

УДК 537.533.335

П. Н. Бурдин, Т. А. Девятайкина, Э. С. Казанцева, Т. В. Рыбичкая
Б. А. Скарбо, А. А. Старостенко, А. С. Цыганов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: pavel.burdin@gmail.com

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОЛЯ КВАДРУПОЛЬНЫХ ЛИНЗ ПРИ СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ*

Представлена технология изготовления железных квадрупольных линз с высоким качеством поля для основного кольца NSLSII. Технология разработана в ИЯФ СО РАН и включает подстройку октупольной и секступольной гармоник с помощью межполюсных вставок и накладок на полюса. Приведены результаты измерения полей для серии готовых линз.

Ключевые слова: квадрупольные линзы, гармоники поля, измерение магнитных полей.

Введение

В лаборатории Брукхэвен в США в настоящее время строится источник синхротронного излучения NSLSII [1]. Для основного кольца источника в ИЯФ СО РАН были спроектированы и изготовлены квадрупольные линзы нескольких типов.

Зависимость интеграла магнитного поля в линзах от координат записывается следующим образом [2; 3]:

$$\frac{\int_{-\infty}^{\infty} B_r(r, \varphi, z) dz}{l_{\text{эфф}}} = \sum_{n=1}^{\infty} B_0 \left[\frac{r}{r_0} \right]^{n-1} \times (-a'_n \cos n\varphi + b'_n \sin n\varphi),$$

$$\frac{\int_{-\infty}^{\infty} B_\varphi(r, \varphi, z) dz}{l_{\text{эфф}}} = \sum_{n=1}^{\infty} B_0 \left[\frac{r}{r_0} \right]^{n-1} \times (a'_n \sin n\varphi + b'_n \cos n\varphi),$$

где B_0 – амплитуда магнитного поля в центре линзы на радиусе r_0 ; n – натуральное число, определяющее номер гармоники, b'_n и a'_n – мультипольные коэффициенты; $l_{\text{эфф}}$ – эффективная магнитная длина линзы. Направление z взято вдоль оси линзы, r и φ – полярные координаты в перпендикулярной к оси плоскости, угол φ отсчитывается от горизонтального направления x , начало координат находится в центре линзы (рис. 1).

Удвоенный номер гармоники показывает количество полюсов мультиполя, для которого эта гармоника основная. Например, гармоника $n=2$ является основной для квадрупольной линзы, $n=3$ – для секступольной, а $n=4$ – для октупольной, поэтому их соответственно называют квадрупольной, секступольной и октупольной гармониками.

Помимо основной гармоники в реальных линзах присутствуют и паразитные, обусловленные ошибками, допущенными при изготовлении. Обычно, проектируя и изготавливая линзы, стремятся уменьшить все

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

паразитные гармоники, поскольку они могут качественно менять характер движения частиц в магнитных полях линз. В современных квадрупольных линзах величина паразитных гармоник находится на уровне $10^{-3} \div 10^{-4}$ относительно основной. Далее мультипольные коэффициенты будут приводиться относительно основного:

$$a_n = \frac{a'_n}{b'_2}, \quad b_n = \frac{b'_n}{b'_2}.$$

В табл. 1 приведены требования к качеству поля квадрупольных линз NSLSII, заданные заказчиком на радиусе 25 мм. Требования должны выполняться в диапазоне 65–100 % рабочего тока.

Чтобы достичь таких требований, в экспериментальном производстве ИЯФ СО РАН использовался многократно проверенный способ изготовления точных линз. Ярма линзы склеивалось из штампованных пластин, затем осуществлялась корректировка межполюсных зазоров. Тем не менее измерения первых линз не удовлетворяли требованиям. Поэтому была введена индивидуальная доработка ярма линз. Для серийного производства такая доработка должна быть простой и быстрой. В данной статье представлен быстрый, эффективный и дешевый способ коррекции наиболее значительных паразитных гармоник.

Изготовление квадрупольных линз NSLSII

Основные параметры квадрупольных линз, изготовленных в ИЯФ СО РАН для основного кольца NSLSII, представлены в табл. 2. Линзы производились по следующей технологии.

Ярмо набиралось из пластин толщиной 1 мм. На одной пластине было расположено два полюса (см. рис. 2).

Пластины производились штамповкой из кремнистой электротехнической стали с низким содержанием углерода марки 1200-100 Power Core. Сталь была получена от фирмы ThyssenKrupp (<http://www.thyssenkrupp-steel-europe.com>) в рулонах с клеевым покрытием. Штамповка осуществлялась последовательно черновым и чистовым штампами. Черновой штамп вырезал пластину с припуском 6 мм, чистовой штамповал в размер.

На рис. 3 приведены измерения профиля полюса случайно выбранной готовой пла-

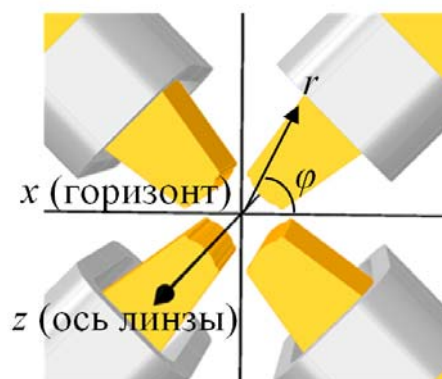


Рис. 1. Оси координат в квадрупольной линзе

Таблица 1
Требования к качеству поля линз

	Ограничения на гармоники, в единицах 10^{-4} относительно основной гармоники
b3–4	± 2
b5	± 1
b6, b10, b14	± 3
b7–9	± 1
b11–13	$\pm 0,5$
b15	$\pm 0,5$
a3	± 2
a4–5	± 1
a6, a10, a14	± 1
a7–9	± 1
a11–13	$\pm 0,5$

