

На правах рукописи

**ФОМИН Евгений Александрович**

**ИНЖЕКТОР КОМПЛЕКСА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО  
ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
В НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» -  
ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ  
С ДВОЙНЫМ ПРОХОЖДЕНИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА**

01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук

Автор:



Москва 2015

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт»

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:**

**КОРЧУГАНОВ** доктор физико-математических наук,  
Владимир Николаевич заместитель директора Курчатовского центра  
синхротронно-нейтронных исследований по  
ускорительно-накопительному комплексу  
Курчатовского НБИКС-Центра  
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:**

**КРАВЧУК** доктор технических наук, директор Института  
Леонид Владимирович ядерных исследований РАН, г. Троицк

**КОСТРОМИН** кандидат физико-математических наук,  
Сергей Александрович начальник отдела сверхпроводящих магнитов и  
технологий лаборатории физики высоких  
энергий Объединенного института ядерных  
исследований, г. Дубна

**ВЕДУЩАЯ** Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
**ОРГАНИЗАЦИЯ:** СО РАН, г. Новосибирск

Защита состоится « 28 » октября 2015 г. в 14-30 на заседании  
диссертационного совета Д **212.130.01** на базе НИЯУ МИФИ.

Адрес: 115409, г. Москва, Каширское шоссе 31, тел. (495) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке НИЯУ МИФИ и  
на сайте: <http://ods.mephi.ru>.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

И.о. ученого секретаря  
диссертационного  
совета



С.П. Масленников

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Улучшение потребительских качеств пучков синхротронного излучения связано с увеличением их интенсивности и яркости. Для этой цели в последние годы для накопительного кольца Сибирь-2 Курчатовского источника синхротронного излучения были разработаны новые магнито-оптические структуры с малыми эмиттансами. Эти структуры обладают большим натуральным хроматизмом, и, как следствие, меньшей динамической апертурой. Кроме того, для расширения спектрального диапазона синхротронного излучения, в прямолинейные промежутки накопителя планируется постановка многополюсных вигглеров – вставных устройств с малым пространственным периодом изменения магнитного поля и малыми вертикальными апертурами.

Существующая в настоящий момент каскадная схема инъекции в накопительное кольцо Сибирь-2 является стандартной для источников синхротронного излучения 2-го поколения:

- ускорение электронов в линейном ускорителе до энергии 80 МэВ, их инъекция с частотой 1 Гц и накопление в бустерном синхротроне Сибирь-1;
- подъем энергии электронного пучка в Сибири-1 до 450 МэВ и перепуск его в накопитель Сибирь-2;
- накопление электронного пучка в Сибири-2 до необходимого уровня, подъем энергии до номинальной величины 2,5 ГэВ и последующая работа на пользователей синхротронного излучения;
- окончание работы на пользователей синхротронного излучения, сброс электронного пучка в накопителе Сибирь-2 и повторение всего цикла инъекции.

При сохранении существующей схемы инжекции, требующей изменения в 5,5 раз магнитных полей в магнитных элементах в режимах подъема и опускания энергии, переход накопителя Сибирь-2 на новые оптические структуры или постройка вигглеров с малыми апертурами приведет к существенному уменьшению эффективности инжекции в накопитель. Действительно, при сохранении большого фазового объема выпускаемого пучка из накопителя Сибирь-1 и уменьшении поперечных акцептансов структуры Сибири-2 процесс накопления пучка станет большой проблемой. Накопление пучка электронов усложнится еще и из-за роста инкрементов многосгустковых неустойчивостей на низкой энергии инжекции, связанных с уменьшением геометрических расстояний до стенок вакуумной камеры в устройствах вставок.

На современных ускорительных комплексах – источниках синхротронного излучения 3-его поколения, для решения подобных проблем, в основном применяется схема инжекции на полной энергии, т.н. top-up energy injection scheme, с помощью которой поддерживается с высокой точностью величина тока электронов и высокая долговременная стабильность орбиты электронных сгустков в источнике синхротронного излучения.

