

Научная статья

УДК 537.533.335

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-5-19

Исследование квадрупольных линз для канала транспортировки ионов

Сергей Андреевич Быков^{1,2}, Владимир Александрович Востриков^{1,2}
Константин Владимирович Жилиев¹, Иван Иванович Морозов^{1,2}
Иван Николаевич Окунев¹, Алексей Юрьевич Пахомов¹

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

S.A.Bykov@inp.nsk.su
V.A.Vostrikov@inp.nsk.su
K.V.Zhilyaev@inp.nsk.su
I.I.Morozov@inp.nsk.su
I.N.Okunev@inp.nsk.su
A.Yu.Pakhomov@inp.nsk.su

Аннотация

В Институте ядерной физики СО РАН разрабатывались магнитные элементы перепускного канала пучков заряженных частиц от SIS18 до SIS100 (FAIR, Германия) [1]. В данной работе представляется описание квадрупольного магнита Q2 и результаты серийных магнитных измерений. Магнитные измерения проводились с помощью вращающейся гармонической катушки и перемещающейся каретки с линейным массивом датчиков Холла. Квадрупольные линзы обеспечивают интегральный градиент магнитного поля с высоким качеством ($< 5 \cdot 10^{-3}$), что удовлетворяет заявленным требованиям. В то же время из-за ошибок изготовления и сборки в магнитном поле присутствуют гармоники высшего порядка, которые могут оказывать влияние на динамику движения пучка. Особое внимание уделялось амплитуде третьей (секступольной) гармоники, которая определяет хроматические свойства линзы. Это позволяет проводить сортировку изготовленных линз по величине искажений и минимизировать влияние на динамику движения пучка, используя оптимальную расстановку магнитов.

Ключевые слова

квадрупольный магнит, датчики Холла, вращающаяся катушка, третья гармоника

Для цитирования

Быков С. А., Востриков В. А., Жилиев К. В., Морозов И. И., Окунев И. Н., Пахомов А. Ю. Исследование квадрупольных линз для канала транспортировки ионов // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 4. С. 5–19.
DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-5-19

Research of Quadrupole Lenses for Ions Transport Channel

Sergey A. Bykov^{1,2}, Vladimir A. Vostrikov^{1,2}, Konstantin V. Zhilyaev¹
Ivan I. Morozov^{1,2}, Ivan N. Okunev¹, Alexey Yu. Pakhomov¹

¹Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation
²Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

S.A.Bykov@inp.nsk.su
V.A.Vostrikov@inp.nsk.su
K.V.Zhilyaev@inp.nsk.su
I.I.Morozov@inp.nsk.su
I.N.Okunev@inp.nsk.su
A.Yu.Pakhomov@inp.nsk.su

Abstract

In Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS the magnetic elements of transfer channel for charged particle beams from SIS18 to SIS100 (FAIR, Germany) [1] were developed. The article presents a description of the quadrupole magnet Q2 and serial magnetic measurements results. Magnetic measurements with application of rotating harmonic coil and moving carriage with linear array of Hall sensors were taken. Quadrupole lenses provide magnetic field integral gradient with high quality ($<5 \cdot 10^{-3}$) and satisfy the requirements. High order harmonics are present in the magnetic field due to manufacturing and assembly errors and can imperfect on beam dynamics. Main attention was considered to the third (sextupole) harmonic amplitude, determinate the chromatic properties of the lens. It allows select manufactured magnets to distortion value and minimize imperfection of beam dynamics by optimal theirs arrangement.

Keywords

quadrupole magnet, Hall sensors, rotating coil, third harmonic

For citation

Bykov S. A., Vostrikov V. A., Zhilyaev K. V., Morozov I. I., Okunev I. N., Pakhomov A. Yu.. Research of quadrupole lenses for ions transport channel. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 4, pp. 5–19 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-5-19

Введение

FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) – строящийся в Дармштадте (Германия) международный ускорительный комплекс [1], который будет использовать антипротоны и ионы для проведения исследований по ядерной физике, физике элементарных частиц, атомной физике, физике конденсированного состояния и др. Важным элементом комплекса является НЕВТ (High Energy Beam Transport) – система транспортных каналов между ускорителями и экспериментальными установками.

Для перепускного канала пучков ионов от SIS18 до SIS100 с магнитной жесткостью 18 Тл · м в ИЯФ СО РАН были спроектированы и изготовлены квадрупольные магниты Q2. Основные параметры магнита приведены в табл. 1. Общий вид квадрупольного магнита представлен на рис. 2.

3D-расчет магнитного поля квадрупольного магнита Q2 проводился с помощью программы MERMAID [2]. В ходе расчетов подбирались оптимальная форма полюса магнита, размеры обратного ярма, а также форма торцевой фаски, необходимые для достижения требуемого качества поля в широком диапазоне величины тока возбуждения.

Для достижения требуемой однородности интегрального градиента поля во всем диапазоне изменения тока и упрощения торцевой фаски форма полюса была несколько изменена (рис. 3, *справа*). Такое изменение привело к незначительному нарушению однородности локального градиента на границе рабочей апертуры при максимальном поле. При этом оптимальная торцевая фаска – плоская 10 мм × 45°.