Таблица 2
Параметры квадрупольных линз NSLSII

Показатель	Тип 9801 и 9802 (короткие линзы)	Тип 9804 и 9807 (длинные линзы)
Радиус апертуры, мм	33	33
Магнитная длина, м	0,250	0,448
Градиент магнитного поля, Т/м	11	20,2
Полный ток в обмотках, кА	4,9	9,0

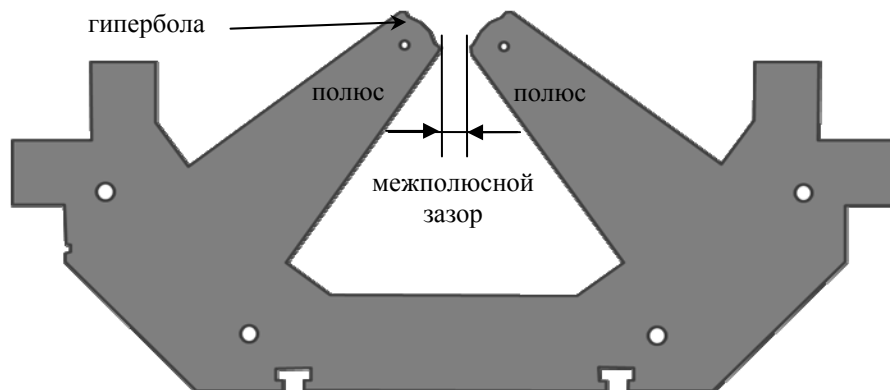


Рис. 2. Пластина квадрупольной линзы NSLSII

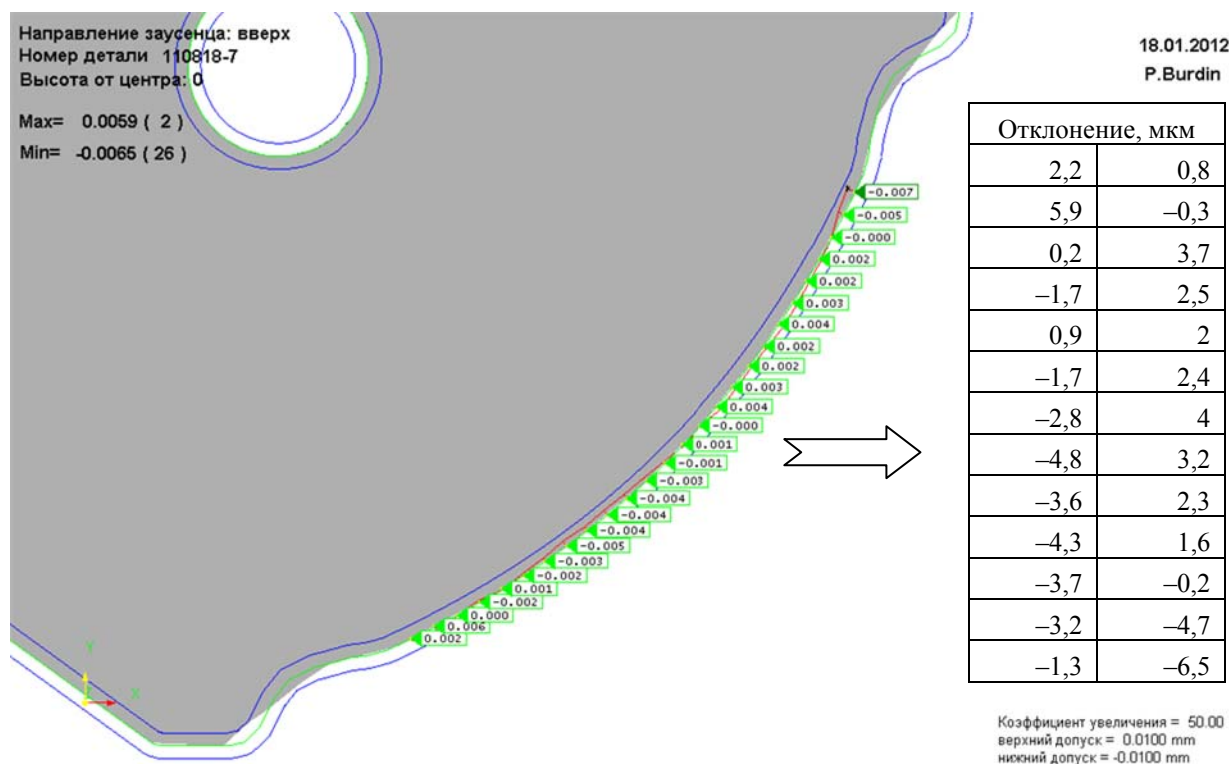


Рис. 3. Результаты измерения профиля полюса

стины. Измерения представлены как отклонение от расчетного профиля с выравниванием относительно гиперболы. Для данного полюса максимальное отклонение гиперболы оказалось $-6,5$ мкм, а стандартное отклонение составило $3,2$ мкм.