В Курчатовском источнике синхротронного излучения эти проблемы предлагается одновременно решить с помощью установки бустерного синхротрона, работающего в интервале энергий от 80 МэВ до 2500 МэВ, то есть от энергии электронов существующего линейного ускорителя – фор-инжектора до максимальной энергии электронов накопителя – источника синхротронного излучения Сибирь-2.

Однако, большой диапазон изменения энергии бустера ( $E_{\text{макс}} / E_{\text{мин}} \sim 30$ ) означает, что инжекция в бустерный синхротрон будет осуществляться на слишком низких уровнях магнитных полей в магнито-оптической структуре бустера ( $\sim 0,04$  Т на орбите). При этом возникают серьезные трудности

(остаточное намагничивание, стабилизация малых токов возбуждения магнитных элементов, большие времена радиационного затухания бетатронных и синхротронных колебаний), из-за которых существенно уменьшается эффективность работы бустера, ужесточаются требования к конструкциям элементов магнитной системы бустера и к параметрам источников питания для магнитных элементов.

Решить часть этих проблем возможно с помощью увеличения энергии электронов пучка, инжектируемого в бустерный синхротрон. Так, при увеличении энергии инжекции в бустерный синхротрон в 2 раза:

- существенно уменьшается влияние остаточных неоднородных полей в магнитной системе бустера при инжекции;
- уменьшаются времена затухания бетатронных и синхротронных колебаний в 8 раз, эффективно подавляя действие резонансов на самом низком уровне энергии частиц, тем самым уменьшается вероятность частичных сбросов тока пучка;
- в 2 раза увеличиваются минимальные токи источников питания элементов магнитной системы бустерного синхротрона, тем самым облегчается задача стабилизации токов источников питания с требуемой точностью.

Не лишним будет отметить и заметное уменьшение стоимости бустера в случае увеличения энергии инжекции электронов в бустер с 80 МэВ до 160 МэВ.

Актуальность решения названных проблем очевидна. В результате, существенно возрастает надежность и стабильность работы бустерного синхротрона, как инжектора. Появляется возможность, как непрерывной работы, так и дальнейшей модернизации специализированного источника синхротронного излучения – накопителя электронов Сибирь-2 в сторону источника синхротронного излучения 3-его поколения.

## **Цель работы**

Целью настоящей работы является разработка детальной функциональной схемы фор-инжектора, которая позволила бы увеличить энергию электронного пучка на выходе имеющегося линейного ускорителя в 2 раза, не уменьшив, при этом, ток и не увеличив эмиттанс электронного пучка.

Основными задачами диссертации являются:

1. Разработка новой функциональной схемы линейного ускорителя.
2. Разработка математической модели высокопереванской электронной пушки с кольцевым катодом.
3. Разработка магнито-оптической структуры магнитного зеркала, обеспечивающей разворот электронного пучка с большим энергетическим разбросом (7 %) без потерь, а также с сохранением его пространственных и угловых размеров.
4. Расчет динамики пучка в ускоряющей структуре линейного ускорителя и в магнитном зеркале.

Таким образом, проделанные в настоящей работе расчеты охватывают все этапы движения электронного пучка в инжекторе.

## **Личный вклад автора**

Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, являются определяющими. Автор исследовал и оптимизировал функциональную схему линейного ускорителя с ахроматическим и изохронным разворотом электронного пучка, позволяющую увеличить энергию электронов в 2 раза, разработал нелинейную оптическую структуру магнитного зеркала и математическую модель сильноточной высокопереванской электронной пушки с кольцевым катодом. Также, автором лично были реализованы все используемые программы для моделирования динамики пучка в магнитном зеркале и линейном

ускорителе, проведены все расчеты и выполнено моделирование, результаты которого изложены в диссертации.

### **Научная новизна**

1. Исследована и оптимизирована функциональная схема установки, состоящей из линейного ускорителя электронов и магнито-оптической структуры (обеспечивающей ахроматический и изохронный разворот релятивистского электронного пучка) и позволяющей увеличить энергию электронов на выходе линейного ускорителя в 2 раза по сравнению со стандартным режимом работы без потери интенсивности.

