с двадцатью шестью магнитами сечением 11×11 мм, представленная на рис. 1.

Расчетные значения остаточной индукции B_r , положения центров ПМ в I квадранте и их ориентация при $L_{PM} = 30$ см приведены в табл. 2. При численном моделировании учитывалось положение рабочей точки ПМ на прямолинейном участке кривой размагничивания, соответствующем магнитной восприимчивости $\chi = 0,1$.

На рис. 2 показано рассчитанное распределение магнитного поля в апертуре РМҚ. Максимальное отклонение расчетного поля от идеального квадрупольного составляет 0,6 % в пределах прямоугольной рабочей области, 0,15 % внутри эллипса, вписанного в рабочую область.

Таблица 2. Положение ПМ в сечении линзы ($\chi = 0,1$, $L_{PM} = 30$ см)

№ магнита	x, y , мм	φ , °	a , мм	$\mu_0 M$, Тл	B_r , Тл
1	8,0, 39,0	157,35	11,0	1,1288	1,1853
2	24,0, 36,0	115,34	11,0	1,1288	1,1853
3	40,0, 29,0	59,10	11,0	1,1288	1,1853
4	55,0, 24,0	-5,03	11,0	1,1288	1,1853
5	69,0, 16,0	-46,72	11,0	1,1288	1,1853
6	55,0, 8,0	-73,60	11,0	1,1288	1,1853
7	69,0, 0,0	-90,00	11,0	1,1288	1,1853

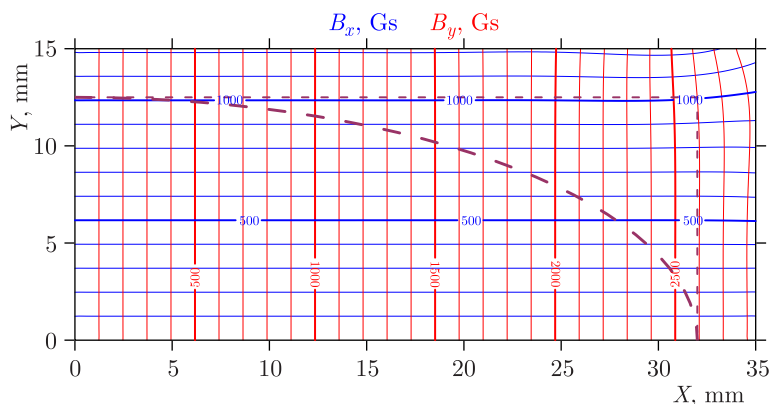


Рис. 2. Изолинии компонент B_x (горизонтальные) и B_y (вертикальные) сформированного поля (Гс) в I квадранте, пунктиром обозначена рабочая область 64×25 мм и вписанный в нее эллипс

В соответствии с разработанной конструкцией линзы к постоянным магнитам предъявлялись следующие требования:

- материал магнитов: Nd-Fe-B;
- защитное покрытие: Ni-Cu-Ni;
- класс магнитов: N35UH;
- геометрическая форма: прямоугольный параллелепипед $11 \times 11 \times 50$ мм;
- предельные отклонения размеров магнитов: $\pm 0,05$ мм;
- радиус скругления кромок 0,3–0,5 мм;
- направление намагничения: компланарно одной из коротких сторон, $\pm 1^\circ$;
- средняя величина остаточной индукции $B_r = 1,185$ Тл, $\pm 3\%$, при температуре эксплуатации 30–40°C;
- коэрцитивная сила магнитов по намагниченности (H_{cM}): не меньше 25 кЭ;
- линейный участок кривой размагничивания $M(H)$: от 0 до -15 кЭ (1200 кА/м).

Для изготовления РМQ была приобретена партия постоянных магнитов с трехкратным запасом по числу, что позволило собрать три образца линзы, описанные выше.

По результатам входного контроля блоков ПМ из партии после отбраковки, формирования выборки, группировки магнитов были определены средние характеристики магнитов, которые использовались для корректировки конструкторской документации (пространственные положения блоков магнитов).

Из партии был сформирован набор блоков ПМ с параметрами, наиболее близкими к расчетным, для основного экземпляра РМQ. Оставшиеся магниты сформировали два дополнительных набора: для технологического и контрольного образцов РМQ. Основной и контрольный образцы линз были изготовлены в соответствии с откорректированной КД.

2. КОНСТРУКЦИЯ КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛИНЗЫ

При разработке линзы, общий вид которой представлен на рис. 3, решались задачи обеспечения:

- прецизионного пространственного позиционирования источников постоянного магнитного поля в объеме линзы (согласно проведенным расчетам и оптимизации) и получения заданной конфигурации магнитного поля;
- возможности измерения характеристик магнитного поля в рабочей области с необходимой точностью;
- совместимости с конструкцией канала вывода пучка в циклотроне;
- эффективной откачки газов при работе в вакууме;
- технологичности изготовления деталей;
- технологичности сборки;
- техники безопасности при работе с постоянными магнитами.