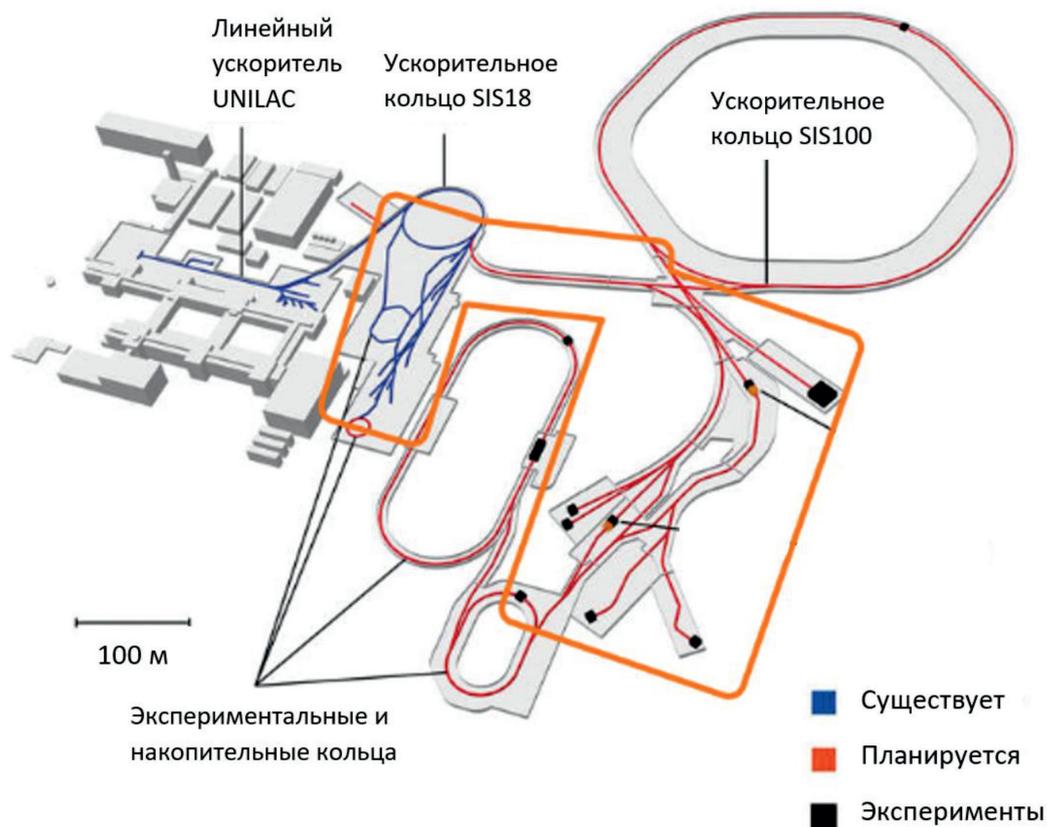


Рис. 1. Ускорительный комплекс FAIR (выделенная область – части НЕБТ)
 Fig. 1. Accelerator complex FAIR (highlighted area – parts of NEBT)

Основные параметры квадрупольного магнита Q2

Таблица 1

Table 1

General parameters of quadrupole magnet Q2

Параметр	Значение	Размерность
Градиент магнитного поля	10	Тл/м
Радиус вписанной окружности	65	мм
Ширина рабочего поля	120	мм
Качество градиента поля в рабочей апертуре $\Delta G/G_0$	$\leq 0,5\%$	–
Эффективная магнитная длина	1,052	м
Количество витков катушки	63	–
Номинальный ток	267	А
Сопротивление при 20 °С	211	МОм
Номинальное напряжение DC/AC	60/230	В
Размеры проводника	9 × 9 Ø6	мм
Требования к охлаждению водой	8,712	л/мин
при повышении температуры	30,000	°С
и перепаде давления	9,699	бар
Вес магнита	2550	кг

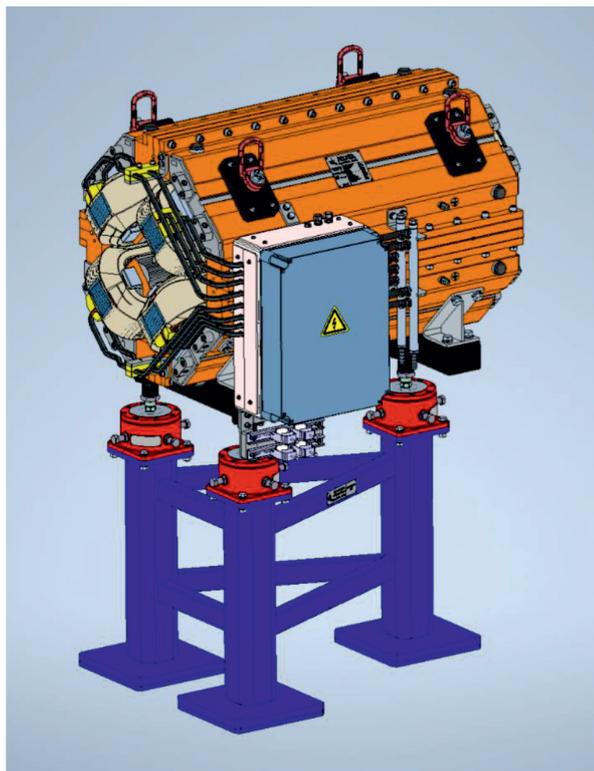


Рис. 2. Квадрупольная магнитная линза Q2 (модель создана в Solid Edge)
Fig. 2. Quadrupole magnet Q2 (model created in Solid Edge)

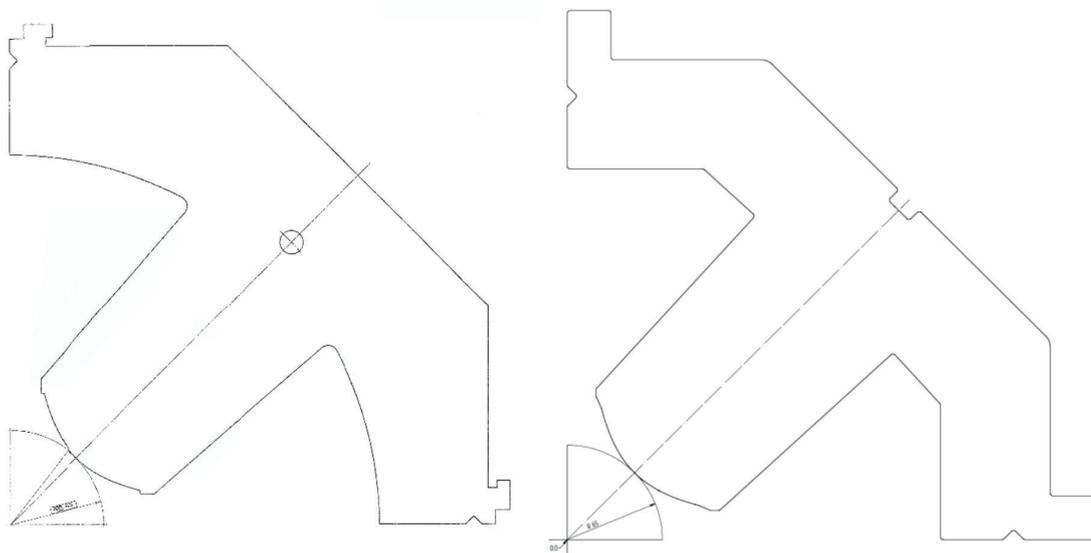


Рис. 3. Профили четвертинки квадрупольной линзы Q2
Fig. 3. Profiles of the quarter quadrupole magnet Q2

На рис. 4 представлены результаты трехмерного расчета однородности интегрального градиента магнитного поля при различных токах. Красной линией обозначена граница рабочей апертуры.

Квадрупольный магнит состоит из ярма и 4 катушек возбуждения. Ярмо магнита длиной 1000 мм собирается из 4 сердечников и стягивается болтами. Шихтованный сердечник магнита склеивается из пластин электротехнической стали толщиной 1 мм.

