

СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ЛИНЗ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА ГРУППИРОВКИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ МАГНИТОВ ИЗ ВЫБОРКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ИЗМЕРЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ

*В. М. Амосков^a, Т. В. Глущенкова^a, Г. Г. Гульбекян^b,
Н. С. Знаменицкова^a, И. А. Иваненко^{b,1}, В. Д. Казанцев^a,
Н. Ю. Казаринов^b, И. В. Калагин^b, М. В. Капаркова^a, Н. А. Крылова^a,
В. П. Кухтин^a, Е. А. Ламзин^a, А. А. Макаров^a, Д. Д. Мельников^a,
А. Н. Неженцев^a, Д. А. Овсянников^b, Н. Ф. Осипов^b, М. В. Семёнова^c,
С. Е. Сычевский^a, Н. А. Шатиль^a*

^a АО «НИИЭФА» им. Д. В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия

^b Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

^c Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

^c ООО «ВАЛТАР МАГНИТ», Королев, Россия

Произведена разработка и изготовление квадрупольной линзы (КЛ) для системы вывода пучка циклотрона ДЦ-140. В результате работы создана конструкция КЛ из однотипных блоков постоянных магнитов (ПМ) в виде прямоугольных параллелепипедов. Проведен входной контроль партии ПМ; на основе полученных результатов уточнена конфигурация и расположение магнитов. Предложен алгоритм, включающий этапы выборки, группировки и сортировки ПМ, реализованный в виде программного кода. Подход применим к различным магнитным системам, состоящим из однотипных блоков ПМ, причем число типов блоков не является ограничением для предложенного алгоритма.

The study is focused on the optimized design and fabrication of a PM-based quadrupole for beam transportation and focusing in the DC-140 cyclotron. It has a modular configuration with a set of geometrically similar PM bricks in every module. Prior to the assembly, geometrical and magnetic parameters were measured over the whole set of PMs. The measured data were used to adjust positions and orientations of PM bricks. A generalized procedure is proposed in a form of a program module to retrieve, sort out, and group specifications of individual PMs from the measurement database. This procedure can be applied to compare and select parameters for various magnets based on PM assemblies without limitation on the PM nomenclature.

PACS: 06.20.Dk; 07.55.Db; 29.20.Hm

¹E-mail: ivan@jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

В ряде магнитных систем при создании поля целесообразно отказаться от катушек с токами в пользу постоянных магнитов (ПМ) [1, 2] и магнитомягких материалов.

В системе вывода циклотрона ДЦ-140 Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований [3, 4] в области низкого уровня поля рассеяния циклотрона предполагается использование квадрупольной линзы на постоянных магнитах (PMQ).

Численные исследования позволили осуществить выбор конфигурации линзы на постоянных магнитах квадратного сечения [5–7] (рис. 1, 2), обеспечивающей необходимые параметры и характеристики поля в канале вывода [3–8]. Максимальное отклонение поля в рабочей области от требуемого значения не превышает 1%, среднее отклонение — 0,1–0,2 %.

В АО «НИИЭФА» разработана конструкция квадрупольной линзы (PMQ) [7]. При создании подобных магнитных систем удобно использовать одинаковые блоки

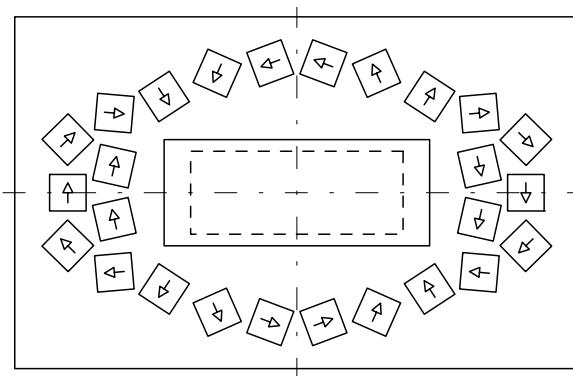


Рис. 1. Сечение квадруполя из постоянных магнитов для оптимальной конфигурации PMQ. Стрелками показаны направления вектора намагничивания. Штриховой линией обозначена рабочая область 64×25 мм. Сплошные линии: апертура 80×32 мм и внешние габариты 170×106 мм

