

На правах рукописи

СТЕШОВ Андрей Георгиевич

ЭЛЕМЕНТЫ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ «MLS»

01.04.20 - физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НОВОСИБИРСК – 2008

Работа выполнена в Институте ядерной физики имени Г.И.Будкера СО РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Чуркин Игорь Николаевич	–	кандидат физико-математических наук.
----------------------------	---	--------------------------------------

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Салимов Рустам Абельевич	–	доктор технических наук, профессор.
Сыресин Евгений Михайлович	–	доктор физ.-мат. наук, профессор.
ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:	–	Курчатовский центр синхротронного излучения и нанотехнологий РНЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2008 г.
в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.01
Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан «_____» _____ 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук

А.В. Бурдаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Синхротронное излучение (СИ) – электромагнитное излучение, испускаемое заряженными частицами, движущимися с релятивистскими скоростями по искривлённым в магнитном поле траекториям. Синхротронное излучение обладает рядом уникальных свойств, определяющих его большое практическое значение: непрерывный спектр излучения от инфракрасного до рентгеновского; малая угловая расходимость испускаемого излучения; линейная поляризация с электрическим вектором, параллельным плоскости орбиты; круговая поляризация выше и ниже плоскости орбиты; возможность вычисления всех свойств излучения; высокая яркость источника во всем диапазоне; чистота источника, т.к. испускание СИ происходит в сверхвысоком вакууме.

Благодаря этим уникальным свойствам, синхротронное излучение широко используется для исследований в атомной физике, материаловедении, химии, биологии и медицине.

Первыми источниками синхротронного излучения были установки, первоначально сооруженные для решения задач физики высоких энергий. Быстрый рост потребности в синхротронном излучении с большой интенсивностью привел к созданию специализированных источников СИ. В этих машинах используется жесткая фокусировка пучка, позволяющая получить малый эмиттанс и, соответственно, более высокую яркость излучения. Кроме этого, для получения большей интенсивности СИ или более монохроматического спектра излучения в специализированных источниках используются вигглеры и ондуляторы – магнитные периодические структуры, заставляющие пучок двигаться по траектории близкой к синусоидальной. Яркость СИ из подобных устройств в сотни раз выше яркости, обеспечиваемой поворотными магнитами.

Отличительными особенностями магнитной структуры специализированных источников СИ являются наличие длинных прямолинейных промежутков без фокусирующих элементов для установки вигглеров и ондуляторов (тип магнитной структуры DBA или TBA). Конструкция допускает вывод большого числа каналов для СИ.

С конца 90-х годов прошлого века до настоящего времени современные специализированные источники СИ были построены практически во всех крупных научных центрах в мире. ИЯФ принимал участие в создании многих из этих машин: «Сибирь» (Россия), BESSY-II (Германия), SLS (Швейцария), SAGA (Япония), SOLEIL (Франция), DIAMOND (Англия) и других.

В последние годы наметилось разделение строящихся источников СИ на две категории. К первой категории относятся источники СИ с рекордными параметрами излучения, что обеспечивается малым эмиттансом пучка (3 – 5 нмрад), высокой энергией электронов > 2 ГэВ, большим током пучка > 500 мА. В их магнитной структуре используются сверхпроводящие элементы, на кольце имеется большое число генераторов СИ с различными параметрами.

Ко второй категории относятся узкоспециализированные источники для конкретных технологических приложений, максимально оптимизированные с точки зрения пользователей конкретного диапазона СИ, имеющие компактные размеры и невысокую стоимость (относительно первой категории). Параметры таких источников могут быть несколько ниже, чем у источников первой категории, но требования на надежность, стабильность параметров, функциональность и технологичность в изготовлении для всех систем (включая магнитную) несколько выше.

Магнитные системы таких источников отличаются высокой компактностью и позволяют выводить большое число каналов СИ. Это приводит к тому, что при сохранении высоких требований на качество формируемых элементами магнитных полей, возникают жесткие требования к их конструкции (габаритные размеры, тип сердечника, число сегментов, процедура сборки/разборки и т.д.). Сроки строительства подобных технологических источников СИ обычно малы, около 3 лет от начала проектирования до начала работы для пользователей, поэтому процесс проектирования и изготовления отдельных систем, в том числе и магнитной, должен быть максимально оптимизирован.