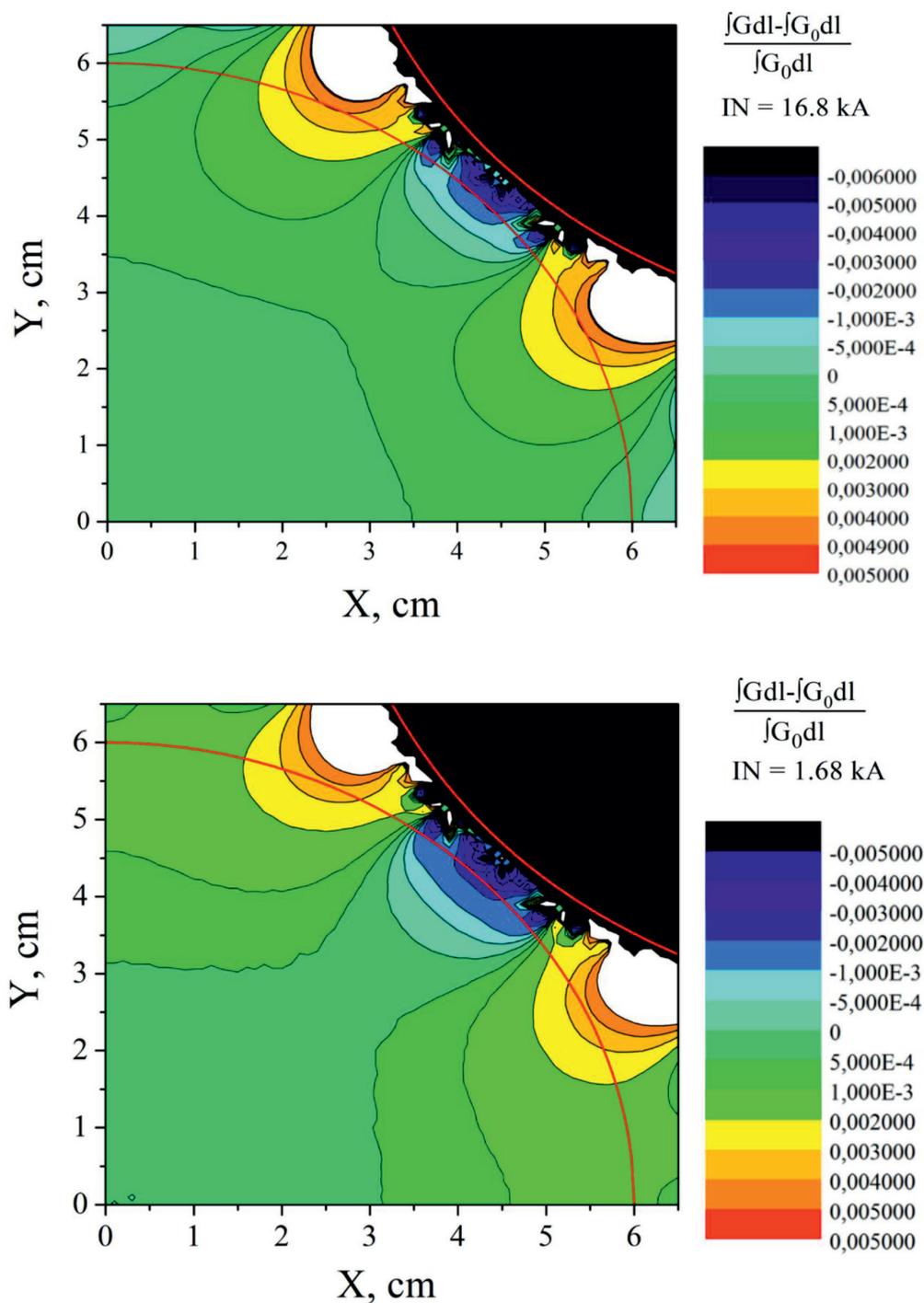


Рис. 4. Неоднородность интегрального градиента магнитного поля при максимальном токе (сверху) и при 10 % от максимального (снизу)
 Fig. 4. Inhomogeneity of the integral magnetic field gradient at maximum current (above) and at 10 % of maximum current (below)

Собранные магниты проходят необходимые электрические, гидравлические, тепловые и механические испытания. Наибольшее значение для определения пригодности магнита имеют магнитные измерения, в ходе которых определяются кривая возбуждения, магнитная длина и качество магнитного поля линзы.

Магнитные измерения

Измерения магнитного поля линзы проводились двумя способами: вращающейся гармонической катушкой и подвижной кареткой с массивом датчиков Холла.

Каретка с массивом датчиков Холла (17 датчиков) (рис. 5) перемещалась по специальной крестообразной направляющей, что позволяло проводить измерения градиента магнитного поля при разных токах как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. Расстояние между крайними датчиками – 152,1 мм. Каретка перемещается вдоль оси магнита на дистанцию 2 м. Калибровка датчиков Холла проводилась один раз в день перед началом цикла измерений с помощью ЯМР магнетометра. Для калибровки каретку с датчиками Холла помещали в калибровочный магнит со стабильностью и однородностью напряженности магнитного поля лучше чем 10^{-6} . Ошибка измерений магнитного поля составляет $\pm 3 \cdot 10^{-5}$ в диапазоне 0,02–2,5 Тл. Кареткой проводились измерения локального градиента в центре магнита, интегрального градиента, кривой возбуждения и эффективной магнитной длины квадруполя для 16 различных величин тока. Кроме того, измерения датчиками Холла служили калибровкой для измерений вращающейся гармонической катушкой путем сравнения интеграла напряженности магнитного поля, полученного из измерений датчиков Холла и вращающейся катушки.



Рис. 5. Система измерения датчиками Холла (слева), каретка с массивом датчиков Холла (справа)
Fig. 5. Hall sensor measuring system (left), carriage with Hall sensors array (right)

Интеграл магнитного поля измерялся вращающейся катушкой диаметром 120 мм (рис. 6, 7). Конструкция вращающейся катушки основана на технологии печатных плат. Вал выполнен в виде двух печатных плат длиной 750 мм с общей длиной измерительной части 1500 мм. Каждая плата содержит 4 катушки, одна из которых предназначена для измерения основной гармоники, а другие – для измерения высших гармоник. Каждая катушка состоит из шести слоев по 10 витков в каждом слое, всего 60 витков. Радиус катушки для измерения аксиальных гармоник варьируется в пределах 5,74–6,1 мм. Подробное описание системы измерения магнитного поля вращающейся гармонической катушкой, созданной в ИЯФ СО РАН, приведено в [3].