Из готовых пластин набирались и склеивались две половинки яра линзы. В процессе склеивания яра корректировались межполюсные зазоры. На рис. 4 приведена

статистика измерений межполюсных зазоров 65-ти готовых половинок длинных линз. Для каждой половинки зазор измерялся в 20-ти точках вдоль оси линзы. Измерения показывают, что на готовых половинках средняя величина межполюсного зазора выдерживается с точностью $20-40$ мкм, а его однородность вдоль оси линзы – в пределах 10 мкм. За однородность здесь берется стандартное отклонение от среднего.

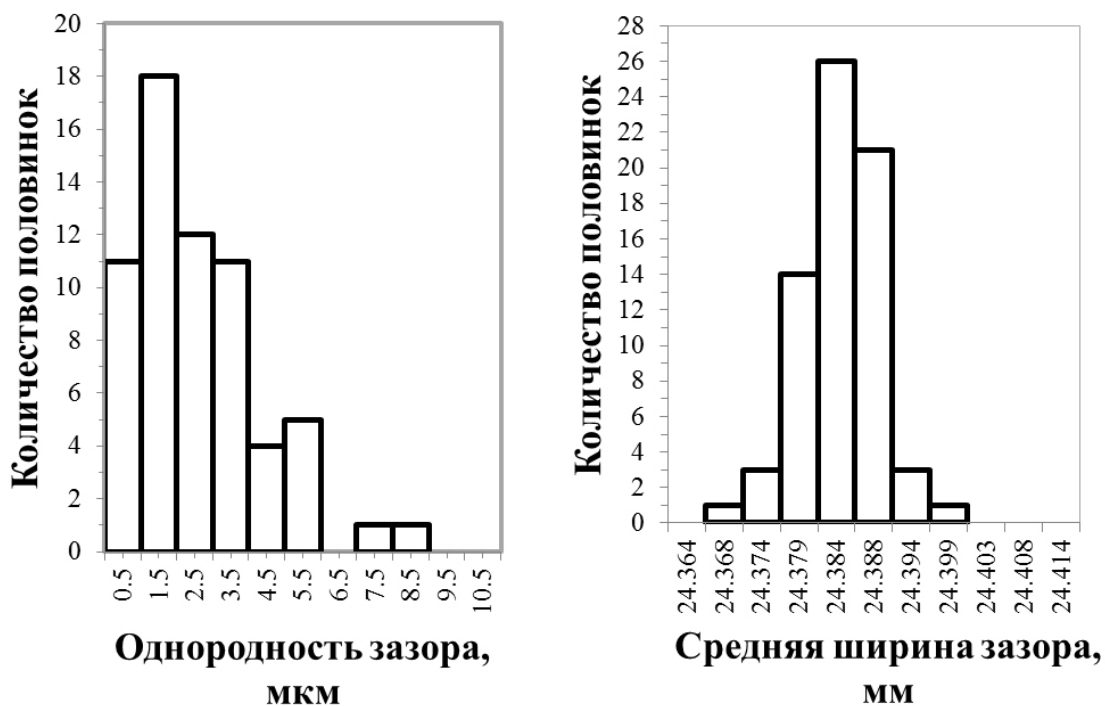


Рис. 4. Результаты измерения межполюсного зазора половинок длинных линз

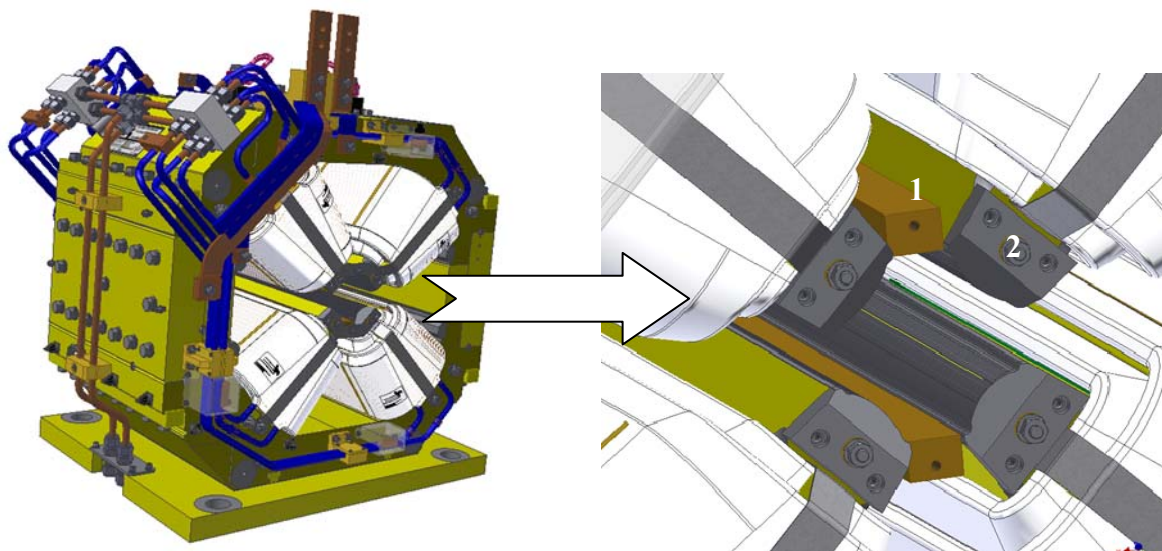


Рис. 5. Квадрупольная линза, тип 9804: 1 – межполюсная вставка; 2 – накладка на полюса

Далее осуществлялась предварительная сборка линзы и первые измерения гармоник магнитного поля. Затем устанавливались межполюсные вставки и накладки на полюса (рис. 5).

