

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физико-технический институт (ФТИ)
Специальность Физика атомного ядра и частиц
Кафедра Прикладная физика (ПФ)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
ИЗМЕРЕНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОВОРОТНЫХ МАГНИТОВ

УДК 621.384.633.013.001.24:004.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2Б	Сутыгина Яна Николаевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник кафедры ПФ ФТИ ТПУ	Шкитов Дмитрий Андреевич	к.ф.-м. н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Тухватулина Лилия Равильевна	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ПФ ФТИ ТПУ	Гоголева Татьяна Сергеевна	к.ф.-м. н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПФ ФТИ ТПУ	Вагнер Александр Рудольфович	к.ф.-м. н.		

Министерство образования и науки Российской Федерации
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования**
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физико-технический институт
 Направление Ядерные физика и технологии
 Кафедра Прикладная физика

УТВЕРЖДАЮ
 Зав. кафедрой ПФ ФТИ

_____ А.Р. Вагнер
 (Дата) (Подпись)

ЗАДАНИЕ
на выполнение бакалаврской работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А2Б	Сутыгиной Яне Николаевне

Тема работы:

Измерение и численное моделирование магнитного поля поворотных магнитов	
Утверждена приказом директора ФТИ	от 16.02.2016 №1237/С

Дата сдачи студентом выполненной работы	15.06.16
--	----------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Измеритель магнитной индукции Ш1-8, трёхмерный магнитостатический код Radia для моделирования магнитного поля, пакет символьных вычислений Wolfram Mathematica.
Перечень подлежащих к исследованию, проектированию и разработке вопросов	Обзор литературных источников по исследуемой тематике; выбор методов исследования; измерение написание численного кода; проведение моделирования; анализ полученных результатов; экономическая часть бакалаврской работы (Расчет себестоимости НИОКР); социальная ответственность.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент, к. фил. наук Тухватулина Л.Р.
Социальная ответственность	Ассистент каф. ПФ, к. ф.-м. н. Гоголева Т.С.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.03.2016
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник кафедры ПФ ФТИ ТПУ	Шкитов Д.А.	к.ф.-м. н.		01.03.2016

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2Б	Сутыгина Я.Н.		01.03.2016

Министерство образования и науки Российской Федерации
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
 «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физико-технический институт
 Направление Ядерные физика и технологии
 Кафедра Прикладная физика
 Период выполнения весенний семестр 2016 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН

выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.06.16
--	----------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
8.03.15	Составление и утверждение технического задания	5
4.04.15	Подбор и изучение материалов по теме	10
1.05.15	Выбор направления исследования	5
30.05.15	Разработка численного кода и проведение моделирования	40
9.06.15	Анализ и описание результатов	30
15.06.16	Подготовка к защите ВКР	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник кафедры ПФ ФТИ ТПУ	Шкитов Д.А.	к.ф. - м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПФ	Вагнер А.Р.	к.ф. - м.н.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А2Б	Сутыгиной Яне Николаевне

Институт	ФТИ	Кафедра	Прикладная Физика
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Физика атомного ядра и частиц

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<p>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</p> <p>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</p> <p>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</p>	<p><i>Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах</i></p>
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</p> <p>2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований</p> <p>3. Планирование и формирование бюджета научных исследований</p>	<p>1. Потенциальные потребители результатов исследования</p> <p>2. Анализ конкурентных технических решений</p> <p>1. Структура работ в рамках научного исследования</p> <p>2. Определение трудоемкости выполнения работ</p> <p>3. Разработка графика проведения научного исследования</p> <p>4. Бюджет научно – технического исследования (НТИ)</p> <p>4.1. Расчет материальных затрат НТИ</p> <p>4.2. Расчет затрат на специальное</p>
--	---

	<p><i>оборудование для научных работ</i></p> <p><i>4.3. Основная заработная плата исполнителей темы</i></p> <p><i>4.4. Отчисления на социальные нужды</i></p> <p><i>4.5. Накладные расходы</i></p> <p><i>4.6. Формирование бюджета затрат научно – исследовательского проекта</i></p>
<p><i>2. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i></p>	<p><i>Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта</i></p>
Перечень графического материала:	
<p><i>1. Календарный график проведения исследования в виде диаграммы Ганта</i></p> <p><i>2. Бюджет проекта</i></p>	
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тухватулина Л.Р.	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2Б	Сутыгина Я.Н.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А2Б	Сутыгиной Яне Николаевне

Институт	ФТИ	Кафедра	ПФ
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.80.02 Ядерные физика и технологии/ Физика атомного ядра и частиц

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<i>1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующее излучение); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
<i>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность; – требования охраны труда при работе на ПЭВМ.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).
<i>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	04.05.16
---	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ПФ ФТИ ТПУ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2Б	Сутыгина Я. Н.		

Оглавление

АННОТАЦИЯ	12
РЕФЕРАТ.....	13
ВВЕДЕНИЕ	14
1. Основы теории магнитного поля.	16
1.1. Постоянные магниты и их свойства.	16
1.2. Методы измерения магнитного поля	21
2. Измерение магнитного поля поворотных магнитов	26
2.1. Описание экспериментальной установки	26
2.2. Результаты измерения магнитного поля.....	30
3. Численное моделирование магнитного поля.....	36
3.1. Программное обеспечение для моделирования магнитного поля	36
3.2. Численное моделирование в Radia.....	39
Заключение	56
Вывод.....	56
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	58
4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	59
4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования	59
4.1.2. Анализ конкурентных технических решений	60
4.1.3. SWOT-анализ	62
4.2. Планирование научно-исследовательских работ	66
4.2.1. Структура работ в рамках научного исследования.....	66
4.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ	68

4.2.3.	Разработка графика проведения научного исследования	70
4.2.4.	Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	73
4.2.5.	Расчет материальных затрат НТИ.....	73
4.2.6.	Основная заработная плата исполнителей темы.....	75
4.2.7.	Дополнительная заработная плата исполнителей темы	77
4.2.8.	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) ...	77
4.2.9.	Затраты на научные и производственные командировки.....	79
4.2.10.	Контрагентные расходы	79
4.2.11.	Накладные расходы	80
4.2.12.	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.....	81
4.3.	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .	81
5.	Социальная ответственность.....	84
5.1.	Анализ опасных и вредных факторов.....	85
5.2.	Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	86
5.2.1.	Организационные мероприятия	86
5.2.2.	Технические мероприятия.....	87
5.2.3.	Условия безопасной работы	89
5.3.	Электробезопасность	91
5.4.	Противопожарная безопасность.....	93
	Список используемой литературы	96
	Приложение А	100

Моделирование магнитного поля вигглера на ускорителе LUCX в программе Radia.....	100
Описание вигглера	101
Результаты моделирования.....	102
Сравнение методов моделирования	105
Заключение	106
Список литературы	108

АННОТАЦИЯ

Синхротронное излучение благодаря своим свойствам имеет широкое применение в науке и медицине. Для создания ведущего однородного магнитного поля, задающего траекторию пучка частиц, испускающих синхротронное излучение, используются поворотные магниты.

Одним из важных исследований в области синхротронного излучения является расчёт характеристик синхротронного излучения (СИ), но для этого необходимо знать параметры магнитного поля, создаваемого магнитом. Существует два способа исследования магнитного поля поворотного магнита, с помощью измерения и численного моделирования. Кроме того ускоритель заряженных частиц, как линейный, так и кольцевой, состоит из большого количества магнитных устройств, управляющих параметрами пучка, соответственно, знание параметров создаваемого ими магнитных полей также необходимо.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования и измерений магнитного поля поворотных магнитов на постоянных магнитах. Приведено сравнение данных эксперимента и данных моделирования. Результаты работы могут быть полезны при проектировании и оптимизации различных магнитных устройств (поворотных магнитов, ондуляторов), используемых для генерации синхротронного излучения. Также результаты работы могут быть использованы для оптимизации параметров пучка в тракте ускорителя.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 108 с., 45 рис., 18 табл., 39 источников, 1 прил.

Ключевые слова: магнитное поле, поворотный магнит, синхротронное излучение, измерение магнитного поля, численное моделирование, Radia.

Объектом исследования является: магнитное поле поворотного магнита.

Цель работы – исследование магнитного поля, создаваемое поворотными магнитами с помощью измерения и численного моделирования.

В процессе исследования проводилось измерение и численное моделирование с помощью численного кода Radia магнитного поля, создаваемое поворотными магнитами и анализ полученных результатов.

В результате исследования было сделано заключение о хорошей согласованности результатов магнитного поля поворотных магнитов полученных с помощью измерения и численного моделирования.

Степень внедрения: в настоящее время предмет исследования находится в стадии теоретической проработки.

Область применения: производство магнитов для ускорителей, пучковая оптика, производство магнитных систем для генерации излучения (вигглер, ондулятор), диагностика пучка.

Экономическая эффективность/значимость работы на данный момент не установлена, так как предмет исследования находится в стадии теоретической проработки.

В будущем планируется провести оптимизацию численного кода для учета влияния свойств ярма на магнитное поле; освоить новое программное обеспечение, позволяющее рассчитывать более сложные конфигурации магнитных систем; провести измерение магнитного поля при помощи приборов с большей точностью.

ВВЕДЕНИЕ

Основным инструментом современной экспериментальной физики атомного ядра и элементарных частиц более полувека служат ускорители заряженных частиц.

При движении с релятивистскими скоростями по искривлённым в магнитном поле траекториям заряженные частицы испускают электромагнитное излучение - синхротронное излучение (СИ). 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 и т.д. [1]. Благодаря этим уникальным свойствам, синхротронное излучение широко используется для исследований в атомной физике, материаловедении, химии, биологии и медицине [2].

Развитие новых источников синхротронного излучения ставит задачи по проектированию и созданию новых магнитных устройств [3]. Так же строительство новых ускорителей, как для научных, так и прикладных целей, так же требует решение задач связанных с созданием различных магнитных устройств, соответствующих необходимым параметрам пучка. В связи с тем, что ускорители являются достаточно дорогими установками, одним из основных методов, используемых при проектировании и создании магнитных систем, является математическое моделирование.

Расчет магнитных систем ускорителей – достаточно сложная задача математической физики, требующая математических исследований при разработке численных методов, эффективных программных реализаций, а также больших ресурсов вычислительных машин. Математическое моделирование дает возможность резко уменьшить время анализа поля в магните выбранной конфигурации, повысить точность, сократить стоимость и такого анализа, и самого магнита, так как непосредственное измерение

самого магнитного поля является трудоемкой и дорогостоящей проблемой. Наряду с этим, математическое моделирование позволяет исследовать и те части конструкции магнита, измерения в которых крайне затруднительны или даже невозможны (например, распределение индукции в магнитопроводе традиционных магнитов), но распределение поля в этих частях сказывается существенным образом на характеристиках и работе магнита [4].

В конечном счете, только математическое моделирование магнитной системы позволяет сделать выбор оптимальной конструкции магнита в каждом конкретном случае. Основной (и очень важной) характеристикой решения, получаемого в результате моделирования, является его точность [5].

1. Основы теории магнитного поля.

В физике ускорителей поворотный магнит (дипольный магнит) – это магнитный элемент, создающий однородное магнитное поле. Данные магниты используются, в первую очередь, для создания ведущего поля, задающего траекторию пучка заряженных частиц, а также в системах впуска/выпуска пучка, и для коррекции равновесной орбиты [6]. Так же данные магниты используются не только в физике ускорителей, но и в ЯМР-томографах и в высокопольных ЯМР-спектрометрах [7].

Дипольные магниты по конструкции бывают:

- на постоянных магнитах,
- классические «тёплые» электромагниты с железным полюсом;
- импульсные магниты с шихтованным железным ярмом или безжелезные;
- сверхпроводящие.

В данной работе будут рассмотрены поворотные магниты на постоянных магнитах, которые получили широкое применение в самых различных областях техники, благодаря достигнутым за последнее время высоким характеристикам материалов, из которых они выполняются.

1.1. Постоянные магниты и их свойства.

К магнитным материалам относят материалы, которые сохраняют заметный магнетизм после их намагничивания и противостоят в определенных пределах внешним размагничивающим воздействиям.

В зависимости от формы гистерезисной кривой и значений основных магнитных характеристик, все магнитные материалы подразделяют на две большие группы: магнитомягкие имеют узкую петлю гистерезиса, малые

значения коэрцитивной силы H_c , используемые в основном как проводники магнитного потока; магнитотвердые характеризуются широкой петлей гистерезиса, высоким значением коэрцитивной силы H_c , используемые как автономные (не потребляющих энергии) источники магнитного поля. Разница между ними в том, что магнитомягкие материалы быстро теряют свои магнитные свойства, в то время как магнитотвердые сохраняют их достаточно долго [8]. На рисунке 8 представлена петля гистерезиса для магнитотвердых материалов.

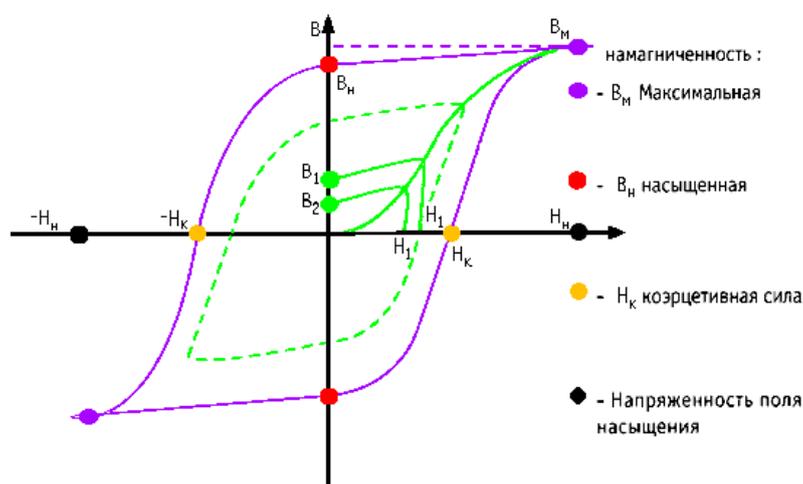


Рисунок 1 – Петля гистерезиса для магнитотвердых материалов.

Постоянный магнит является изделием из магнитотвёрдого материала с высокой остаточной магнитной индукцией, сохраняющее состояние намагниченности в течение длительного времени. Достоинствами постоянных магнитов являются стабильность создаваемого ими поля и отсутствие источников питания при эксплуатации. Недостатком – трудность изменения величины поля (это производится путем изменения величины зазора или применением магнитного шунта) [9].

Для описания характеристик постоянных магнитов используют следующие величины:

Магнитная индукция (B , Тл) – это векторная величина, характеризующая магнитное поле и определяющая силу, действующую на

движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля. Магнитная индукция численно равна отношению силы, действующей на заряженную частицу, к произведению заряда и скорости частицы, если направление скорости таково, что эта сила максимальна и имеет направление, перпендикулярное к векторам силы и скорости, совпадающее с поступательным перемещением правого винта при вращении его от направления силы к направлению скорости частицы с положительным зарядом.

Остаточная магнитная индукция (B_r , Тл) – намагниченность, которую имеет магнитный материал при напряжённости внешнего магнитного поля, равной нулю. Определяет, насколько сильное магнитное поле может производить магнит.

Коэрцитивная магнитная сила (H_c , Ампер/метр) – данная величина характеризует сопротивляемость магнита к размагничиванию. Это величина внешнего магнитного поля, требуемого для полного размагничивания магнита, намагниченного до состояния насыщения. Чем больше коэрцитивная сила, тем "прочнее" магнитный материал удерживает остаточную намагниченность.

Магнитная энергия ($(BH)_{max}$) – полная плотность энергии, максимальное энергетическое произведение. Определяет, насколько сильным является магнит.

Особого внимания заслуживает чувствительность магнитных материалов к изменению температуры. Здесь следует различать обратимые изменения свойств материалов в диапазоне незначительных изменений температуры и необратимые изменения в широком диапазоне температуры, называемые старением. Для учета стабильности в первом случае пользуются значениями температурных коэффициентов. Температурный коэффициент остаточной магнитной индукции определяет, насколько сильно магнитная

индукция изменяется от температуры. Величина - 0,20 означает, что если температура увеличится на 100 градусов Цельсия, магнитная индукция уменьшится на 20%.

Необратимые процессы характеризуются температурой Кюри и заключаются в исчезновении самопроизвольной намагниченности, уменьшении магнитной проницаемости. Температура Кюри (T_{cur} , °C) определяет предел температуры, при которой магнит полностью размагничивается. При снижении температуры магнит не восстанавливает магнитные свойства. Если магнит нагревается в пределах от T_{max} до T_{cur} , при снижении температуры магнитные свойства восстанавливаются.

Максимальная рабочая температур (T_{max} , °C) определяет предел температуры, при которой магнит временно теряет часть своих магнитных свойств. При снижении температуры магнит полностью восстанавливает все магнитные свойства.

Постоянные магниты имеют достаточно большой разброс магнитных характеристик вследствие сложной технологии изготовления и обработки изделий [9]. Выделяют следующие типы постоянных магнитов:

- Полимерные магниты - композитные материалы, состоящие из разных полимерных комплексов и магнитных порошков.
- Магниты SmCo – магниты, выполненные на базе сплавов кобальта и самария.
- Ферриты – это магниты, состоящие из компонентов железа с оксидами разных металлов.
- Магниты NdFeB (неодимовые магниты) – магниты, созданные на базе сплавов бор-железо-неодим.
- Магниты Альнико (AlNiCo) – магниты, которые сделаны на базе сплавов медь, никель, алюминий, железо.

Неодимовые магниты (NdFeB) по своим свойствам самые сильные постоянные магниты, изготавливаемые прессованием, спеканием или литьем из интерметаллида $Nd_2Fe_{14}B$. Преимуществами этого класса магнитов являются высокая магнитная мощность т.е. высокие магнитные свойства (B_r , H_c и $(BH)_{max}$), они мало размагничиваются и имеют невысокую стоимость. Магнитная индукция материала неодимового магнита (NdFeB) 1,15 – 1,45 Тл. Теоретически предел магнитной индукции материала NdFeB ~ 1,6 Тл [10]. Основные магнитные характеристики данного магнитного материала представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Магнитные характеристики основных марок неодимовых магнитов NdFeB.