2. Разработана оригинальная нелинейная магнито-оптическая структура (магнитное зеркало), позволяющая развернуть релятивистский электронный пучок с большим энергетическим разбросом (до 7 %) без потерь и с минимальным возмущением поперечного и продольного фазовых объемов и инжектировать его в линейный ускоритель для повторного прохождения в ускоряющей фазе.

3. Разработан алгоритм математической оптимизации параметров линейных и нелинейных магнито-оптических структур каналов транспортировки заряженных частиц с большим энергетическим разбросом и при наличии ошибок в распределении магнитных полей и выставке магнитных элементов.

4. Разработана математическая модель электронно-оптической структуры высокоперевансной ( $0,5 \text{ мкА/В}^{3/2}$ ) сильноточной электронной пушки с кольцевым катодом, которая обеспечивает беспрепятственное прохождение пучка (сквозь кольцевой катод) после двукратного прохождения ускоряющей структуры линейного ускорителя.

5. Создана математическая модель линейного ускорителя – фор-инжектора специализированного источника синхротронного излучения в НИЦ «Курчатовский институт».

## **Практическая ценность**

Для специализированного источника синхротронного излучения Сибирь-2 разработана новая схема работы линейного ускорителя с магнитным зеркалом, позволяющая получить на выходе инжектора электронный пучок с удвоенной энергией 160 МэВ без потери интенсивности в рабочем интервале энергий (7 %) электронов. С целью увеличения энергии выходного пучка и сохранения компактности инжекционной части подобная схема может применяться в существующих или проектируемых линейных ускорителях, работающих в режиме стоячей волны при минимальных финансовых затратах. Кроме того, регулируя фазу влета электронных сгустков при повторном прохождении ускоряющей структуры линейного ускорителя, можно проводить эксперименты (например, спектрометрические – ядерно-физические, излучение каналированных электронов в периодических структурах, диагностические) на выведенных пучках электронов с плавно изменяемой энергией в диапазоне от 20 МэВ до 160 МэВ.

Создано программное обеспечение, позволяющее моделировать линейную и нелинейную динамику пучка с учетом наличия ошибок в распределении магнитных полей и выставки магнитных элементов, проводить оптимизацию магнито-оптических структур каналов транспортировки пучка с большим энергетическим разбросом. Также, имеется возможность моделировать динамику пучка в линейных ускоряющих структурах с учетом пространственного заряда.

Разработанный программный модуль оптимизации, основанный на методе дифференциальной эволюции, позволяет оптимизировать одновременно несколько параметров магнито-оптических структур каналов транспортировки заряженных частиц (например, силы секступольных и квадрупольных линз или корректоров, их местоположение и др.), используя различные целевые функции (например, распределение оптических



функций, положение равновесной орбиты, распределение пучка в фазовом пространстве и др.). Алгоритм оптимизации позволяет быстро найти решение задачи даже при отсутствии начального приближения, а количество оптимизируемых параметров слабо влияет на скорость оптимизации.

При моделировании динамики пучка для представления магнитных элементов используется стандартное кусочно-постоянное приближение, либо 2D или 3D распределение магнитных полей, полученное из результатов математического моделирования или магнитных измерений.

### **Основные результаты, выносимые на защиту**

1. Результаты исследования и оптимизации функциональной схемы установки на базе линейного ускорителя и магнито-оптической структуры, позволяющей создать компактный источник релятивистских электронов с перестройкой выходной энергии от 0,25 до 2-х (по сравнению с номинальной энергией).

2. Результаты расчетов магнито-оптической структуры (магнитного зеркала), обеспечивающей разворот электронного пучка с большим энергетическим разбросом (до 7 %) с минимальным возмущением поперечного и продольного фазовых объемов.

3. Результаты моделирования нелинейной продольной и поперечной динамики электронного пучка в линейном ускорителе – инжекторе специализированного источника синхротронного излучения Сибирь-2.

