

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КВАДРУПОЛЬНАЯ ЛИНЗА ДЛЯ DTL ЛИНАКА

© 2024 г. Е. И. Антохин<sup>а</sup>, \*, Т. Р. Дербышева<sup>а</sup>, \*\*,  
В. С. Елисеев<sup>а</sup>, Д. А. Хлыстов<sup>а</sup>, И. В. Кильметова<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090 Россия

<sup>б</sup>Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова  
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

\*E-mail: antokhin@mail.ru

\*\*E-mail: derbysheva.t@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.06.2023 г.

После доработки 02.08.2023 г.

Принята к публикации 14.08.2023 г.

Рассмотрена возможность использования для линейного ускорителя гибридной квадрупольной линзы на постоянных магнитах с корректирующей катушкой. Разработана конструкция линзы и проведена ее оптимизация для получения достаточного по величине градиента магнитного поля в апертуре. В специализированном программном комплексе осуществлены расчеты для выявления соответствия характеристик линзы предъявляемым требованиям. Проведено исследование влияния разброса намагниченности постоянных магнитов на качество поля.

**Ключевые слова:** гибридный квадруполь, DTL линак, постоянные магниты

**DOI:** 10.56304/S207956292303003X

ВВЕДЕНИЕ

Проект DARIA (источник нейтронов, предназначенный для прикладных исследований и промышленного применения) направлен на разработку компактных генераторов нейтронов для университетов, научных центров и промышленности [1–4]. В рамках проекта разрабатывается линейный протонный ускоритель, для которого необходима линза, соответствующая параметрам, указанным во втором столбце табл. 1. Важно обратить внимание, что требуется получить высокий градиент маг-

нитного поля, составляющий 49 Т/м с возможностью регулировки до 30%, а геометрическая длина линзы не должна превышать 130 мм.

Необходимость соблюдения ограничений по размерам накладывает особые условия на выбор типа линзы и материалов для нее. В данном случае могут быть использованы квадруполь на постоянных магнитах или электромагнитный квадруполь. Для электромагнитного квадруполя возможна регулировка градиента поля, а также доступно серийное изготовление. Но такой тип магнита нуж-

**Таблица 1.** Сравнение параметров проектируемой линзы и требований спецификации

Параметр	Спецификация	Проект
Магнитная апертура	47 мм	47 мм
Интеграл градиента магнитного поля	6.3 Тл – 30%	6.2 Тл – 30%
Градиент магнитного поля MAX/MIN	49 Тл/м – 30% планируемый	46 Тл/м – 30%
Максимальная длина линзы	130 мм	130 мм (эффективная длина 134 мм)
Нелинейность поля для 75% апертуры	≤0.7	0.3
Профиль полюса	Гипербола	Гипербола
Габариты линзы	450 × 450 × 130, мм	340 × 340 × 130, мм
Тип постоянного магнита	SmCo, Br = 1.1 Тл.	SmCo, Br = 1.1 Тл.

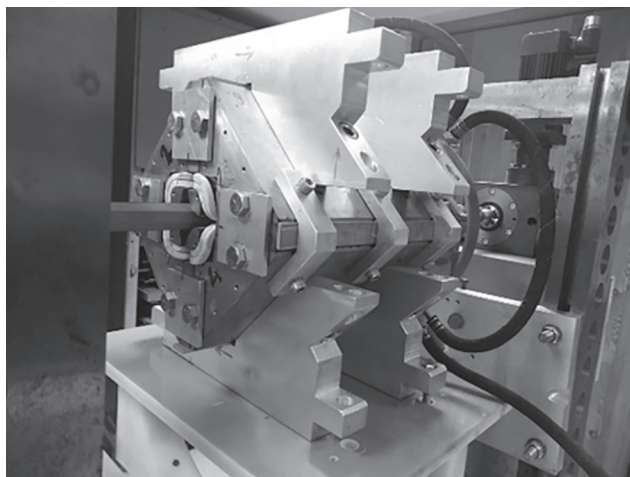


Рис. 1. Прототип гибридной линзы.

