

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

Институт - Неразрушающего контроля
Направление подготовки – 12.03.01 Приборостроение
Кафедра - Точного приборостроения

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Ленточный моментный двигатель

УДК 621.313.13.045.001.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б2В	Самодуров Иван Николаевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ТПС	Мартемьянов Владимир Михайлович	Кандидат технических наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. менеджмента, ИСГТ	Николаенко Валентин Сергеевич			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ЭБЖ, ИНК	Мезенцова Ирина Леонидовна			

По разделу «Вопросы технологии»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ТПС	Гормаков Анатолий Николаевич	Кандидат технических наук		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий каф. ТПС, доцент	Бориков Валерий Николаевич	Доктор технических наук		

Томск – 2016 г.

ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ПРОГРАММЕ

Код результата	Результат обучения
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для разработки, производства, отладки, настройки и аттестации средств приборостроения с использованием существующих и новых технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения
P2	Участвовать в технологической подготовке производства, подбирать и внедрять необходимые средства приборостроения в производство, предварительно оценив экономическую эффективность техпроцессов; принимать организационно-управленческие решения на основе экономического анализа
P3	Эксплуатировать и обслуживать современные средств измерения и контроля на производстве, обеспечивать поверку приборов и прочее метрологическое сопровождение всех процессов производства и эксплуатации средств измерения и контроля; осуществлять технический контроль производства, включая внедрение систем менеджмента качества
P4	Использовать творческий подход для разработки новых оригинальных идей проектирования и производства при решении конкретных задач приборостроительного производства, с использованием передовых технологий; критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы; использовать основы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности
P5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования по своему профилю с использованием новейших достижения науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области знаний, соответствующей выполняемой работе
P6	Использовать базовые знания в области проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности; уметь делать экономическую оценку разрабатываемым приборам, консультировать по вопросам проектирования конкурентоспособной продукции
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности

P8	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, демонстрировать ответственность за результаты работы
P9	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности
P10	Ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а так же различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду
P11	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности

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

Институт неразрушающего контроля
Направление подготовки (специальность) 12.03.01 Приборостроение
Кафедра точного приборостроения

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись)

(Дата)

Бориков В.Н
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
1Б2В	Самодурову Ивану Николаевичу

Тема работы:

Ленточный моментный двигатель
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Цель выпускной квалификационной работы заключается в уточнении полученных ранее результатов аналитических исследований. Необходимо оценить влияние изменения индукции в воздушном зазоре под действием тока, протекающего по многовитковой намотке статора. Также оценить влияние деформаций линий тока в пластинах намотки на силовую (моментную) характеристику. Данные исследования предполагается проводить с помощью экспериментальной установки. В качестве основы установки предлагается выбрать медную пластину 100x50 мм, помещенную в зазор магнитной цепи с ориентировочным значением индукции $B=0,2$ Тл. Максимальный постоянный ток, протекающий по пластине 50 А. Величина двойного интеграла, взятого по всей поверхности пластины и приведенного к току в 1 А, равна 400 А. Характер изменения магнитной индукции в воздушном зазоре магнитной цепи предлагается определять совокупностью магниточувствительных датчиков (Холла, магниторезисторов). Условия проведения

	исследований – лабораторные. Оборудование для проведения исследований – имеющееся на каф. ТПС
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	Обзор литературы Ленточный моментный двигатель Разработка экспериментальной установки Дополнительные разделы: «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» «Социальная ответственность» «Вопросы технологии»
Перечень графического материала	Презентация РР Чертеж общего вида установки А2 Рабочий чертеж крепления А4
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Николаенко Валентин Сергеевич, ассистент кафедры Менеджмента, ИСГТ
Социальная ответственность	Мезенцева Ирина Леонидовна, ассистент кафедры ЭБЖ, ИНК
Вопросы технологии	Гормаков Анатолий Николаевич, доцент кафедры ТПС, к.т.н.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ТПС	Мартемьянов Владимир Михайлович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б2В	Самодуров Иван Николаевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1Б2В	Самодурову Ивану Николаевичу

Институт	Неразрушающего контроля	Кафедра	Точного приборостроения
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Приборостроение

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Работа с информацией, представленной в научных публикациях;
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Определение структуры плана проекта и трудоёмкости работ, разработка графика проведения НИИ, бюджет НИИ.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Определение интегрального показателя финансовой эффективности, интегрального показателя ресурсоэффективности, интегрального показателя эффективности и сравнительной эффективности вариантов исполнения

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Определение потенциалов потребителя результатов исследования.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Планирование этапов работы, определение календарного графика трудоёмкости работы, расчет бюджета.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Оценка сравнительной эффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