4. Алгоритм математической оптимизации параметров линейных и нелинейных магнито-оптических структур каналов транспортировки заряженных частиц, обеспечивающий:

- быструю оптимизацию нескольких параметров магнито-оптических структур с использованием различных целевых функций (распределение пучка в фазовом пространстве, оптических функций,

положение орбиты и др.) без использования специальных начальных условий;

- учет большого энергетического разброса в пучке;
- использование произвольных распределений магнитных полей, учет наличия ошибок в распределении магнитных полей, учет ошибок выставки магнитных элементов.

5. Математическая модель электронно-оптической системы электронной пушки с кольцевым катодом, формирующей сильноточный электронный пучок с большим первеансом ( $0,5 \text{ мкА/В}^{3/2}$ ).

### **Апробация работы и публикации**

Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах, проводимых в НИЦ «Курчатовский институт». Результаты работы легли в основу «Аван-проекта технического перевооружения специализированного источника синхротронного излучения в НИЦ КИ» (2007 г.). Положения диссертации представлялись на российских и международных конференциях, совещаниях и семинарах, в частности:

- XXI всероссийская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC (Звенигород, 2008);
- Научная сессия МИФИ (Москва, 2008);
- XXII всероссийская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC (Протвино, 2010);
- Joint US-CERN-Japan-Russia School course on Synchrotron Radiation & Free Electron Lasers (Эриче, Италия, 2011);
- 20<sup>th</sup> International Workshop on Beam Dynamics and Optimization (Санкт-Петербург, 2014).

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них две в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК РФ. Одна работа

проиндексирована в Web of Science и Scopus, 7 работ проиндексированы в международной базе данных Scopus.

### **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Общий объем диссертации 142 страницы, включая 67 рисунков и 8 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во Введении** обсуждаются современные тенденции развития ускорителей заряженных частиц и актуальность темы диссертации. Приведено описание специализированного источника синхротронного излучения «Сибирь» в НИЦ «Курчатовский институт», описана возможность улучшения потребительских свойств источника, возникающие при этом проблемы и возможные пути их решения. Кратко описана схема модернизации инжектора, цель этой модернизации и получаемые от этого преимущества. В конце сформулированы цели и задачи диссертации, изложена практическая ценность работы и приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрена функциональная схема действующего инжектора, описаны основные характеристики электронной пушки и ускоряющей структуры линейного ускорителя.

Отличительной особенностью используемого линейного ускорителя является то, что он работает в импульсном режиме на стоячей волне. Работа ускорителя в таком режиме позволяет осуществлять ускорение электронного пучка как при прохождении ускоряющей структуры в прямом направлении, так и в обратном. Ускоряющая структура выполнена в виде бипериодической цепочки связанных резонаторов и обладает сильной

резонансной связью между соседними ячейками, что в целом представляет собой один резонансный объем с высокой добротностью. Ускорение электронного пучка осуществляется за счет энергии, накопленной в структуре. В процессе ускорения пучок производит просадку ускоряющего поля, которая соответствует съему запасенной энергии в ускоряющей структуре до  $\sim 10\%$  от первоначальной величины.

Предложена новая функциональная схема инжектора, позволяющая увеличить энергию электронного пучка на выходе инжектора в 2 раза. Увеличение энергии пучка можно осуществить, если после прохождения ускоряющей структуры электронный пучок развернуть на  $180^\circ$  и инжектировать его в линейный ускоритель для повторного прохождения (см. Рис.1).