дается в источнике питания. И для достижения требуемых характеристик поля в большой апертуре электромагнитный квадруполь будет иметь большой размер и потребляемую мощность, что в условиях ограниченного по спецификации пространства вызовет трудности. Линза на постоянных магнитах компактна и для ее работы нет необходимости в источнике питания. Недостатками такого квадруполя являются отсутствие удобного способа перестраивать поле и температурная неустойчивость [5, 6].

В работе предложен вариант линзы, который сочетает в себе преимущества использования электрических обмоток и постоянных магнитов. Похожая линза также рассмотрена в работе [7]. В предложенной конструкции постоянные магниты используются для создания основного магнитного потока и создают 80% величины требуемого поля. На полюсах магнита размещены обмотки для создания дополнительных 20% величины магнитного поля и его возможного изменения.

В работе будет приведено описание конструкции линзы, ее характеристики и анализ соответствия требованиям спецификации. С помощью расчетов, проведенных в вычислительном программном комплексе, проверено, что в заданных граничных условиях работы линзы в составе линейного ускорителя достигаются требуемые параметры — интеграл градиента поля и однородность градиента.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИБРИДНОГО КВАДРУПОЛЯ

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН разработан и создан прототип гибридной квадрупольной линзы. Магнитная апертура прототипа равна 36 мм, длина линзы — 240 мм. Размеры прототипа превышают размеры, указан-

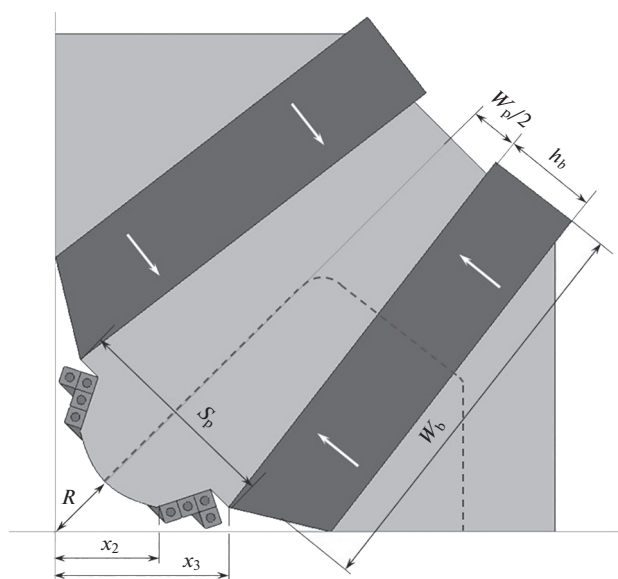


Рис. 2. Схематическое изображение линзы и контур интегрирования.

ные в спецификации. При этом градиент магнитного поля линзы составляет 65 Тл/м, что делает ее неподходящей под требования для проекта DTL линака, но подтверждает опыт ИЯФ в проектировании и производстве гибридных квадруполей. Фотография прототипа представлена на рис. 1.

Для проекта DTL линака предлагается проект линзы с постоянными магнитами из радиационно- и термически стойкого SmCo материала. Для обеспечения нужного диапазона регулировки градиента нужно обеспечить полный ток катушки 2400 А-витков. Для катушки используется шинка 6 мм × 6 мм с общей площадью сечения 144 мм<sup>2</sup>.

Для оптимизации распределения силовых линий поля и увеличения концентрации поля в области полюса необходима минимизация потоков, проходящих через катушку, и потоков рассеяния, описанных уравнениями (1) и (2).