Специализированный метрологический источник синхротронного излучения MLS (Metrology Light Source), начавший свою работу в 2007 году в Берлине, можно считать одним из первых таких узкоспециализированных технологических источников. MLS был построен Национальным центром метрологии Германии – Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), который использует СИ для метрологии и связанных с ней задач в науке и технологиях. Источник MLS предназначен для калибровки измерительного оборудования и источников излучения в спектральном диапазоне от терагерцового и инфракрасного до жесткого ультрафиолетового излучения.

Источник MLS состоит из микротрона на энергию 100 МэВ, используемого в качестве инжектора, и накопительного кольца на энергию электронов от 200 до 600 МэВ.

Магнитная система накопительного кольца состоит из 8 поворотных магнитов, 24 квадруполей, 24 секстиполей и 4 октуполей. Особенностью магнитной системы накопительного кольца MLS является ее компактность. Периметр накопительного кольца всего 48 м, магнитная структура DBA типа состоит из четырех суперпериодов, предусмотрено четыре прямолинейных промежутка: два по 6 м и два по 2,5 м. На первом этапе предполагается

вывод СИ только из 6 каналов, проектом предусмотрена возможность вывода до 15 каналов, поэтому конструкция всех элементов магнитной системы оптимизирована для реализации этой возможности. Конструкция магнитных элементов MLS позволяет установить вакуумную камеру длинными сегментами.

Большой опыт ИЯФ в изготовлении различных типов магнитов для источников СИ позволил максимально оптимизировать конструкции магнитов с точки зрения изготовления и сборки с высокими точностями. Несмотря на относительно невысокую энергию электронов, требования к магнитным параметрам элементов магнитной системы MLS очень высокие и не уступают параметрам магнитных элементов недавно построенных источников СИ (SLS, SAGA и др.).

Выполненное подробное 2- и 3-мерное моделирование магнитных параметров позволило сформулировать в полном объеме требования на механические параметры магнитов и оценить точности изготовления. Это позволило изготовить магниты без предварительного изготовления и измерения прототипов, что значительно ускорило выполнение работы.

Контроль механических параметров магнитов в процессе производства и сборки позволил обеспечить не только требуемые магнитные параметры, но и хорошую повторяемость параметров от магнита к магниту.

Выполненные на оборудовании, разработанном в ИЯФ, магнитные измерения подтвердили соответствие магнитных параметров требованиям проектной документации и хорошо совпали с расчетными параметрами магнитов, полученными в результате моделирования.

Актуальность представленной в диссертации работы обусловлена развитием технологических приложений СИ и востребованностью разработки компактных специализированных источников СИ, работающих в диапазоне от ИК до жесткого УФ излучения. Разработка полного набора магнитных элементов (поворотный магнит, квадрупольная, секступольная и октупольная линзы), сочетающих высокий уровень магнитных параметров с простотой и надежностью конструкции, технологичностью изготовления, обеспечивает ИЯФ лидирующее положение в данном сегменте укоротительной техники.

Работа проходила в тесном сотрудничестве специалистов ИЯФ и научно-исследовательского центра BESSY (Германия), а также Национального центра метрологии Германии (PTB) в 2004-2007 годах.

Цель работы

- Основываясь на опыте ИЯФ в изготовлении магнитных элементов для источников СИ, разработать конструкцию магнитных элементов, отвечающую всем требованиям Технического Задания (РТВ), обеспечивающую требуемые магнитные характеристики и оптимизированную с точки зрения изготовления.

- Выполнить 2- и 3-мерное моделирование магнитных полей, позволяющее определить оптимальные механические параметры элементов магнитной системы, и сформулировать требования к точностям изготовления и сборки магнитных элементов.
- Определить механические параметры сердечников магнитных элементов, контроль которых во время изготовления и сборки позволит обеспечить требуемую величину и идентичность магнитных параметров элементов. Выполнить анализ механических параметров магнитных элементов.
- Провести выборочное измерение магнитных параметров элементов на специализированном оборудовании, разработанном в ИЯФ, с целью подтверждения их соответствия требованиям Технического Задания и результатам магнитного моделирования.