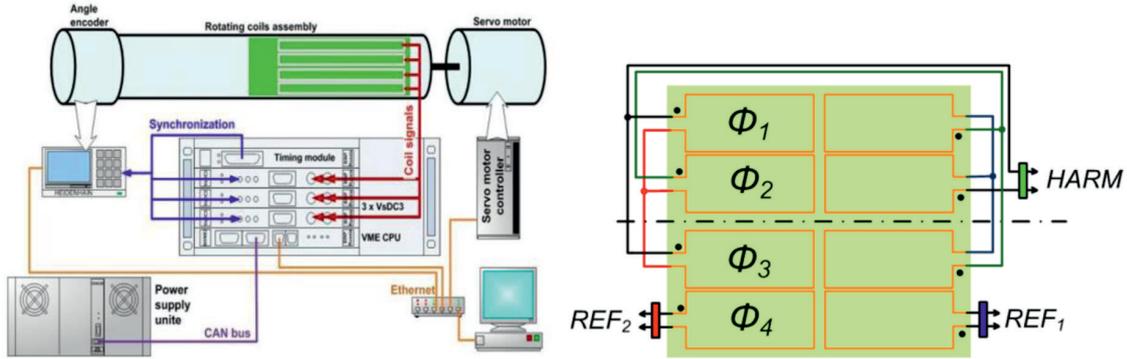


Рис. 6. Схема измерительной установки и схема вращающейся катушки
 Fig. 6. Scheme of the rotating coil measuring setup



Рис. 7. Измерение квадруполь Q2 вращающейся катушкой
 Fig. 7. Measurement of quadrupole Q2 by rotating coil

Перед началом каждого измерения магнит трижды подвергался циклированию от 0 до максимального тока с нарастанием 10 А/с для обеспечения повторяемости измерений. Используемый источник питания обеспечивает пульсации на уровне 5 ppm при токе 1 кА.

Сигнал с катушки раскладывается в ряд Фурье в цилиндрической системе координат:

$$\Psi(r, \theta) = - \sum_{n=0}^{\infty} r^n [-A_n \cos(n\theta) + B_n \sin(n\theta)],$$

где A_n и B_n – амплитуды косого и нормального мультиполей соответственно. Отсюда находим радиальную и азимутальную компоненты магнитного поля:

$$H_{\theta}(r, \theta) = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = \sum_{n=1}^{\infty} nr^{n-1} [A_n \sin(n\theta) + B_n \cos(n\theta)],$$

$$H_r(r, \theta) = -\frac{\partial \Psi}{\partial r} = \sum_{n=1}^{\infty} nr^{n-1} [A_n \cos(n\theta) + B_n \sin(n\theta)].$$

Поле n -й гармоники в точке r, θ :

$$\vec{H}_n(r, \theta) = nr_n^{n-1} \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \sin(n\theta + \varphi_n),$$

где $\varphi_n = \arcsin \frac{A_n}{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}}$ – угол фазового сдвига n -й гармоники.

В идеальной квадрупольной линзе, кроме основной 2-й гармоники, также присутствуют систематические кратные гармоники, обусловленные симметрией, 6-я, 10-я, 14-я и т. д. В поле реального магнита присутствует полный набор гармоник, как прямых, так и косых. Они возникают вследствие ряда причин: точность изготовления профиля полюса, фаски и смыкаемых поверхностей, точность изготовления магнитопровода и сборки ярма, неоднородность магнитных свойств стали и др. Также надо учитывать систематические ошибки системы измерения, такие как биение и провисание вала гармонической катушки, точность измерения угла, электромагнитные наводки, вибрации. В то же время при соблюдении технологии производства и отсутствии серьезных ошибок в конструкции наличие дополнительных гармоник не приводит к значительному ухудшению качества магнитного поля.

Результаты измерений

На рис. 8–10 представлены характерные результаты магнитных измерений квадрупольной линзы Q2. Из кривой возбуждения (рис. 8) видно, что магнит работает в линейной области во всем диапазоне рабочих токов. В то же время эффективная магнитная длина уменьшается при увеличении тока на 10 мм (1 %), что примерно в два раза превышает расчетное изменение магнитной длины. Очевидно, что при увеличении поля происходит частичное насыщение краевой фаски. По всей видимости, это связано с отличием кривой намагничения используемого материала от принятой в расчетах. Принимая во внимание, что квадрупольная линза будет применяться в транспортном канале, изменение магнитной длины является несущественным фактором. Из рис. 8 видно, что интегральный градиент, измеренный с помощью массива датчиков Холла в медианной плоскости, удовлетворяет требованиям однородности в рабочей апертуре. На рис. 10 представлен характерный набор гармоник, нормированных на величину второй гармоники, при различных токах возбуждения.

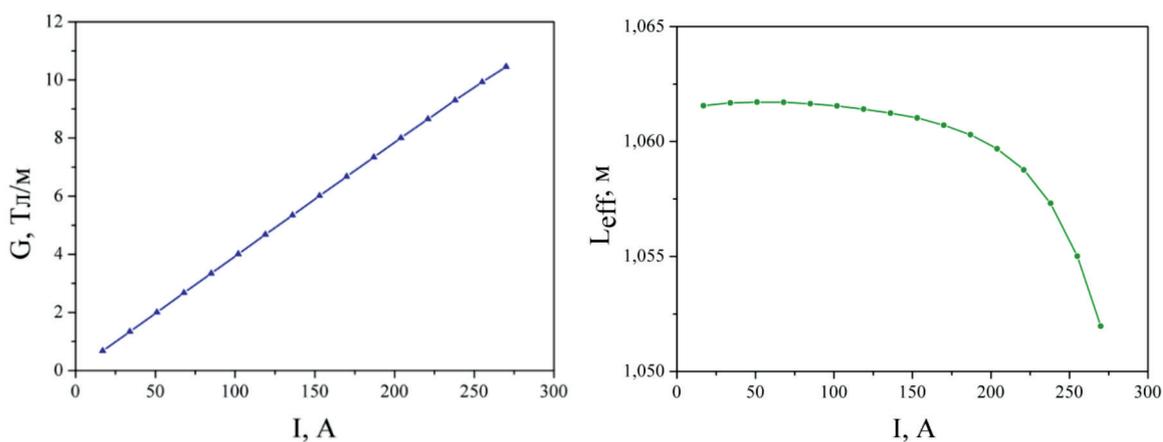


Рис. 8. Кривая возбуждения (слева) и зависимость эффективной магнитной длины от тока (справа)
Fig. 8. Excitation curve (left) and dependence of effective magnetic length on current (right)