Марка (тип)	Остаточная индукция (B_r), Т	Коэрцитивная сила по индукции, H_{cb} , кА/м	Коэрцитивная сила по намагниченности, H_{cm} , кА/м	Максимальное энергетическое произведение, $(BH)_{max}$, КДж/м ³	Рабочая температура, Т, °С
38Н	1,22-1,26	≥916	≥1353	287-303	≤120
40Н	1,26-1,29	≥939	≥1353	303-318	≤120

Ферриты – это магниты, состоящие из компонентов железа с оксидами разных металлов, прессованные вещества, обладающие хорошим удельным сопротивлением - способностью препятствовать прохождению электрического тока.

Ферритовые магниты широко распространены, не смотря на относительно низкие показатели остаточной индукции и энергетического произведения, будучи довольно хрупкими и твердыми, постоянные магниты из феррита имеют ряд несомненных достоинств, среди которых слабая подверженность размагничиванию, коррозионная стойкость и, конечно же, низкая стоимость. Рабочие температуры магнитотвердых ферритов находятся в интервале от – 40 до + 250°С. Изменение температуры оказывает влияние на магнитные свойства изделия [11].

В группе магнитотвердых ферритов наибольшее распространение получили материалы на основе бариевого (стронциевого) феррита и кобальтового феррита. Имеют состав $Ba/SrO \cdot ^6Fe_2O_3$ и характеризуются высокой устойчивостью к размагничиванию в сочетании с хорошей коррозионной стойкостью [12]. Основные магнитные характеристики данного магнитного материала представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Магнитные характеристики основных марок бариевых магнитов.

Марка (тип)	Остаточная индукция (b_r), Т	Коэрцитивная сила по намагниченности, H_{cm} , кА/м	Максимальное энергетическое произведение, $(BH)_{max}$, КДж/м ³	Рабочая температура, Т, °С
1БИ	0,21	136	7,6	- 40 ≤ 250
2БА	0,33	208	19,6	- 40 ≤ 250
3БА	0,38	152	26,0	- 40 ≤ 250

1.2. Методы измерения магнитного поля

Область электроизмерительной техники, которая занимается измерениями магнитных величин, обычно называется областью магнитных измерений. Несмотря на разнообразие задач, решаемых с помощью магнитных измерений, определяются обычно всего несколько основных магнитных величин :

- магнитный поток Φ
- магнитная индукция B ,
- напряженность магнитного поля H ,
- намагниченность M ,
- магнитный момент.

Причем во многих способах измерения магнитных величин фактически измеряется не магнитная, а электрическая величина, в которую

магнитная величина преобразуется в процессе измерения. Интересующая нас магнитная величина определяется расчетным путем на основании известных зависимостей между магнитными и электрическими величинами. Теоретической основой подобных методов является второе уравнение Максвелла, связывающее магнитное поле с полем электрическим [13].

Используются в магнитных измерениях и другие (не только электрические) проявления магнитного поля, например механические, оптические.

Рассмотрим принципы построения приборов для измерения магнитных величин. Как правило, прибор для измерения магнитных величин состоит из двух частей — измерительного преобразователя, назначением которого является преобразование магнитной величины в величину иного вида (электрическую, механическую), более удобную для дальнейших операций, и измерительного устройства для измерения выходной величины измерительного преобразователя [14].

Измерительные преобразователи, входной величиной которых является магнитная величина, называют магнитоизмерительными и в соответствии с видом выходной величины делят на три основные группы: магнитоэлектрические преобразователи (выходная величина электрическая), магнитомеханические (выходная величина механическая) и магнитооптические (выходная величина оптическая).

Широко используются преобразователи, работающих на основе следующих явлений:

- электромагнитная индукция;
- силовое взаимодействие измеряемого магнитного поля с полем постоянного магнита или контура с током;
- гальваномагнитные измерения;

- изменение магнитных свойств материалов в магнитном поле;
- взаимодействие микрочастиц с магнитным полем;
- сверхпроводимость.

Вторая часть прибора для измерения магнитных величин может быть либо обычным прибором для измерения электрической величины, либо прибором со специальными характеристиками.

Прежде чем выбрать метод, необходимо точно определить задачу и условия эксперимента. Следует также знать, какая точность требуется при измерении. При выборе метода следует исходить из характера материала, а также из формы образца. Большое значение для выбора метода имеют область температур, в которой предполагается исследовать то или иное магнитное вещество, и интервал полей, где будут измеряться магнитные свойства [15].

Перечислим основные методы исследования магнитных характеристик:

1. Баллистический метод дает возможность определить основную кривую индукции и намагниченности, петлю гистерезиса и различные виды проницаемостей. Этот метод основан на измерении количества электричества, протекающего через витки обмотки, охватывающей образец. Количество электричества возникает в тот момент, когда магнитный поток резко меняется.

2. Магнитометрический метод также позволяет определить кривую намагничивания, петлю гистерезиса. В основе этого метода — эффект воздействия исследуемого образца на магнитную стрелку, расположенную на некотором расстоянии от него.

3. Радиотехнические методы исследования магнитных свойств вещества дают возможность определять кривую индукции, семейство симметричных петель гистерезиса, полные потери, комплексную

проницаемость при различных частотах, а также изучать ферро-, пара- и ядерный магнитные резонансы.

4. Индукционный метод позволяет определять кривую индукции, намагниченности, проницаемости. Этот метод основан на измерении электродвижущей силы индукции, которая возбуждается во вторичной обмотке, или на измерении реактивного сопротивления катушки, если в нее помещен образец.

В последнее время стали применяться полупроводниковые измерители магнитных полей, так называемые датчики ЭДС Холла. Датчиками ЭДС Холла можно измерять как постоянные, так и переменные магнитные поля.

Датчики магнитного поля на эффекте Холла используют явление взаимодействия перемещающихся электрических зарядов с магнитным полем. Пластина находится в магнитном поле, пронизывающем ее в направлении перпендикулярном движению тока. В магнитном поле под действием силы Лоренца электроны отклоняются от прямолинейного движения. Эта сила сдвигает их в направлении перпендикулярном направлению магнитного поля и направлению тока [16].

В данном случае у верхнего края пластины электронов будет больше, чем у нижнего, то есть возникает разность потенциалов. Эта разность потенциалов и обуславливает появление выходного напряжения [17]. Для образца, сделанного из полупроводника в форме параллелепипеда, эта разность потенциалов определяется уравнением

$$U_x = \frac{R * I * B_x}{t}. \quad (1)$$

где: I- ток через пластину; R-постоянная Холла; B_x - магнитная индукция; t-толщина пластин.

Измеряя напряжение Холла можно определить магнитную индукцию по формуле :

$$B_x = \frac{U_x * t}{I * R} = \frac{U_x}{I} * K \quad (2)$$

где: K- параметр преобразователя Холла, определяемый его материалом и размерами.

Таким образом постоянные магниты являются изделием из магнитотвёрдого материала с высокой остаточной магнитной индукцией, сохраняющее состояние намагниченности в течение длительного времени. Достоинствами постоянных магнитов являются стабильность создаваемого ими поля и отсутствие источников питания при эксплуатации. Недостатком – трудность изменения величины поля (это производится путем изменения величины зазора или применением магнитного шунта).

Так как постоянные магниты имеют достаточно большой разброс магнитных характеристик вследствие сложной технологии изготовления и обработки изделий, их разделяют на типы. Самые сильные постоянные магниты - неодимовые магниты (NdFeB), а ферритовые магниты широко распространены, не смотря на относительно низкие показатели остаточной индукции, постоянные магниты из феррита имеют ряд несомненных достоинств, среди которых слабая подверженность размагничиванию, коррозионная стойкость, низкая стоимость.

Для исследования постоянных магнитов, проводят измерения зачастую не магнитной, а электрической или механической величины, в которую магнитная величина преобразуется расчетным путем на основании известных зависимостей между магнитными и электрическими величинами. При выборе метода следует исходить из характера материала, а также из формы образца. Так же необходимо точно определить задачу, условия эксперимента и точность измерений.

2. Измерение магнитного поля поворотных магнитов

2.1. Описание экспериментальной установки

В данной работе проводится исследование магнитного поля двух поворотных магнитов № 1 и № 2, которые изображены на рисунке 2 и 3:

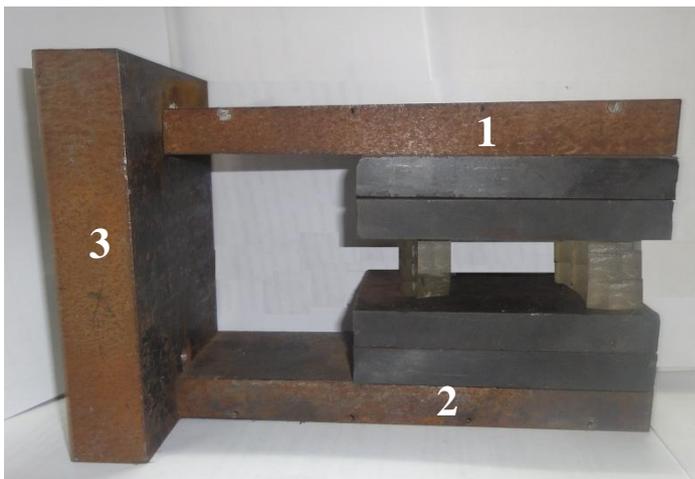


Рисунок 2 – Поворотный магнит № 1. Рисунок 3 – Поворотный магнит № 2.

Поворотный магнит № 1 состоит из ярма и двух полюсов магнита. Каждый полюс состоит из двух блоков одинаковых магнитов, имеющих форму параллелепипеда. Полюсы поворотного магнита № 1 изготовлены из бариевого феррита [18], а ярмо изготовлено из магнитомягкой стали. Зазор между полюсами поворотного магнита 1 равен 49 мм. Основные параметры поворотного магнита № 1 приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные параметры поворотного магнита № 1.

Параметр	Значение
Размеры магнита, мм	80×120×16
Размеры ярма 1,2, мм	122×152×20
Размеры ярма 3, мм	109×29×150

Зазор между полюсами, мм	49
Материал магнитов	Бариевый феррит
Материал ярма	Магнитомягкая сталь

Поворотный магнит № 2 состоит из ярма и двух полюсов магнита. Каждый полюс состоит из двух блоков одинаковых магнитов, имеющих форму параллелепипеда. Полюсы поворотного магнита № 2 изготовлены из бариевого феррита. Ярмо разделено на 3 блока, верхний и нижний блок ярма имеют форму равнобедренной трапециевидной призмы с одинаковым углом наклона края, а боковой блок имеет форму параллелепипеда. Ярмо поворотного магнита № 2 изготовлено из стали. Для данного поворотного магнита зазор между полюсами магнитов может изменяться, исследование магнитного поля проводилось для двух геометрий с зазором 20 мм и 42 мм. Основные параметры поворотного магнита № 2 приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные параметры поворотного магнита № 2.

Параметр	Значения
Размеры магнита, мм	80×120×16
Размеры блока ярма 1,2, мм	40×200×21
Угол наклона φ	1.15 град.
Размеры блока ярма 3, мм	109×29×150
Зазор между полюсами, мм	42; 20
Материал магнитов	Бариевый феррит
Материал ярма	Сталь

Измерение магнитного поля поворотных магнитов осуществляется с помощью измерителя магнитной индукции Ш1-8, в данном приборе для измерения магнитного поля используется эффект Холла. Измеритель магнитной индукции Ш1-8 состоит из зонда с датчиком Холла, назначением

которого является измерение ЭДС, и компенсационной схемы. На рисунке 4 представлен измеритель магнитной индукции Ш1-8.



Рисунок 4 – Измеритель магнитной индукции Ш1-8 с зондом.

Компенсационная схема, представляющая собой потенциометр, предназначена для измерения ЭДС Холла, поступающей от датчика зонда. Компенсация осуществляется подбором одного из резисторов схемы, конструктивно выполненного в виде многодекадного магазина сопротивлений, ручки декад которого выведены на лицевую панель прибора «отсчет индукции, Т». Когда измеряемое напряжение окажется скомпенсированным, стрелка индикатора, расположенного на лицевой панели прибора, устанавливается на нуль. При этом в окошках, расположенных рядом с каждой декадой, оказываются цифры, выражающие величину индукции измеряемого магнитного поля [19].

Данный прибор измеряет компоненту магнитной индукции, которая составляет с датчиком Холла угол 90 градусов. Диапазон магнитной

индукции, измеряемой прибором лежит в пределах от 0,01 до 1,6 Тл. Погрешность измерения магнитной индукции в нормальных условиях в пределах измерения магнитной индукции составляет $\pm 1,5\%$ [20].

Принципиальная схема эксперимента по измерению магнитного поля поворотных магнитов представлена на рисунке 5. Зонд измерителя магнитной индукции Ш1-8 расположен на подставке, которая перемещается с помощью механизмов перемещения управляемых с ЭВМ. Измеритель магнитного индукции Ш1-8 подключен к сети, а механизмы перемещения подставки зонда к отдельному блоку питания.

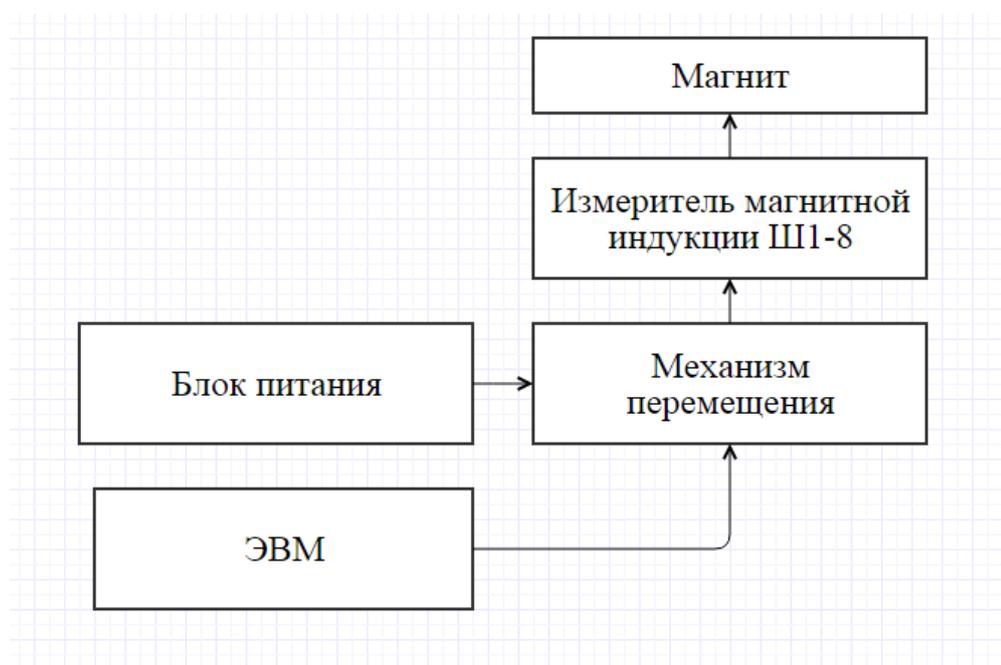


Рисунок 5 – Блок- схема эксперимента по измерению магнитного поля поворотного магнита.

Измерение магнитного поля поворотных магнитов проводилось в лабораторной системе координат. Ось X направлена вдоль длины поворотного магнита, ось Z направлена по ширине магнита, ось Y направлена вдоль высоты магнита. За начало координат была выбрана точка с координатами (0,0,0). Точка X=0 находилась на расстоянии 50 мм от полюсов поворотного магнита. Точка Z=0 находилась на расстоянии 40 мм от полюсов поворотного магнита № 1 и на расстоянии 20 мм от полюсов

поворотного магнита № 2. Точка $Y=0$ находилась у основания нижнего ярма поворотных магнитов. Обработка данных проходила в системе координат, где за начало координат был выбран центр полюса магнита в центре зазора между полюсами. На рисунке 6 представлена лабораторная система координат для поворотного магнита № 1 и № 2.

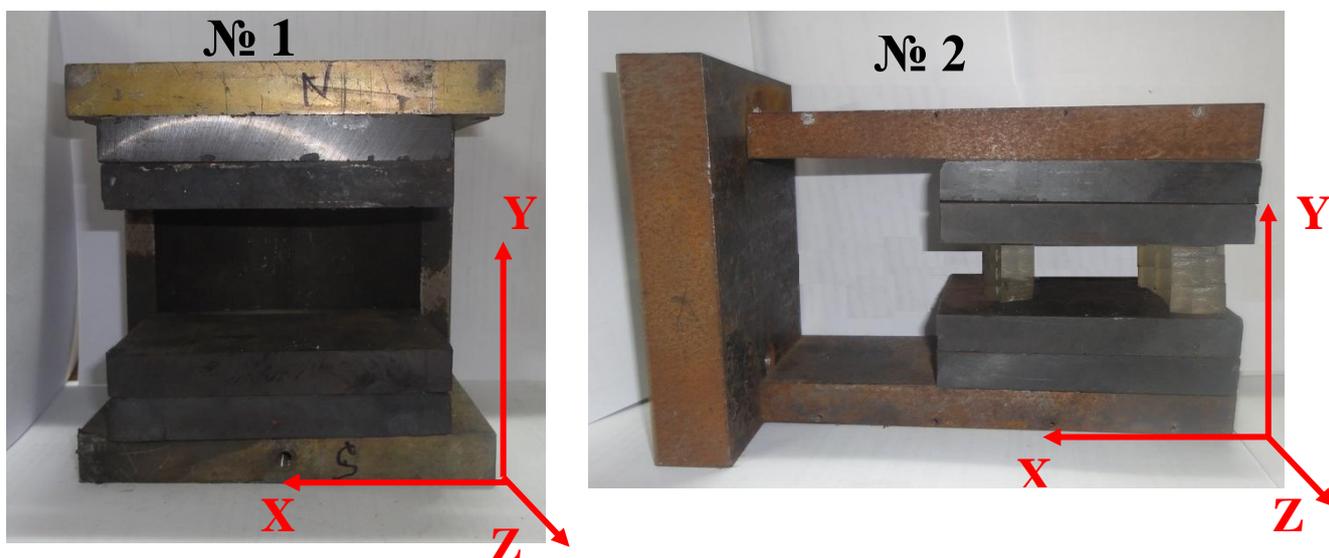


Рисунок 6 –Лабораторная система координат для поворотных магнитов № 1 и № 2.