Межполюсные вставки

Вставка представляла собой прямоугольный брусок с параллельными поверхностями из немагнитного материала. Длина

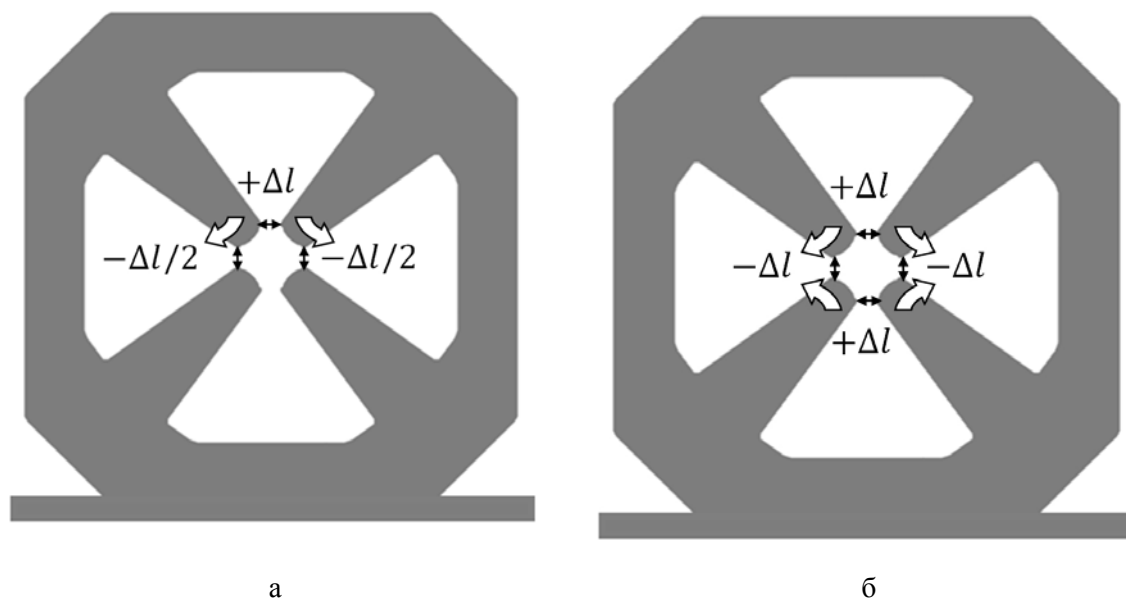


Рис. 6. Направление смещения полюсов при увеличении ширины вставок: а – увеличение ширины верхней вставки на Δl ; б – увеличение ширины двух вставок на Δl

бруска равна длине ярма для надежной фиксации полюсов.

С помощью программы OPERA были рассчитаны изменения полей при увеличении ширины межполюсных вставок. Изменение ширины межполюсных вставок моделировалось сдвигом полюсов. Рассчитаны два случая: увеличение ширины верхней вставки при неизменной ширине нижней и одинаковое увеличение ширины двух вставок (рис. 6).

Для $\Delta l = 20$ мкм расчеты изменения гармоник приведены в табл. 3. Расчеты показывают, что изменяя ширину одной вставки относительно другой можно корректировать гармонику а3, а изменяя ширину двух вставок на равную величину можно корректировать гармонику б4. Зависимость величины гармоник от Δl является линейной функцией.

Исходя из данных расчетов, также можно оценить вероятное искажение полей при неодинаковости межполюсных зазоров половинок, если вставки не установлены. Как показали измерения (см. рис. 3), средняя ширина свободного зазора готовых половинок менялась в пределах 30 мкм. Поэтому в худшем варианте, собрав из двух половинок ярмо, можно было бы получить отличие между верхним и нижним зазором ± 60 мкм. И соответственно величина гармоники а3

Таблица 3

Расчеты изменения гармоник при увеличении ширины межполюсных вставок на 20 мкм, в единицах 10^{-4} относительно основной гармоники

	а	б
а3	-1,2	0
б3	0	0
а4	0	0
б4	0,9	1,8
а5	0,15	0
б5	0	0

относительно основной гармоники достигла бы значения $3 \cdot 10^{-4}$, что выходит за пределы требования к секstupольным гармоникам $\pm 2 \cdot 10^{-4}$. Поэтому коррекция межполюсных зазоров вставками в любом случае была необходима.

Еще одно преимущество межполюсных вставок – значительное увеличение механической стабильности ярма и, следовательно, стабильности магнитного поля при переборке. На рис. 7 приведены измерения секstupольной и октупольной гармоник одного случайного магнита с межполюсными вставками и измерения того же магнита, после того как его разобрали и собрали. Изме-

рения проводились с подъемом и спуском тока. Наибольшее изменение $1 \cdot 10^{-5}$ показала гармоника b_4 . Изменение остальных гармоник оказалось менее $7 \cdot 10^{-6}$. Согласно расчетам (см. табл. 3), такое изменение гармоники b_4 соответствует стабильности положения полюсов относительно друг друга на уровне 1 мкм.

Установка вставок осуществлялась непосредственно на стенде магнитных измерений, что позволяло контролировать изменение полей. На стенде имелся набор вставок разной ширины.

Накладки на полюса

Для финальной подстройки секступольной и октупольной гармоник использовались накладки на полюсах, представляющие собой кусочки полюса с длиной вдоль оси

линзы 15 мм и высотой 35 мм. Профиль накладок соответствовал профилю полюсов линзы. На накладках были выполнены фаски для коррекции гармоник b_6 и b_{10} . Крепление накладок позволяло быстро их переустанавливать, что значительно ускорило при необходимости доработку размеров и формы фасок, так же крепление накладки допускало ее смещение в пределах 1 мм.

