

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Синяткина Сергея Викторовича
«МАГНИТНАЯ СИСТЕМА БУСТЕРНОГО СИНХРОТРОНА С ЭНЕРГИЕЙ 3 ГЭВ
ДЛЯ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ NSLS-II»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная
техника в диссертационный совет Д 003.016.01 на базе ФГБУН Институт
ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

Актуальность темы

Диссертационная работа С.В. биения оптических функций Синяткина
посвящена разработке бустерного (промежуточного) синхротрона в проекте
модернизации источника синхротронного излучения NSLS – II (Брукхейвен.
США). Бустерный синхротрон ускоряет электроны от 170 МэВ до 3.15 ГэВ
со средним током пучка 20 мА и частотой повторения импульсов инжекции
до 2 Гц. Особенностью синхротрона является его относительно малый (по
сравнению с другими бустерами, например, с синхротроном для источника
СИ Diamond, GB) горизонтальный эмиттанс пучка равный 37 нм-рад. Работа
по созданию бустерного синхротрона для BNL началась в ИЯФ СО РАН в
мае 2010 г. и была завершена в рекордно короткие сроки - за три года.
Высокое качество оборудования, явившееся следствием точных
электромагнитных расчетов и измерений, проведенных автором
диссертационной работы, и совершенных производственных технологий,
позволили в короткие сроки запустить синхротрон и получить проектные
параметры.

Цель работы

Целью диссертационной работы явились: разработка оптической
структуры кольца бустерного синхротрона, исследование динамики пучка,

оценка допусков на магнитные элементы, моделирование магнитных полей;,, проектирование, оптимизация и производство ключевых магнитных элементов бустерного синхротрона.

Новые научные задачи в физике высоких энергий, в областях с применением синхротронного излучения и др. требуют постоянного совершенствования существующих и разработки новых ускорительных комплексов на основе передовых ускорительных технологий.

В диссертации, с учетом успешного опыта создания работающих в настоящее время ускорительных комплексов, изучены и отражены основные технологические проблемы при создании бустерного синхротрона. Несомненно, новые разработки, представленные в диссертации востребованы будут применяться в будущем для построения магнитных структур циклических ускорителей, например, при модернизации комплекса СИ в Курчатовском институте.

Научная новизна работы

С помощью детального моделирования карты магнитных полей на разных токах возбуждения оптимизирована форма полюсов дипольных магнитов.

Автором, для достижения требуемых точностей интегралов поля, разработаны оригинальные способы коррекции профиля пластин шихтовки и торцевых фасок, впервые предложенные и примененные при создании поворотных магнитов для накопителя SAGA (Япония) и MLS (Германия). Результаты и наработки, полученные в ходе работы над созданием дипольных магнитов для бустерного синхротрона, используются при проектировании магнитных элементов для современных ускорительных машин.

Разработаны технологические методы, обеспечивающие высокую точность изготовления основных магнитных элементов.

Впервые предложена и реализована методика использования современного высокоточного геодезического оборудования для привязки магнитных осей элементов к геодезическим знакам на магнитопроводе при проведении магнитных измерений.

Реализация разработанных методов позволила в кратчайшие сроки осуществить успешный запуск синхротрона и вывести его на надежный уровень эксплуатации.

Таким образом, внесен серьезный вклад в создание нового уникального инжекционного комплекса, обеспечивающего получение пучков частиц с требуемыми параметрами и проведение экспериментов с их использованием.

Достоверность полученных результатов и правильность сформулированных в диссертации принципов подтверждаются успешной работой магнито-оптической структуры бустера, изготовленной согласно точным расчетам и последующему проектированию магнито-вакуумной системы, функционированием всех разработанных систем магнитных измерений, контроля и коррекции равновесной орбиты.

Практическая значимость и полнота проведенных исследований не вызывает сомнений. В России эта диссертация является наиболее полным изложением технологических проблем создания магнито-оптических систем ускорительных комплексов и их решений.

Диссертация С.В.Синяtkина состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений. Работа изложена на 130 страницах и содержит 38 наименований библиографии.

Общая характеристика и содержание работы

Во введении дано описание развития конструкций основных магнитных элементов ускорителей, начиная от магнитов с совмещенными

функциями и слабой фокусировкой, через магниты с разделенными функциями в структурах с жесткой фокусировкой и, наконец, к современным оптическим структурам источников СИ, включающим сверхплотную упаковку магнитами, одновременно выполняющими функции поворота, фокусировки и коррекции хроматических aberrаций.