2.2. Результаты измерения магнитного поля

Измерение величины магнитного поля B_y поворотного магнита № 1 с зазором $g = 49$ мм проводилось в плоскости XZ в диапазоне значений по X от -110 до 110 мм и по Z от -40 до 80 мм с шагом 10 мм.

Компонента магнитного поля B_y измерена в плоскости XZ для трех случаев: в центре зазора между магнитами ($Y = 0$ мм) и возле полюсов магнитов ($Y = -15$ мм; $Y = 15$ мм). На рисунке 7 изображен поворотного магнита № 1 и плоскости измерения его магнитного поля. На рисунке 8 представлено трёхмерное распределение магнитного поля поворотного магнита № 1.

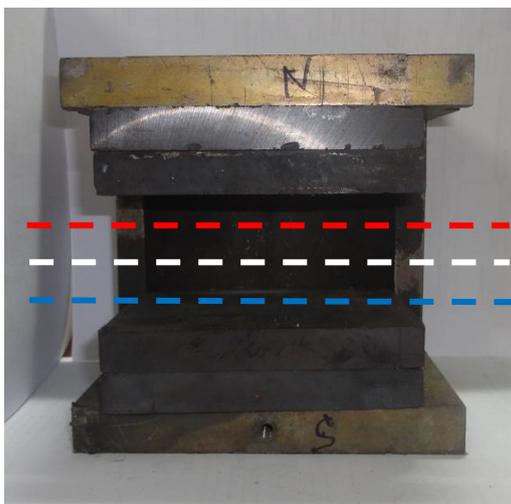


Рисунок 7 – Поворотный магнит № 1 с плоскостями измерения магнитного поля (красная линия - $Y=15$ мм; белая - $Y=0$ мм; синяя - $Y=-15$ мм).

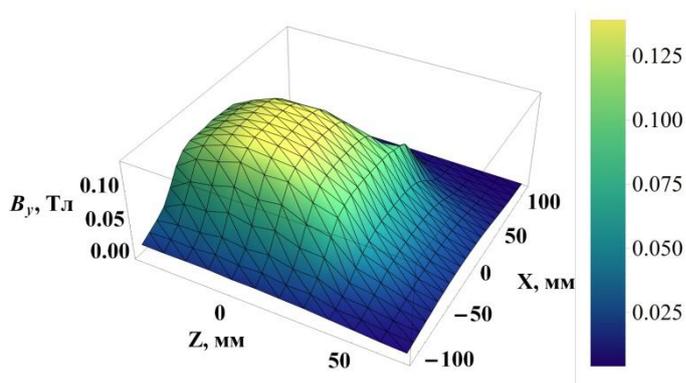


Рисунок 8 – 3D поле поворотного магнита № 1 в центре зазора между полюсами ($Y=0$ мм).

На рисунках 9 и 10 представлены результаты измерения компоненты магнитного поля B_y поворотного магнита № 1 вдоль оси X и Z в центре зазора между магнитами ($Y=0$ мм) и возле полюсов магнитов ($Y=15$ мм; $Y=-15$ мм).

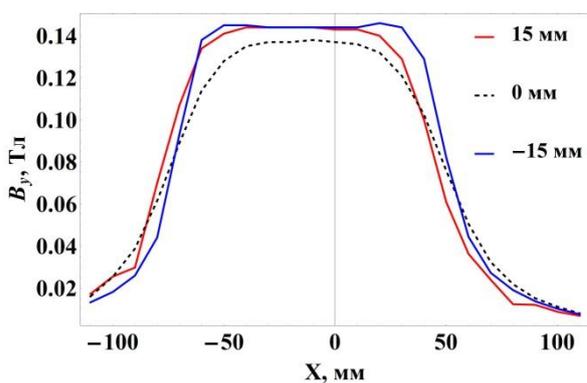


Рисунок 9 – 3D Магнитное поле B_y вдоль оси X при ($Z=0$) для поворотного магнита № 1 при $Y=0$ мм, $Y=15$ мм; $Y=-15$ мм.

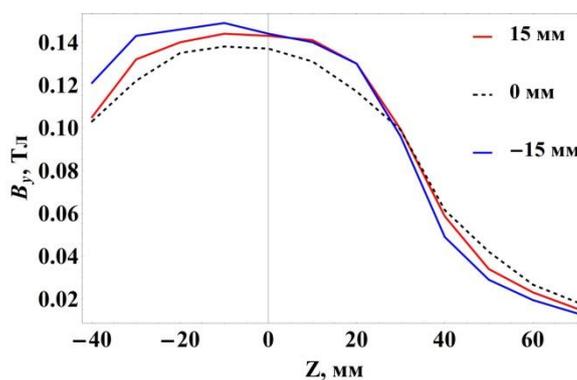


Рисунок 10 – Магнитное поле B_y вдоль оси Z при ($X=0$) для поворотного магнита № 1 при $Y=0$ мм, $Y=15$ мм; $Y=-15$ мм.

Величина магнитной индукции B_y вдоль оси X при ($Z=0$), полученная при измерениях в центре зазора ($Y=0$ мм) поворотного магнита № 1, равна 0,138 Тл. Максимальная величина магнитной индукции, измеренная возле полюсов магнитов $Y=15$ мм и при $Y= -15$ мм равна 0,143 Тл. Разница между магнитным полем в центре зазора между полюсами поворотного магнита № 1 и возле полюсов магнита составляет 3,5%.

Измерение величины магнитного поля B_y поворотного магнита № 2 проводилось для двух геометрий с зазором 42 мм и 20 мм. Измерения проводились в плоскости XZ в диапазоне значений по X от -110 до 110 мм и по Z от -60 до 60 мм с шагом 10 мм. Компонента магнитного поля B_y измерена в плоскости XZ для трех случаев: в центре зазора между магнитами ($Y=0$ мм) и возле полюсов магнитов ($Y=15$ мм; $Y= -15$ мм).

На рисунке 11 изображены плоскости измерения магнитного поля поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм. На рисунке 12 представлено трёхмерное распределение магнитного поля поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм.

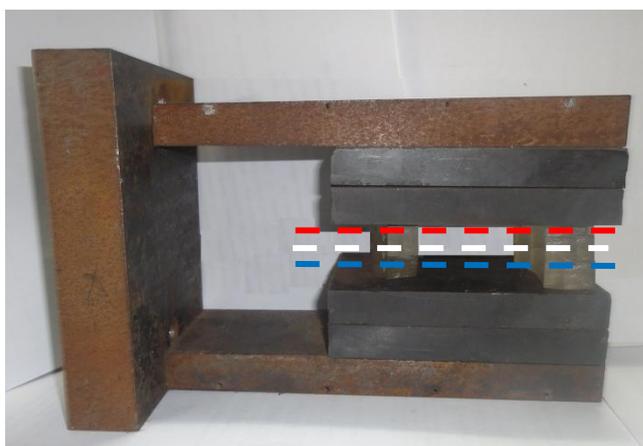


Рисунок 11 – Поворотный магнит № 2 с зазором 42 мм с плоскостями измерения магнитного поля (красная - $Y=15$ мм; белая - $Y=0$ мм; синяя - $Y=-15$ мм).

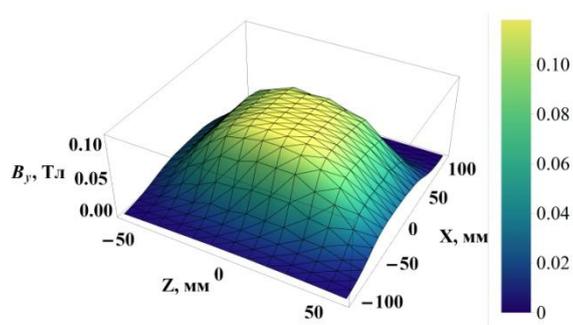


Рисунок 12 – 3D поле поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм в центре зазора между полюсами.

На рисунках 13 и 14 представлены результаты измерения компоненты магнитного поля B_y поворотного магнита № 2 с зазором между магнитами 42 мм вдоль оси X и Z в центре зазора между магнитами ($Y=0$ мм) и возле полюсов магнитов ($Y=15$ мм; $Y=-15$ мм).

Магнитное поле поворотного магнит № 2 не однородно это можно объяснить геометрией ярма поворотного магнита, верхний и нижний блок ярма имеют форму равнобедренной трапецевидной призмы с одинаковым углом наклона края. Полюсы поворотного магнита № 2 расположены не параллельно друг к другу, а под некоторым углом, что и приводит к увеличению магнитного поля.

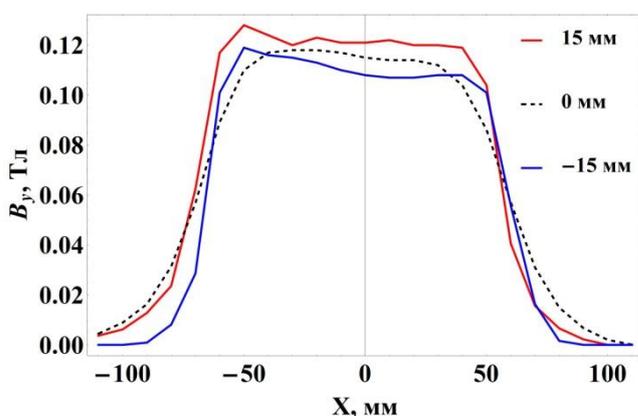


Рисунок 13 –Магнитное поле B_y вдоль оси X для поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм при $Y=0$ мм, $Y=15$ мм; $Y=-15$ мм.

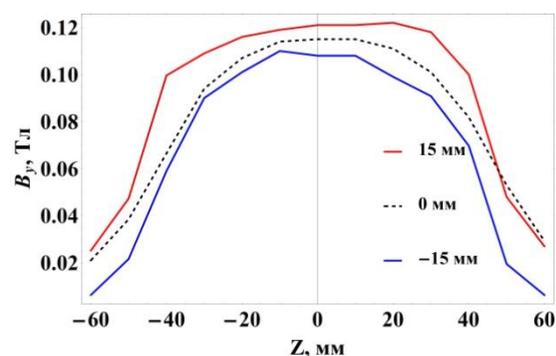


Рисунок 14 –Магнитное поле B_y вдоль оси Z для поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм при $Y=0$ мм, $Y=15$ мм; $Y=-15$ мм.

Величина магнитной индукции B_y вдоль оси X , полученная при измерениях в центре зазора ($Y=0$ мм) поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, равна 0,115 Тл. Максимальная величина магнитной индукции, измеренная возле полюсов магнитов $Y=15$ мм, равна 0,118 Тл, а при $Y=-15$ мм равна 0,108 Тл. Разница между магнитным полем в центре зазора между полюсами поворотного магнита и возле полюсов магнита составляет 2,5% и 6,4%.

Так же было проведено измерение величины магнитного поля B_y поворотного магнита № 2 с зазором $g=20$ мм. Компонента магнитного поля B_y измерена в плоскости XZ в центре зазора между магнитами ($Y=0$ мм).

На рисунке 15 представлено трёхмерное распределение магнитного поля поворотного магнита № 2 с зазором 20 мм.

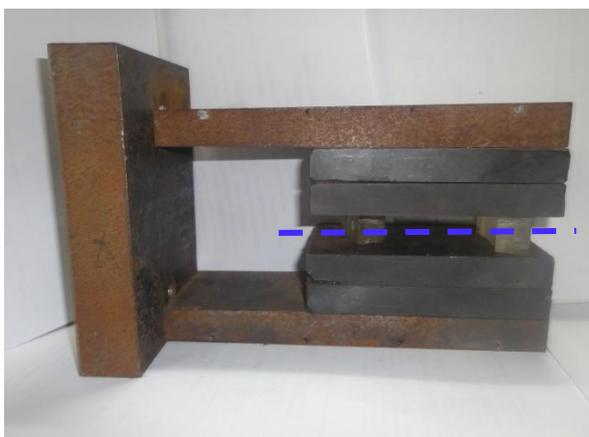


Рисунок 15 – Поворотный магнит № 2 с зазором 20 мм с плоскостью измерения магнитного поля (синяя линия - $Y=0$ мм).

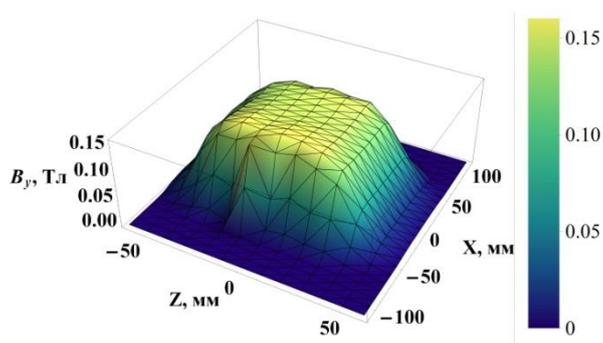


Рисунок 16 –3D поле поворотного магнита № 2 с зазором 20 мм в центре зазора между полюсами .

На рисунках 17 и 18 представлено сравнение результатов измерения компоненты магнитного поля B_y поворотного магнита № 2 с зазором между магнитами 42 и 20 мм вдоль оси X и Z в центре зазора между магнитами ($Y=0$ мм).

Величина магнитной индукции B_y вдоль оси X , полученная при измерениях в центре зазора ($Y=0$ мм) поворотного магнита № 2 с зазором 20 мм, равна 0,148 Тл, а для зазора 42 мм равна 0,115 Тл, разница между этими величинами составляет 22%. При увеличении зазора на 22 мм величина магнитной индукции B_y уменьшилась на 22 %.

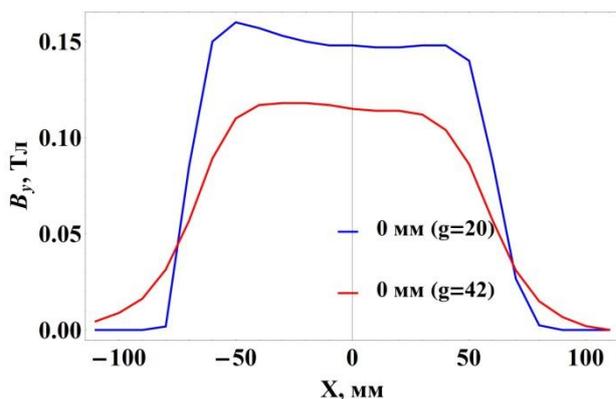


Рисунок 17 – Магнитное поле B_y вдоль оси X для поворотного магнита № 2 с зазором 20 при $Y=0$ мм.

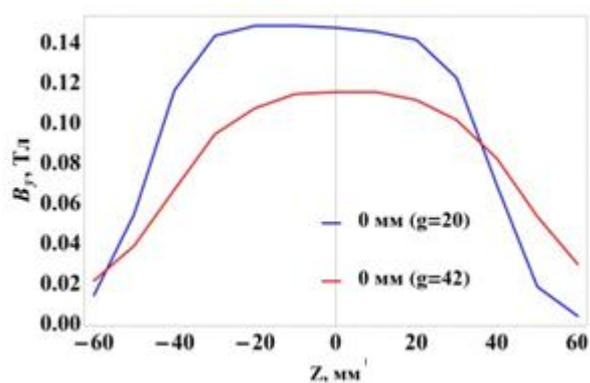


Рисунок 18 – Магнитное поле B_y вдоль оси Z для поворотного магнита № 2 с зазором 42 и 20 мм при $Y=0$ мм.

Таким образом было проведено измерение магнитного поля поворотных магнитов № 1 и № 2 с зазором 42 и 20 мм с помощью измерителя магнитной индукции Ш1-8, в котором для измерения магнитного поля используется эффект Холла.

3. Численное моделирование магнитного поля

3.1. Программное обеспечение для моделирования магнитного поля

В ускорительной технике при проектировании, производстве и оптимизации магнитных систем используют численное моделирование.

Задачи магнитостатики часто возникают при моделировании стационарных магнитных процессов. К ним относится расчет магнитных полей, возбуждаемых постоянным током или постоянными магнитами. Основным подходом для численного решения таких задач в настоящее время является метод конечных элементов (МКЭ). Для его применения область, в которой решается задача, должна быть разбита на элементы, в роли которых обычно выступают многогранники. Результат решения задачи сильно зависит от качества построения этого разбиения. По этой причине в ситуациях, когда необходимо решать задачи с большим количеством трехмерных объектов (или с объектами сложной формы), построение достаточно качественной конечно-элементной сетки может стать нетривиальной проблемой. В таких случаях может быть целесообразным использовать метод граничных элементов (МГЭ), в котором требуется сетка только на границе между объектами, что значительно упрощает ее построение [21].

Главное в идейной стороне метода - зависимость между значениями искомых функций внутри рассматриваемой области и их значениями на границе. Эта зависимость устанавливается переходом от дифференциальных уравнений к следующим из них интегральным соотношениям. Последовательное использование этой идеи приводит к замене дифференциальных уравнений, требующих нахождения неизвестных функций во всей области, на эквивалентные (в определенном смысле) интегральные уравнения, в которые в качестве неизвестных входят значения функций только на границе области. Это обуславливает, во-первых, более

высокую по сравнению с МКЭ точность решения, во-вторых, существенно меньший объем входных данных при реализации методов на ЭВМ [22].

Широкое применение для расчета магнитных систем нашли следующие программы Ansys [23], Femm [24], Radia [25], CST [26] и др.