Научная новизна

- Впервые в мировой практике был спроектирован и изготовлен С-образный поворотный 45° шихтованный магнит с зазором 50 мм и радиусом продольного изгиба сердечника ~ 1.5 м при длине сердечника ~ 1.1 м, для специализированного метрологического источника СИ. Относительная однородность магнитного поля в рабочей области была $2.5 \cdot 10^{-4}$ в диапазоне полей 0.2 – 1.3 Т. Была разработана оригинальная комбинированная технология изготовления сердечника магнита.
- Полный набор элементов магнитной системы (поворотный магнит, квадрупольная, секступольная и октупольная линзы) был изготовлен, основываясь на результатах двух- и трехмерного моделирования магнитных параметров, без предварительного изготовления и магнитных измерений прототипов магнитных элементов.
- Конструкция магнитных элементов не только удовлетворяла высоким требованиям на магнитные параметры, которые обусловлены метрологическим назначением источника СИ, но и учитывала особенности, связанные с компактностью накопительного кольца, совмещением функций магнитных элементов и необходимостью вывода большого числа каналов СИ. Кроме этого, магнитные элементы отличались высокой технологичностью производства.

Практическая значимость работы

В результате данной работы был спроектирован и изготовлен полный набор основных магнитных элементов компактного специализированного источника синхротронного излучения MLS: 8 поворотных магнитов, 24 квадрупольных, 24 секступольных и 4 октупольных. Высокое качество магнитных элементов и их полное соответствие требованиям Технического Задания позволило в короткие сроки собрать магнитную и вакуумную системы, и

запустить источник СИ. В середине 2007 года источник MLS был запущен, и с начала 2008 года работает в проектном режиме.

Полученные в работе результаты и наработки по моделированию, конструированию и измерению магнитных параметров имеют большое значение для создания магнитных систем компактных специализированных источников СИ.

Автор выносит на защиту следующие результаты проделанной работы:

1. Была разработана оптимальная с точки зрения магнитных параметров и технологичности производства конструкция всех основных элементов магнитной системы для первого в мире специализированного метрологического источника СИ.
2. Спроектирован и изготовлен уникальный поворотный 45° шихтованный магнит с сердечником С-типа, зазором 50 мм и радиусом продольного изгиба сердечника ~ 1.5 м при длине сердечника ~ 1.1 м, удовлетворяющий требованиям к метрологическому источнику СИ. Относительная однородность магнитного поля в рабочей области была $2.5 \cdot 10^{-4}$ в диапазоне полей 0.2 – 1.3 Т. Была разработана оригинальная комбинированная технология изготовления сердечника магнита.
3. Спроектирован и изготовлен полный набор мультипольных линз для специализированного метрологического источника СИ. Магнитные параметры данных магнитов соответствуют мировым стандартам для источников СИ 3-го поколения, при этом конструкция магнитов полностью удовлетворяет требованиям, характерным для метрологических источников СИ.
4. Отработана методика 2- и 3-мерного моделирования магнитных параметров с помощью программных продуктов MERMAID 2D, MERMAID 3D и ANSYS. Отработана методика измерения механических параметров магнитов в процессе изготовления, позволяющая осуществлять производство магнитных элементов без предварительного изготовления и магнитных измерений прототипов. Изучено влияние погрешности в изготовлении профиля полюсов магнитных элементов на их магнитные свойства.
5. Выполнены высокоточные измерения магнитных характеристик поворотных магнитов, квадрупольных, секступольных и октупольных линз. Подтверждено полное соответствие магнитных характеристик требованиям Технического Задания.
6. Проанализировано влияние конструктивных особенностей, разработанных в ИЯФ измерительных систем – системы измерения магнитных полей на основе датчиков Холла и измерительного стенда «Вращающаяся катушка» – на точность измерения магнитных параметров элементов магнитной системы MLS.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинаре в Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН (Новосибирск, РФ), на Российских и Международных научных конференциях: Xth European Particle Accelerator Conference (June 26-30, 2006, Edinburgh, Scotland), XVI International Synchrotron Radiation Conference (July 10-14, 2006, Novosibirsk), XXth Russian Conference on Charged Particle Accelerators (Sept.10-14, 2006, Novosibirsk, Russia), и др. Основные результаты работы представлены в 11 публикациях, в том числе, в 5 статьях в реферируемых научных журналах.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 42 наименований, изложена на 128 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков и 30 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении рассмотрены этапы развития специализированных источников СИ, особое внимание уделено эволюции магнитных систем источников. Описаны основные параметры и области применения Специализированного метрологического источника синхротронного излучения MLS. Приведены расчетные спектры СИ. Сформулированы основные цели диссертации и приведено краткое изложение содержания работы.