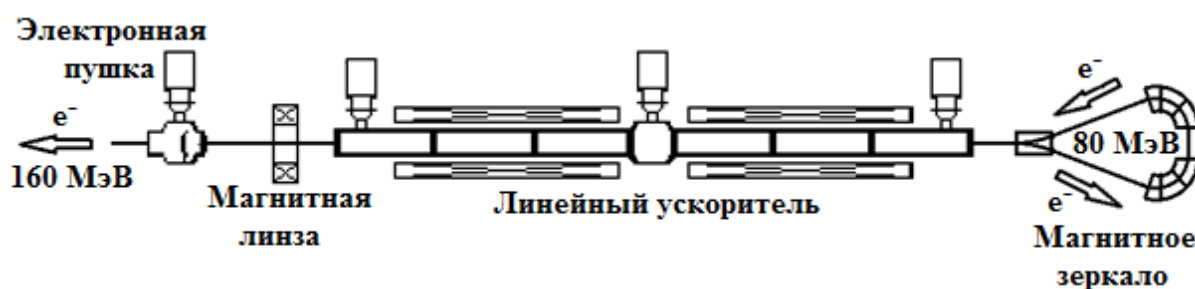


Рисунок 1. Функциональная схема линейного ускорителя, работающего в режиме двойного ускорения электронного пучка.

В конце главы изложены основные достоинства новой функциональной схемы и требования к ней. Рассматриваются, так же, вопросы, связанные с моделированием электромагнитных полей в ускоряющей структуре линейного ускорителя.

**Во второй главе** рассматриваются вопросы, связанные с разработкой математической модели сильноточной высокопереванской электронной пушки с кольцевым катодом, которая является источником электронов в модернизированном инжекторе. Новая электронная пушка по своим параметрам (ток 3 – 4 А, длительность импульса тока 5,5 – 18 нс, энергия

электронов  $\sim 40$  кэВ, первеанс  $\sim 0,5$  мкА/ $V^{3/2}$ ) должна быть, по крайней мере, не хуже пушки, действующей в настоящее время на комплексе, но обеспечивающей прохождение сквозь нее электронного пучка без потерь интенсивности после двукратного прохождения в линейном ускорителе. По результатам проделанного моделирования даны предложения относительно конструкции электронной пушки с кольцевым катодом, удовлетворяющей указанным требованиям.

**Третья глава** посвящена основному элементу в новой функциональной схеме фор-инжектора – магнитному зеркалу, обеспечивающему разворот электронного пучка на  $180^\circ$ . Для осуществления качественного разворота релятивистского электронного пучка с большим энергетическим разбросом (до 7%) без потери интенсивности при инжекции в линейный ускоритель, магнитное зеркало должно обеспечивать одновременно ахроматический и изохронный разворот с сохранением пространственных и угловых размеров пучка.

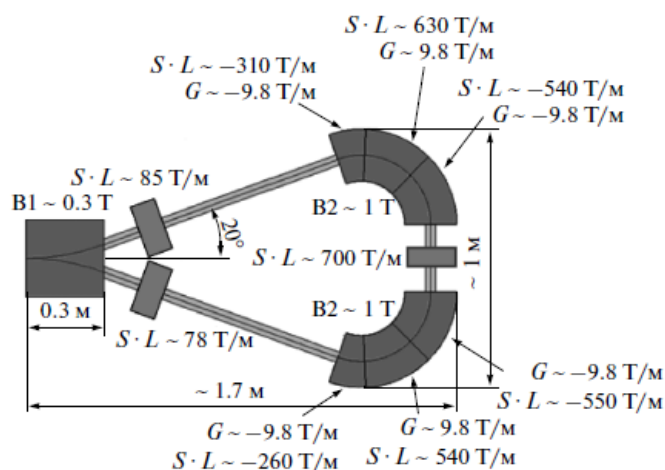


Рисунок 2. Полная магнито-оптическая структура магнитного зеркала.

Представлен базовый вариант линейной зеркально-симметричной магнито-оптической структуры, которая в линейном приближении удовлетворяет всем перечисленным требованиям. На Рис.2 представлена полная структура магнитного зеркала, которая отличается от базовой только

наличием секступольных полей. Основными элементами в этой оптической структуре являются два  $110^0$  поворотных магнита с совмещенными функциями. Наиболее важным фокусирующим свойством этих магнитов является достижение на их длине смены знака дисперсионной функции, что, в свою очередь, позволило на их основе создать компактный ахроматический и изохронный разворот.