В настоящее время программа ANSYS представляет собой многоцелевой пакет проектирования, анализа и моделирования 2D и 3D электромагнитных полей [27]. Основу для вычислений в данной программе составляет метод конечных элементов МКЭ. Программу ANSYS используют при моделировании вигглеров и ондуляторов [28], для исследования магнитных полей поворотных магнитов и для решения многих других задач.

Результаты моделирования сохраняются в файл и благодаря широкому набору модулей импорта/экспорта обеспечивается качественный обмен данными с различными CAD системами. Данное программное обеспечение имеет хороший графический интерфейс и не требует знаний в языках программирования, но благодаря своему функционалу ANSYS достаточно сложная программа в освоении, так же время вычисления зависит от сложности задачи и может занять он нескольких секунд до пары часов.

Femm это программа для моделирования магнитного поля в 2D геометрии, реализующая метод конечных элементов. Она достаточно проста в освоении, имеет средства графического проектирования геометрии и не требует знаний в языках программирования [29].

Программа CST для исследования магнитных систем используется реже, чем все остальные программы так, как данный продукт оптимизирован для численного моделирования высокочастотных устройств. Результаты моделирования так же сохраняются в файл и возможен обмен данными с различными CAD системами.

Одной из важнейших особенностей среды проектирования CST STUDIO SUITE является тесная интеграция нескольких методов моделирования и мощных возможностей управления. Одним из основных методов решения электромагнитных задач является метод конечного интегрирования. Данное программное обеспечение не требует никаких специальных знаний в области программирования.

Исследование магнитного поля поворотных магнитов проводилось при помощи моделирования в трёхмерном магнитостатическом коде Radia [30]. Данный программный пакет разработан в European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) для решения физических и технических проблем, встречающихся в процессе разработки устройств для генерации синхротронного излучения. Тем не менее, он также может быть использован в различных областях физики, где требуется эффективное решение задач магнитостатики. В Radia особое внимание уделяется точному и быстрому вычислению магнитного поля Основу для вычислений в Radia составляет метод граничных элементов МГЭ.

При моделировании в программе следует придерживаться определенного алгоритма:

- 1 Построение геометрии элементов магнитной системы.
- 2 Задание магнитных свойств материалов к элементам, созданных в пункте 1.
- 3 Группировка элементов в контейнеры.
- 4 При необходимости сегментация геометрии элементов системы на более мелкие блоки.
- 5 При необходимости осуществление дополнительных преобразований к созданной системе (сдвиги, повороты).

После того, как была правильно построена геометрия, нужно определить, необходимо ли провести сегментацию магнитной системы.

Метод граничных элементов, используемый в Radia, предполагает равномерное намагничивание в каждом элементе. Для постоянных магнитов магнитная проницаемость близка к 1 и намагниченность достаточно однородна по объёму элемента, но для материалов с большей магнитной проницаемостью намагниченность распределена неравномерно. Чтобы решить эту проблему, необходимо произвести разбиение элементов на более мелкие блоки, то есть сегментацию. В результате элемент будет разделён на множество меньших блоков, в которых намагниченность будет считаться однородной. В текущей версии Radia не предусмотрено механизма для автоматической сегментации. Пользователь должен указать параметры сегментации самостоятельно. Процедуру следует прекратить, когда магнитное поле на заданном участке становится неизменным на желаемом уровне точности. Разработчиками рекомендуется сначала найти достаточное количество блоков в горизонтальном направлении с отсутствием или минимальным разбиением в продольном и вертикальном направлениях, а затем найти достаточное количество блоков в продольном направлении с ранее найденным значением блоков для горизонтального направления. Сегментация может быть применена сразу ко всей геометрии (т.е. к контейнеру, в который объединены все элементы) или к различным частям геометрии отдельно.

3.2. Численное моделирование в Radia.

Для исследования магнитного поля поворотных магнитов численным методом созданы их модели в коде Radia. На рисунке 19 и 20 представлены модели поворотных магнитов № 1 и № 2.

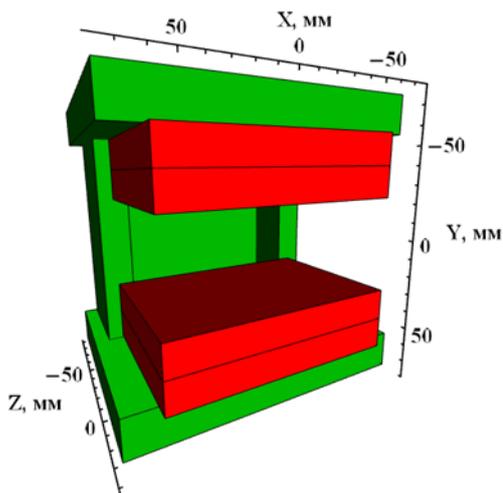


Рисунок 19 – Модель поворотного магнита № 1.

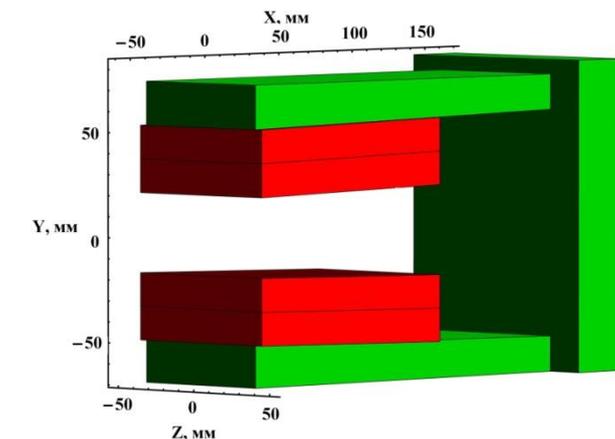


Рисунок 20 – Модель поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм.

В программе Radia для задания магнитных свойств полюсам поворотных магнитов необходимо знать остаточную намагниченность материала полюсов магнита. Для данных поворотных магнитов остаточная намагниченность полюсов не известна. Полюсы поворотных магнитов созданы из барриевого феррита, остаточная намагниченность для данного материала может изменяться от 0,2-0,4 Тл.

Для определения остаточной магнитной индукции полюсов поворотных магнитов проведено численное моделирование полюсов поворотных магнитов с остаточной намагниченностью материала 0,2-0,4 Тл. На рисунке 21 и 22 представлено магнитное поле вдоль оси X поворотных магнитов № 1 и № 2, полученное при помощи моделирования в центре зазора между полюсами ($Y=0$ мм) с остаточной намагниченностью 0,2 Тл, 0,3 Тл, 0,4 Тл и магнитное поле, полученное при измерениях в центре зазора между полюсами магнитов.

Из рисунков 21 и 22 видно, что магнитное поле от полюсов поворотных магнитов, полученное при помощи численного моделирования меньше, чем магнитное поле, полученное при измерениях. Данное расхождение можно объяснить влиянием ярма поворотных магнитов на магнитное поле.

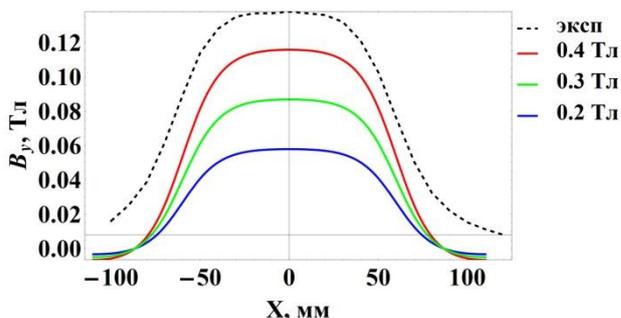


Рисунок 21 – Магнитное поле B_y вдоль оси X поворотного магнита № 1 с остаточной намагниченностью 0,2 Тл, 0,3 Тл, 0,4 Тл и магнитное поле, полученное при измерениях.

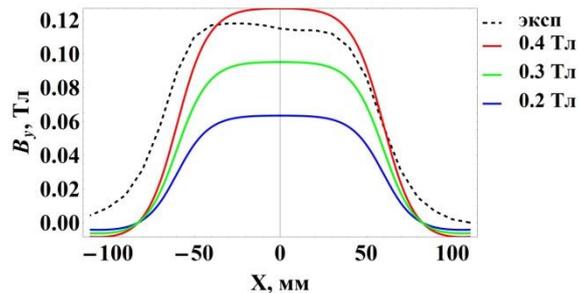


Рисунок 22 – Магнитное поле B_y вдоль оси X поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм с остаточной намагниченностью 0,2 Тл, 0,3 Тл, 0,4 Тл и магнитное поле, полученное при измерениях.

Ярмо поворотного магнита №1 состоит из магнитомягкой стали т.е. электротехнической стали [31]. На рисунке 23 приведены основные марки электротехнической стали и их кривые намагничивания [32].

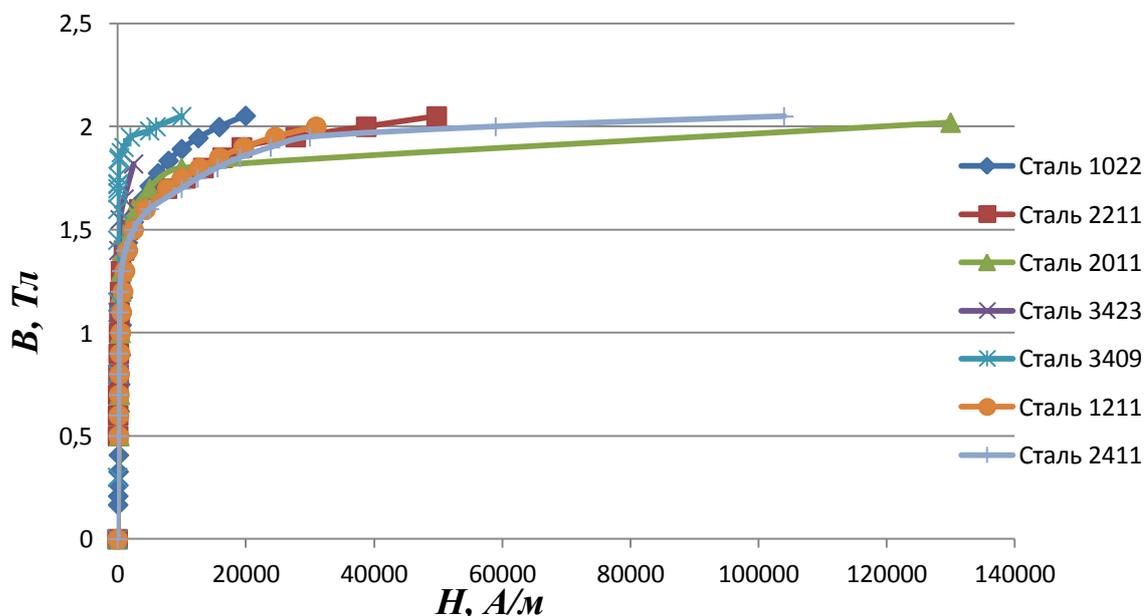


Рисунок 23 – Кривые намагничивания марок электротехнической стали.

Свойства электротехнической стали зависят от способа обработки, электротехническую сталь подразделяют на горячекатаную (1022, 2011) и холоднокатаную (3409) сталь. Чаще всего для магнитных и электрических приборов используют горячекатаную сталь так, как ее производство дешевле и данный вид стали менее подвержен деформации.

Для оценки влияния марки ярма на магнитное поле проведено численное моделирование магнитного поля от поворотного магнита № 1 с ярмом из электротехнической горячекатаной стали марки 1211, 2011, 1022 при остаточной намагниченности 0,3 Тл, результаты данного моделирования представлены на рисунке 24.

Из рисунка 24 видно, что магнитное поле поворотного магнита № 1 изменяется не более чем на 1% при изменении марки стали ярма. При дальнейшем моделировании магнитного поля поворотного магнита № 1 будет использовано ярмо из электротехнической стали марки 1022.

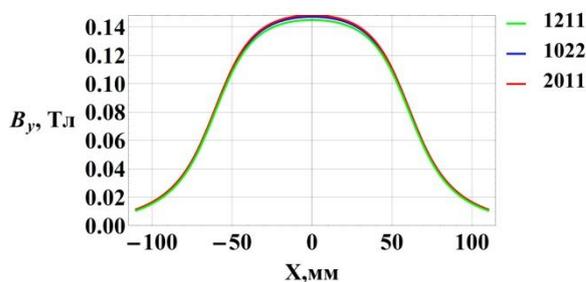


Рисунок 24 – Магнитное поле B_y вдоль оси X поворотного магнита № 1 с ярмом из электротехнической стали марки 1211, 2011, 1022 с остаточной намагниченностью 0,3 Тл.

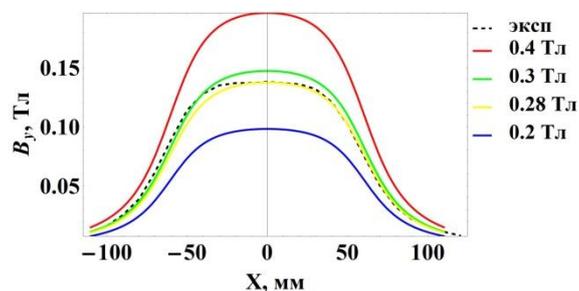


Рисунок 25 – Магнитное поле B_y вдоль оси X поворотного магнита № 1 с остаточной намагниченностью 0,2 Тл, 0,28 Тл, 0,3 Тл, 0,4 Тл и магнитное поле, полученное при измерениях.

На рисунке 25 представлены результаты измерения и численного моделирования компоненты магнитного поля B_y поворотного магнита № 1 с ярмом из стали марки 1022 при остаточной намагниченности 0,2 Тл, 0,28 Тл,

0,3 Тл, 0,4 Тл вдоль оси X при Z=0 мм в центре зазора между магнитами (Y=0 мм).

Из рисунка 25 видно, что магнитное поле поворотного магнита № 1, полученное при помощи численного моделирования, согласуются с результатами магнитного поля, полученного при измерениях, при остаточной намагниченности полюсов магнита 0,28 Тл. Так же полученное при помощи численного моделирования магнитное поле согласуется с данными магнитного поля, полученного ранее [33].

В программе Radia для задания материала ярма была использована функция, которая создает блок формы параллелепипеда. Поэтому для исследования магнитного поля поворотного магнита № 1 была построена упрощенная модель, которая не учитывает точную геометрию блоков ярма.

На рисунке 26 представлено трёхмерное распределение магнитного поля поворотного магнита № 1 в центре зазора между полюсами. На рисунке 27 представлены результаты измерения и численного моделирования компоненты магнитного поля B_y поворотного магнита № 1 вдоль оси X при Z=0 мм в центре зазора между полюсами магнитов (Y=0 мм).

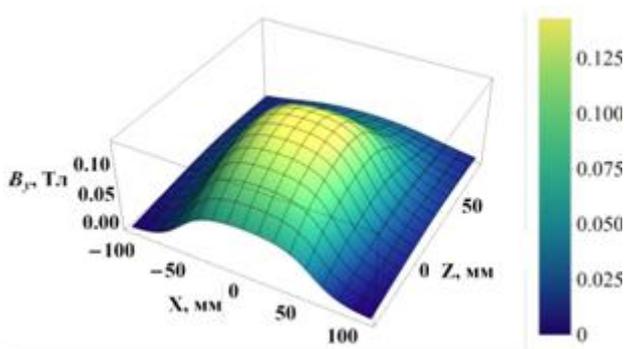


Рисунок 26 – 3D поле поворотного магнита № 1 в центре зазора между полюсами.

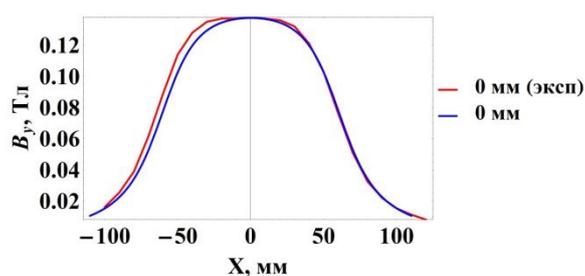


Рисунок 27 – Магнитное поле B_y вдоль оси X при Y= 0 мм для поворотного магнита № 1.

В центре полюсов магнита при X=0 мм и Z=0 мм, величина магнитной индукции B_y , полученная при численном моделирование в центре зазора

($Y=0$ мм) между полюсами поворотного магнита № 1, равна 0,137 Тл, а магнитная индукция B_y , полученная при измерениях равна 0,138 Тл. Разница между магнитным полем в центре зазора между полюсами поворотного магнита № 1, полученная при помощи численного моделирования и магнитного поля, полученного при помощи измерений составляет 1%.

На краю полюсов магнита при $X=60$ мм, $X=-60$ мм и $Z=0$ мм, величина магнитной индукции B_y , полученная при численном моделировании в центре зазора ($Y=0$ мм) между полюсами поворотного магнита № 1, равна 0,0823 Тл, 0,0802 Тл, а магнитная индукция B_y , полученная при измерениях равна 0,0821 Тл, 0,089 Тл. Разница между магнитным полем на краю полюсов поворотного магнита № 1, полученная при помощи численного моделирования и магнитным полем, полученным при помощи измерений составляет 0,2 и 10 %.

На рисунках 28 и 29 представлены результаты измерения и численного моделирования компоненты магнитного поля B_y поворотного магнита № 1 вдоль оси X при $Z=0$ мм вблизи полюсов магнита ($Y=15$ мм, $Y=-15$ мм).

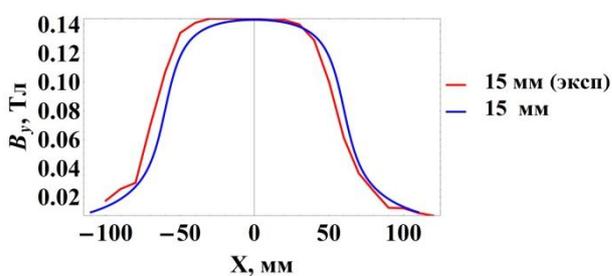


Рисунок 28 – Магнитное поле B_y вдоль оси X при $Y=15$ мм для поворотного магнита № 1.