В Первой главе диссертации подробно рассмотрены назначение, конструкция и основные параметры элементов магнитной системы специализированного источника СИ: дипольных, квадрупольных, секступольных и октупольных магнитов. Приведены определения основных параметров, характеризующих магнитные свойства элементов, которые затем используются в тексте диссертации. Сформулированы требования к конструкции и магнитным характеристикам основных элементов магнитной системы современных специализированных источников СИ.

Описана схема и основные параметры магнитной системы накопительного кольца MLS. Описаны требования к конструкции и параметрам элементов магнитной системы, вызванные особенностями конструкции MLS: плотной компоновкой элементов магнитной системы, большим числом портов под каналы вывода СИ, сборкой вакуумной камеры длинными сегментами, равными по длине суперпериоду магнитной структуры.

Во Второй главе диссертации обосновывается выбор конструкции поворотного магнита MLS. Описываются методы и подходы, использованные при моделировании магнитных полей. Формулируются задачи 2- и 3-мерного моделирования магнитных полей. Приводятся и обсуждаются

результаты моделирования магнитных полей. На основании результатов моделирования формулируются требования к точности изготовления сердечников магнитов. Параметры поворотного магнита MLS приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Величина межполюсного зазора, мм	50
Радиус кривизны сердечника, мм	1528
Угол отклонения	45°
Длина сердечника по прямой, мм	1108
Диапазон рабочих магнитных полей, Т	0.21 – 1.31
Ток, А (В = 1.31 Т)	623
Размер рабочей области (гор.х верт.), мм	±30 × ±18
Однородность поля ΔВ/В (в рабочей области)	±2.5·10 ⁻⁴
Отклонение магнитной длины для магнитов внутри серии ΔL _{eff} /L _{eff}	10 ⁻³
Корректирующие катушки, % (от В)	1
Охлаждение	вода ΔР = 6 атм

Поперечное сечение сердечника имеет С-образную форму. Сердечник магнита — шихтованный с параллельными краями, толщина листов 0.5 мм, коэффициент упаковки не хуже 0.97, согласно требованию Технического Задания. Так как, при данной длине сердечника и угле поворота сагитта составляет 104 мм, было принято решение делать сердечник изогнутым — это позволило значительно сэкономить расход материала и уменьшить общий вес магнита.

2-мерное моделирование магнитных полей проводилось с помощью программы MERMAID 2D, разработанной в ИЯФ СО РАН, 3-мерное моделирование проводилось с помощью программного пакета ANSYS. В результате моделирования получены следующие результаты:

- Выбран оптимальный с точки зрения обеспечения однородности поля профиль поперечного сечения магнита.
- Проанализировано влияние отклонения формы профиля полюса на распределение магнитного поля в центральном сечении магнита.
- Уточнены параметры катушек поворотного магнита.
- Выбрана форма и размер краевых фасок на полюсах магнита.
- Проанализировано влияние шихтовки на магнитные параметры.

Основываясь на результатах моделирования, определен профиль пластины сердечника и предельно допустимое отклонение, на основании чего был изготовлен штамп. Кроме этого, сформулирован ряд требований к точности изготовления сердечника магнита в целом.

На основании опыта ИЯФ в изготовлении шихтованных сердечников, была предложена оригинальная комбинированная технология изготовления сердечников поворотных магнитов. Для изготовления сердечников использовалась электротехническая листовая сталь М940-50А (Thyssen Krupp Steel, Германия) толщиной 0.5 мм, с изолирующим покрытием двух типов: Stabolit 70 и Stabolit 20. Stabolit 70 – покрытие, позволяющее при определенном температурном и нагрузочном режиме склеивать пластины между собой, а Stabolit 20 – лак, обеспечивающий электроизоляцию и возможность сварки пластин. Из отштампованных пластин с покрытием Stabolit 70 склеивались торцевые пакеты толщиной 100 мм, затем в специальном стапеле из пластин с покрытием Stabolit 20 и торцевых пакетов формировался сердечник. Стапель обеспечивал сдавливание сердечника, что обеспечивало требуемый коэффициент упаковки. Форма сердечника фиксировалась стальными пластинами, привариваемыми сначала к торцевым пакетам сердечника, а затем по всей длине к торцам пластин и находящимися в напряженном состоянии. Таким образом, торцевые пакеты и соединяющие их пластины образовывали жесткий каркас, обеспечивающий механическую устойчивость сердечника.