Магнитная цепь гибридного квадруполя описывается уравнением:

$$\frac{1}{\mu_0} \int_0^R B_r dl + \frac{1}{\mu_{\text{core}}} \int B_{st} dl + \frac{1}{\mu_0} \int_{pm} B_{pm} dl = NI + Mh_b, \quad (1)$$

где  $B_r$  — поле в апертуре,  $B_{st}$  — поле в стали,  $B_{pm}$  — поле в постоянном магните,  $M$  — намагниченность постоянного магнита,  $NI$  — количество ампер-витков корректирующей катушки. Контур интегрирования показан на рис. 2 пунктирной линией.

Пренебрегая падением магнитного потенциала в стали, получаем выражение:

$$\frac{GR^2}{2} = \mu_0 NI + H_M h_b, \quad (2)$$

где  $H_M$  — это напряженность поля внутри постоянного магнита.

Одновременно с уравнениями (1) и (2) для напряженности поля должно быть выполнено условие сохранения магнитного потока от блока постоянных магнитов.

$$B_b w_b = \int_{x_2}^{x_3} B_0 dx + \int_0^{x_2} G x dx + \int_0^{w_p/2} B_{w_p} dx. \quad (3)$$

Уравнение (3) описывает баланс магнитного потока, генерируемого блоком постоянного магнита. Здесь  $B_b w_b$  — поток через поверхность  $w_b$ .

Поверхности для сохранения магнитного потока также показаны на рис. 2.

Для компенсации потоков рассеяния от внешних сторон блоков постоянных магнитов плитки приближены друг к другу на размере  $w_p/2$ . При этом ширина полюса  $S_p$  на рис. 2 должна быть оптимизирована исходя из двух противоположных факторов:

1) минимизации ширины  $x_3 - x_2$  для уменьшения потока рассеяния через нее, но при условии обеспечения достаточного пространства под корректирующую катушку

2) выбор достаточной ширины полюса  $S_p$ , при которой не происходит насыщения стали.

Минимизация потоков рассеяния приводит к дизайну магнитного квадрупольного линзы, показанному на рис. 3.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИНЗЫ

Моделирование линзы производилось в специализированном программном комплексе методом конечных элементов. Результаты приведены на рис. 4–8. На рис. 4 показано распределение модуля вектора индукции магнитного поля в сечении линзы. Силовые линии поля в контуре линзы показаны на рис. 5. Наибольшая концентрация силовых линий и, соответственно, наибольшая величина поля, наблюдается в области полюса.

В табл. 1 приведено сравнение требований к линзе, указанных в спецификации, и параметров проектируемой линзы, подтвержденных результатами моделирования линзы. Из таблицы видно, что соблюдаются основные требования, в том числе к геометрической длине квадрупольного линзы и получаемому градиенту магнитного поля.

Было исследовано влияние разброса намагниченности постоянных магнитов на коэффициенты ряда Фурье, описывающие поле квадрупольного линзы. Производилось разложение компоненты  $B_y(r)$  в ряд Фурье на радиусе 85% апертуры в 128 точках.

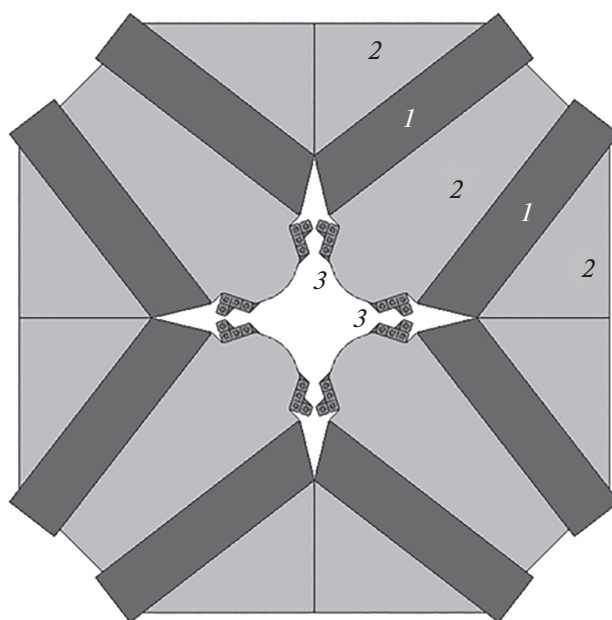


Рис. 3. Дизайн гибридного квадрупольного линзы: 1 — постоянные магниты, 2 — сталь Ст-10, 3 — электрообмотка.