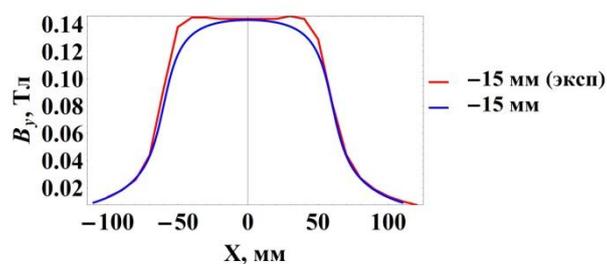


Рисунок 29 – Магнитное поле B_y вдоль оси X при $Y=-15$ мм для поворотного магнита № 1.

Величина магнитной индукции B_y вдоль при $X=0$ мм и $Z=0$ мм, полученная при численном моделировании вблизи полюсов ($Y=15$ мм ; $Y=-15$ мм) поворотного магнита № 1, равна 0,143 Тл. Полученные результаты магнитного поля в центре полюсов поворотного магнита при $X=0$ мм

полностью совпадают с результатами магнитной индукции B_y , полученной при измерениях.

На краю полюсов магнита при $X=60$ мм, $X=-60$ мм и $Z=0$ мм, величина магнитной индукции B_y , полученная при численном моделировании вблизи полюса ($Y=15$ мм) поворотного магнита № 1, равна 0,082 Тл, 0,086 Тл, а магнитная индукция B_y , полученная при измерениях равна 0,0609 Тл, 0,107 Тл. Разница между магнитным полем на краю полюсов поворотного магнита № 1, полученная при помощи численного моделирования и магнитным полем, полученным при помощи измерений составляет 25 и 24 %.

На краю полюсов магнита при $X=60$ мм, $X=-60$ мм и $Z=0$ мм, величина магнитной индукции B_y , полученная при численном моделировании вблизи полюса ($Y=-15$ мм) поворотного магнита № 1, равна 0,0822 Тл, 0,0906 Тл, а магнитная индукция B_y , полученная при измерениях равна 0,0821 Тл, 0,0932 Тл. Разница между магнитным полем на краю полюсов поворотного магнита № 1, полученная при помощи численного моделирования и магнитным полем, полученным при помощи измерений составляет 0,2 и 3 %.

На рисунке 30 представлены результаты измерения и численного моделирования компоненты магнитного поля B_y поворотного магнита № 1 вдоль оси Z при $X=0$ мм в центре зазора между магнитами ($Y=0$ мм).

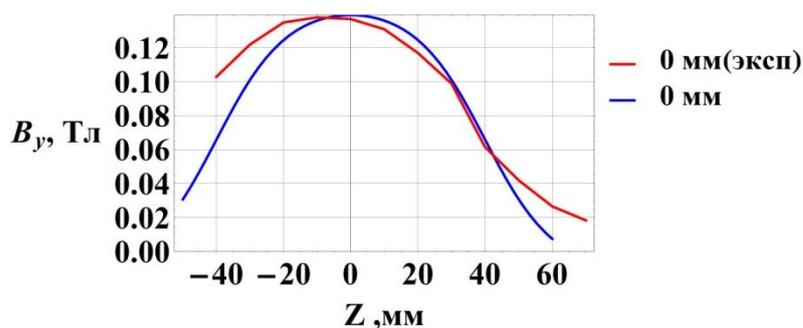


Рисунок 30 – Магнитное поле B_y вдоль оси Z при $Y=0$ мм для поворотного магнита № 1.

Величина магнитной индукции B_y при $X=0$ мм, полученная при численном моделировании в центре зазора ($Y=0$ мм) на краю полюсов ($Z= -40$ мм) поворотного магнита № 1, равна 0,062 Тл, а магнитная индукция B_y вдоль оси X , полученная при измерениях равна 0,103. Разница между магнитным полем в центре зазора между полюсами на краю полюсов поворотного магнита № 1, полученная при помощи численного моделирования и магнитного поля, полученного при помощи измерений, составляет 39 %.

На рисунках 31 и 32 представлены результаты измерения и численного моделирования компоненты магнитного поля B_y поворотного магнита № 1 вдоль оси Z при $X =0$ мм вблизи полюсов магнита ($Y=15$ мм, $Y=-15$ мм).

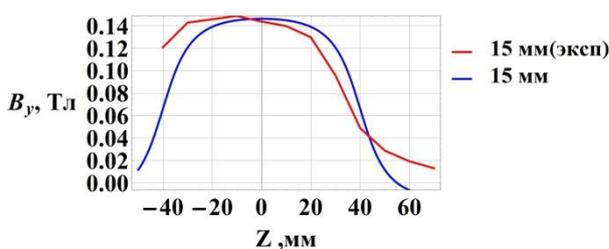


Рисунок 31 – Магнитное поле B_y вдоль оси Z при $Y=15$ мм для поворотного магнита № 1.

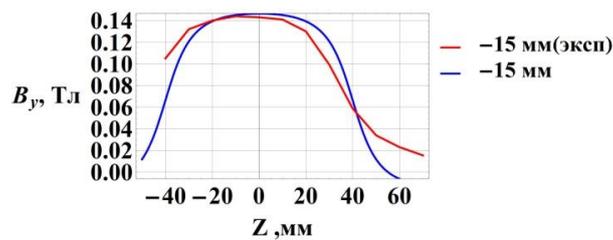


Рисунок 32 – Магнитное поле B_y вдоль оси Z при $Y=-15$ мм для поворотного магнита № 1.

Величина магнитной индукции B_y при $Z=0$ мм и $Y=15$ мм, $Y= -15$ мм, полученная при численном моделировании магнитного поля на краю полюсов ($Z= -40$ мм) поворотного магнита № 1, равна 0,062 Тл, а магнитная индукция B_y вдоль оси X , полученная при измерениях равна 0,121 Тл и 0,115 Тл. Разница между магнитным полем в центре зазора между полюсами на краю поворотного магнита № 1, полученная при помощи численного моделирования и магнитного поля, полученного при помощи измерений составляет 48 % и 46%.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в центре полюсов магнита ($X=0$ мм, $Z=0$ мм) величина магнитной индукции B_y , полученная при численном моделировании между полюсами поворотного магнита № 1, хорошо согласуется с результатами магнитного поля, полученными при измерениях. Разница между результатами составляет не более 1 %.

На краях полюсов магнита ($Z=40$ мм, $Z=-40$ мм), разница между магнитной индукцией B_y , полученная при численном моделировании магнитного поля между полюсами поворотного магнита № 1 вблизи ярма ($Z=-40$ мм), и магнитного поля, полученного при помощи измерений составляет не более 48 %. Данное расхождение можно объяснить не точным заданием геометрии и свойств материала ярма в программе Radia..

На краю полюсов магнита ($X=60$ мм, $X=-60$ мм), разница между магнитной индукцией B_y , полученной при численном моделировании между полюсами поворотного магнита № 1 и магнитным полем, полученным при измерениях составляет не более 25 %. Моделирование не позволяет точно описать результаты измерений на краях полюсов поворотных магнитов в программе Radia.

Поворотный магнит № 2 состоит из ярма и двух полюсов магнита. Верхний и нижний блок ярма имеют форму равнобедренной трапецевидной призмы с одинаковым углом наклона края. В программе Radia для задания материала ярма была использована функция, которая создает блок формы параллелепипеда. Поэтому для исследования магнитного поля поворотного магнита № 2 была построена упрощенная модель, которая не учитывает угол наклона края верхнего и нижнего ярма. Полюса поворотного магнита № 2 обладают остаточной намагниченностью равной 0,28 Тл. Ярмо поворотного магнита № 2 изготовлено из стали, для моделирования была выбрана конструкционная сталь марки 37.

На рисунке 33 представлена модель поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм. На рисунке 34 представлено трёхмерное распределение магнитного поля поворотного магнита № 2 с зазором между магнитами 42 мм.

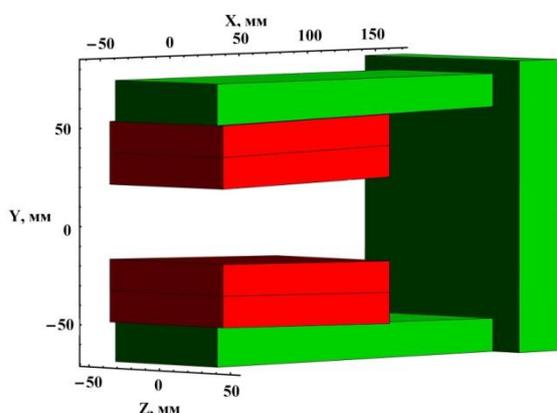


Рисунок 33 – Модель поворотного магнита № 2 с зазором между магнитами 42 мм.

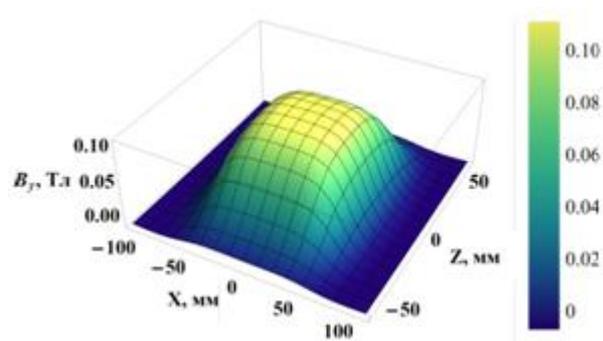


Рисунок 34 – 3D поле поворотного магнита № 2 с зазором между магнитами 42 мм в центре зазора между полюсами.

На рисунке 35 представлены результаты измерения и численного моделирования компоненты магнитного поля B_y поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм вдоль оси X при $Z=0$ мм в центре зазора между магнитами ($Y=0$ мм).

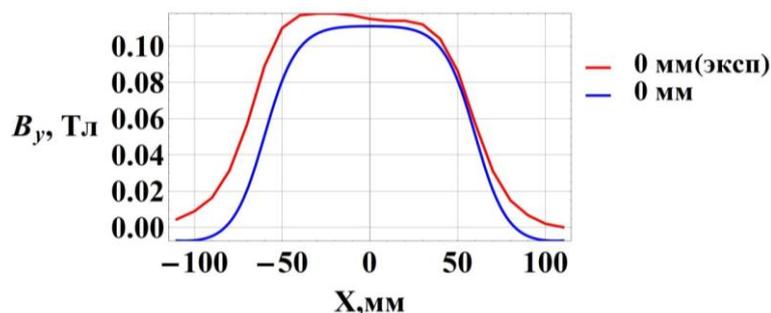


Рисунок 35 – Магнитное поле B_y вдоль оси X при $Z=0$ мм для поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм.

Величина магнитной индукции B_y при $X=0$ мм, полученная при численном моделировании в центре зазора ($Y=0$ мм) поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, равна 0,111 Тл, а магнитная индукция B_y , полученная при измерениях равна 0,115 Тл. Разница между магнитным полем в центре зазора между полюсами поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, полученная при помощи численного моделирования и магнитного поля, полученного при помощи измерений составляет 4 %.

На краю полюсов магнита при $X=60$ мм, $X=-60$ мм и $Z=0$ мм, величина магнитной индукции B_y , полученная при численном моделировании в центре зазора ($Y=0$ мм) между полюсами поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, равна 0,0534 Тл, 0,0598 Тл, а магнитная индукция B_y , полученная при измерениях равна 0,0571 Тл, 0,0892 Тл. Разница между магнитным полем на краю полюсов поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, полученная при помощи численного моделирования и магнитным полем, полученным при помощи измерений составляет 6,5 и 32 %.

На рисунках 36 и 37 представлены результаты измерения и численного моделирования компоненты магнитного поля B_y поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм вдоль оси X при $Z=0$ мм вблизи полюсов магнита ($Y=15$ мм, $Y=-15$ мм).

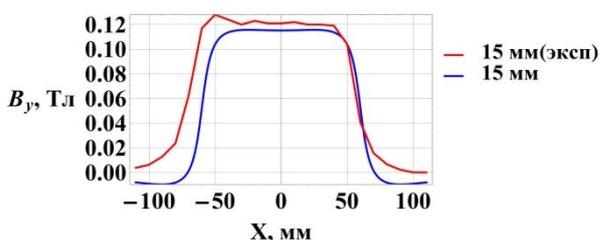


Рисунок 36 – Магнитное поле B_y вдоль оси X при $Y=15$ мм для поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм.

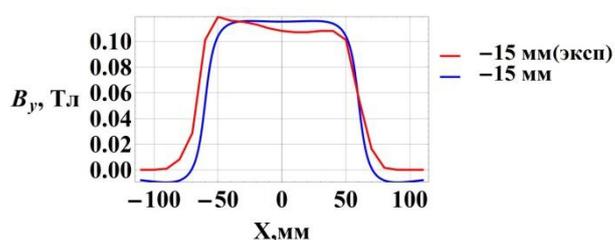


Рисунок 37– Магнитное поле B_y вдоль оси X при $Y=-15$ мм для поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм.

Величина магнитной индукции B_y при $X=0$ мм и $Z=0$ мм, полученная при численном моделировании в центре зазора ($Y=15$ мм) поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, равна 0,116 Тл, а магнитная индукция B_y вдоль оси X , полученная при измерениях равна 0,121. Разница между магнитным полем в центре зазора между полюсами поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, полученная при помощи численного моделирования и магнитного поля, полученного при помощи измерений составляет 4 %.

Величина магнитной индукции B_y при $X=0$ мм и $Z=0$ мм, полученная при численном моделировании в центре зазора ($Y= -15$ мм) поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, равна 0,111 Тл, а магнитная индукция B_y вдоль оси X , полученная при измерениях равна 0,122. Разница между магнитным полем в центре зазора между полюсами поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, полученная при помощи численного моделирования и магнитного поля, полученного при помощи измерений составляет 9 %.

На краю полюсов магнита при $X=60$ мм, $X= -60$ мм и $Z=0$ мм, величина магнитной индукции B_y , полученная при численном моделировании вблизи полюса ($Y=15$ мм) поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, равна 0,0415 Тл, 0,0712 Тл, а магнитная индукция B_y , полученная при измерениях равна 0,0406 Тл, 0,117 Тл. Разница между магнитным полем на краю полюсов поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, полученная при помощи численного моделирования и магнитным полем, полученным при помощи измерений составляет 2 и 39 %.

На краю полюсов магнита при $X=60$ мм, $X= -60$ мм и $Z=0$ мм, величина магнитной индукции B_y , полученная при численном моделировании вблизи полюса ($Y= -15$ мм) поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, равна 0,0457 Тл, 0,0634 Тл, а магнитная индукция B_y , полученная при измерениях равна 0,0558 Тл, 0,101 Тл. Разница между магнитным полем на краю полюсов поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, полученная при помощи

численного моделирования и магнитным полем, полученным при помощи измерений составляет 18 и 37 %.

На рисунке 38 представлены результаты измерения и численного моделирования компоненты магнитного поля B_y поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм вдоль оси Z при $X = 0$ мм в центре зазора между магнитами ($Y = 0$ мм).

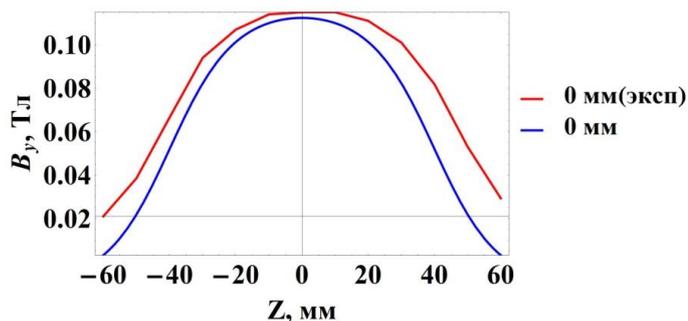


Рисунок 38 – Магнитное поле B_y вдоль оси Z при $X = 0$ мм для поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм.

Величина магнитной индукции B_y при $X = 0$ мм, полученная при численном моделировании в центре зазора ($Y = 0$ мм) на краю полюсов ($Z = 40$ мм, $Z = -40$ мм) поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, равна 0,0569 Тл, 0,0582 Тл, а магнитная индукция B_y , полученная при измерениях равна 0,0818 Тл, 0,0665 Тл. Разница между магнитным полем в центре зазора между полюсами на краю полюсов поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, полученная при помощи численного моделирования и магнитного поля, полученного при помощи измерений, составляет 30 и 12 %.

На рисунках 39 и 40 представлены результаты измерения и численного моделирования компоненты магнитного поля B_y поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм вдоль оси Z при $X = 0$ мм вблизи полюсов магнита ($Y = 15$ мм, $Y = -15$ мм).

Величина магнитной индукции B_y при $Z=0$ мм и $Y=15$ мм, полученная при численном моделировании магнитного поля на краю полюсов ($Z= 40$ мм, $Z= -40$ мм) поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, равна 0,0602 Тл, 0,0576 Тл, а магнитная индукция B_y вдоль оси X , полученная при измерениях равна 0,1 Тл и 0,0996 Тл. Разница между магнитным полем вблизи полюсов поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, полученная при помощи численного моделирования и магнитного поля, полученного при помощи измерений составляет 38 % и 42%.

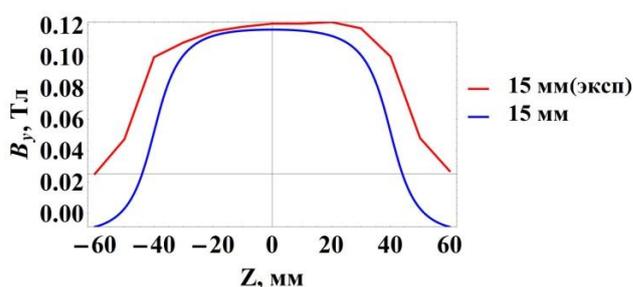


Рисунок 39 – Магнитное поле B_y вдоль оси Z при $Y=15$ мм для поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм.