В программе OPERA проведены расчеты полей для нескольких типов смещений рис. 8. В табл. 4 приведены изменения гармоник для смещения накладок с двух сторон длинных линз на $\Delta l = 150$ мкм.

Согласно расчетам, тип смещения a (см. рис. 8) в основном изменяет гармонику a_3 , тип смещения b – гармонику b_3 , а тип смещения v – гармонику b_4 . Таким образом, смещением накладок можно осуществлять не только окончательную подстройку

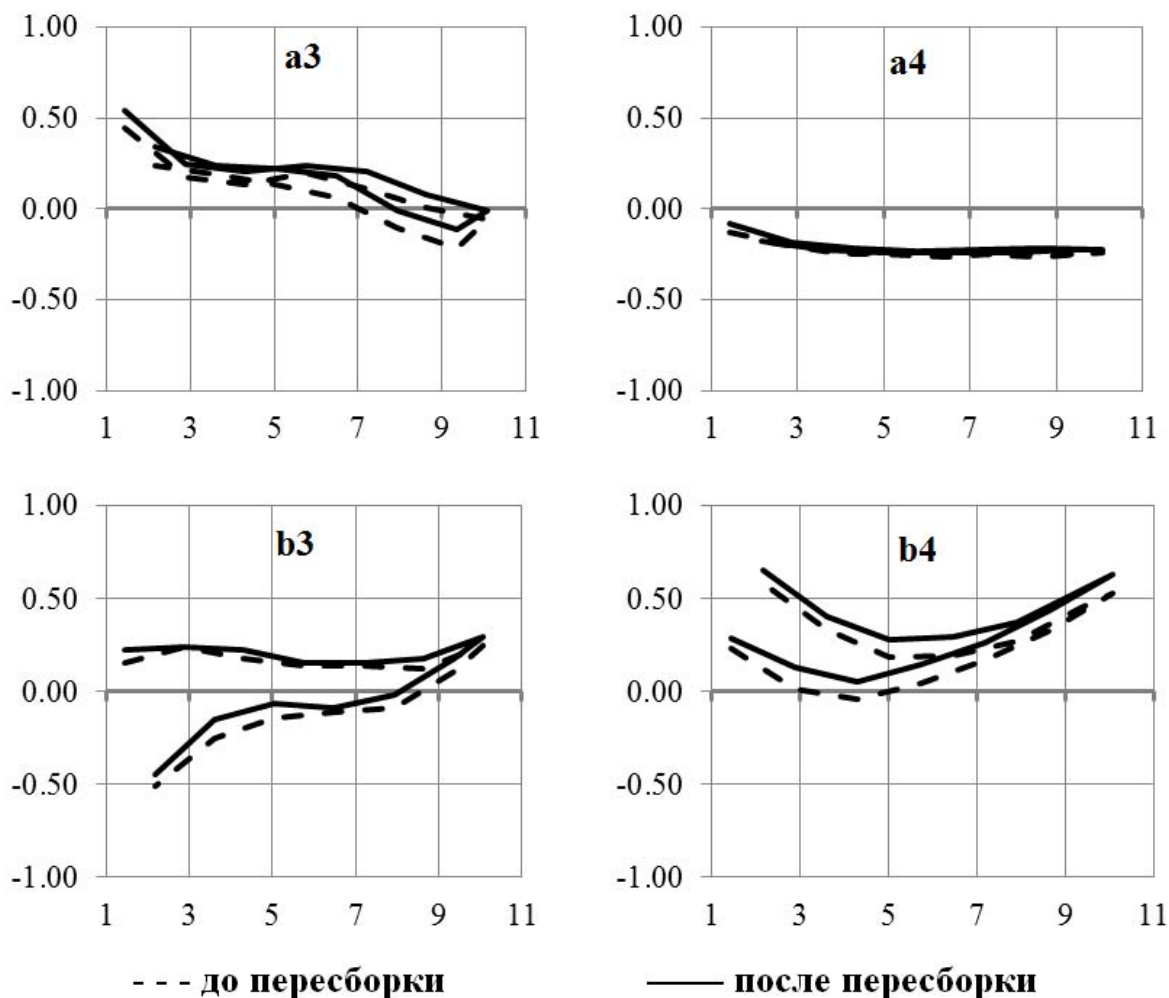


Рис. 7. Результаты измерения зависимости гармоник от тока в обмотках линзы 9804-0012 до и после пересборки. По вертикали отложены величины гармоник в единицах 10^{-4} относительно основной гармоники, по горизонтали – полный ток в обмотках линз, кА (--- до пересборки, — после пересборки)

