

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента,  
доктора технических наук Рояка Михаила Эммануиловича  
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. Синяткина посвящена разработке бустерного синхротрона для источника синхротронного излучения NSLS – II (Брукхейвен, США), ускоряющего 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 37 нм-рад. Работа по созданию бустерного синхротрона для BNL началась в ИЯФ СО РАН в мае 2010 г. и была завершена за три года. Сжатые сроки выполнения проекта и высокое качество оборудования позволили в короткие сроки запустить синхротрон и получить проектные параметры.

**Цель** диссертационной работы - разработка оптической структуры кольца бустерного синхротрона для источника синхротронного излучения NSLS II (Брукхейвенская национальная лаборатория, США), исследование динамики пучка, оценка допусков на магнитные элементы, моделирование, проектирование и производство дипольных магнитных элементов с совмещенными функциями синхротрона.

**Личный вклад автора** в получение научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Автор провел расчет оптики и динамики синхротрона-бустера для источника СИ NSLS-II, выполнил анализ влияния различных погрешностей на оптику кольца. определил параметры магнитных элементов и допуски на точность их изготовления. Проведено моделирование вихревых токов в вакуумной камере, оценено влияние на динамику пучка и разработан способ коррекции данного эффекта, определены требования к точности магнитных измерений. Разработана методика получения параметров дипольных магнитов на основе карт магнитных полей. Выполнен анализ достоверности магнитных измерений и геодезической привязки магнитной оси элементов к геодезическим знакам. Ав-

тор принимал непосредственное участие в магнитном моделировании, разработке и изготовлении с требуемым качеством поля основных магнитных элементов бустера (28 поворотных магнитов BF типа и 32 магнитных элементов BD типа). Автором был проведен анализ результатов магнитных измерений, разработан метод коррекции параметров дипольных магнитов, определена выставка магнитных элементов на кольце. Создана модель оптической структуры кольца на основе магнитных измерений и проведенных экспериментов с пучком, учитывающая изменения параметров магнитов в течение ускорения пучка. Автор внес существенный вклад при формировании режима работы бустера, принимал непосредственное участие в запуске бустерного синхротрона и получении его номинальных параметров.

**Научная новизна** определяется тем, что при выполнении диссертационной работы рассчитаны, спроектированы и изготовлены уникальные поворотные магниты с шихтованным сердечником и с совмещенными функциями, включающими в себя градиентную и секступольную компоненты поля, обеспечивающие проектные параметры пучка. Так же автором предложен способ определения допусков на качество и выставку магнитных элементов кольца, разработана оригинальная технология изготовления сердечника и торцевых фасок сложной формы магнита, обеспечивающая требуемые допуски. Продемонстрирован способ коррекции параметров диполей на основе результатов магнитных измерений посредством изменения межполюсного зазора и нахождения новой магнитной оси.

Впервые предложена и реализована методика использования современного высокоточного геодезического оборудования для привязки магнитной оси элементов к геодезическим знакам на магнитопроводе при проведении магнитных измерений. Рассчитано и подтверждено влияние вихревых токов в вакуумной камере и её заземления на эффективные характеристики дипольных магнитов. Подтверждено полное согласие между выработанными техническими требованиями на качество магнитных элементов, качеством производства, результатами контроля и параметрами работающего бустерного кольца.

### **Научная и практическая ценность**

Выработанные методы моделирования магнитных полей на основе корректного использования известных программных комплексов позволяют проектировать дипольные магниты с высокой степенью достоверности и помогают учесть ключевые эффекты при работе синхротронного кольца. Разработанная технология изготовления сердечника и торцевых фасок сложной формы магнитов позволяет изготовить дипольные магниты с требуемыми магнитными характеристиками. Разработанная методика и инструментарий для магнитных измерений с использованием геодезической системы обеспечивают высокоточные измерения магнитных характеристик поворотных магнитов. Полученное 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. Результаты запуска бустера подтвердили высокое качество расчетов, моделирования, проектирования, изготовления и измерения магнитных элементов ускорителя. В настоящее время бустер стабильно работает в стандартном цикле ускорения при проектном токе пучка.