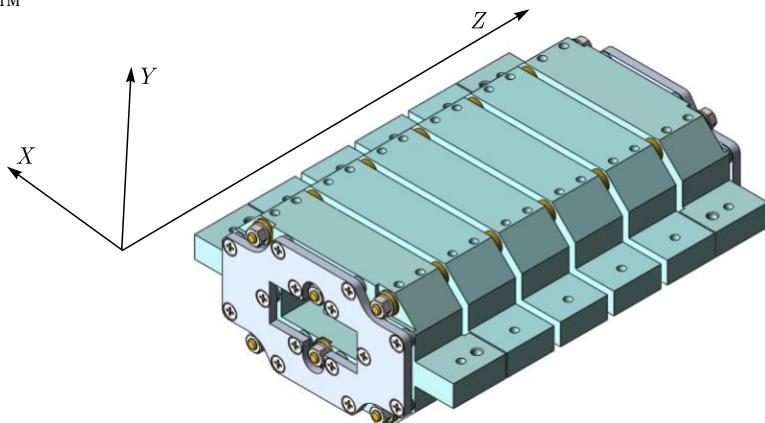


Рис. 2. Внешний вид PMQ (фотоrealистическое изображение) и принятая система координат

ПМ простейшей формы в виде прямоугольных параллелепипедов или цилиндров. По результатам проведенного численного моделирования [5, 6, 8] сформулированы требования к магнитной системе РМQ и ее компонентам [7]. Анализ показывает, что решение задачи обеспечения достаточно высокой точности формирования градиента магнитного поля в рабочей области линзы требует учета реальных геометрических и магнитных характеристик ПМ.

Первоначально вычислительная модель [5, 6] базировалась на идеализированном описании (см., например, [9, 10]), которое подразумевало идентичность блоков ПМ. Однако в силу существующей технологии производства высококоэрцитивных магнитов воспроизводимость их магнитных параметров лежит в диапазоне $\pm 1,5\%$. Это обстоятельство, с одной стороны, ограничивает точность формирования поля в открытых магнитных системах, а с другой стороны, повышает стоимость их разработки и изготовления за счет необходимости увеличения объема выборки (партии) ПМ.

Для изготовления РМQ была приобретена партия из 630 магнитов прямоугольной формы $11 \times 11 \times 50$ мм, что позволяет собрать три описанных в [7] образца.

Предварительно в ООО «ВАЛТАР» (поставщик ПМ) было принято решение просканировать все магниты по длинной стороне с использованием трехмерного датчика магнитного поля.

В результате проведенных измерений было отбраковано 7 магнитов ($1,09\%$ от общего количества), которые сильно отличались как по геометрическим параметрам, так и по реперным значениям амплитуды и интеграла поля. Проведенные измерения показали, что, вопреки распространенному «мнению» о повторяемости магнитных параметров ПМ, для критически важных приложений необходимо осуществлять входной контроль каждого магнита.

КОРРЕКТИРОВКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ ПМ

Результаты входного контроля ПМ, проведенного в АО «НИИЭФА», показали большую, чем предполагалось, неоднородность магнитных свойств в объеме магнита, а также отсутствие симметрии собственного поля магнита. В частности, поле магнита со стороны северного и южного полюсов может отличаться больше, чем на 1% , на расстояниях, сравнимых с размерами рабочей области линзы.

Результаты обработки измерений поля магнитов представлены на рис. 3. Каждый магнит представлен точкой на плоскости $B_n - B_s$. Здесь B_n и B_s — нормальные составляющие поля вдоль нормали к поверхности магнита на расстоянии 20 мм от его центра (или 14,5 мм от поверхности), соответственно, со стороны северного и южного полюсов магнита. Магниты с симметричным полем располагаются на диагональной линии $B_n = B_s$. Ниже диагонали расположены магниты с преобладающим B_n , выше — с преобладающим B_s .

Представленные данные на рис. 3 относятся к 519 подлежащим выборке магнитам из 630, поставленных в АО «НИИЭФА». Остальные магниты были исключены из рассмотрения по результатам входного контроля их параметров [7], значения которых выходили за допустимые пределы.