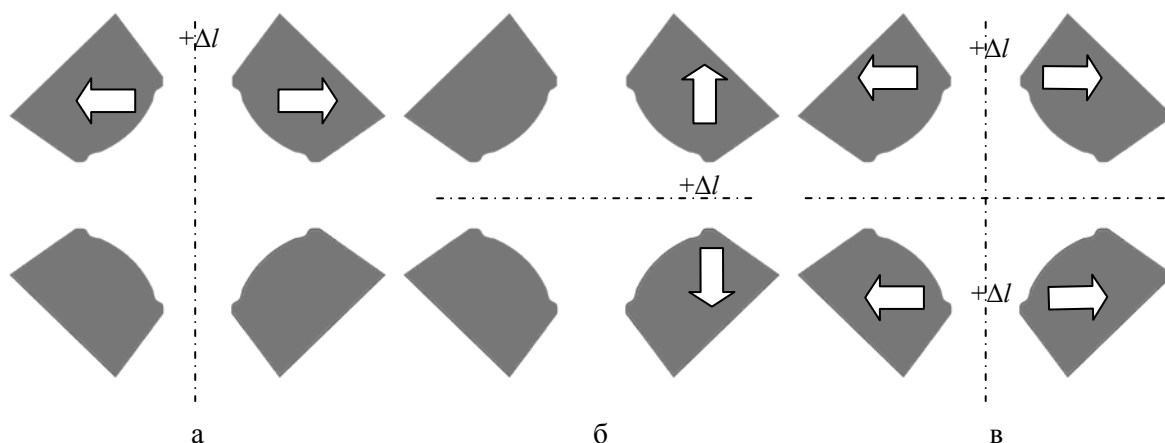


Рис. 8. Типы смещения накладок

Таблица 4

Расчеты изменения гармоник при смещении накладок на 150 мкм (в единицах 10^{-4} относительно основной гармоники)

	а	б	в
а3	-0,4	0	0
б3	0	-0,4	0
а4	0	0	0
б4	0,15	-0,15	0,3
а5	0,05	0	0
б5	0	-0,05	0

гармоники а3 и б4, но и вносить коррективы в величину гармоники б3.

Накладки устанавливались непосредственно на стенде магнитных измерений, где они приклеивались и фиксировались шпилькой. В процессе приклеивания осуществлялись измерения магнитных полей и необходимая подстройка гармоник смещением накладок. После высыхания клея наклейки шлифовались.

Полная настройка магнита с установкой вставок и накладок занимала один рабочий день, что вполне подходит для серийного производства.

Измерение полей квадрупольных линз NSLSII

Измерение полей осуществлялось вращающейся катушкой [4].

На рис. 9, а показана статистика измерения гармоник 60-ти длинных линз после предварительной сборки без вставок и накладок. Кружком обозначено среднее значение

гармоники, крестиком – максимальное и минимальное значения, чертой – стандартное отклонение от среднего, прямоугольником – ограничения по спецификации. Значительный сдвиг гармоники б4 в предварительной сборке объясняется специальным занижением величины межполюсного зазора, что было необходимо для установки и фиксации вставок. Ранее упоминалось, что отличие в величине межполюсных зазоров при изготовлении должно было дать для гармоники а3 в худшем случае $\pm 3 \cdot 10^{-4}$. Однако измерения показывают разброс $\pm 5 \cdot 10^{-4}$. Путем проведения серии экспериментов было выяснено, что дополнительный сдвиг полюсов происходит при сборке магнита вследствие неидеальности различных стыковочных поверхностей. Тем не менее подобные трудности устраняются при использовании межполюсных вставок.

На рис. 9, б показаны измерения тех же магнитов после подбора вставок и установки накладок на полюса. Разброс значений гармоники а3 от магнита к магниту удалось уменьшить в 5 раз, гармоники б3 – в 3 раза, а гармоники б4 – в 3,4 раза. В итоге требования к секступольной и октупольной гармоникам были удовлетворены с запасом. Чтобы достичь таких значений гармоник без подстройки полей вставками и накладками, потребовалось бы выдерживать одинаковость ширин межполюсных зазоров по меньшей мере в 10 мкм.

Статистика измерения амплитуд

$$\text{Ampl}_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

всех гармоник для готовых линз представлена на рис. 10. Кружком обозначены сред-

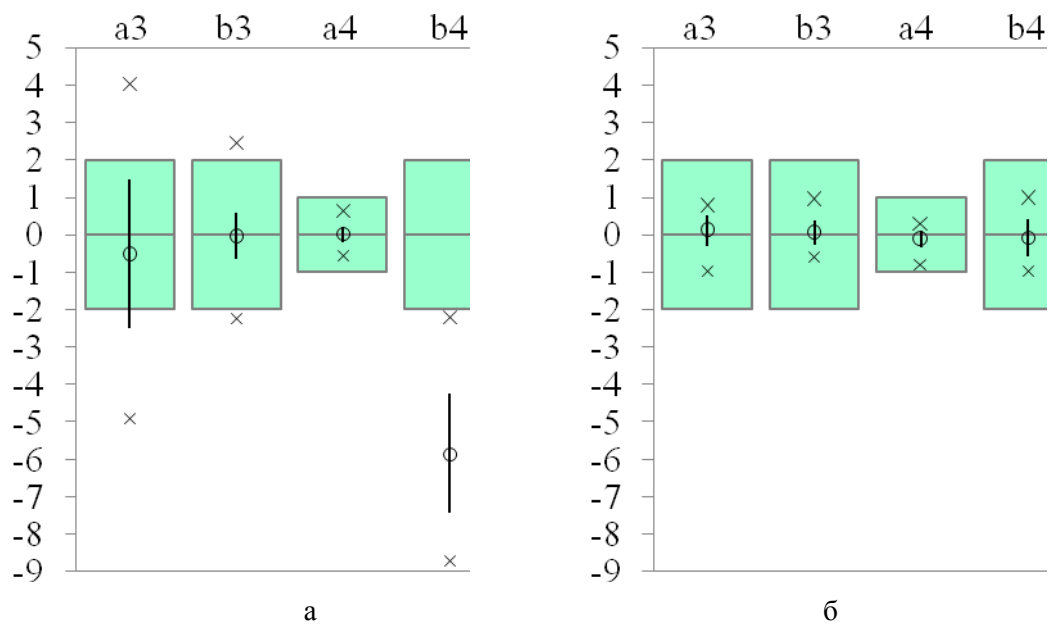


Рис. 9. Результаты измерения гармоник поля в единицах 10^{-4} относительно основной гармоники: а – предварительная сборка; б – после подстройки накладками на полюсах и межполюсными вставками