РМQ состоит из шести секций с расположенными в них блоками постоянных магнитов (по двадцать шесть ПМ в каждой секции), двух щек,

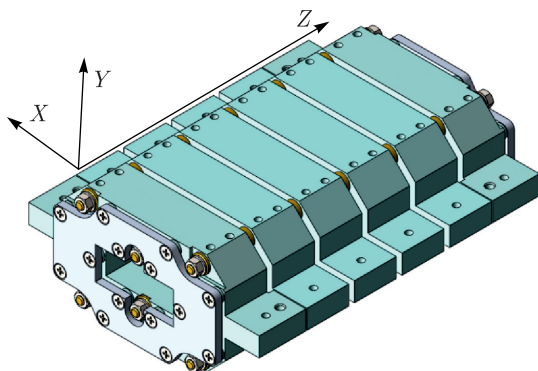


Рис. 3. Внешний вид РМQ (фотореалистическое изображение) и локальная система координат

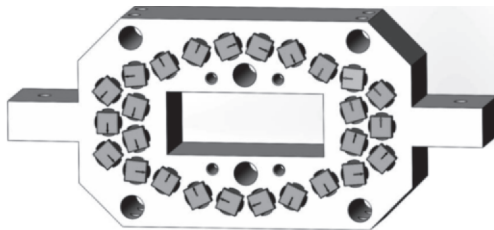


Рис. 4. Внешний вид одной секции (фотореалистическое изображение)

установленных на крайних секциях и фиксирующих положение блоков ПМ в осевом направлении линзы, тридцати втулок, обеспечивающих соосное положение секций, шести шпилек, стягивающих секции с магнитами в единый корпус линзы.

Поскольку линза состоит из шести одинаковых секций (пристыкованных друг к другу в продольном направлении) с одинаковым расположением в каждой из них двадцати шести блоков ПМ, то необходимо выделить из партии магнитов группы по шесть штук (каждая группа соответствует своему положению в сечении линзы) так, чтобы средние магнитные свойства каждой группы по возможности были одинаковыми.

Секции двух типоразмеров (две крайние и четыре внутренние) изготавливаются из плиты алюминиевого сплава Д16. Общий вид секций представлен на рис. 4.

3. ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Конструктивная длина сборки ПМ в продольном направлении составляет $L_{PM} = 30$ см и набирается из шести блоков магнитов длиной по 5 см. Остаточная индукция магнитов с учетом требования на эффективную длину $L_{eff} = 299,3$ мм и торцевых эффектов должна составлять $B_r = 1,1854$ Тл.

В ходе проведения работ по входному контролю часть блоков магнитов (9 шт.) была повреждена и исключена из дальнейших действий.

Входной контроль поставленной партии магнитов на рассматриваемом этапе включал три испытания:

- 1) контроль геометрических размеров магнитов с использованием специально изготовленного «калибра»;
- 2) контроль направления вектора намагничивания магнитов с использованием специальной оснастки;
- 3) измерение величины магнитного поля на заданных расстояниях от магнита с использованием специальной оснастки с целью определения остаточной индукции и магнитной восприимчивости.

3.1. Контроль геометрических размеров. Для проведения контроля геометрических размеров блоков постоянных магнитов был изготовлен измерительный калибр, который представлен на рис. 5.

Магниты, длина которых превышала 50,05 мм, были отбракованы.

В процессе измерений выяснилось, что сечение всех блоков имеет плюсовой допуск. Поэтому был изготовлен дополнительный калибр с отверстиями со сторонами 11,01, 11,02, 11,03 и 11,04 мм для уточнения поперечных размеров магнитов.

По результатам проведенных испытаний число блоков магнитов, не соответствующих размерам, составило 41 шт. С учетом девяти поврежденных магнитов, число непригодных блоков магнитов составило 50 шт.

Окончательно, 580 оставшихся блоков магнитов были признаны годными. Дефекты типа сколов и царапин без нарушения защитного покрытия не считались критическими.

3.2. Контроль направления вектора намагничивания. Исходя из требований к блокам ПМ отклонение вектора намагничивания от требуемого направления не должно превышать $\pm 1^\circ$.

Методика определения направления вектора намагничивания сводится к следующему.

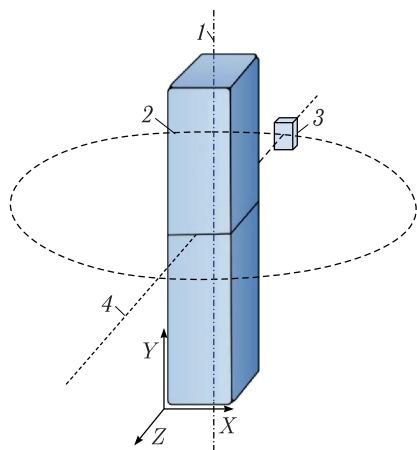


Рис. 6. Схема организации измерений: 1 — ось вращения; 2 — датчик; 3 — постоянный магнит; 4 — рабочая ось магнита (для вращения магнита на 180°)

иде (тем ближе, чем больше радиус R). Максимум этой кривой должен соответствовать углу, вдоль которого направлен вектор намагничивания ПМ.