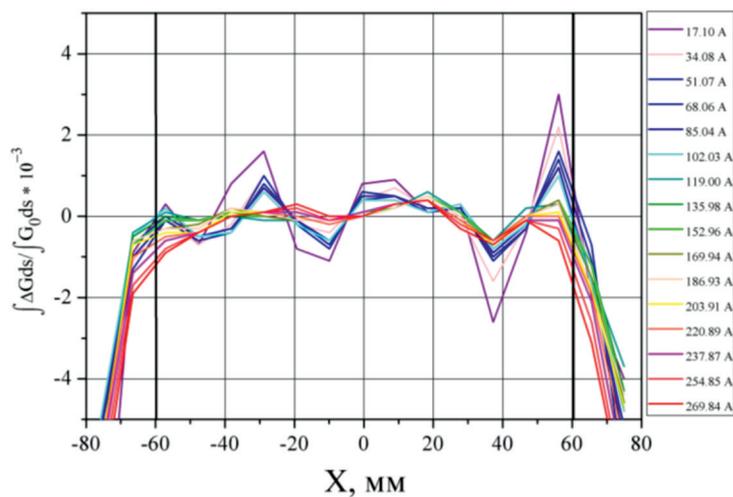


Рис. 9. Однородность интегрального градиента поля в медианной плоскости при различных токах
 Fig. 9. Homogeneity of the integral magnetic field gradient in the median plane at different currents

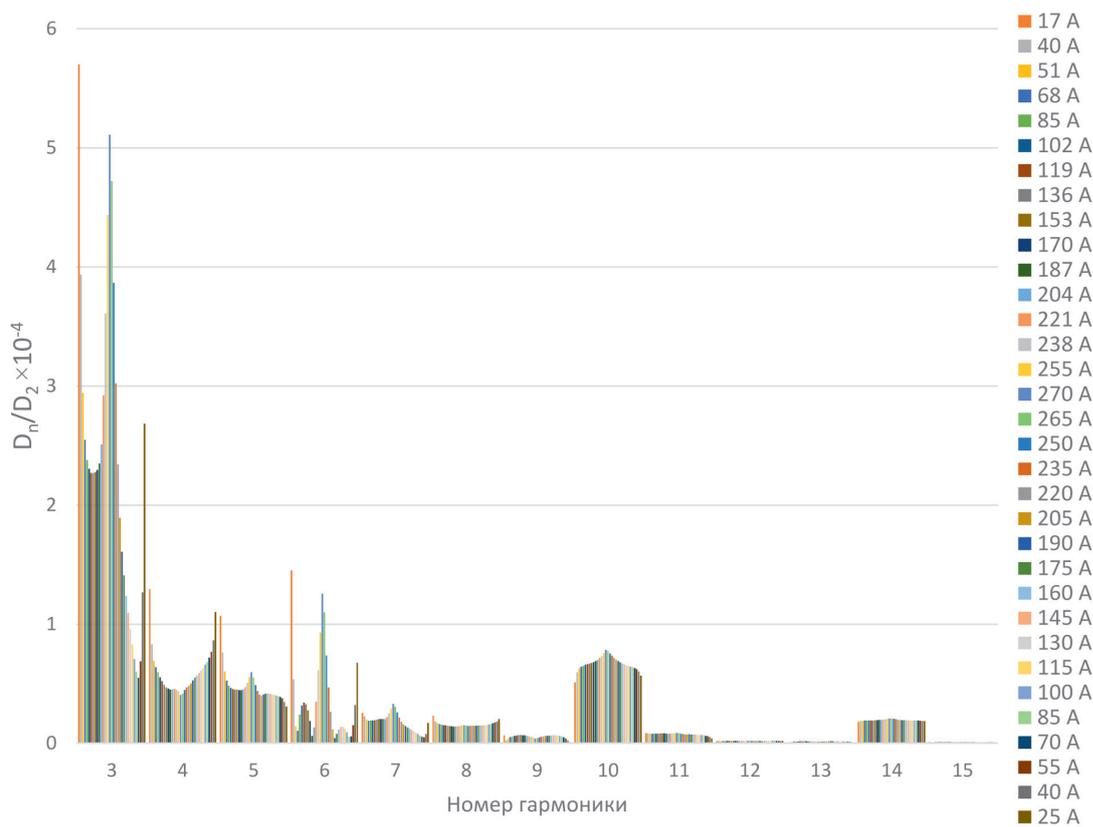


Рис. 10. Относительные амплитуды гармоник магнитного поля при различных токах в одном из магнитов
 Fig. 10. Relative amplitudes of magnetic field harmonics depending on the current in one of the magnets

Анализ гармоник магнитного поля

После измерений первой серии изготовленных квадрупольных магнитов было установлено, что кроме систематических нелинейных гармоник в спектре присутствуют достаточно большие 3-я, 4-я и 5-я гармоники. Сравнивая нормированные амплитуды гармоник ($(D_n/D_2, D_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2})$) при различных токах для серии магнитов, можно отметить следующие закономерности (рис. 11–14). Во-первых, у большинства линз амплитуды 3-й гармоники превышают амплитуды остальных гармоник. Во-вторых, амплитуды 3-й гармоники имеют сильную и различную для разных магнитов зависимость от тока. В то же время амплитуды 4-й гармоники зависят от тока слабо.

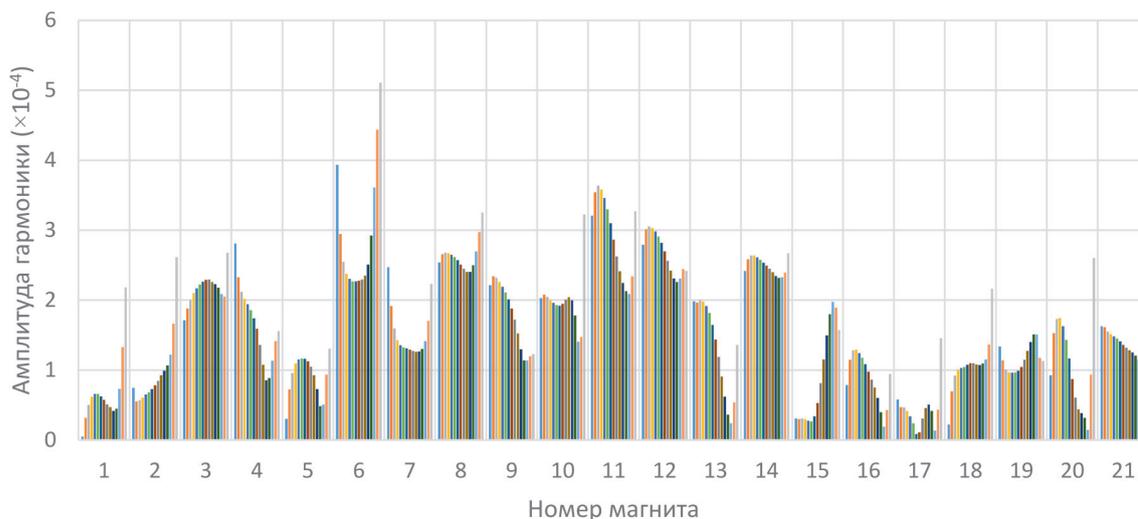


Рис. 11. Амплитуды 3-й гармоники магнитного поля в разных магнитах при различных токах
Fig. 11. Amplitudes of the 3rd harmonic of the magnetic field depending on the current in different magnets