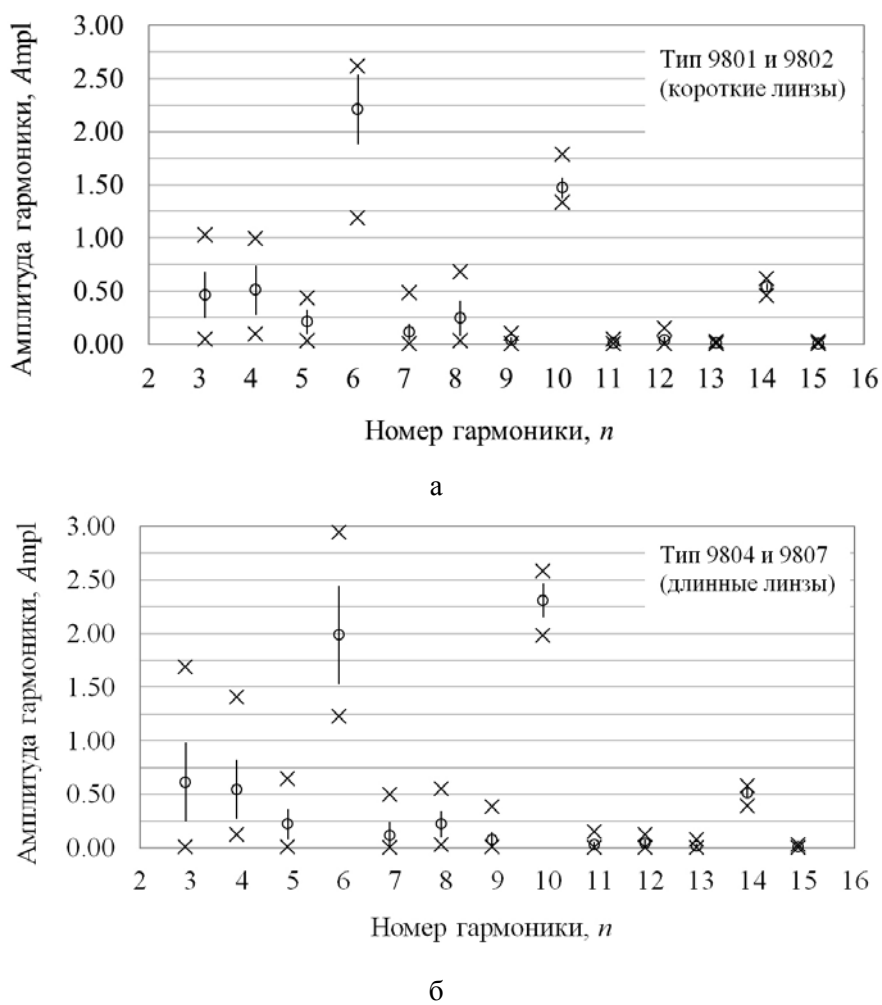


Рис. 10. Результаты измерения амплитуд гармоник в единицах 10^{-4} относительно основной гармоники: а – статистика по 60-ти коротким линзам; б – статистика по 60-ти длинным линзам

Таблица 5

Источники синхротронного излучения

Название источника	SLS	SOLEIL	DIAMOND	ALBA	NSLSII
Расположение	Швейцария	Франция	Англия	Испания	США
Год запуска	2000	2006	2007	2011	строится
Изготовитель квадруполей (количество квадруполей)	Россия, ИЯФ СО РАН (190)	Дания, DANFYSIK (160)	Англия, Tesla Engineering Ltd (254)	Россия, ИЯФ СО РАН (114)	Россия, ИЯФ СО РАН (120)
Радиус апертуры квадруполей, мм	30	33	37	30.5	33
Длина квадруполей, м	0.23/0.27/ 0.34/0.46	0.32/0.46	0.3/0.4/0.6	0.2/0.26/ 0.28/0.5	0.217/ 0.415
Источник данных	[5]	[6]	[7]	[8]	