В Третьей главе описан процесс производства поворотных магнитов, проанализированы результаты измерения механических параметров сердечников, приведены результаты электрических и гидравлических испытаний магнитов. Подробно описана методика измерения магнитных полей с помощью датчиков Холла и разработанное в ИЯФ для этих целей измерительное оборудование. Рассмотрены основные источники погрешности при измерениях данной системой. Приводятся результаты измерения магнитных параметров 8-ми поворотных магнитов, проводится анализ результатов измерений и их сравнение с результатами моделирования магнитных полей.

Поворотный магнит MLS в собранном состоянии представлен на Рис.1. Усредненные результаты измерения механических параметров сердечников поворотных магнитов в сравнении с заложенными точностями изготовления представлены в Таблице 2.

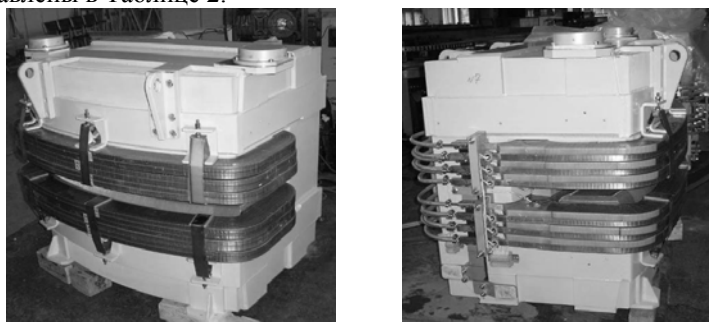


Рис. 1. Поворотный магнит MLS.

Таблица 2

	Ном. \pm допуск	<Изм.> $\pm \sigma$
Зазор диполя, мм	50.00 \pm 0.02	50.000 \pm 0.015
Длина сердечника по прямой, мм	1108.0 \pm 0.5	1108.27 \pm 0.42
Длина полюса между фасками, мм	1082.0 \pm 0.1	1081.93 \pm 0.11
Прогиб сердечника, мм	< 0.3	< 0.3
Коэфф. Упаковки	> 0.97	> 0.98

Измерения магнитных полей производились с помощью системы на основе датчиков Холла. Измерительной кареткой с 25 датчиками за два прохода снималась прямоугольная карта магнитного поля, из которой затем в результате математической обработки рассчитывались величины требуемых магнитных параметров. На Рис.2 приведены зависимости однородности магнитного поля от поперечной координаты для центрального сечения 8-ми поворотных магнитов (точки) и расчетная зависимость (линия) ($B = 1.3\text{T}$).

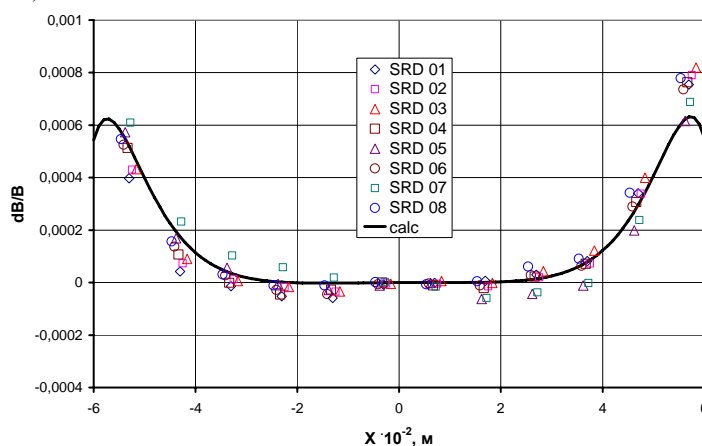


Рис. 2. Зависимости однородности магнитного поля от поперечной координаты для центрального сечения 8 поворотных магнитов (точки) и расчетная зависимость (линия) при $B = 1.3\text{ T}$.