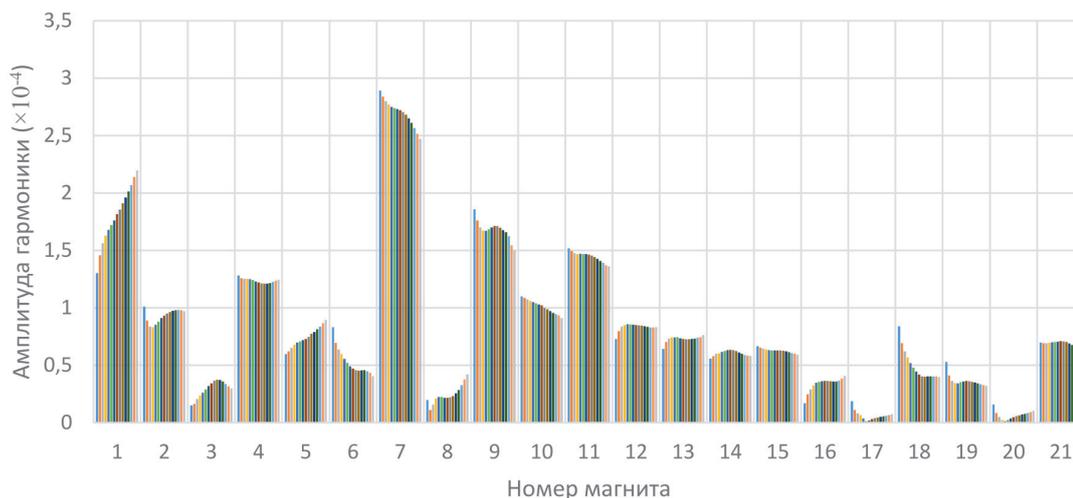


Рис. 12. Амплитуды 4-й гармоники магнитного поля в разных магнитах при различных токах
Fig. 12. Amplitudes of the 4th harmonic of the magnetic field depending on the current in different magnets

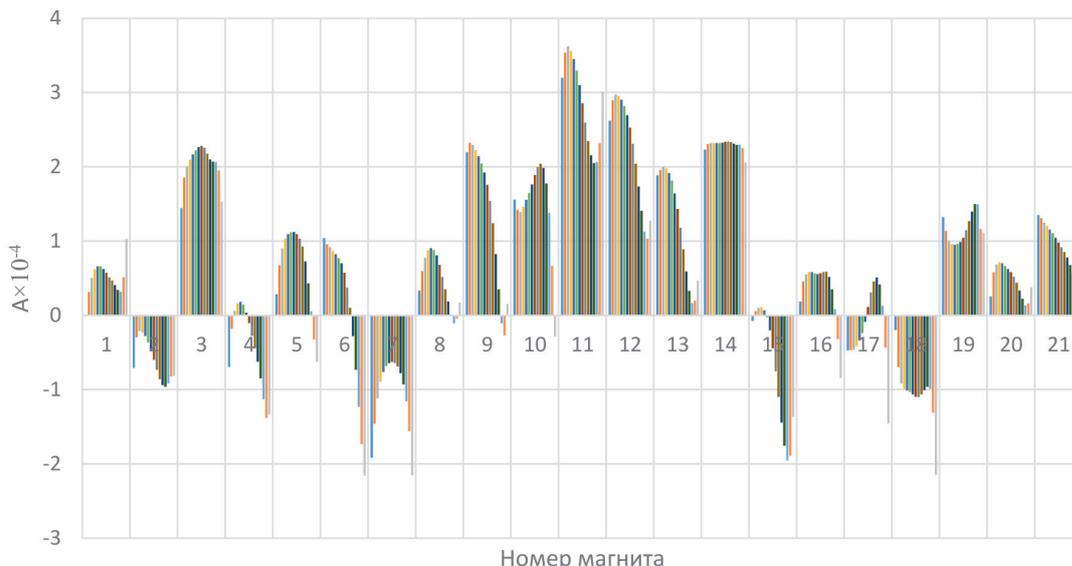


Рис. 13. Амплитуды A 3-й гармоники магнитного поля в разных магнитах при различных токах
 Fig. 13. Amplitudes A of the 3rd harmonic of the magnetic field depending on the current in different magnets

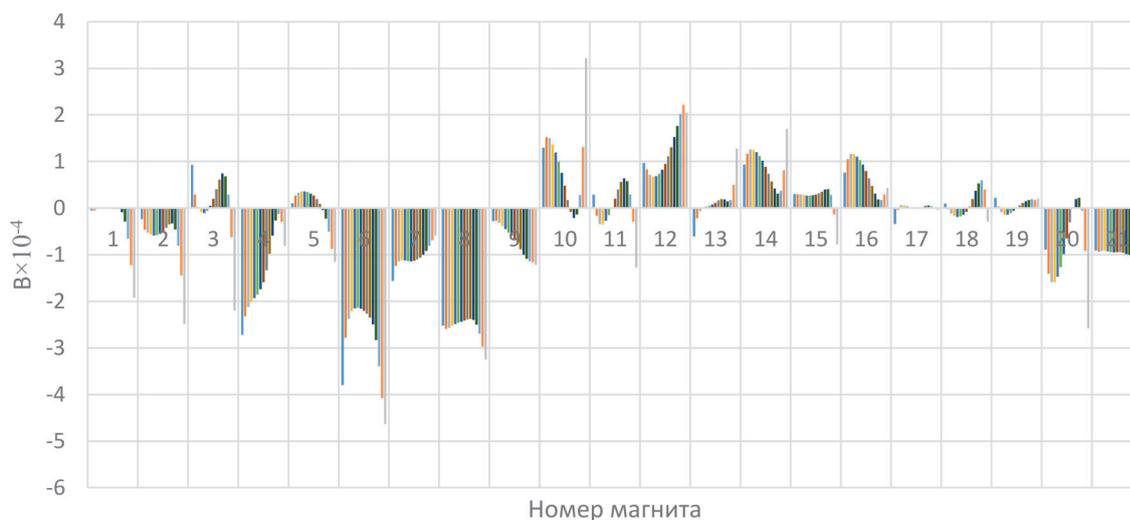


Рис. 14. Амплитуды B 3-й гармоники магнитного поля в разных магнитах при различных токах
 Fig. 14. Amplitudes B of the 3rd harmonic of the magnetic field depending on the current in different magnets