Кроме перечисленных свойств, при помощи прецизионного перемещения вдоль оси линейного ускорителя всей магнито-вакуумной конструкции зеркала, заложена возможность контроля фазы влета в линейный ускоритель при обратном проходе электронных сгустков. Это позволяет регулировать энергию электронов на выходе линейного ускорителя от начального значения  $\sim 20$  МэВ до максимального значения 160 МэВ.

**В четвертой главе** приводятся результаты моделирования динамики электронного пучка в линейном ускорителе с учетом влияния пространственного заряда при первом и втором проходах, а также динамики пучка в магнитном зеркале. Рассмотрено влияние пространственного заряда на динамику пучка в линейном ускорителе. Предложена нелинейная магнито-оптическая структура магнитного зеркала, обеспечивающая разворот пучка с требуемым энергетическим разбросом (7 % – определяется энергетическим разбросом в электронном пучке на выходе линейного ускорителя) с минимальными искажениями размеров и формы электронного пучка в фазовом пространстве. За ее основу была взята линейная структура, полученная в предыдущей главе, но добавлены секступольные компоненты магнитного поля в  $110^0$  поворотные магниты и введены три сосредоточенные секступольные линзы (см. Рис.2). Численные значения для всех секступольных полей были получены в результате применения алгоритма оптимизации, основанного на методе дифференциальной эволюции, где в качестве целевой функции являлось получение

электронного пучка с энергетическим разбросом 7 % на выходе магнитного зеркала с минимально возможными искажениями в фазовом пространстве. В конце главы сделана оценка влияния эффекта встречи движущихся навстречу друг другу электронных сгустков находящихся в начале и в конце цуга в магнитном зеркале.

**В Заключении** сформулированы основные результаты работы.

**В Приложении 1** приводится описание действующей на ускорительно-накопительном комплексе «Сибирь» электронной пушки и результаты расчета некоторых ее параметров.

**В Приложении 2** приводится описание метода дифференциальной эволюции, который был использован при реализации программного модуля многомерной оптимизации параметров магнито-оптических структур каналов транспортировки заряженных частиц.

### **Основные результаты диссертационной работы**

1. Исследована и оптимизирована функциональная схема инжектора, позволяющая увеличить энергию электронов на выходе инжектора в 2 раза по сравнению с номинальным значением. Новая функциональная схема инжектора предполагает создание:

- магнито-оптической системы, т.н. магнитного зеркала, устанавливаемого на выходном конце линейного ускорителя для разворота и согласования параметров электронного пучка для повторного прохождения ускоряющей структуры линейного ускорителя в обратном направлении;
- нового источника электронов – высокопервечанской сильноточной электронной пушки с кольцевым катодом.

2. Разработана нелинейная магнито-оптическая структура магнитного зеркала, позволяющая развернуть на  $180^0$  релятивистский электронный пучок с большим энергетическим разбросом (7 %) без потерь. Отметим, что

вследствие наложенного требования на компактность магнитного зеркала, полученная магнито-оптическая структура обеспечивает хорошее сохранение пространственных и угловых размеров электронного пучка при относительно малых отклонениях от равновесного значения (до 1 %). Для обеспечения эффективной инжекции в структуру линейного ускорителя частиц, развернутых для повторного прохождения, найдено не тривиальное распределение магнитных полей в основных поворотных магнитах магнитного зеркала. При этом имеющиеся малые искажения формы распределения частиц с большим энергетическим разбросом (до 7 %) в поперечном фазовом пространстве на выходе магнитного зеркала не влияют на эффективность разворота.

3. Выполнено моделирование нелинейной динамики электронного пучка в линейном ускорителе – инжекторе специализированного источника синхротронного излучения Сибирь-2.

4. Выполнено моделирование нелинейной динамики релятивистского электронного пучка с большим энергетическим разбросом (7 %) в магнито-оптической структуре магнитного зеркала.