Усредненные результаты измерения магнитных параметров в сравнении с результатами моделирования приведены в Таблице 3.

По результатам магнитных измерений сделаны следующие выводы:

- Магнитные параметры поворотных магнитов полностью удовлетворяют требованиям Технического Задания.
- Результаты магнитного моделирования хорошо согласуются с результатами измерений, что позволяет использовать подобное магнитное моделирование для определения требований на точности изготовления и сборки магнитов.

Таблица 3

	Моделирование		Измерения <Изм.> ± σ
	$K_{\text{уп}} = 0.97$	$K_{\text{уп}} = 1$	
Ток, А	623	623	621.7 ± 0.5
Поле в центре, Т	1.305	1.305	1.301 ± 0.002
Магнитная длина, мм	1180.4	1195.7	1192.2 ± 0.7
Диполь h, 1/м	0.665	0.657	0.654
Квадруполь k, 1/м ²	0.0293	0.0271	0.024 ± 0.001
Секступоль m, 1/м ³	-0.809	-0.762	-0.723 ± 0.019
Октуполь n, 1/м ⁴	9.95	16.48	10.4 ± 1.4

В Четвертой главе обосновывается выбор конструкции квадрупольных, секступольных и октупольных линз MLS. Подробно описаны особенности конструкции, позволяющие получить требуемые магнитные параметры. Представлено описание 2- и 3-мерного моделирования магнитных параметров мультипольных линз. Обсуждаются результаты моделирования, на основании которых формулируются требования на механические точности изготовления сердечников мультиполей. Параметры мультипольных линз MLS приведены в Таблице 4.

Таблица 4

	Квадруполь	Секступоль	Октуполь
Вписанный радиус, мм	35	38	43
Длина сердечника, мм	165	80	80
Размер фаски, мм	5.3 × 45°	6 × 45°	–
Магнитная сила S	13 Т/м	280 Т/м ²	2700 Т/м ³
$\Delta H/H_m$ ($R_{\text{ref}} = 30$ мм)	$\leq 10^{-3}$	$\leq 10^{-2}$	$\leq 10^{-2}$
Ток, А	92.7	34	6.1
Охлаждение	вода ΔP = 6 атм	вода ΔP = 6 атм	воздушное
Катушки коррекции	Град.	дип. верт/гор	нет

$\Delta H/H_m$ – отклонение поля m-го мультиполя на заданном радиусе (R_{ref}) от «идеального», рассчитывается из амплитуд гармоник Фурье разложения поля.

Конструкция мультипольных линз была выбрана, основываясь на опыте ИЯФ в производстве магнитов для источников СИ 3-го поколения (SLS и др.). Шихтованные сердечники линз выполнены по клеевой технологии из электротехнической стали толщиной 0.5 мм (M940-50A). Конструкция линз позволяет устанавливать вакуумную камеру длинными изогнутыми сегментами, равными по длине суперпериоду магнитной структуры.

Квадрупольные и секступольные линзы оснащены катушками коррекции. Корректирующие катушки квадрупольей используются для градиентной коррекции, а секступольей – для дипольной горизонтальной и вертикальной коррекций или для skew-квадрупольной коррекции.

2- и 3-мерное моделирование линз было выполнено в программах MERMAID 2D и MERMAID 3D, разработанных в ИЯФ. В результате моделирования получены следующие результаты:

- Выбран профиль поперечного сечения сердечников линз, обеспечивающий требуемые магнитные параметры.
- Изучено влияние отклонения формы профиля полюсов линз на распределение поля в рабочей области.
- Уточнены параметры и расположение катушек линз.
- Выбран размер краевых фасок на полюсах квадрупольной и секступольной линз.

Полученные в результате моделирования координаты профилей пластин для сердечников мультиполей и их максимально допустимое отклонение были использованы при изготовлении штампов. По результатам моделирования были сформулированы требования к точностям изготовления и сборки сердечников линз.