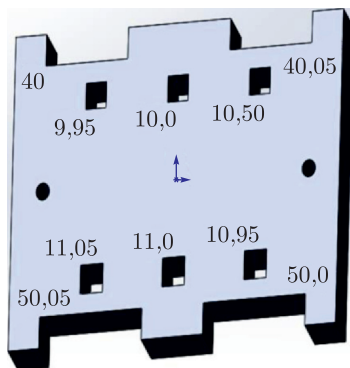


Рис. 5. Принципиальная модель измерительного калибра, используемого при входном контроле

Датчик поля располагается на расстоянии R от продольной (параллельной длинной стороне) оси магнита в центральной плоскости магнита (перпендикулярной этой оси), изображен на рис. 6. Датчик ориентирован так, что нормаль к поверхности его чувствительной зоны направлена радиально от оси магнита. Магнит вращается в процессе измерений вокруг своей продольной оси так, что в системе координат магнита датчик описывает окружность, сохраняя радиальную ориентацию нормали.

Результат измерений представляет собой кривую зависимости нормальной к поверхности чувствительной зоны датчика компоненты поля от угла поворота, близкую к синусо-

Далее для краткости принята следующая терминология. «Рабочей» гранью блока магнита называется грань, через которую магнитный поток выходит из магнита (тогда через противоположную грань магнитный поток входит в магнит, а через четыре оставшиеся грани поток практически отсутствует). «Рабочей» осью магнита называется ось, перпендикулярная его рабочей грани. «Нормальным» направлением намагничивания называется перпендикулярное к рабочей грани, т.е. параллельное рабочей оси. За «нулевой» угол принимается такое положение датчика относительно магнита, когда центр чувствительной зоны находится точно на рабочей оси магнита. Отклонение положения максимума измеренной кривой от нулевого угла и будет считаться отклонением вектора намагничивания от его нормального направления.

Точность определения угла отклонения вектора намагничивания от требуемого направления зависит от:

1) точности установки нормали чувствительной зоны датчика вдоль радиального направления от оси магнита;

2) точности выставления «нуля» углового положения датчика на рабочей оси магнита;

3) точности совпадения оси вращения магнита с продольной осью магнита;

4) точности определения углов поворота относительно нулевого угла;

5) процедуры обработки показаний датчика с целью получения гладкой зависимости и нахождения экстремальных значений;

6) выбора оптимального расстояния R (при больших R кривая ближе к синусоиде, но сигнал слабее, при малых R сигнал сильнее, но кривая более сложная и ее максимум сложнее интерпретировать);

7) учета внешнего поля (геомагнитного и других сторонних полей).

Можно показать, что компоненты поля в точке $(R, 0)$:

$$H_x = H_r \approx \frac{m}{2\pi R^3} \left(\cos \varphi + \frac{3}{4} \delta (3 \cos (2\varphi + \chi) + \cos \chi) \right), \quad (1)$$

$$H_y = H_\varphi \approx \frac{-m}{4\pi R^3} (\sin \varphi + 3\delta \sin (2\varphi + \chi)), \quad (2)$$

где m — удельный (на единицу длины) дипольный магнитный момент магнита; R — расстояние от оси вращения до чувствительной зоны датчика; $\varphi = \alpha + \beta + \psi$ — угол отклонения вектора намагничивания от направления на датчик; α — искомое отклонение вектора намагниченности в магните от нормали; β — неизвестное отклонение «технического нуля» (т.е. рабочей оси магнита в положении, когда датчик поворота показывает «0»; ψ — показания датчика угла поворота; $\delta = \Delta R/R$ — относительное отклонение оси магнита от оси вращения; χ — угол отклонения оси магнита от оси вращения относительно направления вектора намагниченности.

Показания датчика при этом равны

$$H_p = H_r \cos \gamma + H_\varphi \sin \gamma, \quad (3)$$

где γ — неизвестный угол отклонения направления нормали датчика от радиального направления.

Максимум измеряемой компоненты достигается при угле $\varphi = \alpha + \beta + \psi \approx -\gamma/2 - (9/2)\delta \sin \chi$, т.е. при показаниях угла поворота $\psi = -\alpha - \beta - \gamma/2 - (9/2)\delta \sin \chi$. Тогда углы β, γ, χ и несоосность δ изначально неизвестны и дают соответствующий вклад в ошибку определения α . В частности, для определения угла намагничивания α в магните с точностью $0,1^\circ$, углы β, γ также не должны превышать $0,1^\circ$, а несоосность ΔR (при $R = 30$ мм) должна быть не больше $0,01$ мм, что технически трудно осуществить.

С тем чтобы практически исключить влияние ошибок β, γ, χ и δ , процедура с вращением магнита повторяется два раза: один раз с магнитом в исходном положении и второй раз — с повернутым на 180° вокруг рабочей оси. Для каждой из двух измеренных зависимостей $H_1(\psi)$, $H_2(\psi)$ выделяются первые гармоники и находятся углы ψ_1 и ψ_2 , на которых они достигают максимума. Окончательно, угол α находится как их полуразность:

$$\alpha = (\psi_2 - \psi_1)/2. \quad (4)$$

При измерении магнит закреплен на валу шагового двигателя и вращается вокруг своей продольной оси, а датчик магнитного поля закреплен на заданном расстоянии от магнита. Схема организации измерения магнита приведена на рис. 6.

На едином основании закреплен шаговый двигатель и стойка с датчиком Холла. Для установки была изготовлена на 3D-принтере оснастка, обеспечивающая соосность шкива двигателя и магнита при его установке. Управление вращением двигателя и измерениями сигнала датчика с помощью АЦП осуществлялось разработанным программным обеспечением.