Присутствие 3-й, 4-й и 5-й гармоник обусловлено изменением зазора между полюсами четвертинок линзы в горизонтальном направлении, которое неизбежно происходит при сборке магнита. Так как квадруполь состоит из 4 частей, вначале стягиваются две нижние части, и две верхние отдельно. Затем верхняя половина устанавливается на нижнюю, и они стягиваются болтами. Под весом верхней половины нижняя половина «раскрывается», т. е. увеличивается зазор между полюсами четвертинок линзы. Верхняя половина, наоборот, сжимается, при этом зазор уменьшается. Изменения зазоров остаются в пределах механических допусков, но, как результат, увеличиваются амплитуды гармоник. При этом расстояние между проти-

воположными полюсами практически сохраняется в пределах допусков, так как амплитуда 6-й гармоники не увеличивается. Зависимость амплитуд гармоник от тока может объясняться влиянием торцевой фаски, которая частично насыщается при увеличении тока.

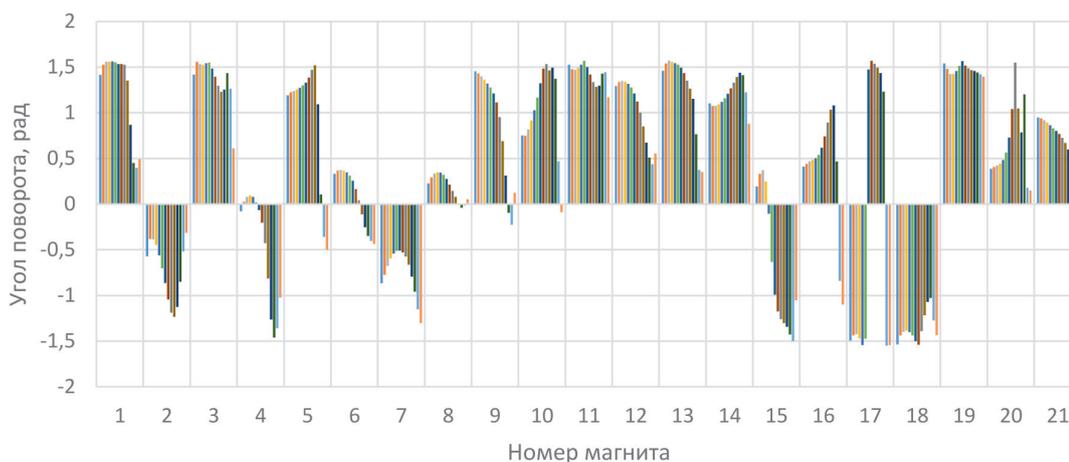


Рис. 15. Угол поворота 3-й гармоники при различных токах
Fig. 15. Rotating angle of the 3rd harmonic depending on the current

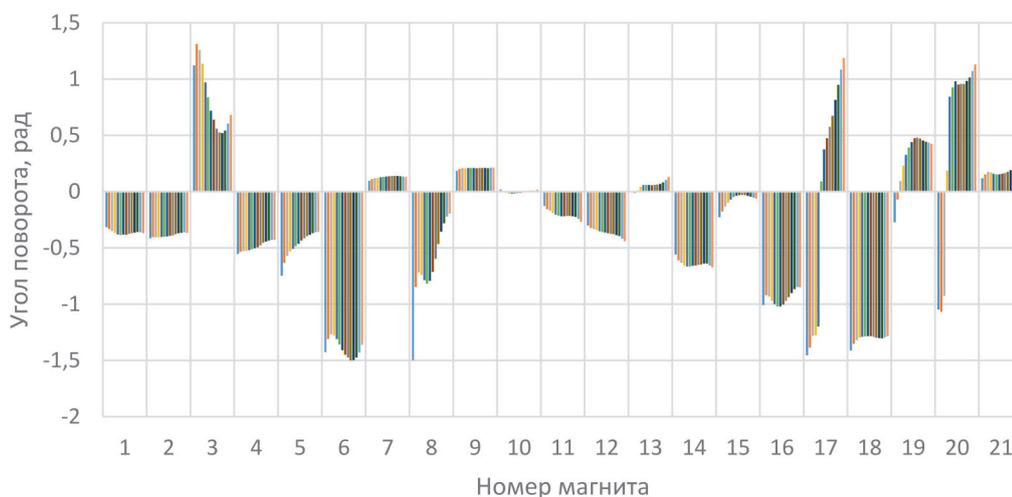


Рис. 16. Угол поворота 4-й гармоники при различных токах
Fig. 16. Rotating angle of the 4th harmonic depending on the current

Из рис. 15, 16 видно, что угол поворота ($\varphi_n = \arcsin A_n / \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$) 3-й и 4-й гармоник зависит от тока, причем эта зависимость различна для разных магнитов. Это означает, что секступольная и октупольная гармоники поворачиваются на достаточно большой угол при изменении тока. Такое поведение гармоник сложно объяснить неравномерным насыщением торцевых фасок или отличием стали в разных сердечниках и требует дальнейшего разбирательства, в первую очередь, с погрешностями измерительной системы.

Рис. 17 и 18 демонстрируют наличие гистерезиса амплитуд нелинейных гармоник в линзах. Видно, что гистерезис 3-й гармоники достаточно большой, в то время как у 4-й гармоники

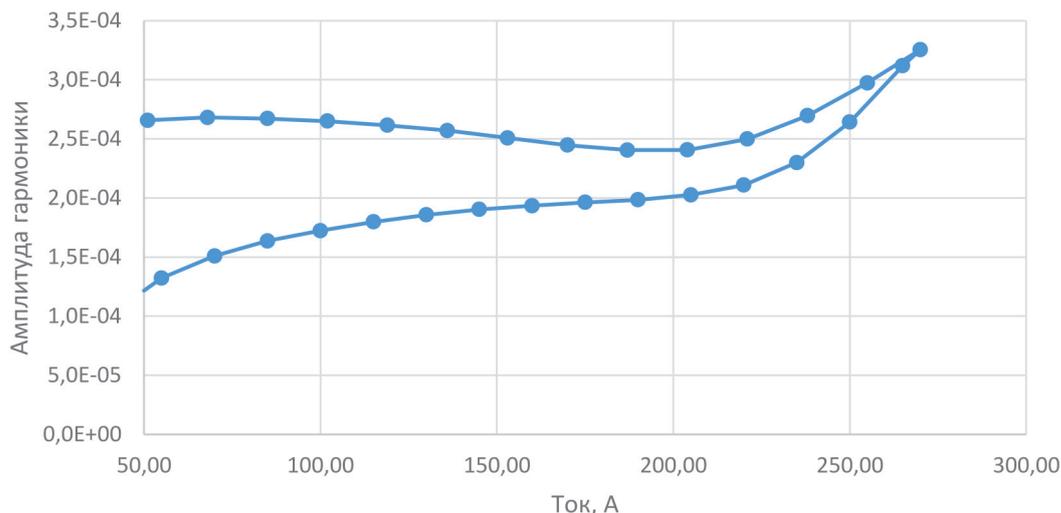


Рис. 17. Гистерезис амплитуды D_3 при изменении токах
 Fig. 17. D_3 amplitude hysteresis depending on the current