В настоящее время нарастающее использование магнитов ускорителей с совмещенными функциями стало возможным, прежде всего, благодаря высокому достигнутому уровню современных промышленных технологий (САПР и ЧПУ) и программного обеспечения, позволяющего с высокой точностью вычислять 3D конфигурации магнитного поля. При помощи современных координатно-измерительных комплексов производят высокоточное пространственное позиционирование магнитов ускорителя или датчиков измерения магнитного поля в самих магнитах. Контроль положения орбиты в кольце осуществляется с использованием датчиков положения пучка, обладающих субмикронной точностью, а также прецизионных корректирующих магнитов и мощных программных алгоритмов коррекции орбиты.

Автор показывает, что все источники СИ следующего, четвертого поколения будут использовать магниты с совмещенными функциями, поскольку это помогает получить натуральный эмиттанс пучка существенно меньше 1 нм-рад при приемлемом размере накопительного кольца.

В первой главе проведен подробный анализ магнитной структуры и оптики синхротрона NSLS II (Брукхэйвен, США).

Компактность ячейки и ускорителя достигается применением дипольных магнитов с совмещенными функциями. Включение квадрупольных компонент в поворотные магниты является достаточно обычным явлением, в то время, как интеграция компонент секступольного поля встречается редко.

Отдельно исследованы факторы, задающие требования на параметры и точность изготовления магнитных элементов. К таким факторам, прежде всего, относятся чувствительность оптики ускорителя к ошибкам пространственного позиционирования магнитов, влияние качества магнитного поля на искажение оптических функций, параметров пучка, уменьшение динамической апертуры и т.д.

В конце главы приводится сводная таблица требований к магнитам с совмещенными функциями BF и BD, определивших особенности их проектирования, изготовления, измерений и оптимизации.

Во второй главе обосновывается выбор конструкции поворотных магнитов BF и BD. Приводятся и обсуждаются результаты 2-х и 3-х мерного моделирования магнитных полей. На основании результатов моделирования формулируются требования к точности изготовления сердечников магнитов.

В третьей главе описан процесс производства поворотных магнитов, проанализированы результаты измерения механических параметров сердечников и их влияние на характеристики магнитов.

В четвертой главе приводится методика прецизионного измерения магнитного поля с помощью датчиков Холла и описывается разработанное в ИЯФ для этих целей измерительное оборудование. Для учета влияния наведенных токов в стенках вакуумной камеры на параметры диполей был разработан и создан стенд для измерений импульсных магнитных полей. Описаны результаты измерения магнитных параметров 32 дефокусирующих и 28 фокусирующих поворотных магнитов, проводится анализ результатов измерений, и их сравнение с результатами моделирования магнитных полей. На основе результатов магнитных измерений была проведена коррекция выставки дипольных магнитов с учетом минимизации искажения орбиты пучка и бieniaия оптических функций из-за отклонения параметров дипольных

магнитов от требуемых значений. Создана уточненная (реалистичная) модель магнитной структуры, учитывающая изменения параметров магнитов в течение ускорения пучка. На основе этой модели была выполнена коррекция бетатронных частот и остаточного хроматизма кольца в процессе ускорения, определены необходимые зависимости задаваемых в магниты токов от энергии пучка (таблицы «режимов» для ускорения), позволившие получить минимальные потери интенсивности при подъеме энергии.

Магнитные измерения обеспечили достаточную точность для описания модели кольца и позволили сделать вывод о качестве производства магнитов. В целом точность изготовления дипольных магнитов с учетом сделанных дополнительных коррекций отвечает предъявленным требованиям.

В пятой главе представлены основные результаты по запуску бустерного синхротрона для источника NSLS-II. Выполнено сравнение измеренных с помощью пучка параметров кольца с ожидаемыми значениями, полученными из моделирования ошибок магнитных элементов кольца. Достигнутое высокое качество магнитных элементов и их соответствие требованиям Технического Задания позволили в короткие сроки собрать магнитную систему кольца, инжектировать пучок и получить проектные параметры пучка в синхротроне-бустере. В настоящее время бустер стабильно работает в стандартном цикле ускорения при проектном токе пучка 30 мА.