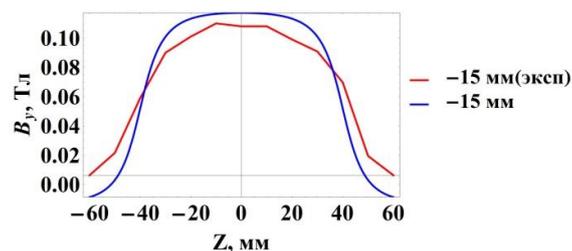


Рисунок 40 – Магнитное поле B_y вдоль оси Z при $Y=-15$ мм для поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм.

Величина магнитной индукции B_y при $Z=0$ мм и $Y=15$ мм, $Y=-15$ мм, полученная при численном моделировании магнитного поля на краю полюсов ($Z= -40$ мм) поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, равна 0,057 Тл, 0,0625 Тл, а магнитная индукция B_y вдоль оси X , полученная при измерениях равна 0,059 Тл и 0,0697 Тл. Разница между магнитным полем вблизи полюсов поворотного магнита № 2 с зазором 42 мм, полученная при помощи численного моделирования и магнитного поля, полученного при помощи измерений составляет 0,1 % и 10 %.

На рисунке 41 представлена модель поворотного магнита № 2 с зазором 20 мм. На рисунке 42 представлено трёхмерное распределение магнитного поля поворотного магнита № 2 с зазором между магнитами 20 мм.

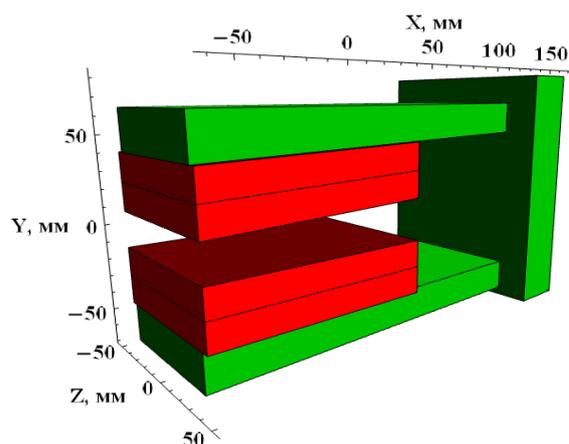


Рисунок 41 – Модель поворотного магнита № 2 с зазором между магнитами 20 мм.

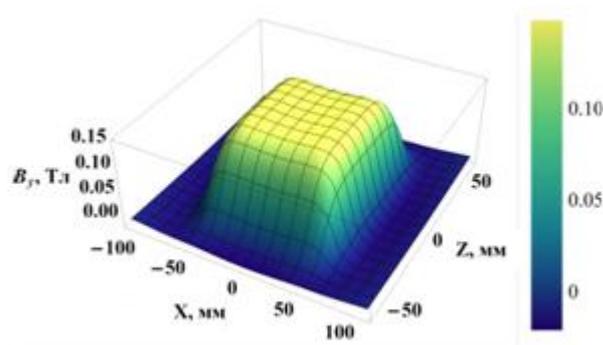


Рисунок 42 – 3D поле поворотного магнита № 2 с зазором между магнитами 20 мм в центре зазора между полюсами.

На рисунке 43 представлены результаты измерения и численного моделирования компоненты магнитного поля B_y поворотного магнита № 2 с зазором 20 мм вдоль оси X при $Z=0$ мм в центре зазора между магнитами ($Y=0$ мм).

На рисунке 44 представлены результаты измерения и численного моделирования компоненты магнитного поля B_y поворотного магнита № 2 с зазором 20 мм вдоль оси Z при $X=0$ мм в центре зазора между магнитами ($Y=0$ мм).

Величина магнитной индукции B_y вдоль оси X , полученная при численном моделировании в центре зазора между полюсами ($Y=0$ мм) поворотного магнита № 2 с зазором 20 мм, равна 0,142 Тл, а магнитная индукция B_y вдоль оси X , полученная при измерениях равна 0,148 Тл. Разница между магнитным полем в центре зазора между полюсами поворотного магнита № 2 с зазором 20 мм, полученная при помощи численного моделирования и магнитного поля, полученного при помощи измерений составляет 4 %.

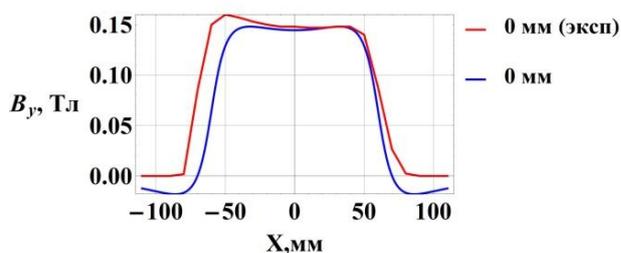


Рисунок 43 – Магнитное поле B_y вдоль оси X при $Z=0$ мм для поворотного магнита № 2 с зазором 20 мм.

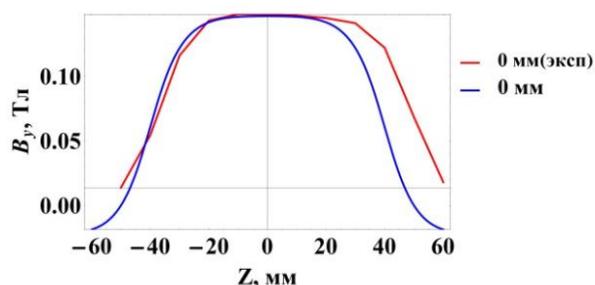


Рисунок 44 – Магнитное поле B_y вдоль оси Z при $X=0$ мм для поворотного магнита № 2 с зазором 20 мм.

На краю полюсов магнита при $X=60$ мм, $X=-60$ мм и $Z=0$ мм, величина магнитной индукции B_y , полученная при численном моделировании в центре зазора между полюсами ($Y=0$ мм) поворотного магнита № 2 с зазором 20 мм, равна 0,0578 Тл, 0,0968 Тл, а магнитная индукция B_y , полученная при измерениях равна 0,0878 Тл, 0,146 Тл. Разница между магнитным полем на краю полюсов поворотного магнита № 2 с зазором 20 мм, полученная при помощи численного моделирования и магнитным полем, полученным при помощи измерений составляет 34 и 33 %.

Величина магнитной индукции B_y при $X=0$ мм, полученная при численном моделировании в центре зазора ($Y=0$ мм) на краю полюсов ($Z=40$ мм, $Z=-40$ мм) поворотного магнита № 2 с зазором 20 мм, равна 0,0665 Тл, 0,0542 Тл, а магнитная индукция B_y , полученная при измерениях равна 0,122 Тл, 0,0543 Тл. Разница между магнитным полем в центре зазора между полюсами на краю полюсов поворотного магнита № 2 с зазором 20 мм, полученная при помощи численного моделирования и магнитного поля, полученного при помощи измерений, составляет 45 и 0,1 %.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в центре полюсов магнита ($X=0$ мм, $Z=0$ мм) величина магнитной индукции B_y , полученная при численном моделировании между полюсами поворотного магнита № 2,

хорошо согласуется с результатами магнитного поля, полученными при измерениях. Разница между результатами составляет не более 9 %.

На краях полюсов магнита ($Z=40$ мм, $Z= -40$ мм), разница между магнитной индукции B_y , полученная при численном моделирование магнитного поля между полюсами поворотного магнита № 2, и магнитного поля, полученного при помощи измерений составляет не более 45 %. Моделирование в программе Radia не позволяет точно описать результаты измерений на краях полюсов поворотных магнитов.

На краю полюсов магнита ($X=60$ мм, $X= -60$ мм), разница между магнитной индукции B_y , полученной при численном моделирование между полюсами поворотного магнита № 2 и магнитным полем, полученным при измерениях составляет не более 39 %. Данное расхождение можно объяснить не точным заданием геометрии и свойств материала ярма в программе Radia.

Заключение

В ходе проделанной работы проведен эксперимент по измерению магнитного поля поворотных магнитов двух конфигураций, в одной из которых зазор между магнитами может изменяться, с помощью датчика Холла. Измерения магнитного поля проводились в трех плоскостях между полюсами поворотных магнитов.

Численное моделирование магнитного поля проводилось при помощи трёхмерного магнитостатического кода Radia, в данной программе построены две модели поворотных магнитов №1 и №2 (с зазором 42 и 20 мм) и проведено моделирование магнитных полей для различных плоскостей между полюсами магнитов.

Вывод

Проведено сравнение результатов магнитного поля поворотных магнитов № 1 и № 2 (с зазором 42 и 20 мм) полученных с помощью измерения и численного моделирования, которые хорошо согласуются между собой в центре полюсов магнита ($X=0$ мм, $Z=0$ мм). Разница между результатами составляет не более 9 %.

Разница между магнитным полем на краях полюсов поворотных магнитов № 1 и № 2, полученных с помощью измерения и численного моделирования, составляет в среднем 48 %. Данное расхождение значений магнитного поля можно объяснить не точностью задания свойств материала ярма в программе Radia. Моделирование в программе Radia не позволяет точно описать результаты измерений на краях полюсов поворотных магнитов.

Результаты учебно-исследовательской работы за время обучения прошли апробацию на следующих конференциях:

– VII Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» июнь 2015 г.

Томск. Доклад «Расчёт магнитного поля вигглера на ускорителе LUCX@КЕК»;

– VII Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» июнь 2015 г. Томск. Доклад «Моделирование характеристик ондуляторного излучения для параметров ускорителя LUCX@КЕК»;

– Международная молодежная конференция Физика.СПб/2015 г. Санкт-Петербург. «Моделирование магнитного поля вигглера на ускорителе LUCX в программе Radia»;

– XLVI Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (ФВЗЧК-2016) июнь 2016 г. в Москве в Московском Государственном Университете. «Обзор современных средств численного моделирования синхротронного излучения».

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности (потенциала) разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований. Через такую оценку ученый может найти партнера для дальнейшего проведения научного исследования, коммерциализации результатов такого исследования и открытия бизнеса.

Целью данной главы является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации [34].

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;

- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

В данной работе проводилось исследование магнитного поля поворотных магнитов с помощью измерений и численного моделирования. Исследование магнитного поля поворотного магнита осуществляется с помощью измерителя магнитной индукции Ш1-8, в котором для измерения магнитного поля используется эффект Холла. Так же было проведено численное моделирование магнитного поля от поворотных магнитов при помощи трёхмерного магнитостатического кода Radia. На данном этапе говорить о коммерческом потенциале данного исследования рано. В связи с этим анализ потенциальных потребителей результатов сделан не был. Данное исследование магнитного поля может быть полезным при проектировании, производстве и оптимизации организациям, использующим ускорительную технику. В качестве заинтересованных могут выступать организации, сфера деятельности которых затрагивает следующие области:

- Производство магнитов ускорителей;
- Пучковая оптика;
- Производство магнитных систем для генерации излучения (вигглер, ондулятор);
- Диагностика пучка;

Развитие новых источников синхротронного излучения ставит новые задачи по проектированию и созданию новых магнитных устройств. Строительство новых ускорителей как для научных, так и прикладных целей, так же требует решение задач связанных с созданием различных магнитных устройств, соответствующих необходимым параметрам пучка. При

проектировании и производстве магнитных систем, имеющих сложную структуру, оптимизацию без моделирования и численных расчетов практически выполнить невозможно.

4.1.2. Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Для проведения анализа конкурентоспособности разработки будет использоваться оценочная карта, приведенная в таблице 5. В качестве конкурирующих разработок были приняты: проведение моделирования магнитного поля с помощью программного пакета CST – K_1 , проведение численного моделирования при помощи программы Ansys – K_2 .

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять единицу.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле

$$3: \quad K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (3)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Таблица 5 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_ϕ	B_{k1}	B_{k2}	K_ϕ	K_{k1}	K_{k2}
1	2	3	4	5	6	7	8

Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,22	5	2	3	1,1	0,44	0,33
2. Помехоустойчивость	0,1	4	2	1	0,4	0,2	0,1
3. Качество интеллектуального интерфейса	0,2	5	5	2	1	1	0,4
4. Надежность	0,1	4	3	4	0,4	0,3	0,4
5. Потребность в ресурсах памяти	0,1	4	3	5	0,4	0,3	0,5
6. Простота эксплуатации	0,01	3	1	2	0,03	0,01	0,02
7. Удобство в эксплуатации	0,05	4	3	4	0,2	0,3	0,05
8. Функциональная мощность	0,1	5	3	5	0,5	0,3	0,5
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
2. Уровень проникновения на рынок	0,01	1	2	5	0,01	0,02	0,05
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
4. Цена	0,01	4	3	3	0,04	0,03	0,03
Итого	1				4,58	3,4	2,88

Из данного анализа видно, что моделирование при помощи трехмерного магнитостатического кода Radia имеет преимущество перед конкурентными разработками за счет простоты, удобства эксплуатации при этом сохраняя высокую функциональную мощность. Так же данная программа находится в свободном доступе. Однако заметной проблемой является слабое проникновение на рынок.

4.1.3. SWOT-анализ

SWOT-анализ – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

Сильными сторонами исследования магнитного поля поворотных магнитов с помощью измерений и численного моделирования в программе Radia можно назвать следующие свойства и особенности:

- возможность измерения магнитного поля с малой погрешностью с помощью измерителя магнитной индукции Ш1-8;
- возможность реализовать точную геометрию магнитной системы в программе Radia;
- согласованность с известными исследованиями;
- отсутствие необходимости знаний языков программирования.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Слабыми сторонами данной разработки можно назвать следующие свойства и особенности:

- длительность измерений магнитного поля с помощью измерителя магнитной индукции Ш1-8;
- необходимость наличия пакета программ Wolfram Mathematica;

– высокая стоимость пакета программ Wolfram Mathematica.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

К возможностям данного проекта можно отнести:

- автоматизация и модернизация схемы измерения магнитного поля;
- свободный доступ пакета программ Wolfram Mathematica.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту.

К угрозам можно отнести:

- поломка схемы измерения магнитного поля;
- поломка ЭВМ;
- отсутствие коммерческого интереса к проекту;
- недостаточная точность расчетов.

В таблице 6 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Таблица 6 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
		B1	+	+	+

	B2	+	+	+	+
--	----	---	---	---	---

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение.

Подобные матрицы были построены для анализа сильных сторон и угроз проекта, для анализа слабых сторон и возможностей проекта, а также для анализа слабых сторон и угроз проекта.

В таблице 7 представлен SWOT-анализ в виде таблицы, так же показаны результаты пересечений сторон, возможностей и угроз.

Таблица 7 – SWOT-анализ

	Сильные стороны	Слабые стороны
	<p>научно-исследовательского проекта:</p> <ul style="list-style-type: none"> – С1. возможность измерения магнитного поля с малой погрешностью с помощью измерителя магнитной индукции Ш1-8; – С2. – возможность реализовать точную геометрию магнитной системы в программе Radia; 	<p>научно-исследовательского проекта:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Сл1. длительность измерений магнитного поля с помощью измерителя магнитной индукции Ш1-8; – Сл2. необходимость наличия пакета программ Wolfram Mathematica; – Сл3. высокая стоимость пакета программ Wolfram

	<p>– С3. согласованность с известными исследованиями;</p> <p>– С4. отсутствие необходимости знаний языков программирования.</p>	Mathematica.
<p>Возможности:</p> <p>– В1. автоматизация и модернизация схемы измерения магнитного поля;</p> <p>– В2. свободный доступ пакета программ Wolfram Mathematica.</p>	<p>1. Возможность точного измерения магнитных полей различных магнитных систем;</p> <p>2. Возможность численного расчета для магнитных систем различной конфигурации.</p>	<p>1. Возможность быстрого измерения магнитного поля различных магнитных систем;</p> <p>2. Возможность независимого пользования</p>
<p>Угрозы:</p> <p>– У1. поломка схемы измерения магнитного поля;</p> <p>– У2. поломка ЭВМ;</p> <p>– У3. отсутствие коммерческого</p>	<p>1. Возможность повышения безопасности при измерении, а затем и при работе с программным обеспечением.</p>	<p>1. Возникновение трудностей при обработке большого количества данных</p>

интереса к проекту; – У4. недостаточная точность расчетов.	2. Анализа рынка потребителей.	
--	-----------------------------------	--

Проанализировав характер НТР можно сделать вывод, что наиболее оптимальной стратегией выхода разработки на рынок является стратегия совместной предпринимательской деятельности. Совместная предпринимательская деятельность – это стратегия, которая основана на соединении общих усилий фирмы с коммерческими предприятиями партнера для создания производственных и маркетинговых мощностей. Эта стратегия выбрана, так как необходимо найти стабильный рынок заказов и сбыта товара.

4.2. Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1. Структура работ в рамках научного исследования

Научно-исследовательские работы и опытно-конструкторские разработки разбиваются на этапы в соответствии с ГОСТ 15.101-98, (для НИР) ГОСТ Р 15.201-2000 (для ОКР). В зависимости от характера и сложности НИОКР ГОСТ допускает разделение этапов на отдельные виды работ.

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 8.

Таблица 8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей.

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
	3	Выбор направления исследований	Руководитель, студент
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Студент
	6	Выбор магнитных систем	Руководитель, студент
	7	Разработка схемы измерения магнитного поля	Руководитель, студент
	8	Проведение экспериментов	Руководитель, студент
	9	Оценка правильности полученных результатов, сравнение их с существующими	Руководитель, студент

	10	Численное моделирование магнитных полей поворотных магнитов	Студент
	11	Оценка правильности полученных результатов, сравнение их с существующими	Руководитель, студент
Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, студент
	13	Определение целесообразности проведения ВКР	
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ВКР)	11	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Студент
	12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, студент
	14	Поиск путей оптимизации разработки	Руководитель, студент

4.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения

ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула (4):

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (4)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Пример:

$$t_{ожі} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 3}{5} = 1.8 \quad (5)$$

Далее расчеты проводятся аналогично.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p (6), учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{p_i} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (6)$$

где T_{p_i} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Пример:

$$T_{pi} = \frac{1,8}{1}.$$

Далее расчеты проводятся аналогично.