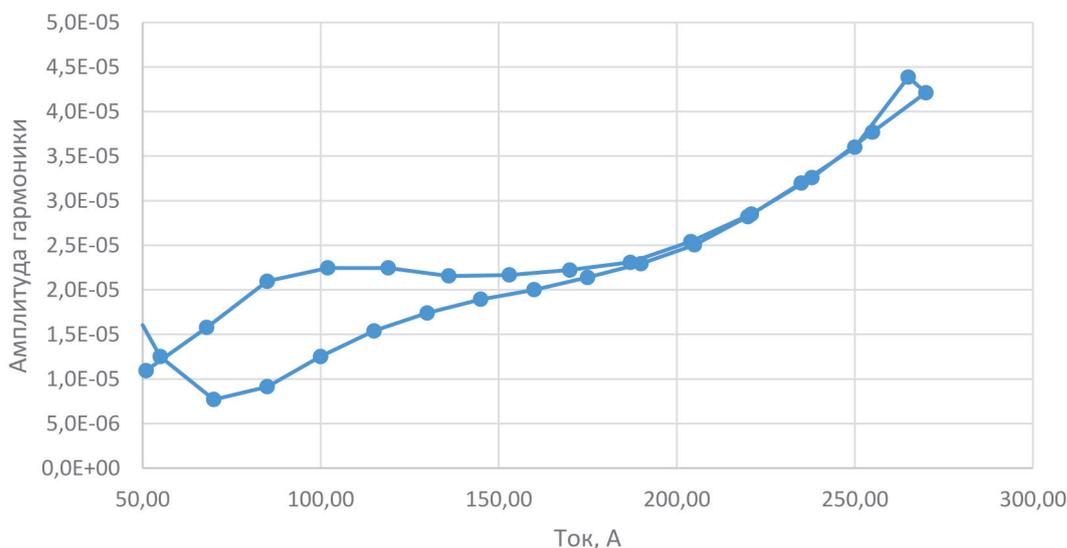


Рис. 18. Гистерезис амплитуды D_4 при изменении токах
 Fig. 18. D_4 amplitude hysteresis depending on the current

он незначительный. Наличие гистерезиса может быть обусловлено разной магнитной проницаемостью четвертинок линзы.

Заключение

В ИЯФ СО РАН разработаны и изготовлены квадрупольные магниты для канала перепуска. Магнитные измерения показали, что магниты удовлетворяют необходимым требованиям. При обработке данных магнитных измерений исследовались нежелательные высшие гармоники поля. Особое внимание было уделено секstupольной и октупольной гармоникам. Наблю-

дается зависимость угла поворота гармоник от тока и гистерезис амплитуды секступольной гармоники. В остальных высших гармониках гистерезис незначительный.

Несмотря на то что наибольшая 3-я гармоника мала ($< 0,05\%$), она может оказывать неконтролируемое влияние на динамику движения пучка. Данное исследование позволяет проводить сортировку магнитов по величине нелинейных гармоник и их зависимости поведения от тока. Исходя из полученных результатов была обеспечена расстановка магнитов по каналу, обуславливающая минимальное возмущение динамики движения пучка.

Список литературы

1. **Gutbrod H., Augustin I., Eickhoff H., Groß K., Henning W., Krämer D., Walter G.** FAIR Baseline Technical Report. 2006. Vol. 2.
2. **Dubrovin A. N.** User's Guide MERMAID: Magnet Design in Two and Three Dimensions. SIM Limited, Novosibirsk Department, 1994.
3. **Павленко А. В.** Многофункциональные цифровые интеграторы для прецизионных измерений магнитных полей в элементах ускорителей / Дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2015.
4. **Okunev I., Batrakov A., Kobets V., and Morozov I.** Field Measurements of Magnets for Modern SR Sources and FEL // IEEE Transaction on Applied Superconductivity. 2016. Vol. 26, no. 4.
5. **Zickler Th.** Basic design and engineering of normal-conducting, iron-dominated electromagnets / Ed. by D. Brandt // Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Magnets, Bruges, Belgium, CERN-2010-004, 2009.

References

1. **Gutbrod H., Augustin I., Eickhoff H., Groß K., Henning W., Krämer D., Walter G.** FAIR Baseline Technical Report. 2006. Vol. 2.
2. **Dubrovin A. N.** User's Guide MERMAID: Magnet Design in Two and Three Dimensions. SIM Limited, Novosibirsk Department, 1994.
3. **Pavlenko A. P.** Multifunctional digital integrators for precision measurements of magnetic fields in accelerator elements: Dissirtation. Novosibirsk, 2015. (in Russ.)
4. **Okunev I., Batrakov A., Kobets V., and Morozov I.** Field Measurements of Magnets for Modern SR Sources and FEL // IEEE transaction on applied superconductivity. 2016. Vol. 26, no. 4.
5. **Zickler Th.** Basic design and engineering of normal-conducting, iron-dominated electromagnets / Ed. by D. Brandt // Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Magnets, Bruges, Belgium, CERN-2010-004, 2009.

Информация об авторах

Сергей Андреевич Быков, старший лаборант
Владимир Александрович Востриков, научный сотрудник
Константин Владимирович Жиляев, младший научный сотрудник
Иван Иванович Морозов, кандидат физико-математических наук
Иван Николаевич Окунев, научный сотрудник
Алексей Юрьевич Пахомов, младший научный сотрудник

Information about the Authors

Sergey A. Bykov, Senior Laboratory Assistant

Vladimir A. Vostrikov, Research Assistant

Konstantin V. Zhilyaev, Junior Researcher

Ivan I. Morozov, Candidat of Science (Physics and Mathematics)

Ivan N. Okunev, Research Assistant

Aleksey Yu. Pakhomov, Junior Researcher

*Статья поступила в редакцию 15.08.2023; одобрена после рецензирования 07.11.2023;
принята к публикации 14.11.2023*

*The article was submitted 15.08.2023; approved after reviewing 07.11.2023;
accepted for publication 14.11.2023*