На защиту вынесены следующие положения:

1. Рассчитана оптическая модель бустерного синхротрона с малым эмиттансом, определены допуски на качество магнитных элементов кольца, проведена оценка влияния вихревых токов в вакуумной камере на параметры пучка.
2. Рассчитаны, спроектированы и изготовлены уникальные поворотные магниты с шихтованным сердечником и с совмещенными функциями,

включающими в себя градиентную и секступольную компоненты поля, удовлетворяющие всем требованиям Технического Задания и обеспечивающие проектные параметры пучка. Относительная однородность магнитного поля за вычетом номинальных градиентной и секступольной компонент магнитного поля в области ± 2 см была лучше, чем $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ в диапазоне полей от 0.08 Т до 1.13 Т для диполей BD и от 0.03 Т до 0.46 Т для диполей BF.

3. Разработана оригинальная технология изготовления сердечника магнита, обеспечивающая требуемые допуски.
4. Разработана технология изготовления торцевых фасок сложной формы, позволяющая корректировать как основные, так и высшие мультипольные компоненты поля.
5. Отработан метод коррекции параметров диполей на основе результатов магнитных измерений посредством изменения межполюсного зазора и нахождения новой магнитной оси.
6. Выработана методика использования современного высокоточного геодезического оборудования для привязки магнитной оси элементов к геодезическим знакам на магнитопроводе.
7. Отработана методика двух- и трехмерного моделирования магнитных параметров. В процессе моделирования изучено влияние погрешности изготовления профиля полюсов магнитных элементов и механической деформации из-за магнитных сил на параметры магнитных элементов.
8. Исследовано влияние погрешностей изготовления измерительного оборудования и ошибок измерительной электроники на точность определения магнитного поля. Эти исследования позволили добиться высокой точности измерений.
9. Выполнены высокоточные измерения магнитных характеристик поворотных магнитов с использованием геодезической системы. Подтверждено полное соответствие магнитных характеристик требованиям Технического Задания.

10. Сделан расчет влияния вакуумной камеры на эффективные параметры диполей при работе в импульсном режиме. Проведены экспериментальные исследования поведения импульсного магнитного поля, хорошо согласующиеся с результатами расчета.

Работа проходила в тесном сотрудничестве специалистов ИЯФ и Брукхейвенской национальной лаборатории США в 2010-2014 годах. По результатам диссертационной работы опубликовано 15 статей, в том числе 4 статьи в периодических изданиях, входящих в рекомендуемый перечень ВАК, 11 статей в трудах международных конференций, 4 статьи в трудах Всероссийских конференций.

В заключении автор в общем виде перечисляет основные результаты работы.

Автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК, написан четким языком, в достаточной мере отражает структуру диссертации и содержит краткое изложение всех ее ключевых моментов. Он дает ясное представление о сути и значимости проделанной работы, и о роли автора в ее выполнении.

В качестве общих замечаний к диссертационной работе необходимо отметить следующее:

1. Глава 1, Неточные выражения, в которых сравниваются величины, имеющие разные размерности:

- стр.13. «В случае накопления *фазовый* размер накопленного и инжектируемого пучка полностью занимает акцептанс вакуумной камеры синхротрона», «от расчетной траектории в поворотном магните, а не от оси пучка»;

- стр.19. «Для эффективной инжекции и ускорения пучка в бустере динамическая апертура должна быть не меньше требуемого акцептанса». «Такое качество поля обеспечивает приемлемую динамическую апертуру и допустимые биения оптических функций $e_x = 37$ нм-рад».

2. Глава 2, стр.39, В Таблице 2.2. надо вместо 1086 Вт писать 10860 Вт.

Стр.40, 42 и далее. Некорректное высказывание: «Основные задачи двумерного моделирования поля – это создание «правильного» профиля полюса магнита, обеспечивающего требуемую однородность поля в заданной области во всем диапазоне энергии пучка...». Правильно: «Для диполей с совмещенными функциями необходимо обеспечивать не «однородность поля», а постоянство нормированных на значение поля на орбите (энергию) распределений интегральных мультиполных компонент магнитного поля в зависимости от поперечных координат».

Стр.50, Рис.2.13. В тексте нет объяснения отличий графиков на левом и правом рисунках.