В Пятой главе рассмотрены основные этапы производства мультиполюльных линз, анализируются результаты механических измерений сердечников линз, приводятся результаты электрических и гидравлических тестовых испытаний. Подробно описана методика измерения магнитных параметров мультиполей методом радиальной вращающейся катушки, описан измерительный стенд «Вращающаяся катушка», разработанный в ИЯФ, проанализировано влияние конструктивных особенностей стенда на точность измерений. Приведены результаты измерения амплитуд Фурье разложения магнитного поля на радиусе 30 мм, и рассчитанные через них значения магнитной силы мультиполей и отклонения магнитного поля на заданном радиусе. С использованием результатов моделирования зависимости магнитных параметров от формы профиля полюса, показано, что измеренные магнитные параметры квадрупольа хорошо согласуются с оценками, выполненными по результатам измерения профиля пластин квадрупольа.

Квадрупольная и секступольная линзы MLS представлены на Рис.3.

Результаты механических измерений сердечников мультиполюльных линз приведены в Таблице 5 (D – диаметр апертуры мультиполя, S – минимальное расстояние между соседними полюсами, L – длина сердечника, L_{ϕ} – длина полюса между фасками).

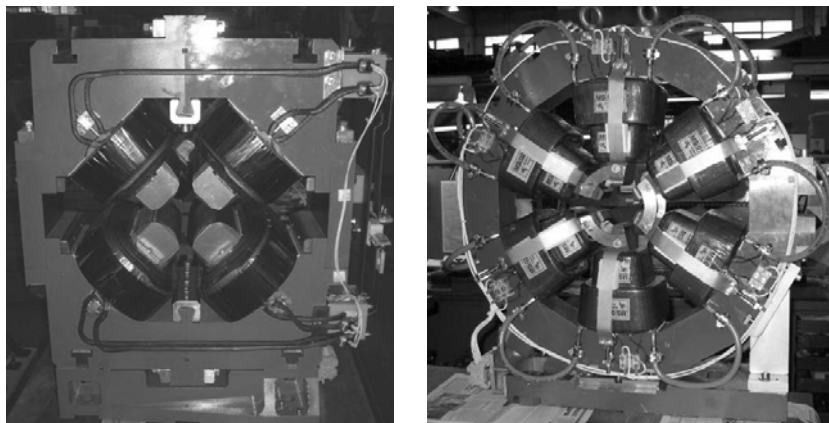


Рис. 3. Мультипольные линзы MLS: квадрупольная – слева; секступольная – справа.

Таблица 5

Парам	Квадруполь		Секступоль		Октуполь	
	Ном. ± доп.	<Изм.> ± σ	Ном. ± доп.	<Изм.> ± σ	Ном. ± доп.	<Изм.> ± σ
D, мм	70.00 ±0.02	70.023 ±0.014	76.00 ±0.03	75.98 ±0.02	86.00 ±0.03	86.000 ±0.005
S, мм	22.00 ±0.02	22.000 ±0.013	22.00 ±0.03	21.99 ±0.01	16.99 ±0.03	16.985 ±0.005
L, мм	165.0 ±0.4	165.08 ±0.18	80.00 ±0.25	79.97 ±0.20	80.0 ±0.4	80.09 ±0.14
L _ф , мм	154.40 ±0.08	154.46 ±0.02	68.00 ±0.06	68.05 ±0.01	–	–

По результатам магнитных измерений сделаны следующие выводы:

- Магнитные параметры квадрупольных, секступольных и октупольных линз полностью удовлетворяют требованиям Технического Задания.
- Результаты магнитного моделирования хорошо согласуются с результатами измерений, что позволяет, основываясь на результатах подобного моделирования, осуществлять окончательное конструирование и производство мультипольных линз.

Сравнение результатов магнитных измерений с результатами предварительного моделирования приведено в Таблице 6.

Таблица 6

Парам.	Квадруполь (m=2)		Секступоль (m=3)		Октуполь (m=4)	
	Изм.	Мод.	Изм.	Мод.	Изм.	Мод.
Ток, А	92.7	92.7	34	34	6.1	6.1
$S_m, T/M^{m-1}$	12.76	12.76	287.7	287.1	2791	2778
$\Delta H/H_m$	$8.7 \cdot 10^{-4}$	$3.6 \cdot 10^{-4}$	$4.8 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$6.3 \cdot 10^{-3}$	$3.4 \cdot 10^{-3}$
$L_{eff}, мм$	–	200.6	–	100.4	–	99.3
Точность	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$	$\pm 10^{-5}$	$\pm 1.5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 10^{-5}$	$\pm 7 \cdot 10^{-4}$	$\pm 10^{-5}$