Угловое разрешение определяется количеством шагов двигателя за один оборот, в данном случае — 3200 шагов. Таким образом, угол поворота за один шаг равен $360^\circ/3200 = 0,1125^\circ$. На рис. 7 показана схема установки для проведения измерений.

Результаты измерений суммируются в табл. 3.

Таблица 3. Результаты измерений одного магнита

Поворот магнита, °	Показания датчика, В
0	3,37206
0,1125	3,37357
0,225	3,37388
0,3375	3,38265
...	...
360	3,37199

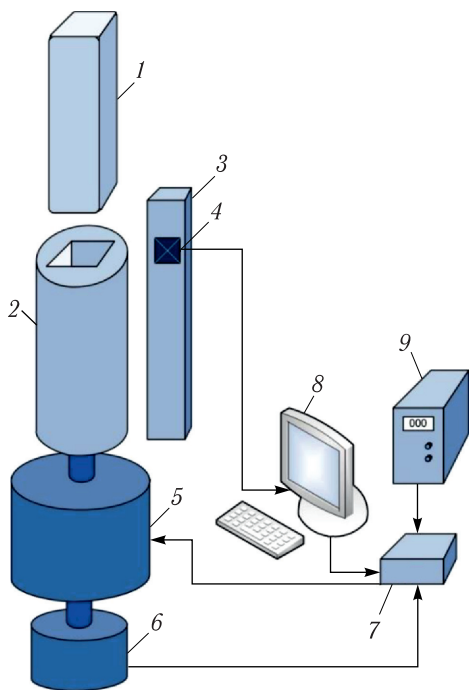


Рис. 7. Схема измерительной установки: 1 — постоянный магнит; 2 — оснастка для установки магнита; 3 — стойка для закрепления датчика Холла; 4 — датчик Холла; 5 — шаговый двигатель; 6 — абсолютный энкодер; 7 — драйвер шагового двигателя; 8 — компьютер с ЦАП-АЦП; 9 — блок питания

В графическом виде результаты измерений представляются зависимостями, характерный вид которых приведен на рис. 8.

Пробные повторные измерения на ряде магнитов продемонстрировали воспроизводимости определения угла α на уровне $\pm 0,01-0,02^\circ$.

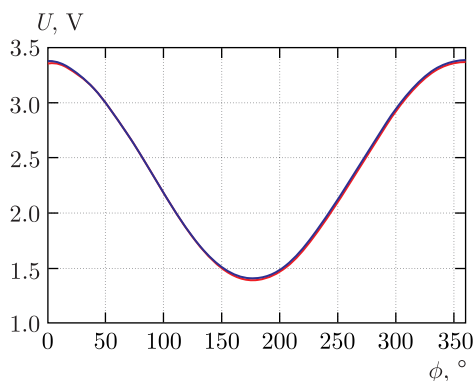


Рис. 8. Типичные зависимости показаний датчика от угла поворота вала двигателя. Два набора измерений, отвечающие исходному и 180° -му повороту магнита вокруг рабочей оси

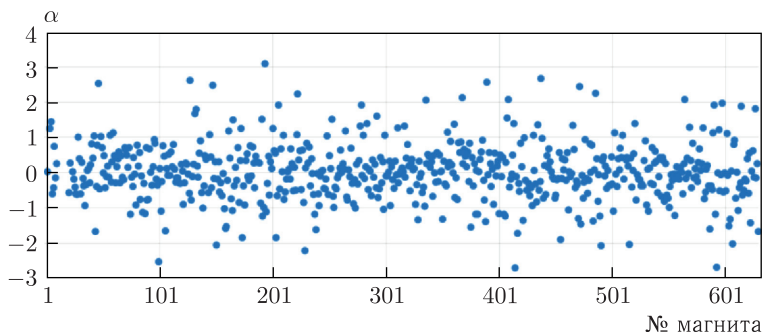


Рис. 9. Результаты входного контроля по определению отклонения вектора намагниченности от нормали. α — угол отклонения вектора намагниченности от нормали

Результаты измерений направлений намагниченности 580 магнитов, прошедших контроль геометрических параметров, представлены на рис. 9.

Большая часть магнитов имеет отклонение вектора намагниченности в пределах $\pm 1^\circ$ и удовлетворяет предъявляемым требованиям к магнитам. 105 магнитов (18 % от 580) имеют отклонение больше 1° , из них 20 магнитов (3 %) — больше 2° .

3.3. Контроль величины магнитной индукции. На начальном этапе методика определения остаточной индукции B_r и магнитной восприимчивости χ блоков ПМ базировалась на предположении об однородности их свойств во всем объеме блока магнита. Для дальнейшего развития методики использовались результаты численного 3D-моделирования распределения магнитного поля вокруг постоянного магнита в форме прямоугольного параллелепипеда $11 \times 11 \times 50$ мм с варьируемой от 0 до 0,1 величиной восприимчивости χ .

Задача формулировалась следующим образом. Для каждого блока ПМ из партии в количестве 630 шт (за исключением нескольких дефектных или поврежденных) определить остаточную индукцию B_r и магнитную восприимчивость χ . Затем путем выборки определить три набора ПМ по $26 \times 6 = 156$ шт. с наиболее близкими характеристиками для изготовления трех образцов РМҚ.