Стр.52. В тексте отсутствует описания графиков на стр.53 и принятых обозначений.

В Главе 4, раздел 4.4, для облегчения понимания очень плотного изложения результатов расчетов магнитных полей и результатов магнитных измерений, было бы естественно ввести разбиение текста с соответствующими графиками на отдельные подразделы с соответствующими названиями.

Нечеткие определения и опечатки:

1. На стр.53 указано, что «Кривые на Рис.2.16 и Рис.2.17 учитываются в процессе ускорения частиц». ???!!! Правильно писать: «Изменение эффективной длины магнита от энергии бустера, показанные на Рис.2.16 и Рис.2.17, учитывается...»

2. «Распределение интегральных компонент магнитного поля показано на Рис.2.17». Правильно: «Зависимости интегральных мультипольных составляющих магнитного поля от энергии бустера...».

3. Стр.54. Неточное описание: «...неприемлемые **магнитные нарушения**»; «В *профиле* пластины предусмотрены **канавки** для установки **дюбелей**»; «В верхней части пластины имеется **точная канавка** с отклонением **поверхностей** от базовых не более 15 $\mu\text{м}$ ». В отдельной пластине нет ни канавок, ни мест для установки дюбелей (может быть, имелось в виду – штифтов?).

4. Дублирование в описании пластин на стр. 54 и стр.57.

5. Глава 4, стр.80. Грамматическая описка в названии. Таблица 4.4: «Требования измерительную систему с датчиками Холла».

Раздел 4.3 на стр.83, ошибка в записи формулы (4.2) для относительной точности измерения интеграла поля $\sigma_{I/I}$. Действительно, дисперсия произведения статистически независимых величин (магнитного поля в точке и дискретного шага вдоль продольной направляющей каретки), при их известных дисперсиях, определяется через сумму квадратов и число испытаний...

6. Чрезмерное количество положений (10) , выносящихся к защите. Надо отметить, что вполне достаточно пяти пунктов, но более четко сформулированных.

Выводы и заключения

Представленная к защите работа прошла серьезную **апробацию**. Результаты, полученные в ходе ее выполнения, были опубликованы в статьях в реферируемых научных журналах и многократно докладывались на международных и российских конференциях. Факт запуска и успешной работы бустерного синхротрона на расчетных параметрах течение 7-ми лет сам по себе является наилучшей аprobацией данной работы.

Диссертация С.В. Синяткина на высоком уровне демонстрирует знание ускорительной физики. В качестве примера достаточно перечислить: проведенные тонкие расчеты и исследование магнито-оптической структуры бустерного синхротрона, факторов, задающих требования на параметры и точность изготовления магнитных элементов (Глава 1); проведение качественных импульсных высокоточных магнитных измерений и соответствующие расчеты прецизионных поправок к компонентам магнитного поля, вносимых вихревыми токами в вакуумной камере, демонстрирующие филигранное владение автором культурой и техникой магнитных измерений и магнитных расчетов (Глава 4).

Результаты запуска бустера подтвердили высокое качество расчетов, моделирования, проектирования, изготовления и измерения магнитных элементов ускорителя. Полученные в работе результаты и наработки по конструированию, моделированию, измерению параметров магнитов и производству магнитных элементов имеют большое значение для создания магнитных систем современных ускорительных комплексов, коллайдеров и источников синхротронного излучения.

Сделанные в отзыве замечания не снижают значимости и высокого уровня выполненной автором работы и не умаляют положений и выводов, вынесенных автором на защиту.

Все, изложенное выше, позволяет утверждать, что диссертационная работа С.В. Синяткина является законченным исследованием и полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации к кандидатским диссертациям по специальности «01.04.20 — Физика пучков и ускорительная техника» и критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней».

Автор диссертации, С.В. Синяткин, несомненно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Доктор физ.-мат. наук, заместитель
руководителя Научного комплекса
по перспективным ускорительным
технологиям

Телефон +79151305813,
+79104436285, 84951967257

E-mail: vnkorchuganov@mail.ru
НИЦ «Курчатовский институт»



В.Н. Корчуганов

Подпись В.Н. Корчуганова заверена

Заместитель директора - главный

учёный секретарь НИЦ

«Курчатовский институт»

А.В. Николаенко

01 СЕН 2020