В Заключение перечислены основные результаты работы, которые одновременно являются положениями, выносимыми на защиту.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] *P. Budz, M. Abo-Bark, K. Burkman, V. Duerr, J. Kolbe, J. Rahn and G. Wusterfeld; D. Kramer; I. Churkin, E. Rouvinskiy, E. Semenov, S. Sinyatkin, A. Steshov, R.M. Klein, G. Ulm.* The magnets of the Metrology Light Source in Berlin-Adlershof // Nuclear Instruments & Methods, A 575 (2007), p.42-45.
- [2] *A.M. Батраков, П.Д. Воблый, А.Г. Стешов, И.Н. Чуркин.* Измерение магнитных параметров мультиполей специализированного источника синхротронного излучения MLS // Приборы и техника эксперимента (ПТЭ), 1, 2008, стр.131-135.
- [3] *A.M. Batrakov, P.D. Vobly, A.G. Steshov, I.N. Churkin.* Measuring the magnetic parameters of the multipole magnets for the specialized source of synchrotron radiation MLS // *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, v.51, No. 1, p.119–123.
- [4] *P. Budz, M. Abo-Bakr, K. Burkman, V. Durr, J. Kolbe, D. Kramer, J. Rahn, G. Wustefeld, I. Churkin, E. Semenov, S.Sinyatkin, A. Steshov, E. Rouvinskiy, R. Klein, G. Ulm.* The magnets of the Metrology Light Source // Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, THPLS013, p.3296-3298.
- [5] *S. Belokrinskiy, P. Budz, N. Nefedov, A. Philipchenko, E. Rouvinski, E. Semenov, S.Sinyatkin, A. Steshov, I. Churkin.* Multipole Magnets for the Metrology Light Source (PTB) // Proceedings of RuPAC 2006, JACoW publication, p.295-297.
- [6] *P. Budz, - M. Abo-Bark, K. Burkman, V. Duerr, J. Kolbe, J. Rahn and G. Wusterfeld, D. Kramer, I. Churkin, E. Rouvinskiy, E. Semenov, S. Sinyatkin, A. Steshov, R.M. Klein, G. Ulm.* The magnets of the Metrology

Light Source in Berlin-Adlershof. // Digest Report of the XVI International Synchrotron Radiation Conference. July 10-14, 2006, Novosibirsk.

- [7] *S. Belokrinitskiy, P. Budz, N. Nefedov, A. Philipchenko, E. Rouvinski, E. Semenov, S. Sinyatkin, A. Steshov, I. Churkin.* Multipole Magnets for the Metrology Light Source (PTB) // XXth Russian Conference on Charged Particle Accelerators: Book of abstracts, Sept.10-14, 2006, Novosibirsk, Russia
- [8] *S. Belokrinitskiy, P. Budz, I. Churkin, A. Philipchenko, E. Rouvinski, L. Schegolev, E. Semenov, S. Sinyatkin, A. Steshov.* Bending Magnets for the Metrology Light Source (PTB) // XXth Russian Conference on Charged Particle Accelerators: Book of abstracts, Sept.10-14, 2006, Novosibirsk, Russia.
- [9] *I. Churkin, O. Kiselev, V. Korchuganov, A. Ogurtsov, A. Philipchenko, L. Schegolev, K. Schreiner, S. Sinyatkin, A. Steshov, V. Ushakov, M. Kuroda, Y. Tsuchida.* Bending Magnets for the SAGA Storage Ring // Nuclear Instruments & Methods, A 543 (2005) p.47-50.
- [10] *I. Churkin, O. Kiselev, V. Korchuganov, A. Ogurtsov, A. Philipchenko, L. Schegolev, K. Schreiner, S. Sinyatkin, A. Steshov, V. Ushakov, M. Kuroda, Y. Tsuchida.* Bending Magnets for the SAGA Storage Ring: Manufacturing and Magnetic Measurements // Proceedings of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, p.1738-1740.
- [11] *L. Rivkin, Ch. Vollenweider, J.A. Zichy, I. Churkin, A. Steshov, V. Korchuganov and et al.* Precise measurements of magnetic field parameters of the multipoles for the SLS storage ring // Nuclear Instruments & Methodes. A 470 (2001) 11-17.