Из этих 519 магнитов необходимо было выбрать 312 магнитов для сборки двух линз: основной и контрольной. Выбор осуществлялся таким образом, чтобы умень-

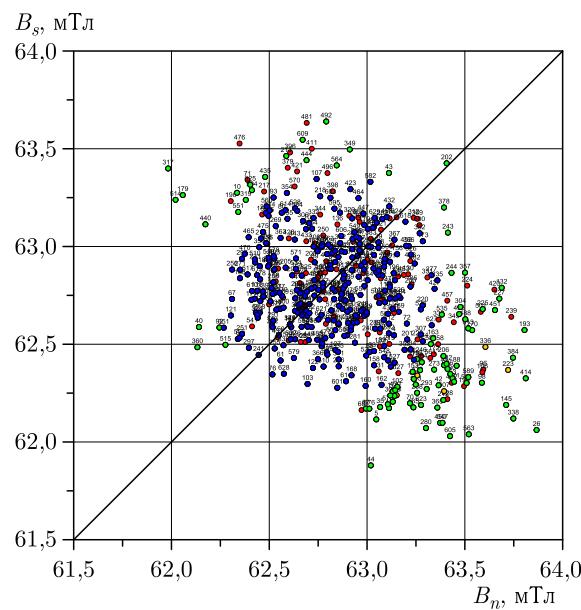


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Измеренные значения нормальной составляющей поля на рабочей оси магнитов на расстоянии 20 мм от центра магнита (14,5 мм от поверхности). B_n — поле со стороны северного полюса магнита, B_s — поле со стороны южного полюса магнита. Диагональной линии отвечает симметричное поле: $B_n = B_s$. Цифры над кружками соответствуют номерам магнитов, промаркированных поставщиком. Красные кружки — магниты, отбракованные по результатам измерений размеров; желтые кружки — магниты, отбракованные по результатам измерений направления вектора намагниченности; зеленые кружки — магниты, отбракованные по результатам измерений величины магнитного поля; синие кружки — оставшиеся 312 магнитов для сборки двух линз

шить влияние разброса свойств выбранных магнитов на качество поля квадрупольной линзы. В качестве критериев использовались среднеквадратическое отклонение поля магнита на заданном расстоянии (по обе стороны от магнита) и максимальное отклонение поля от среднего.

Магниты, подготовленные к выборке, характеризуются следующими статистическими оценками их параметров: объем выборки (количество магнитов) — 519 шт.; среднее поле на расстоянии 20 мм — $\bar{B} = (\bar{B}_n + \bar{B}_s)/2 = 62,829$ мТл; средняя несимметрия поля — $\Delta\bar{B}_n = (\bar{B}_n - \bar{B}_s)/2 = 0,072$ мТл (0,11%); максимальное отклонение поля с северной или южной стороны от среднего — $|\Delta B|_{\max} = 1,037$ мТл (1,65%); среднеквадратичное отклонение поля с северной или южной стороны от среднего — $\sigma_B = 0,333$ мТл (0,53 %).

ПРОЦЕДУРА ВЫБОРКИ МАГНИТОВ

Процедура выборки магнитов включала три этапа. На первом этапе из партии были исключены магниты, которые по результатам входного контроля размеров не проходили в отверстие со стороной (11 + 0,03) мм измерительного калибра (на рис. 3, красный цвет, 114 шт.).

На втором этапе из партии были исключены магниты, которые по результатам входного контроля имели отклонение направления вектора намагниченности от нормали больше 2° (рис. 3, желтый цвет, 5 шт.).

На третьем этапе из партии последовательно исключались магниты с максимальным отклонением поля от текущего среднего вплоть до требуемого объема выборки магнитов в 312 шт. На рис. 3 исключенные магниты выделены зеленым цветом, оставшиеся — синим цветом.

Интегральная несимметрия поля отобранных магнитов уменьшилась в 6 раз — с 0,12 до 0,019 %. Однако разброс характеристик магнитов все еще остается значимым: 0,38 % в среднем и до 0,89 % в максимуме. Дальнейшего улучшения разброса этих характеристик можно ожидать за счет должной группировки отдельных магнитов с учетом конструктивного исполнения линзы.