4.2.3. Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Гантта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой (7):

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (7)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле (8):

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (8)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 96 - 20} = 1,47$$

$$t_{\text{min1}} = 1$$

$$t_{\text{max1}} = 3$$

$$t_{\text{ож1}} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 3}{5} = 1,8$$

$$T_{p1} = \frac{1,8}{1} = 1,8$$

$$T_{k1} = 1,8 \cdot 1,47 = 3$$

На основе полученных выше расчетов строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работы в рамках научно-исследовательского проекта и представлен в таблице 9 с разбивкой по месяцам и неделям за период времени дипломирования.

Таблица 9 – Календарный план-график проведения ВКР

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ															
				март.				апрель				май				июнь			
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Составление и утверждение технического задания	Р	3																

2	Выбор направления исследований проводимых в рамках ВКР	С, Р	3																	
3	Подбор и изучение материалов по теме	С	10																	
4	Календарное планирование работ по теме	Р	5																	
5	Проведение экспериментов	С	10																	

6	Оценка правильности полученных результатов	С, Р	5																	
7	Выбор параметров моделирования	С,Р	5																	
8	Численное моделирование магнитных полей поворотных магнитов	С	10																	
10	Оценка эффективности применения результатов исследования	С,Р	40																	
11	Составление пояснительной записки	С,	7																	
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	С,Р	5																	

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, m^2 и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./ m^2 и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 10.

Отсутствие в таблице разделения на источники финансирования говорит о том, что источник один. Источник финансов в данной работе – студент.

Основные работы для ВКР проводились за рабочей станцией в корпусе университета и на домашней станции. Время, проведенное за работой: 1280 часов. Мощность рабочих станций: 0,5 кВт.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле (10):

$$C = C_{эл} * F_{об} * P = 4 * 0,5 * 1280 = 2560 \text{ руб} \quad (10),$$

где $C_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (4 руб. за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

$F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 1165 рублей.

Таблица 10 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
1. Электроэнергия	кВт·ч	640	4	2560

4.2.6. Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20–30 % от тарифа или оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} \quad (11),$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, студента) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}} = 1294 \cdot 31 = 40121 \text{ руб.},$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{р}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{20000 \cdot 11,2}{225} = 1294 \text{ руб.},$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M=11,2$ месяца, 5-дневная неделя;
 при отпуске в 48 раб. дней $M=10,4$ месяца, 6-дневная неделя;
 F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 11).

Таблица 11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	109	109
- праздничные дни		
Потери рабочего времени		
- отпуск	31	41
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	225	215

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{tc} \cdot k_p = 20000 \cdot 1,3 = 26000 \text{ руб.},$$

где Z_{tc} – заработная плата по КПП, руб.,

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 для Томска;

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 12.

Таблица 12 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Z_{tc} , руб.	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	20000	1,3	26000	1294	31	40121
Студент	2642	-	2642	132	25	3288
Итого						43409

4.2.7. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} = 40121 \cdot 0,12 = 4815 \text{ руб.},$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Дополнительная заработная плата представлена в таблице 13.

Таблица 13 – Расчёт дополнительной заработной платы

Исполнитель	$k_{\text{доп}}$	$З_{\text{осн}}$	$З_{\text{доп}}$
Руководитель	0,12	40121	4815
Итого			4815

4.2.8. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (12),$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представлять в таблице 14.

$$k_{\text{внеб}} = k_{\text{пф}} + k_{\text{с}} + k_{\text{пн}} \quad (13),$$

где $k_{\text{пф}}$ – коэф. отчисления в пенсионный фонд;

$k_{\text{с}}$ – коэф. отчисления страховых взносов;

$k_{\text{пн}}$ – коэф. отчисления в подоходный налог.

$$k_{\text{внеб}} = 0,271$$

Таблица 14 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель	Студент
Основная заработная плата, руб.	40121	3288
Дополнительная заработная плата, руб.	4815	-
Коэффициент отчислений во	0,271	

внебюджетные фонды		
Сумма отчислений	12177	-
Итого	12177	

4.2.9. Затраты на научные и производственные командировки

Затраты на научные и производственные командировки исполнителей определяются в соответствии с планом выполнения темы и с учетом действующих норм командировочных расходов различного вида и транспортных тарифов. В данной дипломной работе затраты на командировки равны нулю.

4.2.10. Контрагентные расходы

Контрагентные расходы включают затраты, связанные с выполнением каких-либо работ по теме сторонними организациями (контрагентами, субподрядчиками), т.е.:

1) Работы и услуги производственного характера, выполняемые сторонними предприятиями и организациями. К работам и услугам производственного характера относятся:

- выполнение отдельных операций по изготовлению продукции, обработке сырья и материалов;
- проведение испытаний для определения качества сырья и материалов;
- контроль за соблюдением установленных регламентов технологических и производственных процессов;
- ремонт основных производственных средств;
- поверка и аттестация измерительных приборов и оборудования, другие работы (услуги) в области метрологии и прочее.
- транспортные услуги сторонних организаций по перевозкам грузов внутри организации (перемещение сырья, материалов, инструментов, деталей, заготовок, других видов грузов с базисного (центрального)

склада в цехи (отделения) и доставка готовой продукции на склады хранения, до станции (порта, пристани) отправления).

2) Работы, выполняемые другими учреждениями, предприятиями и организациями (в т.ч. находящимися на самостоятельном балансе опытными (экспериментальными) предприятиями по контрагентским (соисполнительским) договорам на создание научно-технической продукции, головным (генеральным) исполнителем которых является данная научная организация).

Расчет величины этой группы расходов зависит от планируемого объема работ и определяется из условий договоров с контрагентами или субподрядчиками. В данной работе затраты по данной статье расходов отсутствуют.

4.2.11. Накладные расходы

В данную статью входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных служб. По этой статье учитываются оплата труда административно-управленческого персонала, содержание зданий, оргтехники и хозяйственного инвентаря, амортизация имущества, расходы по охране труда и подготовке кадров.

Накладные расходы в ТПУ составляют 25-35 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (14),$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов, равный 30+10=40 %.

Где дополнительные 10% учитывают амортизацию.

Накладные расходы составят:

$$C_{\text{накл}} = 0,4 * (44936) = 17974 \text{ руб.}$$

4.2.12. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 15.

Таблица 15 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НИИ	2560
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	43409
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	4815
4. Отчисления во внебюджетные фонды	12177
5. Накладные расходы	17974
6. Затраты на научные и производственные командировки	-
7. Контрагентные расходы	-
Бюджет затрат НИИ	80935

На основании расчета определили затраты на выполнение НИИ, которая составила 80935 рублей.

4.3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его

нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (15),$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в форме таблицы (таблица 16).

Таблица 16 – Оценка характеристик исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Оценка
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,4	5
2. Удобство в эксплуатации	0,1	5
3. Помехоустойчивость	0,05	4
4. Энергосбережение	0,2	5
5. Надежность	0,2	4
6. Материалоемкость	0,05	5
ИТОГО	1	

$$I_{p-ист} = 5 * 0,4 + 5 * 0,1 + 4 * 0,05 + 5 * 0,2 + 4 * 0,2 + 5 * 0,05 = 3,95$$

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

5. Социальная ответственность

В связи с различными чрезвычайными ситуациями происходящими на предприятии, соответственно очень важным является обеспечение безопасности рабочих мест на предприятии, и предотвращение возможных опасных ситуации. Одно из основных направлений профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда. Одновременно должно осуществляться последовательное повышение качества и эффективности всех средств коллективной и индивидуальной защиты от вредных и опасных производственных факторов, увеличение объема их производства до полного удовлетворения потребностей народного хозяйства и рациональное их использование.

Охрана труда - это система законодательных актов, социально-экономических, организационных, технических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека во время труда [34].

Полностью безопасных и безвредных производств не существует. Задача охраны труда — свести к минимуму вероятность поражения или заболевания работающего с одновременным обеспечением комфорта при максимальной производительности труда. Реальные производственные условия характеризуются, как правило, наличием некоторых опасных и вредных производственных факторов.

Опасным производственным фактором, согласно ГОСТ [34], называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводит к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

5.1. Анализ опасных и вредных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов [35], которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

В выпускной квалификационной работе проведено исследование магнитного поля с помощью измерений и численного моделирования. В таблице 17 приведены основные вредные и опасные факторы производственного процесса.

Таблица 17 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Измерение магнитного поля и работа с компьютером, на каф. ПФ		Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03
		Пожарная опасность	ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.
	Воздействие		Санитарно-

	радиации (ВЧ,УВЧ,СВЧ и т.д.)		эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»
--	------------------------------------	--	--

На инженера, работа которого связана с моделированием на компьютере, воздействуют следующие факторы:

– физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой чистоты; освещённость; наличие излучения; психофизиологические.

– психофизиологические опасные и вредные производственные факторы делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

5.2.Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ

5.2.1. Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте.

Проверяемому, присваивается соответствующая квалификационная группа по технике безопасности с учётом его знаний и опыта работы и выдается специальное удостоверение.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

5.2.2. Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще, должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости изображены на рисунке 45.

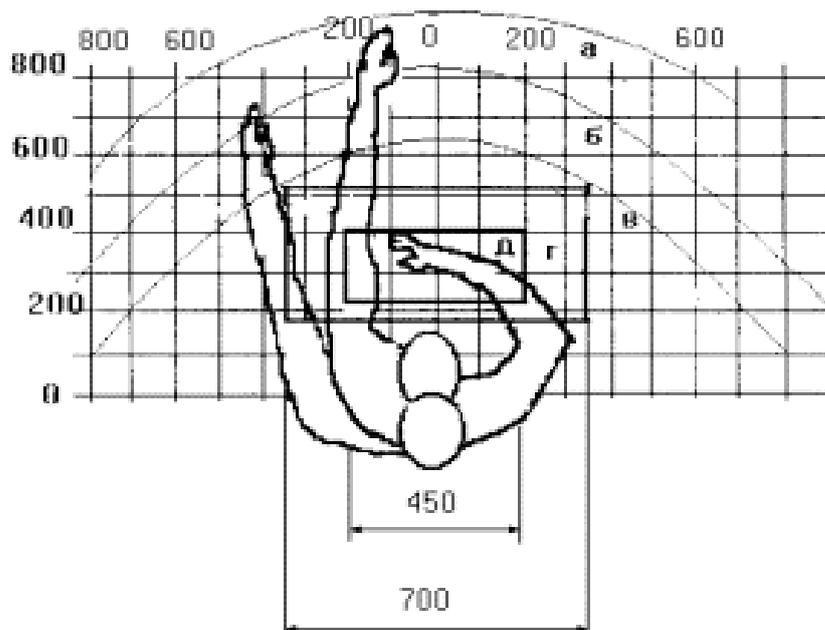


Рисунок 45 – Зоны досягаемости рук

- а - зона максимальной досягаемости рук;
- б - зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;
- в - зона легкой досягаемости ладони;
- г - оптимальное пространство для грубой ручной работы;
- д - оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура - в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация: в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) - литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола - литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования: высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм; высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм.; рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм.; должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной - не менее 500 мм, глубиной на уровне колен - не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног - не менее 650 мм.; рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем; монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её

размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

5.2.3. Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Микроклимат – комплекс физических факторов внутренней среды помещений, оказывающий влияние на тепловой обмен организма и здоровье человека.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии со [36К] и приведены в таблице 18.

Таблица 18– Оптимальные параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22-24	40-60	0,1

Тёплый	23-25	40-60	0,1
--------	-------	-------	-----

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещении должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека — не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность — 40%, скорость движения воздуха — 0,1 м/с, температура летом — 20..25 °С, зимой — 13..15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Согласно [36] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц-2кГц — 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц-400кГц — 2,5В/м.
- Плотность магнитного потока должна быть не более:
- в диапазоне частот 5Гц-2кГц — 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц-400кГц — 25нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);

- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. По нормам конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более $7,7 \cdot 10^{-4}$ А/кг, что соответствует эквивалентной дозе, равной 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

5.3.Электробезопасность

Действие электрического тока на человека носит сложный и разнообразный характер. При замыкании электрической цепи через организм

человека ток оказывает термическое, электролитическое, биологическое и механическое воздействие.

Термическое действие тока проявляется в виде ожогов как наружных участков тела, так и внутренних органов, в том числе кровеносных сосудов и нервных тканей. Электроожоги излечиваются значительно труднее и медленнее обычных термических, сопровождаются внезапно возникающими кровотечениями, омертвением отдельных участков тела.

Электролитическое действие тока вызывает электролиз крови и лимфатической жидкости, в результате чего нарушается их химический состав и ткани организма в целом.

Биологическое воздействие выражается в раздражении живых тканей организма. Электрический ток нарушает действие биотоков, управляющих внутренним движением ткани, вызывает непроизвольное, противоестественное судорожное сокращение мышц сердца и легких.

Механическое действие тока, на организм является причиной электрических травм. Характерными видами электротравм являются ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, электроофтальмия, разрывы тканей, вывихи суставов и переломы костей.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. При измерениях и численном моделировании существует опасность электропоражения в следующих случаях [37]:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под

напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);

- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

В качестве мероприятий по обеспечению безопасности работы с электрооборудованием могут быть использованы следующие защитные средства. Отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы, вывешивание плакатов, указывающих место работы, заземление корпусов всех установок через нулевой провод, покрытие металлических поверхностей инструментов надёжной изоляцией, недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклучение в корпуса электропоражающих элементов, заклучение в корпус токоведущих частей).

5.4.Противопожарная безопасность

Согласно нормам пожарной безопасности, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д [38]. Так как помещение лаборатории по степени пожароопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер [39]. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;

— своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

1. Сообщить руководству (дежурному);
2. Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС;
3. Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Список используемой литературы

1. Фетисов Г. В., Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. – Физматлит. – Москва, 2007. – С. 91-93.
2. Кулипанов Г.Н., Скринский А.Н., Использование синхротронного излучения: состояние и перспективы . – УФН 122. – 1977. – С. 369.
3. Фетисов Г. В., Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. – Физматлит Москва, 2007. — С. 117-193.
4. Загирняк М.В., Подорожный С.В., Разработка математической модели и расчет электромагнитного поля в рабочей зоне извлекающей магнитной системы подвешенного сепаратора. – Електротехніка і Електромеханіка. – 2009. – №3. – С.25–28
5. Жидков Е. П., Волошина И. Г., Полякова Р. В., Перепелкин Е. Е., Российская Н. С., Шаврина Т. В., Юдин И. П., Проблемы компьютерного моделирования магнитных систем для некоторых физических установок. "Математика. Компьютер. Образование". – Сб. трудов XV международной конференции. – 2008. – Том 2. – С. 193-202.
6. Семенов А.М., Разработка, исследование и запуск вакуумной системы бустера-синхротрона для источника синхротронного излучения третьего поколения NSLS-II – Новосибирск, 2015.
7. Ерохин А., Accelerators today and tomorrow – ЦЕРН, ИЯФ СО РАН. – 2013.
8. Гинзбург В. Л., Андрюшин Е. А., Сверхпроводимость. – Педагогика. – 1990.
9. Миткевич А.В., Стабильность постоянных магнитов. – Ленинград: Энергия, 1971. – С 60-120.
- 10.Пятин Ю. М., Постоянные магниты : Справочник. – Москва: Энергия, 1980. – С 120-486.
- 11.Ситидзе, Ю. Ферриты. – Москва: Мир, 1964. – С110 – 408.
- 12.Куневич А.В., Подольский А.В., Ферриты. Энциклопедический справочник. Том 1. Магниты и магнитные системы. – СПб.: ЛИК, 2004

- 13.Иванов М.П., Методы измерения физических величин (магнитные измерения) : учебное пособие – Уфа: Изд-во Уфимского авиационного ин-та, 1984. – С 22 – 54.
- 14.Ю.Н. Маслов., Магнитные измерения и приборы. –Москва. –1999. – С.40–53.
- 15.Келин Н.А., Кудрявцев В.К., Методы и устройства для контроля магнитных свойств постоянных магнитов. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – С 79.
- 16.Боровик Е. С, Еременко В. В., Мильнер А. С. Лекции по магнетизму. – ФИЗМАТЛИТ, 2005. – С 420-480.
- 17.Д.А. Павлов, С.М. Планкина, А.В. Кудрин., Эффект Холла Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. – С 8– 20.
- 18.Корицкий Ю.В., Пасынков В.В., Справочник по электрическим материалам. – Энергоиздат, 1988. – Т. 1–3.
- 19.Чечерников, В. И. Магнитные измерения : учебное пособие. – Москва: Изд-во Московского ун-та, 1969. – С 60-100.
- 20.Измеритель магнитной индукции Ш1-8.Техническое описание и инструкция по эксплуатации.1984
- 21.Бреббия, К., Применение метода граничных элементов в технике. – Москва: Мир, 1982. – С120- 200.
- 22.Сабоннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л., Метод конечных элементов. – М.: Мир, 1989. – С100-135.
- 23.ANSYS – [Электронный ресурс]: <http://www.ansys.com/>
- 24.FEMM 4.2 – [Электронный ресурс]: www.femm.info.
- 25.Radia – [Электронный ресурс]: <http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia>.
- 26.CST PARTICLE STUDIO – [Электронный ресурс]: <https://www.cst.com/Products/CSTps/solvers>
- 27.Буль О.Б., Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов : программа ANSYS : учебное пособие по специальности

- "Электрические и электронные аппараты" направления "Электротехника, электромеханика и электротехнология"]. – М., 2006. – С 50-98.
28. Кулипанов Г.Н., Изобретение В.Л. Гинзбургом ондуляторов и их роль в современных источниках синхротронного излучения и лазерах на свободных электронах: устный выпуск журнала «Успехи физических наук. – Новосибирск, 2007.
29. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM : учебное пособие для вузов по специальности "Электрические и электронные аппараты" направления "Электротехника, электромеханика и электротехнология"]. . – М., 2005. . – С 120-254.
30. Chubar O., et al. A 3D magnetostatics computer code for insertion devices // J. Synchrotron Rad. – 1998. – V.5. P. 481–484.
31. Марочник стали и сплавов– [Электронный ресурс]: http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=924
32. Кривые намагничивания – [Электронный ресурс]: <http://cae-club.ru/forum/krivye-namagnichivaniya-bh-delimsya-dannymi>
33. G.A. Naumenko Features of edge effect of coherent synchrotron radiation of relativistic electrons – Advanced Materials Research Vol.1084, 2015– P 234– 240.
34. Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С.36.
35. ГОСТ 12.0.002-80. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения.
36. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ Опасные и вредные факторы. Классификация. – М.: ИПК: Изд-во стандартов, 1997 г.