Рассмотрено несколько крайних случаев, при которых намагниченность изменялась на  $\pm 0.5\%$ , что является допустимым отклонением при производстве постоянных магнитов. На рис. 6 показан один из рассмотренных случаев изменения намагниченности. По такому же принципу был произведен анализ еще нескольких случаев.

На рис. 7 диаграмма показывает распределение членов ряда Фурье при отсутствии разброса намагниченности. На рис. 8 видно, что в разложении поля появляется дипольная компонента в случае отклонения намагниченности, показанной на рис. 6. В этом случае искажение компонент поля является наибольшим. В остальных рассмотренных вариантах значения коэффициентов Фурье находятся в пределах между идеальным случаем и случаем на рис. 6.

## ВЫВОДЫ

В ИЯФ СО РАН разработан и создан прототип линзы квадрупольного гибридного типа. Характеристики и размеры прототипа не позволяют использовать его в проекте линака для DARIA, но подтверждают возможность создания линзы с подходящими параметрами.

Проведено моделирование проектной гибридной квадрупольной линзы в вычислительном программном комплексе. Результаты моделирования

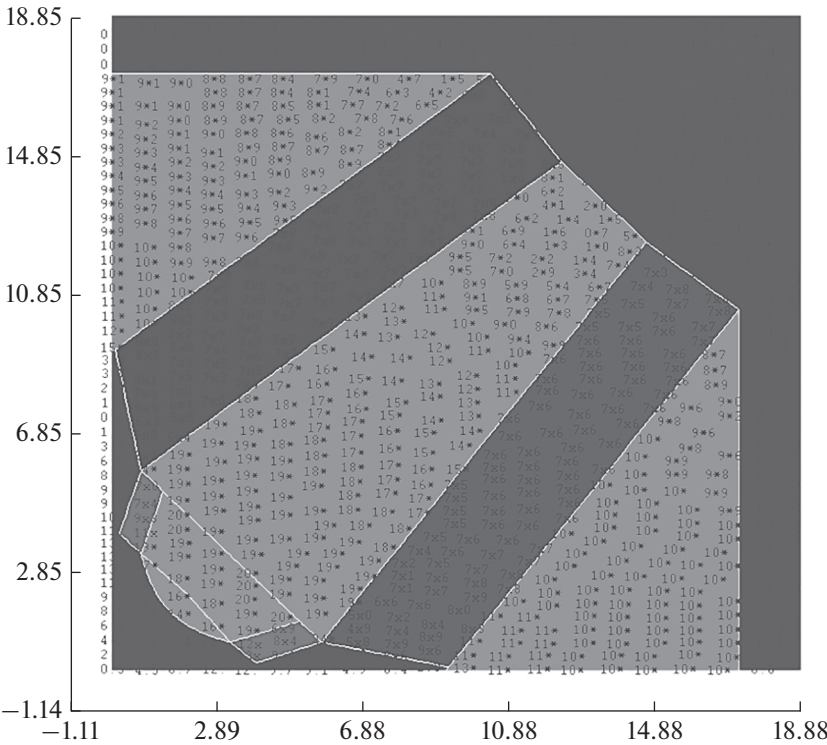


Рис. 4. Карта модуля вектора индукции магнитного поля в сечении линзы.