ГРУППИРОВКА МАГНИТОВ

Процедура группировки использует в качестве критерия качества поля отклонение интеграла поля в продольном направлении линзы от требуемого значения в каждой точке (x, y) сечения в рабочей области ее апертуры:

$$\int_{z_1}^{Z_2} B_x dz - D_0 y L_{\text{eff}\ 0} \quad \text{или} \quad \int_{z_1}^{Z_2} B_y dz - G_0 x L_{\text{eff}\ 0}. \quad (1)$$

Линза состоит из шести одинаковых секций, пристыкованных друг к другу в продольном направлении, с одинаковым расположением в каждой из секций 26 ПМ. Необходимо из партии магнитов выделить группы по 6 шт. (каждая группа соответствует своему положению в сечении линзы) так, чтобы средние магнитные свойства каждой группы по возможности были одинаковы.

Процедура группировки магнитов состояла из трех этапов.

На первом этапе магниты были сгруппированы по парам. Вначале из числа несгруппированных магнитов выбирался магнит с наибольшими отклонениями B_n и B_s от средних значений \bar{B}_n и \bar{B}_s . Для него из оставшихся магнитов подбирался такой, который в паре с предыдущим при усреднении давал B_n и B_s , максимально близкие к \bar{B}_n и \bar{B}_s . Процедура повторялась, пока все 312 магнитов не были сгруппированы по 156 парам.

На втором этапе пары группировались в четверки. Вначале из числа несгруппированных пар выбиралась пара с наибольшими отклонениями B_n и B_s от средних \bar{B}_n и \bar{B}_s . Для нее из оставшихся пар подбиралась такая, которая при усреднении давала B_n и B_s , максимально близкие к \bar{B}_n и \bar{B}_s . Процедура повторялась, пока количество сгруппированных четверок не сравнялось с числом оставшихся пар (соответственно, 52 и 52, чтобы на следующем этапе из них сформировать шестерки).

На третьем этапе окончательно формировались шестерки магнитов. Из числа несгруппированных пар выбиралась пара с наибольшими отклонениями B_n и B_s от общих средних \bar{B}_n и \bar{B}_s . Для нее из оставшихся четверок подбиралась такая, которая при усреднении (по шести магнитам) давала B_n и B_s , максимально близкие к \bar{B}_n и \bar{B}_s . Процедура повторялась, пока все магниты не были сгруппированы.

Таблица 1. Статистика по магнитам на разных этапах выборки и группировки

Этап	N	\bar{B} , мТл	$\Delta\bar{B}_n$, мТл	σ_B , мТл	$ \Delta B _{\max}$, мТл
Исходный	519×1	62,829	0,072 (0,11 %)	0,333 (0,53 %)	1,037 (1,65 %)
Выборка					
этап 1	405×1	62,814	0,078 (0,12 %)	0,337 (0,54 %)	1,053 (1,68 %)
этап 2	400×1	62,813	0,072 (0,12 %)	0,333 (0,53 %)	1,053 (1,68 %)
этап 3	312×1	62,799	0,012 (0,019 %)	0,241 (0,38 %)	0,560 (0,89 %)
Группировка					
этап 1	156×2	62,799	0,012 (0,019 %)	0,026 (0,041 %)	0,074 (0,12 %)
этап 2	52×4	62,799	0,013 (0,021 %)	0,014 (0,022 %)	0,024 (0,038 %)
этап 3	52×6	62,799	0,012 (0,019 %)	0,012 (0,019 %)	0,018 (0,029 %)

В табл. 1 сведены результаты последовательного выполнения всех этапов выборки и группировки магнитов для основного и контрольного экземпляров линзы.

Описанный выше алгоритм выборки, группировки и сортировки магнитов реализован в виде программного кода, на основе которого были получены представленные результаты. В качестве входных данных использовались результаты измерений входного контроля параметров ПМ.

Аналогично, по той же методике, с использованием того же программного кода, была проведена выборка, группировка и сортировка оставшихся магнитов для сборки технологического образца линзы.

Таким образом, можно утверждать, что оценка требуемого объема партии ПМ была проведена верно. В результате выборки 312 магнитов и их группировки по 6 магнитов средняя несимметрия поля и среднеквадратичное отклонение поля снижены с 0,12 до 0,019 % и с 0,53 до 0,019 % соответственно, а максимальное — до 0,029 %, более чем на порядок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен алгоритм выборки, группировки и сортировки постоянных магнитов, реализованный в виде программного кода, использующего в качестве входных данных результаты измерений входного контроля параметров постоянных магнитов.