Блок ПМ намагничен компланарно одной из коротких сторон. Остаточная индукция при 20°C должна составлять 1,203 Тл ($\pm 1,5\%$ согласно техническому заданию), что требуется подтвердить путем магнитных измерений. Заказанный класс магнитов N35UH должен обеспечивать указанную B_r , коэрцитивную силу не меньше $H_{CB} = 25$ кЭ, а также сохранение линейной зависимости $B(H)$ (постоянство χ) — участка кривой размагничивания в диапазоне H от 0 до -15 кЭ.

Методика восстановления параметров постоянных магнитов основывалась на следующих предположениях:

1) блок ПМ имеет однородные свойства (постоянный по величине и направлению вектор остаточной индукции B_r и постоянную по величине магнитную восприимчивость) во всем объеме ПМ.

2) магнитная восприимчивость χ — изотропная характеристика, т.е. намагниченность в любой точке магнита определяется как $M = M_r + \chi H$.

Для разработки методики восстановления параметров блоков ПМ выполнено численное моделирование 3D-поля одиночного магнита заданных размеров с $B_r = 1,2$ Тл и двумя вариантами магнитной восприимчивости: $\chi = 0$ (идеальный ПМ без размагничивания) и $\chi = 0,1$ (типичное значение для ПМ Nd-Fe-B). Расчеты выполнены с использованием программного комплекса КОМПРОТ [11] на конечно-элементной 3D-модели с ~ 10 млн узлов. Оцениваемая погрешность определения поля — 10^{-4} (0,01 %).

На рис. 10 показано распределение поля магнита вдоль его оси симметрии X , параллельной вектору остаточной намагниченности магнита, при $\chi = 0$ и $\chi = 0,1$. Центр магнита расположен в точке $x = 0$, граница (поверхность) магнита: $x = 5,5$ мм. Пунктиром отмечены предполагаемые места расположения датчиков Холла, измеряющих поле магнита. Видно, что «реальный» ($\chi = 0,1$) магнит из-за размагничивания дает несколько меньшее поле (на 5–6 %), чем «идеальный» ($\chi = 0$).

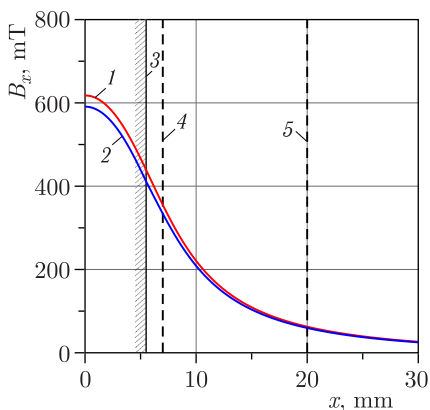


Рис. 10. Расчетное распределение поля B_x (мТл) вдоль рабочей оси магнита $11 \times 11 \times 50$ мм с $B_r = 1,2$ Тл. 1 — поле идеального постоянного магнита ($\chi = 0$); 2 — поле магнита с типичной восприимчивостью $\chi = 0,1$; 3 — граница постоянного магнита ($x = 5,5$ мм); 4 — ближнее расположение датчика поля ($x = 7$ мм); 5 — дальнее расположение датчика ($x = 20$ мм)

Однако отношение полей неодинаково на разных расстояниях. На рис. 11 показано отношение $B_x^{(\mu=1,1)} / B_x^{(\mu=1)}$ полей магнита с $\chi = 0,1$ и $\chi = 0$. Зависимость этого отношения от расстояния дает возможность сформировать методику восстановления B_r и χ по измерениям поля на двух расстояниях от магнита.

Из рис. 11 видно, что наибольшая разница отношений полей магнитов с разной величиной χ наблюдается вблизи поверхности магнита ($\approx 0,937$) и в пределе на большом удалении от него ($\approx 0,956$). Однако непосредственно на поверхности магнита, в силу конечности размеров датчика Холла, измерить поле не удастся, а на большом удалении поле магнита будет слишком слабым для датчика Холла. Поэтому исходя из возможности размещения

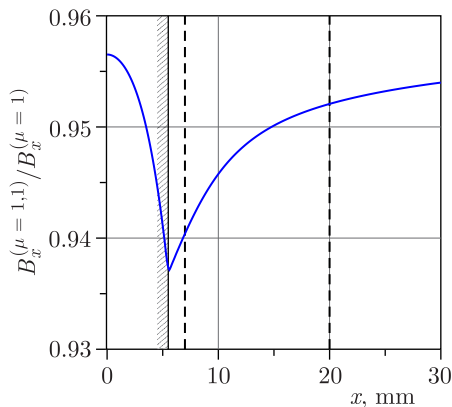


Рис. 11. Отношение $B_x^{(\mu=1,1)} / B_x^{(\mu=1)}$ полей типичного ($\varkappa = 0,1$) и идеального ($\varkappa = 0$) постоянных магнитов (при одинаковых B_r) на рабочей оси магнита

датчика вблизи магнита и уровня поля на удалении от него (см. рис. 10) выбраны положения: $x_1 = 7$ мм (поле около 350 мТл) и $x_2 = 20$ мм (около 60 мТл), для которых сохраняется относительно ощутимая разница отношений ($\approx 0,940$ и $\approx 0,952$ соответственно). Более точно расчетные значения поля на выбранных расстояниях приведены в табл. 4.