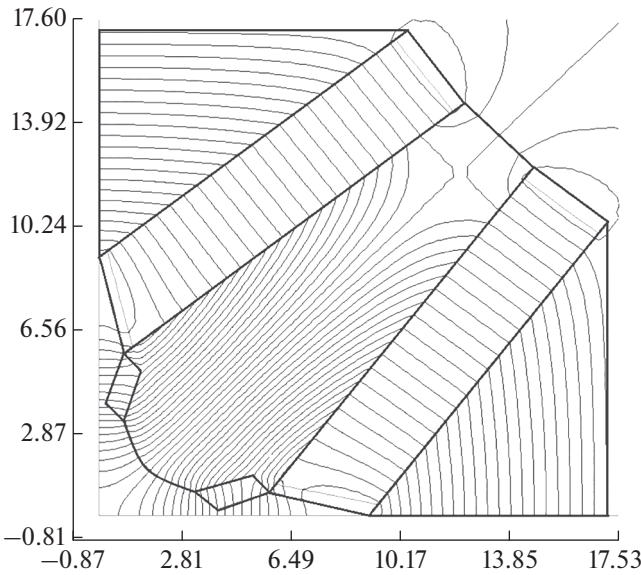


Рис. 5. Силовые линии поля квадрупольной линзы.

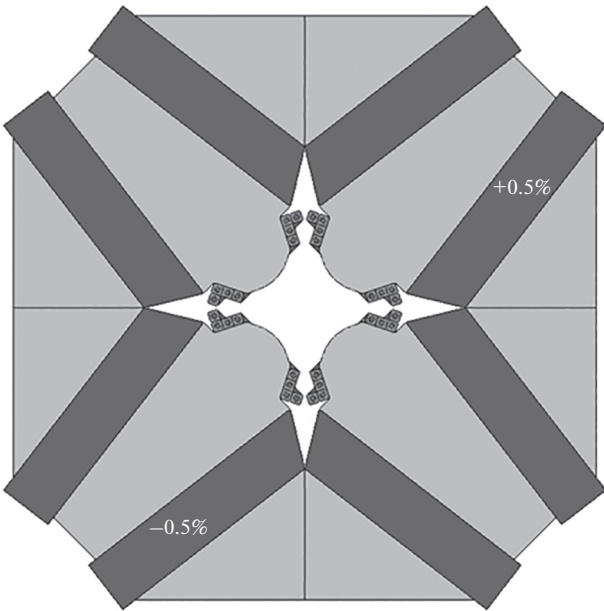


Рис. 6. Изменение намагниченности в плитках постоянного магнита.

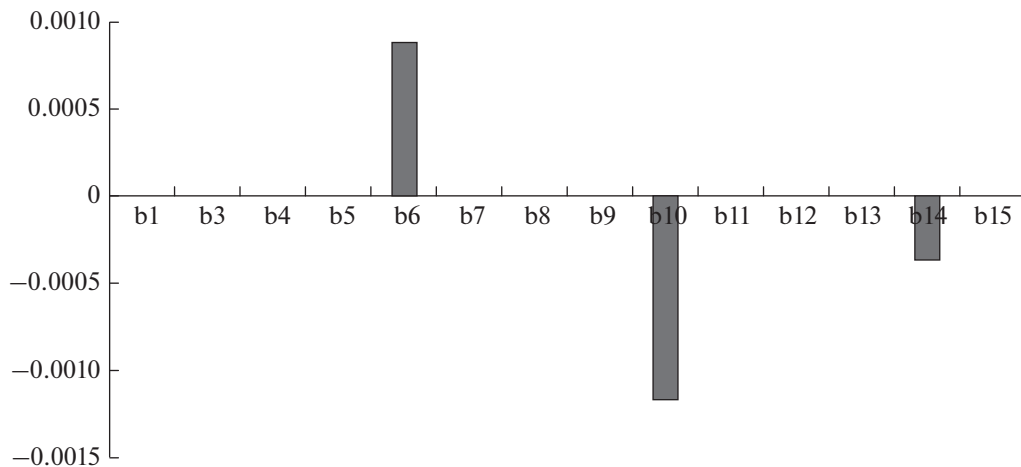


Рис. 7. Коэффициенты ряда Фурье без разброса намагниченности.