Описанный подход носит достаточно общий характер, он применим к различным магнитным системам, использующим однотипные блоки постоянных магнитов, причем число типов блоков не является ограничением.

Данный подход был применим при разработке конструкции прецизионной квадрупольной линзы на постоянных магнитах, предназначеннной для компенсации горизонтальной дефокусировки пучков заряженных частиц в системе вывода циклотрона ДЦ-140.

В результате выборки магнитов и их группировки в 52 блока по 6 шт. в каждом были получены следующие результаты:

- максимальное отклонение поля от среднего значения поля магнитов уменьшилось с 1,65 до 0,029 % ($|\Delta B|_{\max} = 0,018$ мТл) — в 60 раз по сравнению с отдельными магнитами из партии в 519 шт.;

- среднеквадратичное отклонение поля уменьшилось с 0,53 до 0,019 % ($\sigma_B = 0,012$ мТл) — в 30 раз по сравнению с отдельными магнитами.

При этом определяющим фактором уменьшения этих отклонений является группировка магнитов по блокам (см. табл. 1).

Выполненное численное 3D-моделирование поля квадрупольной линзы, включающее описание каждого блока постоянных магнитов, соответствующее полученным выше результатам, подтверждает выполнимость требований к качеству поля линзы при условии выполнения допусков на изготовление элементов ее конструкции и сборку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капчинский И. М., Скачков В. С., Артемов В. С. и др. Опыт использования неявнополюсных квадрупольных линз с постоянными магнитами на линейном ускорителе И-2 // Тр. IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, Дубна, 16–18 октября 1984 г. Т. 2. 1984. С. 57–60.
2. Капчинский И. М., Лазарев Н. В. О возможности использования постоянных магнитов в жесткофокусирующих каналах ионных магнитных ускорителей. Препринт ИТЭФ № 75. М., 1975. 17 с.
3. Mitrofanov S. et al. The DC130 Project: New Multipurpose Applied Science Facility for FLNR // 14th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology (HIAT2018), Lanzhou, China, 2018.
4. Gulbekyan G. et al. Conceptual Design of FLNR JINR Radiation Facility Based on DC130 Cyclotron // Proc. 61 Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams, Daejeon, Korea, 2018.
5. Амосков В. М., Васильев В. Н., Гапионок 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. Особенности разработки мультипольных элементов на основе постоянных магнитов для систем транспортировки заряженных частиц. 1. Методика предварительного выбора параметров и конфигурации магнитов // Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. Прикл. математика. Информатика. Процессы управления. 2021. Т. 17, вып. 4. С. 313–329; <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2021.401>.
6. Амосков В. М., Васильев В. Н., Гапионок 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 мультипольных элементов на основе постоянных магнитов для систем транспортировки заряженных частиц. Уточненная методика выбора конфигурации линзы // Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. Прикл. математика. Информатика. Процессы управления. 2022. Т. 18, вып. 4. С. 454–472; <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2022.402>.
7. Амосков В. М., Глушенкова Т. В., Гульбекян Г. Г., Знаменщикова Н. С., Иваненко И. А., Казанцев В. Д., Казаринов Н. Ю., Калагин И. В., Капаркова М. В., Крылова Н. А., Кухтин В. П., Ламзин Е. А., Ларионов М. С., Макаров А. А., Неженцев А. Н., Овсянников Д. А., Овсянников Д. А. мл., Осипов Н. Ф., Семенова М. В., Сычевский С. Е., Фирсов А. А., Шатиль Н. А. Контроль параметров блоков постоянных магнитов для создания прецизионных элементов систем транспортировки заряженных частиц // XV Международный семинар по проблематике ускорителей заряженных частиц, посвященный памяти проф. В. П. Саранцева, Алушта, 2024; Письма в ЭЧАЯ. 2025. Т. 22, № 4(261).
8. 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 (RuPAC 2021). 2021. P. 99–101.
9. Том Р., Тарр Дж. Магнитные системы МГД-генераторов и термоядерных установок. Основы расчета полей и сил. М.: Энергоатомиздат, 1985. 272 с.
10. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948.

Получено 28 октября 2024 г.