Таблица 4. Расчетные значения поля на рабочей оси на расстояниях 1,5 и 14,5 мм от поверхности магнита $11 \times 11 \times 50$ мм с $B_r = 1,2$ Тл

$\varkappa$	$x_1 = 7$ мм	$x_2 = 20$ мм
$\varkappa = 0$	355,1164 мТл	62,51503 мТл
$\varkappa = 0,1$	333,9485 мТл	59,51877 мТл

При выводе методики для аппроксимации экспериментальных данных принята следующая эмпирическая зависимость поля в заданной точке x_i от $\varkappa$:

$$B_i(\varkappa) = B_r \frac{a_i}{1 + b_i}. \quad (5)$$

Численные расчеты показывают, что она соблюдается с точностью 10^{-4} (0,01 %) в диапазоне $0 < \varkappa < 0,2$ в предположении изотропного распределения $\varkappa$.

Отсюда следует, что

$$\begin{aligned} \frac{a_1}{B_1} B_r - b_1 \varkappa &= 1, \quad \frac{a_2}{B_2} B_r - b_2 \varkappa = 1, \quad \Rightarrow \\ B_r &= \frac{b_1 - b_2}{D}, \quad \varkappa = \frac{c_1 - c_2}{D}, \quad D = c_2 b_1 - c_1 b_2, \quad c_1 = \frac{a_1}{B_1}, \quad c_2 = \frac{a_2}{B_2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Последняя строка, собственно, и представляет собой методику определения B_r и $\varkappa$ по измерениям поля магнита в двух разноудаленных от магнита точках.

Коэффициенты a_i , b_i находятся из соотношений

$$B_i^{(0)} = B_r a_i, \quad B_i^{(\varkappa)} = B_r \frac{a_i}{1 + b_i \varkappa} \Rightarrow a_i = \frac{B_i^{(0)}}{B_r}, \quad b_i = \frac{B_i^{(0)}/B_i^{(\varkappa)} - 1}{\varkappa}. \quad (7)$$

Значения a_i , b_i приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5. Коэффициенты для определения B_r и $\varkappa$ по измерениям поля магнита в точках $x_1 = 7$ мм и $x_2 = 20$ мм

i	a_i	b_i
1	0,2959303	0,6338672
2	0,05209586	0,5034143

Точность определения B_r по данной методике можно оценить как

$$\begin{aligned} \frac{\delta B_r}{B_r} &= \frac{1}{D} \sqrt{\left(\frac{b_2 a_1}{B_1^2} \delta B_1\right)^2 + \left(\frac{b_1 a_2}{B_2^2} \delta B_2\right)^2} = \\ &= \frac{1}{D} \sqrt{\left(\frac{b_2 a_1}{B_1}\right)^2 + \left(\frac{b_1 a_2}{B_2}\right)^2} \frac{\delta B_i}{B_i}, \quad (8) \end{aligned}$$

где δB_i — погрешность измерения поля B_i в точке x_i .

Для примера при $B_r = 1,2$ Тл и $\varkappa = 0,05$: $\delta B_i/B_i = 0,16 \cdot \delta B_r/B_r$. В частности, для определения B_r с погрешностью $\delta B_r/B_r = 0,1\%$ ($= 10^{-3}$) погрешность измерения поля должна быть $\delta B_i/B_i = 0,016\%$. В области 350 мТл эта погрешность составляет $\pm 0,05$ мТл, а в области 60 мТл — $\pm 0,01$ мТл.

Ошибка определения $\varkappa$:

$$\delta \varkappa = \frac{B_r a_1 a_2}{D B_1 B_2} \sqrt{\left(\frac{\delta B_1}{B_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta B_2}{B_2}\right)^2} = \frac{B_r a_1 a_2}{D B_1 B_2} \sqrt{2} \frac{\delta B_i}{B_i}. \quad (9)$$

Для случая $B_r = 1,2$ Тл и $\varkappa = 0,05$: $\delta B_i/B_i = 0,09 \cdot \delta \varkappa$, т.е. при ошибке измерения $\delta B_i/B_i = 0,016\%$ погрешность определения $\delta \varkappa = \pm 0,002$.

Проведем оценку влияния погрешности позиционирования датчика на рабочей оси магнита при измерении поля B_x . Эта погрешность может быть оценена как:

$$\delta B_x = \frac{\partial B_x}{\partial x} \delta x. \quad (10)$$

На рис.12 приведен график относительного изменения поля $(\partial B_x / \partial x) / B_x$ на оси симметрии магнита (оси X). Эта величина составляет $-15\%/мм$ в точке $x_1 = 7$ мм и $-10\%/мм$ в точке $x_2 = 20$ мм. Чтобы обеспечить точность измерения поля с погрешностью $\delta B_1/B_1 = 0,016\%$,