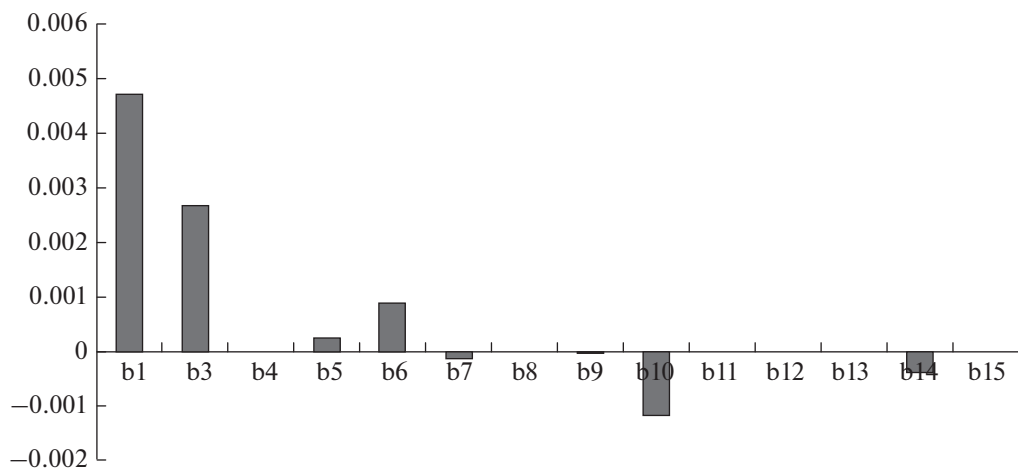


Рис. 8. Коэффициенты ряда Фурье с разбросом намагниченности.

показывают, что свойства линзы соответствуют требованиям.

Исследовано влияние разброса намагниченности постоянных магнитов на коэффициенты Фурье, рассчитанные для поля линзы. Определено наибольшее возможное искажение поля под влиянием отклонений намагниченности, а именно появление дипольной компоненты. Эта компонента отвечает за смещение магнитной оси линзы и не является проблемой, поскольку легко компенсируется общим перемещением линзы. Другие появившиеся вследствие нарушения квадрупольной симметрии поля компоненты не приводят к нарушению требуемой однородности градиента.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Рояку М.Э. за консультации по методам FEM расчетов магнитного поля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Grigoriev S., Iashina E., Pavlov K. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotr. Neutron Tech. 2019. V. 13 (6). P. 1132.
2. Skalyga V.A et al. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotr. Neutron Tech. 2022. V. 16 (3). P. 427.
3. Барабин С.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47 (10). С. 7.
4. Кропачев Г.Н и др. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2023. Т. 18 (4). С. 568.
5. Mihara T. et al. // SLAC National Accelerator Lab. 2004. SLAC-PUB-10877.
6. Teotia V. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2022. V. 982.
7. Tosin G. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2012. V. 674. P. 67.

## Quadrupole Lens for Drift-Tube Linac

E. I. Antokhin<sup>1, \*</sup>, T. R. Derbysheva<sup>1, \*\*</sup>, V. S. Eliseev<sup>1</sup>, D. A. Khlystov<sup>1</sup>, and I. V. Kil'metova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

<sup>2</sup>*National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, 123182 Russia*

*\*e-mail: antokhin@mail.ru*

*\*\*e-mail: derbysheva.t@yandex.ru*

Received June 27, 2023; revised August 2, 2023; accepted August 14, 2023

**Abstract**—This article considers the possibility of using a hybrid permanent magnet quadrupole lens with correcting coil for a linear accelerator. The design of the lens was developed and its optimization was carried out to obtain a magnetic field gradient of sufficient magnitude in the aperture. Calculations were carried out in a specialized software package to determine whether the characteristics of the lens meet the requirements. The influence of variation of permanent magnet magnetization on the field quality was investigated.

**Keywords:** hybrid quadrupole, DTL linac, permanent magnets