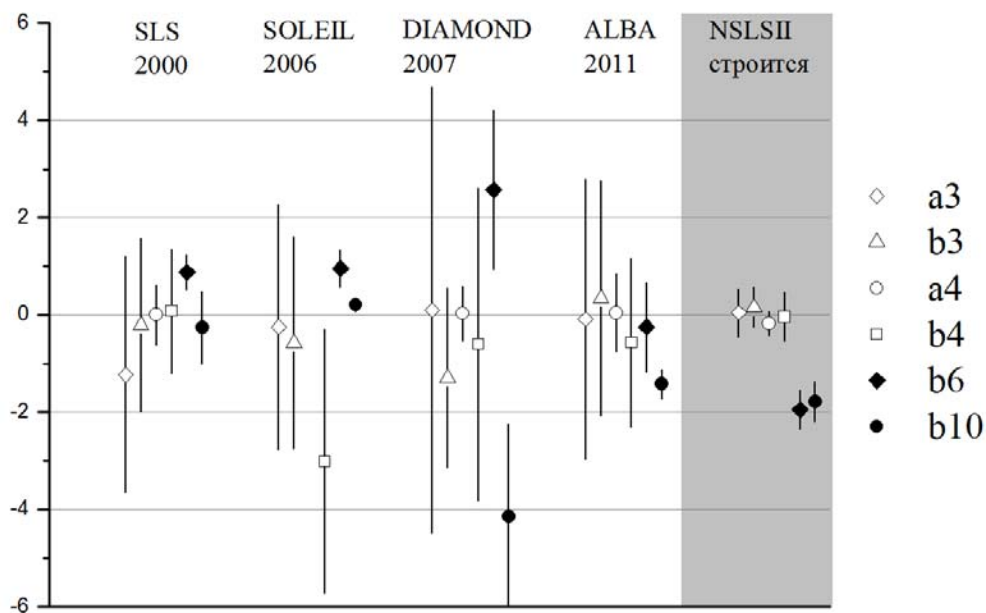


Рис. 11. Результаты измерения полей квадрупольных линз для современных источников синхротронного излучения (в единицах 10^{-4} от основной гармоники)

ние значения амплитуд по линзам, крестиком – максимальные и минимальные значения, вертикальной чертой – стандартное отклонение от среднего.

Качество полей квадруполей современных источников СИ

Для квадруполей нескольких современных источников синхротронного излучения (табл. 5) и квадруполей NSLSII, изготовленных по представленной технологии, на

рис. 11 приведено сравнение качества поля. Измерения для всех квадруполей пересчитаны на 75 % апертуры и усреднены по всем типам линз. В качестве погрешностей отложено одно стандартное отклонение от среднего.

Относительно большое среднее значение гармоник b6 и b10 квадруполей NSLSII обусловлено особенностями профиля полюса линз. Изначально профиль был рассчитан так, чтобы в центре линзы значения этих гармоник были нулевые. В таком случае,

чтобы скомпенсировать значительную величину b_6 , появляющуюся на краях линзы, необходимо делать глубокую фаску на торцах ярма или накладок. В то же время эффективно подавляющая гармонику b_6 фаска увеличивает гармонику b_{10} . Поэтому фаска углублялась до тех пор, пока гармоника b_6 не уменьшилась примерно до величины возрастающей гармоники b_{10} . И в итоге средняя величина этих гармоник оказалась около $-2 \cdot 10^{-4}$.

Заключение

Разработан эффективный способ коррекции наиболее значительных паразитных гармоник поля в квадрупольных линзах с помощью межполюсных вставок и накладок на полюса. Шириной вставок корректировались по одной компоненте секступольной и октупольной гармоник, смещением накладок – обе компоненты секступольной и одна компонента октупольной гармоники. Используя эти коррекции, удалось уменьшить наиболее проблемные гармоники в 3–5 раз. Кроме того, установленные вставки стабилизировали положение полюсов относительно друг друга на уровне нескольких микрон при разборке и последующей сборке линзы.

Предложенная технология при необходимости позволяет получать не только малые, но и наперед заданные значения секступольной и октупольной гармоник в квадрупольях.

В заключение авторы выражают признательность П. Д. Воблomu за создание стенда магнитных измерений, Е. С. Рувинскому за конструктивные замечания в процессе разработки технологии, Е. Б. Левичеву за помощь в подготовке статьи.

Список литературы

1. *Kramer S. L., Bengtsson J., Krinsky S. et al.* NSLS-II Design: A Novel Approach to Light Source Design // Proc. of APAC-2007. Indore, India. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/>
2. *Bryant P. J.* Basic Theory of Magnetic Measurements // Cern Accelerator School. 1992. Vol. 5. P. 52–69.
3. *Jain A. K.* Basic Theory of Magnets // Cern Accelerator School. 1998. Vol. 5. P. 1–21.
4. *Walckiers L.* The Harmonic-Coil Method // Cern Accelerator School. 1992. Vol. 5. P. 138–167.
5. *Antokhin E. I., Batrakov A. M., Churkin I. N. et al.* Multipoles of the SLS Storage Ring: Manufacturing and Magnetic Measurements // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2002. Vol. 12. P. 51–54.
6. *Brunelle P., Benabderrahmane C., Bertheaud P. et al.* Magnetic Measurements Results of the Dipoles, Quadrupoles and Sextupoles of the Soleil Storage Ring // Proc. of EPAC-2006. Edinburgh, Scotland. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/>
7. *Bailey C., Marks N., Goldie F., Leigh B.* Harmonic Measurement and Adjustment of Diamond Quadrupoles // Proc. of EPAC-2006. Edinburgh, Scotland. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/>
8. *Gurov S., Blinov M., Levichev A. et al.* ALBA Storage Ring Quadrupoles and Sextupoles Manufacturing and Measurements // Proc. of PAC-09. Vancouver, BC, Canada. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/>

Материал поступил в редколлегию 22.03.2012

P. N. Burdin, T. A. Devyataikina, E. S. Kazantseva, T. V. Rybitskaya
B. A. Skarbo, A. A. Starostenko, A. S. Tsyganov

IMPROVEMENT OF QUADRUPOLE MAGNETS FIELD QUALITY IN SERIAL PRODUCTION

Technology of production of quadrupole magnets with high quality fields is presented in the article. The technology was developed in Budker Institute of Nuclear Physics. It includes method of correction octupole and sextupole harmonic terms. Field quality measurements of ready magnets are presented.

Keywords: quadrupole magnets, harmonic terms, field quality measurements.