5. Разработан алгоритм математической оптимизации параметров магнито-оптических структур и создано соответствующее программное обеспечение, позволяющее моделировать линейную и нелинейную динамику электронного пучка, проводить оптимизацию магнито-оптических структур каналов транспортировки пучка с большим энергетическим разбросом. Для получения траекторий электронов в оптических структурах могут использоваться как линейные, так и нелинейные уравнения движения, имеется возможность учитывать ошибки в распределении магнитных полей и выставке магнитных элементов. Для представления магнитных элементов может использоваться стандартное кусочно-постоянное приближение, 2D или 3D распределение магнитных полей, полученное из результатов математического моделирования или магнитных измерений. Модуль



оптимизации позволяет осуществлять быструю оптимизацию нескольких параметров магнито-оптических структур каналов транспортировки пучка заряженных частиц с использованием различных целевых функций (например, распределение оптических функций, положение равновесной орбиты, распределение пучка в фазовом пространстве и др.) без использования специальных начальных условий.

6. Разработана математическая модель электронно-оптической системы высокоперевансной ( $\sim 0.5 \text{ мкА/В}^{3/2}$ ) электронной пушки с кольцевым катодом с энергией электронов 40 кэВ и током  $\sim 4 \text{ А}$ .

**Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах:**

1. А.В. Аношин, В.Н. Корчуганов, Е.А. Фомин, Модернизация линейного ускорителя - инжектора специализированного источника синхротронного излучения "Сибирь" в РНЦ Курчатовский институт. // Сборник трудов научной сессии МИФИ-2008, том 5, стр. 28-30.
2. A. Anoshin, E. Fomin, V. Korchuganov et al., Modernization and Development of Kurchatov Center of Synchrotron Radiation and Nanotechnology. // Proceedings of RuPAC 2008, Zvenigorod, Russia, pp. 197-200.
3. A. Anoshin, E. Fomin, V. Korchuganov et al., A New Injection System for Kurchatov Source of SR. // Proceedings of RuPAC 2008, Zvenigorod, Russia, pp. 238-240.
4. A. Anoshin, E. Fomin, V. Korchuganov, S. Tomin, Electron Beam Dynamics in LINAC of Kurchatov Source of Synchrotron Radiation with Energy Doubling. // Proceedings of RuPAC 2008, Zvenigorod, Russia, pp. 396-398.
5. V. Korchuganov, A. Anoshin, E. Fomin et al., Kurchatov Synchrotron Radiation Source Facilities Modernization. // Proceedings of RuPAC 2010, Protvino, Russia, pp. 136-140.

6. E. Fomin, V. Korchuganov, Nonlinear Electron Beam Dynamics with Large Energy Spread in the Magnetic Mirror. // Proceedings of RuPAC 2010, Protvino, Russia, pp. 212-214.
7. E. Fomin, V. Korchuganov, Electron Beam Dynamics with Space Charge in Linear Accelerator. // Proceedings of RuPAC 2010, Protvino, Russia, pp. 215-217.
8. В.Н. Корчуганов, Е.А. Фомин и др., Аван-проект технического перевооружения специализированного источника синхротронного излучения в РНЦ КИ. Научно-техническая часть. Линейный ускоритель. // Тех. Проект РНЦ КИ, 2007, стр. 1-31.
9. В.Н. Корчуганов, Е.А. Фомин, Новая функциональная схема линейного ускорителя - инжектора источника синхротронного излучения "Сибирь". // Атомная энергия, 2013 г., том 114, номер 5, стр. 292-295.
10. Ye. Fomin, V. Korchuganov, Differential Evolution Algorithm for Charge Particle Beam Transfer Line Optic Optimization. // Proceedings of IVESC-ICSE-ICSTPEA-BDO'2014, Saint-Petersburg, Russia, pp. 56-57.
11. В.Н. Корчуганов, Е.А. Фомин, Магнитное зеркало для модернизированного линейного ускорителя - инжектора источника синхротронного излучения в НИЦ "Курчатовский институт". // Ядерная физика и инжиниринг, 2014г., том 5, №7-8, стр. 630-637.