--

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. менеджмента, ИСГТ	Николаенко Валентин Сергеевич			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б2В	Самодуров Иван Николаевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1Б2В	Самодурову Ивану Николаевичу

Институт	Неразрушающего контроля	Кафедра	Точного приборостроения
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Теоретические исследования (моделирование, расчеты) характеристик приборов/ оборудования (без разработки опытного образца)	В ходе выпускной работы было произведено расчет и проектирование деталей гироидина.
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Профессиональная социальная безопасность. 1.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации объекта исследования. 1.2. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.	Рабочий процесс проводится в кабинете на кафедре, где могут быть такие вредные факторы как: отклонение показателей микроклимата, недостаточная освещенность рабочей зоны, повышенный уровень ионизирующих излучений. В ходе выполнения работы так же возможно поражение электрическим током.
2. Экологическая безопасность: 2.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду 2.2. Анализ «жизненного цикла» объекта исследования. 2.3. Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.	Во время проведения исследования и по его окончанию не существуют источников загрязнения окружающей среды.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	В ходе работы возможно возникновение пожара.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	Рациональная планировка рабочей зоны, требования к основным элементам рабочего места: рабочий стол, рабочий стул, персональный компьютер, клавиатура и мышка.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ЭБЖ, ИНК	Мезенцова Ирина Леонидовна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б2В	Индыгашева Нэля Сергеевна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «Вопросы технологии»

Студенту:

Группа	ФИО
1Б2В	Самодурову Ивану Николаевичу

Институт	ИНК	Кафедра	ТПС
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Вопросы технологии»:

1. Годовая программа выпуска или размер партии	<i>Единичное производство</i>
2. Конструкторская документация на изделия	<i>Чертежи общего вида установки, спецификация, рабочий чертеж крепления</i>
3. ГОСТы, стандарты, нормали, справочники	ГОСТ 2.004-88 ЕСКД ГОСТ 14.301—73 ЕСТПП и др.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Определение сборочного состава изделия 2. Оценка технологичности конструкции изделия 3. Разработка технологического процесса сборки изделия 4. Разработка технологического процесса изготовления детали «крепление»	
---	--

Перечень разработанной документации (с точным указанием обязательных чертежей):

Карта технологичного процесса сборки, Карта технологичного процесса изготовления детали «крепление»
--

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ТПС	Гормаков А.Н.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б2В	Самодуров Иван Николаевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 91 с., 29 рис., 15 табл., 12 источников, 2 прил.

Ключевые слова: моментный двигатель, ленточная намотка, электропроводящая лента, моментная характеристика, аналитические исследования, экспериментальные исследования.

Объектом исследования является ленточный моментный двигатель.

Цель работы – исследование параметров ленточного моментного двигателя.

В процессе исследования проводилось экспериментальное и аналитическое определение характеристик ленточного моментного двигателя, разработана установка для исследования единичной токопроводящей пластины.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: принцип работы данного электродвигателя основан на взаимодействии поля постоянных магнитов с распределенными токами ленточной намотки. Указанный тип моментного двигателя позволяет обеспечить прохождения большего тока по намотке, и соответственно, повышение величины создаваемого момента.

Степень внедрения: в стадии внедрения.

Область применения: специальные электромеханические устройства.

Оглавление

Введение	11
Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки.....	13
Обзор литературы	14
1. Ленточный моментный двигатель.....	15
1.1. Принцип работы и конструкция ленточного моментного двигателя.....	15
1.2. Характеристики ленточного моментного двигателя.....	17
1.2.1. Моментная характеристика.....	17
1.2.2. Определение скоростного сопротивления.....	24
1.2.3. Исследования температурных режимов.....	27
1.2.4. Выбор конструктивных параметров двигателя.....	30
1.2.5. Реакции тока пластины.....	38
1.2.6. Постановка задачи создания экспериментальной установки.....	39
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	40
4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения.....	40
4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования.....	40
4.1.2. Анализ конкурентных технических решений.....	40
4.1.3. Технология QuaD	43
4.2. Планирование научно-исследовательских работ.....	46
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	46
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ	47
4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования	48
4.2.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	51
4.2.4.1. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского	55
4.3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой,	56
Список публикаций	59

Введение

В качестве исполнительных элементов в последнее время все большее развитие получают моментные двигатели, применяемые в различных системах телемеханики, автоматики, измерительной техники.

В последние годы теория, разработка и применение таких двигателей получило значительное развитие. Однако повышение технико-экономических требований к системам, появление различных новейших материалов, выпуск небольшими сериями, оптимизация приносят новые аспекты в конструировании моментных двигателей. Разработанное специальное программное обеспечение, а также пакеты прикладных программ, позволяют практически полностью автоматизировать все этапы проектирование.