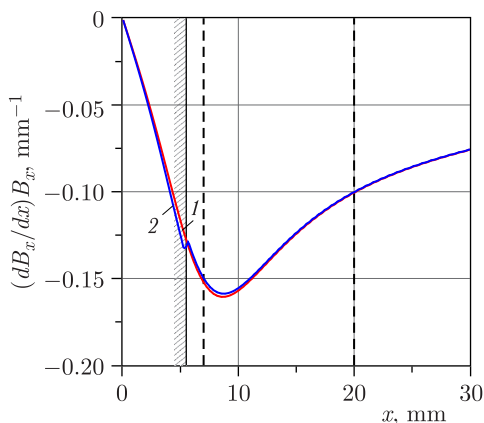


Рис. 12. Относительное изменение поля $(\partial B_x/\partial x)/B_x$ (1/мм) вдоль рабочей оси магнита $11 \times 11 \times 50$ мм с $B_r = 1,2$ Тл: 1 – $\alpha = 0$; 2 – $\alpha = 0,1$

погрешность установки датчика (чувствительной зоны) должна быть равна $\delta x = (\delta B_x/B_x)/((\delta B_x/\partial x)/B_x) = 0,016\%/(15\%/мм) = \pm 1$ мкм.

Такую точность установки датчика обеспечить технически сложно. Поэтому процедура проведения измерений была модифицирована следующим образом. Измерения проводятся с использованием оснастки, которая представляет собой немагнитный параллелепипед с четырьмя прецизионными (вырезанными на станке с ЧПУ) квадратными отверстиями 11×11 мм. Центры этих отверстий (относительно центра оснастки) располагаются в точках $x_1 = -20$ мм, $x_2 = -7$ мм, $x_3 = -x_2 = 7$ мм, $x_4 = -x_1 = 20$ мм. В центр оснастки помещается однокомпонентный датчик Холла, измеряющий поле в направлении X , что видно на рис. 13, 14.

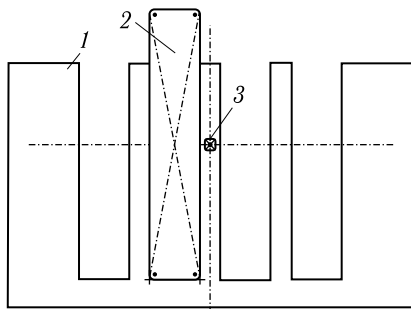


Рис. 13. Схема измерения для определения остаточной индукции. 1 – приспособление для измерения индукции магнита; 2 – постоянный магнит; 3 – датчик Холла

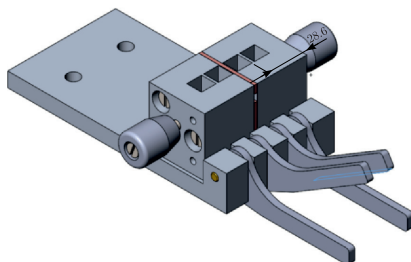


Рис. 14. Приспособление для установки магнита и измерения магнитной индукции в четырех фиксированных положениях

В процессе проведения измерений каждый магнит последовательно вставляется в каждое из четырех отверстий так, что его вектор намагничивания совпадает с положительным направлением оси X (условно — северным полюсом), и в каждом положении фиксируются показания датчика. Эти измерения нумеруются как положения № 1, 2, 3 и 4, и им соответствует положительное поле (B_1, B_2, B_3, B_4). Затем магнит вставляется южным полюсом, и измерения в каждом из 4 отверстий повторяются в том же порядке. Это измерения в положениях № 5, 6, 7 и 8, и им соответствует отрицательное поле (B_5, B_6, B_7, B_8).

Считая, что в пределах малого смещения $\pm \Delta x$ чувствительной зоны датчика поведение поля $B_x(x)$ линейно, можно существенно точнее определить поле в заданных координатах x_1 и x_2 относительно центра магнита:

$$\begin{aligned} B_x(x_2) &= (B_1 - B_8)/2, \\ B_x(x_1) &= (B_2 - B_7)/2, \\ B_x(-x_1) &= (B_3 - B_6)/2, \\ B_x(-x_2) &= (B_4 - B_5)/2. \end{aligned} \tag{11}$$

Следует заметить, что в идеальном случае (если магниты однородные и симметричные) поля по разные стороны от магнита должны быть одинаковыми: $B_x(x_1) = B_x(-x_1)$, $B_x(x_2) = B_x(-x_2)$, $B_5 = -B_1$, $B_6 = -B_2$, $B_7 = -B_3$, $B_8 = -B_4$.

Таким образом, описанная процедура измерения позволяет снизить требования на точность позиционирования датчика в направлении X (в направлении поля): $|\Delta x| < 0,5$ мм. Такая же точность позиционирования может быть принята по другим осям: $|\Delta y| < 0,5$ мм, $|\Delta z| < 0,5$ мм, так как поле на оси X (оси симметрии магнита) в этих направлениях имеет экстремум ($\partial B_x / \partial y = 0$, $\partial B_x / \partial z = 0$).

Полученные путем выполнения описанной процедуры значения B_x в точках $x_1 = 7$ мм и $x_2 = 20$ мм могут быть использованы для восстановления B_r и κ по описанной выше методике.

Схема проведения измерения магнитной индукции на фиксированных расстояниях от поверхности магнита приведена на рис. 13.