- 37.ГОСТ 12.1.030-81, Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
- 38.НПБ 105-95. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. 31 окт. 1995 г.
- 39.ГОСТ 12.4.009-83, Система стандартов безопасности труда. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание.

Приложение А

Моделирование магнитного поля вигглера на ускорителе LUCX в программе Radia

На компактном линейном электронном ускорителе LUCX (КЕК) в Японии в конце 2015 года была произведена установка плоского малогабаритного вигглера [1], состоящего из NdFeB постоянных магнитов. После установки вигглера на LUCX планируется проведение экспериментов по генерации ондуляторного излучения в терагерцовом (0.1 – 10 ТГц) диапазоне длин волн [2] на основе заранее сгруппированного электронного пучка с расстояниями между сгустками порядка длины самих сгустков. Энергия электронов после электронной пушки равна 8.25 МэВ, а после ускоряющей секции – 30 МэВ [3]. Большой интерес к ТГц излучению связан с тем, что данный вид излучения не ионизирует органические вещества подобно, например, рентгеновскому излучению, и потому может быть использован для исследования биологических систем [4].

Чтобы провести детальные расчёты и оптимизацию характеристик ондуляторного излучения, необходимо знать параметры магнитного поля, создаваемого вигглером. Также знание магнитного поля во всём объёме между полюсами вигглера требуется для того, чтобы сделать оценки изменения и смещения пучка заряженных частиц в процессе движения в вигглере, необходимые для настройки магнитной системы ускорителя.

В данной работе представлены расчёты магнитного поля в центральной плоскости вигглера, расчёты поля вдоль траектории движения пучка электронов (центральная ось вигглера) для нескольких значений ширины зазора между полюсами магнитов. Также представлены результаты анализа влияния поворотов вигглера относительно его центра вокруг всех трёх осей.

Магнитное поле вычислялось на основе пакета Radia [5], являющегося интегрированным модулем системы Mathematica компании Wolfram Research [6]. Данные моделирования о магнитном поле сравниваются с известными экспериментальными данными [1] и с данными, полученными при моделировании на основе метода конечных элементов.

Описание вигглера

Вигглер содержит пять периодов, состоящих из постоянных магнитов, где длина каждого периода равна 60 мм, ширина зазора между полюсами может меняться от 30 до 60 мм. Трёхмерная модель вигглера, построенная в Radia, изображена на рисунке А.1.

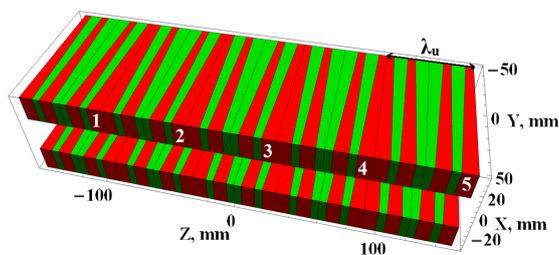


Рисунок А.1 – Трёхмерная модель вигглера.

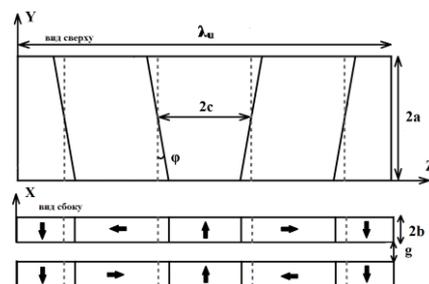


Рисунок А.2 – Схема одного периода.

Магниты имеют форму равнобедренной трапецевидной призмы с одинаковым углом наклона края ϕ (рисунок А.2). Магнитные блоки в каждом периоде обладают вертикальной либо горизонтальной намагниченностью, направления которой изображены на рисунке А.2. Основные параметры магнитной системы приведены в таблице А.1.

Таблица А.1 – Параметры вигглера

Параметр	Значение
Длина периода, λ_u	60 мм
Количество периодов	5

Зазор между полюсами, g	30 – 60 мм
Угол наклона, φ	2.0 град.
Состав магнитов	Nd-Fe-B
Размеры блока, 2b×2a×2c	20×100×15 мм
Остаточная намагниченность	1.32 Тл

Результаты моделирования

На рисунке А.3 представлено трёхмерное распределение магнитного поля в проекции на ось X (B_x) в центральной плоскости вигглера. Из рисунка видно, что магнитное поле не симметрично относительно плоскости YZ. Даная асимметрия распределения магнитного поля обусловлена трапецевидной геометрией магнитов, составляющих вигглер, и их направлениями магнетизации.

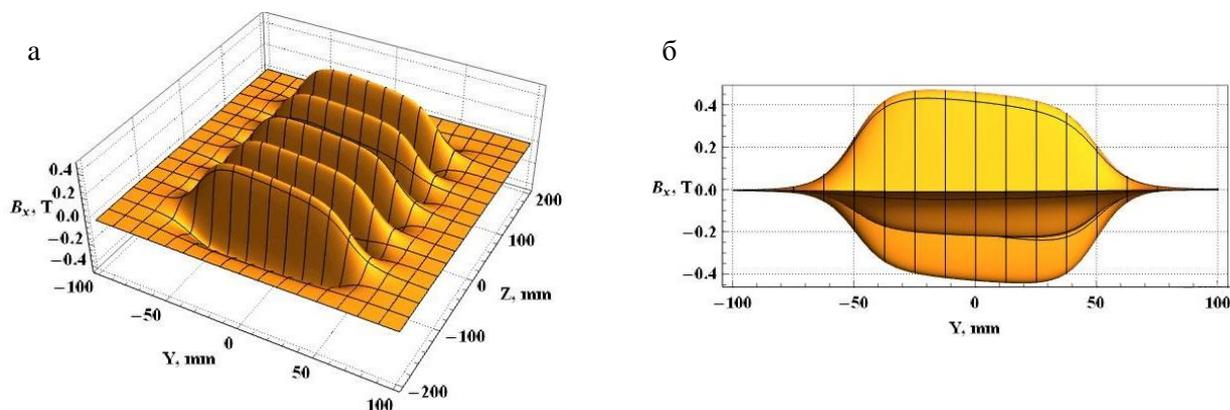


Рисунок А.3 – 3D поле вигглера в центральной плоскости для ширины зазора 30 мм (а), вид сбоку (б).

Максимумы распределения соответствуют центрам периодов, а минимумы – краям. В плоскости YZ магнитное поле имеет достаточно постоянное значение и в максимуме разброс значений в диапазоне по оси Y от -10 до 10 мм равен 4%.

На рисунке А.4 изображены проекции магнитной индукции на ось X (B_x), рассчитанные для значений ширины зазора между полюсами вигглера

равных 30, 40, 50 и 60 мм. Максимальная величина магнитной индукции, полученная при моделировании для ширины зазора 30 мм в центре вигглера, равна 0.432 Т, при этом измеренная величина равна 0.421 Т [1]. Разница между этими величинами составляет 2.6%. Причиной данного расхождения может быть систематическая ошибка угла наклона края при изготовлении магнитных блоков и не полным учётом особенностей магнитных свойств материала магнитов, в частности, проницаемость в моделировании принималась равной 1, хотя в направлении оси магнетизации её действительное значение равно 1.05.

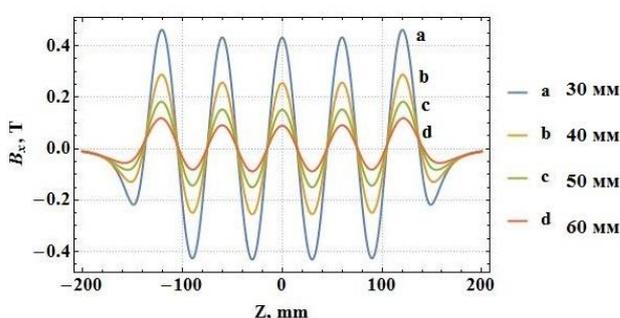


Рисунок А.4 – Магнитное поле вдоль оси при разной ширине зазора между полюсами.

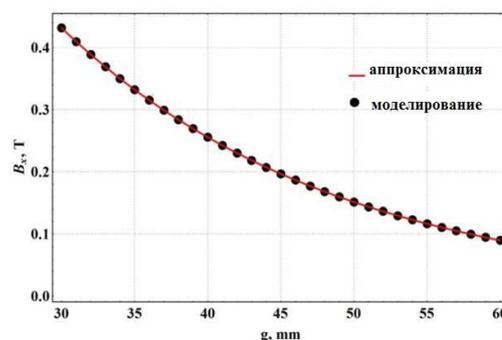


Рисунок А.5 – Зависимость проекции магнитной индукции на ось X от ширины зазора.

На рисунке А.5 представлена проекция магнитной индукции на ось X в центре (0, 0, 0) вигглера в зависимости от ширины зазора. С увеличением зазора между магнитами величина поля уменьшается по следующему экспоненциальному закону: $a \cdot e^{-b \cdot g}$, где $a = 2.079 \pm 4 \cdot 10^{-4}$ Т и $b = 0.052392 \pm 5 \cdot 10^{-6}$ 1/mm. Максимальная величина магнитного поля, полученная при моделировании в центре вигглера, изменяется в пределах от 0,09 до 0,432 Т при изменении ширины зазора от 60 до 30 мм соответственно.

На рисунке А.6 изображены проекции магнитной индукции (B_x), рассчитанные для вигглера с шириной зазора 30 мм, вдоль траектории пучка заряженных частиц, где сплошная кривая соответствует случаю, когда

траектория пучка совпадает с осью вигглера, а пунктирная кривая соответствует магнитной индукции, рассчитанной для вигглера повернутого на угол $\alpha = 1/\gamma = 3.548$ градуса вокруг оси Y относительно его центра $(0, 0, 0)$ против часовой стрелки (рисунок А.1), где $\gamma = 16.14$ Лоренц-фактор для электрона. Для сравнения магнитного поля вдоль траектории пучка при разных положениях вигглера были выбраны области О, А и В, указанные на рисунке А.6, которые соответствуют центру вигглера, центру и краю последнего периода.

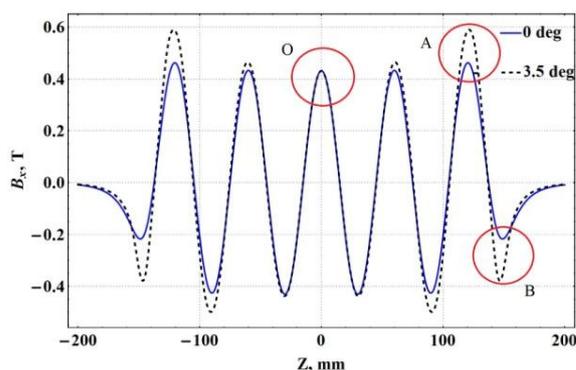


Рисунок А.6 – Зависимость проекции магнитной индукции (B_x) на оси Z для двух положений вигглера.

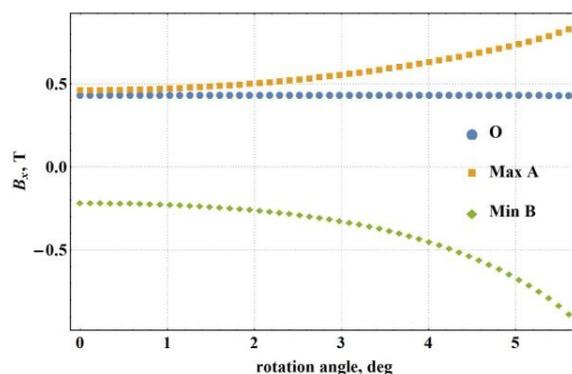


Рисунок А.7 – Зависимость проекции магнитной индукции (B_x) от угла поворота вигглера для трёх локализаций на оси вигглера.

На рисунке А.7 представлены зависимости компоненты B_x при поворотах вигглера вокруг оси Y в диапазоне углов от 0 до 2γ , где 2γ это максимальный угол поворота, при котором вигглер не касается траектории пучка.

В таблице А.2 представлены отношения (r) магнитных полей вигглера в зависимости от угла поворота (α) относительно осей X , Y и Z в областях О, А и В соответственно. Параметр r это отношение магнитной индукции B_x вигглера повернутого относительно оси на угол α , к магнитной индукции B_x вигглера при $\alpha = 0$.

Таблица А.2 – Отношения магнитных полей в зависимости от угла поворота

Параметр	Ось								
	Y			X				Z	
$\alpha, ^\circ$	1	1.5	2	-4	-2	2	4	-2	2
$r(0)$	1	1	1	1	1	1	1	0.994	0.994
$r(\text{макс А})$	1.02	1.046	1.087	1.01	1.09	0.988	0.978	0.994	0.994
$r(\text{мин В})$	1.048	1.1	1.2	0.969	0.985	1.013	1.026	0.994	0.994

Моделирование показало что, при повороте относительно оси Y параметр r не зависит от направления поворота. При повороте относительно оси X параметр r изменяется в зависимости от направления поворота, что обусловлено внутренней структурой вигглера, т.е. геометрией его магнитных элементов. При повороте относительно оси Z параметр r изменяется не значительно и не зависит от направления поворота.

Сравнение методов моделирования

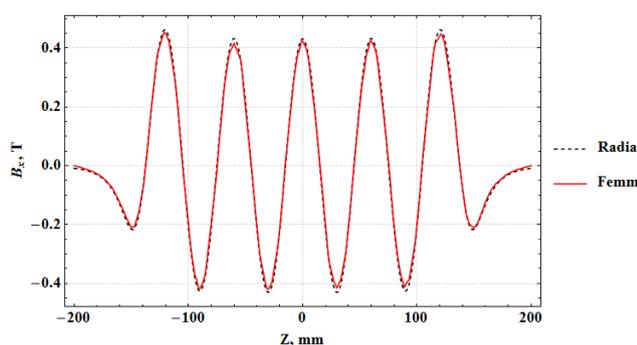


Рисунок А.6 – Сравнение компоненты B_x магнитного поля, рассчитанного в Radia и Femm, сплошная и пунктирная линия соответственно.

На рисунке А.8 представлены графики проекции магнитной индукции на ось X, рассчитанные для 30 мм ширины зазора между полюсами вигглера в программах Radia и Femm. Femm это программа для моделирования магнитного поля в 2D геометрии, реализующая метод конечных элементов. Она достаточно проста в освоении, имеет средства графического проектирования геометрии и не требует знаний в языках программирования [7]. Максимальная величина магнитного поля в центре вигглера, полученная

в Radia, равна 0.432 Т, в Femm – 0.423 Т. Разница между этими величинами и измеренной составляет 2.6 и 0.5% соответственно. По-видимому, данное расхождение может быть обусловлено не столько применением различных численных методов, реализованных в этих программах, сколько разницей в способах задания магнитных свойств материала, которые отличны друг от друга в этих программах.

Заключение

Таким образом, можно заключить, что построена модель вигглера ускорителя LUCX, позволяющая рассчитать характеристики магнитного поля вигглера в зависимости от следующих параметров его геометрии: ширина зазора, углы поворота относительно траектории пучка. Также на основе функционала Radia достаточно легко можно смещать вигглер относительно траектории пучка.

Магнитное поле не симметрично относительно плоскости YZ, что обусловлено геометрией магнитов вигглера. Величина магнитного поля изменяется по экспоненциальному закону при изменении ширины зазора. При изменении величины магнитного поля (B_x) в диапазоне от 0.09 до 0.432 Т фундаментальная частота ондуляторного излучения изменяется от 14.5 до 4 ТГц.

В большей степени на величину магнитного поля вдоль траектории пучка влияет неточность при юстировке положения вигглера для углов поворота вдоль оси Y. Неточности в настройке при поворотах вдоль осей X и Z заметным образом не влияют на поле вдоль траектории пучка. При повороте вигглера относительно осей X, Y, Z на угол меньше чем 0.5 градусов приводит к изменению магнитного поля (B_x) не более чем на 1%.

Величина магнитного поля (B_x), полученная в Radia на основе метода граничных элементов, согласуется с точностью около 2% с результатами, полученными в Femm на основе метода конечных элементов. Однако

расчеты предпочтительнее проводить в Radia в силу более широкого спектра её возможностей.

В дальнейшем планируется провести моделирование траектории электронов [8], проходящих через вигглер, при различных точках влёта частиц, что возможно с помощью функционала Radia.

Список литературы

1. Kashiwagi S., et al. Rigorous evaluation of the edge-focusing wiggler based on the magnetic field measurement // PRST AB. – 2009. – V.12. – P.120703.
2. Харисова А.Е., и др. // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сб. тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции. – Томск, 2015. – С.132.
3. Fukuda M et. al. 2011 Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A 637 S67
4. Tonouchi M. 2007 Nature Photon. 1 97
5. Chubar O., et al. A 3D magnetostatics computer code for insertion devices // J. Synchrotron Rad. – 1998. – V.5. – P. 481–484
6. Mathematica, <https://www.wolfram.com/mathematica/>
7. FEMM 4.2 – Finite Element Method Magnetics, www.femm.info
8. Knyazik A., et al. Status of UCLA helical permanent-magnet undulator // Proceedings of PAC. – Canada, 2009. – P.2441.