Полученные в рамках диссертационного исследования результаты и наработки по конструированию, моделированию, измерению магнитных параметров магнитов и производству магнитных элементов имеют большое значение для создания магнитных систем современных ускорительных комплексов, коллайдеров и источников синхротронного излучения.

**Достоверность результатов** проведенной работы подтверждается успешным запуском бустера, что так же подтверждает высокое качество расчетов, моделирования, проектирования, изготовления и измерения магнитных элементов ускорителя. В настоящее время бустер стабильно работает в стандартном цикле ускорения при проектном токе пучка.

### **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений и списка литературы из 38 наименований, изложена на 130 страницах машинописного текста, включает 85 иллюстраций и 21 таблицу.

**Во введении** приведено краткое изложение тенденции развития современных ускорителей заряженных частиц, определены проблемы создания оптических структур, обоснована актуальность темы диссертации, определена цель, сформулированы задачи, отмечена научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен подробный анализ магнитной структуры и оптики синхротрона NSLS II. 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.

**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.

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 как о сути и значимости проделанной работы, так и о роли автора в ее выполнении.

К небольшим недостаткам работы можно отнести следующее.

1. На стр.31 указано, что зависимость 1.14 найдена расчетным путем. Однако никаких сведений об этом пути не приводится.
2. На стр.34 в ссылке на рис.1.10 указано, что нарушена симметрия поля относительно оси Y из-за вихревых токов. Данное утверждение не совсем понятно, (возможно, потому что на рисунке 1.10 отсутствуют обозначения осей) поскольку в полностью симметричной области при симметричном возбуждающем поле вихревые токи вроде бы тоже должны быть симметричны.
3. В таблице 2.2 на стр.39 в строке «Ср.мощность/магнит» максимальное значение в правом столбце почему-то меньше остальных (не максимальных) значений. Видимо, это какая-то опечатка.
4. Практически во всех главах, где описывается математическое моделирование, никак не указано, ни какая постановка использовалась при расчетах в программных комплексах (для векторного или скалярного потенциала), ни каким образом оценивалась

погрешность результатов численного моделирования (была ли она ниже погрешности измерений).

Указанные замечания никак не снижают несомненных достоинств работы. Диссертация представляет собой законченное исследование, направленное на решение актуальной задачи. По теме диссертационной работы диссертантом в соавторстве было опубликовано 16 статей, в том числе 4 статьи в периодических изданиях, входящих в рекомендуемый перечень ВАК.

Материалы диссертации были представлены на международных конференциях по ускорителям частиц: PAC'13 (г. Пасадена, США, 2013), IPAC'13 (г. Шанхай, Китай, 2013), IPAC'14 (г. Дрезден, Германия, 2014), IPAC'15 (г. Ричмонд, США, 2015), "Synchrotron and Free Electron Laser Radiation: Generation and Application" (г. Новосибирск, Россия, 2016). Достоверность диссертационной работы подтверждена опытом эксплуатации бустерного синхротрона для источника синхротронного излучения NSLS – II.

Диссертация Синяткина Сергея Викторовича «Магнитная система бустерного синхротрона с энергией 3 ГэВ для источника синхротронного излучения NSLS – II» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем требованиям и критериям ВАК, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук, а её автор, Синяткин Сергей Викторович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры прикладной математики  
Новосибирского государственного  
технического университета

*Ю.Ю.Рояк*

*Рояк*

М.Э. Рояк

Адрес: 630073, Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20  
Телефон: +79139294869, +7-383-346-27-76  
E-mail: royak@corp.nstu.ru

Подпись профессора кафедры ПМт НГТУ  
М.Э. Рояка заверяю *Ю.Ю.Рояк*



*Ю.Ю.Рояк*