Измерение индукции производится датчиком Холла, предварительно откалиброванным с погрешностью не хуже $\pm 0,02$ мТл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной ранее НИР [4–6] сформирован технический облик квадрупольной линзы на постоянных магнитах. Сформулированы требования к блокам ПМ, которые представляют собой прямоугольные параллелепипеды, намагниченные коллинеарно одной из коротких сторон. С использованием трехмерных математических моделей разработаны методики контроля геометрических размеров ПМ, величины и направления вектора намагничивания, а также остаточной индукции и магнитной восприимчивости.

Исследовалась приобретенная партия магнитов в количестве 630 штук.

Разработанные методики являются составляющими процедуры входного контроля каждого базового блока ПМ и могут обеспечивать высокую степень индивидуализации контроля значительных по числу партий постоянных магнитов.

На практике приобретенные у поставщика постоянные магниты прошли входной контроль по перечисленным выше параметрам, что обеспечило выполнение соответствующей части ОКР, разработку технологии изготовления и сборки линзы, подготовку соответствующей конструкторской документации.

Разработка и создание крупных установок с использованием большого числа блоков постоянных магнитов требует значительных трудовых затрат. Предложенный подход позволяет в будущем эффективно применить систему искусственного интеллекта на всех этапах входного контроля и существенно повысить производительность труда и надежность анализа данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mitrofanov S. et al.* The DC130 Project: New Multipurpose Applied Science Facility for FLNR // 14th Int. Conf. on Heavy Ion Accelerator Technology HIAT2018, Lanzhou, China, 2018.
2. *Mitrofanov S. et al.* Conceptual Design of FLNR JINR Radiation Facility Based on DC130 Cyclotron / G. Gulbekyan, P. Apel, V. Bekhterev // Proc. of 61st Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams, Daejeon, Korea, 2018.
3. *Капчинский И. М., Скачков В. С., Артемов В. С.* Опыт использования неявно-полюсных квадрупольных линз с постоянными магнитами на линейном ускорителе И-2 // Труды IX Всес. совещ. по ускор. заряж. частиц. 1984. Т. 2. С. 57–60.
4. *Amoskov V. M., Vasiliev V. N., Gaponok E. I., Gulbekyan G. G., Edamenko N. S., Ivanenko I. A., Kazarinov N. Y., Kalagin I. V., Kaparkova M. V., Kukhtin V. P., Lamzin E. A., Makarov A. A., Nezhentzev A. N., Ovsyannikov D. A., Ovsyannikov D. A., Jr., Osipov N. F., Rodin I. Yu., Sytchevsky S. E., Firsov A. A.* Modelling and Design of Permanent Magnet Multipoles for Beam Transport and Focusing. I. Selection of Optimal Design and Parameters // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2021. Т. 17, вып. 4. С. 313–329; <https://doi.org/10.21638/11701/spbu.10.2021.401>.
5. *Амосков В. М., Васильев В. Н., Гапионов Е. И., Гульбекян Г. Г., Едаменко Н. С., Иваненко И. А., Казаринов Н. Ю., Калагин И. В., Капаркова М. В., Кухтин В. П., Ламзин Е. А., Макаров А. А., Неженцев А. Н., Овсянников Д. А., Овсянников Д. А. (мл.), Осипов Н. Ф., Родин И. Ю., Сычевский С. Е., Фирсов А. А., Шатиль Н. А.* Особенности разработки мультиполюсных элементов на основе постоянных магнитов для систем транспортировки заряженных частиц. Уточненная методика выбора конфигурации линзы // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2022. Т. 18, вып. 4. С. 454–472; <https://doi.org/10.21638/11701/spbu.10.2022.402>.

6. Kukhtin V., Firsov A., Kaparkova M., Lamzin E., Larionov M., Makarov A., Nezhentzev A., Rodin I., Shatil N., Gulbekyan G., Ivanenko I., Kazarinov N., Kalagin I., Osipov N., Edamenko N., Ovsyannikov D., Sytchevsky S. Simulation and Design of the Permanent Magnet Multipole for DC140 Cyclotron // 27th Russian Particle Accelerator Conference. 2021. P.99–101; doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRA03.
7. Штеффен К. Оптика пучков высокой энергии. М.: Мир, 1969. 223 с.
8. Соколов А. А., Тернов И. М. Синхротронное излучение. М.: Наука, 1966. 228 с.
9. Фетисов Г. В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 672 с.
10. Arslanova D., Gavrish Yu., Gaponok E., Grosheva A., Knyazev N., Kukhtin V., Eugeny L., Nezhentzev A., Ovsyannikov A., Ovsyannikov D., Sytchevsky S., Znamenshchikova N. Feasibility Study of Permanent Magnet Dipoles for SILA Facility // Cybernetics and Physics. 2023. V.12, No.4. P.252–256; <http://lib.physcon.ru/file?id=e88b2fd8a0f1>.
11. Doinikov N. I., Lamzin E. A., Sytchevsky S. E. On Computation of 3-D Magnetostatic Fields of Electrophysical Apparatus Magnet Systems // IEEE Trans. Magn. 1992. V. 28, No. 1. P. 908–911; <http://ieeexplore.ieee.org/document/120025/>.

Получено 28 февраля 2025 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 21.03.2025.

Формат $60 \times 90/16$. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,59. Тираж 120 экз. Заказ № 61066.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/