При отборе исполнительного двигателя разработчики сталкиваются с рядом задач. Основная из них – определить целесообразность применения моментных двигателей, которые наряду с достоинствами, имеют большие, по сравнению с быстроходными двигателями с редуктором, энергопотребление и массу.

Основное внимание в работе уделено моментным двигателям с постоянными магнитами. Конструктивно двигатели могут реализовываться как нормального исполнения, т.е. обмотка управления размещена под индуктором, так и обращенного, когда обмотка управления может располагаться как на статоре, так и на роторе. Достоинством моментного двигателя с постоянными магнитами является относительно малое потребление мощности на единицу момента, так как рабочий магнитный поток обеспечивают постоянные магниты.

В работе предложена идея развития нового варианта создания активного элемента исполнительных устройств, в которых функции обмотки машин традиционного исполнения выполняет ленточная намотка (пакетный элемент). Исследования являются научно-исследовательской работой, выполняемой сотрудниками и студентами кафедры точного приборостроения. Изначально предложенный вариант обмотки предполагался для линейного двигателя с пакетным элементом, затем как элемент моментного двигателя. Намотку в свою

очередь можно представить в виде совокупности ряда пакетных элементов. Проведенные исследования являются основой для развития теоретических аспектов двигателя подобного рода. В ходе работы, проведенной в течении последних лет, предложен принцип действия моментного двигателя оригинального исполнения, спроектирован и изготовлен макет такого двигателя, проведены аналитические и экспериментальные исследования с помощью программных продуктов COMSOL Multiphysics и Agros 2D и разработанных исследовательских установок.

Полученные аналитические исследования необходимо откорректировать, так как в математических моделях двигателя не учитываются некоторые факторы, такие как деформация токовых линий распределенного по пластине тока, искажение основного магнитного потока, протекающим по пластине током. Данная коррекция возможна с помощью проведения экспериментальных исследований на специально разработанной установке.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования

Определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

Выпускная квалификационная работа бакалавра (ВКР бакалавра):

Работа на соискание академической степени “бакалавр”, содержащая системный анализ известных технических решений, технологических процессов, программных продуктов, выполняемая выпускником самостоятельно с использованием информации, усвоенной им в рамках дисциплин общетехнического и специального цикла.

Моментный двигатель: представляет собой двигатель специального исполнения с низкими скоростями вращения и значительным моментом. Большие моменты, создаваемые моментным двигателем, позволяют создавать приводные системы без использования редукторов, что позволяет решать задачи позиционирования с очень высокой точностью.

Магнитный поток: физическая величина, равная плотности потока силовых линий магнитного поля, проходящих через бесконечно малую площадку

Обозначения и сокращения

ВКР – выпускная квалификационная работа

ПК – персональный компьютер

ТД – техническая документация

КПД – коэффициент полезного действия

Обзор литературы

В основе ВКР лежит патент Российской Федерации № 2441310 МПК H02K/26.00. в котором описаны особенности конструкции, область применения и преимущества ленточного моментного двигателя. Согласно патенту, данное изобретение относится к области электротехники, в частности к моментным магнитоэлектрическим двигателям, и может быть использовано для создания момента в различных системах коррекции и программного разворота. Наиболее близким к заявляемому изобретению по использованию, технической сущности и достигаемому результату является магнитоэлектрический моментный двигатель, выбранный в качестве прототипа. Техническим результатом изобретения является расширение рабочего диапазона углов взаимного поворота ротора и статора моментного двигателя, при котором величина развиваемого момента достаточна для нормальной работы прибора. [1]

Также основой ВКР является статья «Исполнительные двигатели с ленточной намоткой» [13] в которой рассмотрен принцип действия исполнительных устройств с активными пакетным и ленточным элементами. Приведены варианты применения такого исполнительного устройства в схемах моментного двигателя и вентильного двигателя, у которых активный элемент выполнен из тонкой электропроводящей ленты. Рассмотрен импульсный режим работы моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора.

Большая часть ВКР написана на основе собственных статей и статей участников исследовательской группы, опубликованных в течении последних 4 лет, в которых объектом исследования является ленточный моментный двигатель, его характеристики и основные элементы.

1. Ленточный моментный двигатель.

1.1. Принцип работы и конструкция ленточного моментного двигателя.

Конструкция ленточного моментного двигателя состоит из внешней и внутренней магнитных систем, гильзы и ленточной намотки. [1] Схема конструкции ленточного моментного двигателя представлена на рисунке 1.

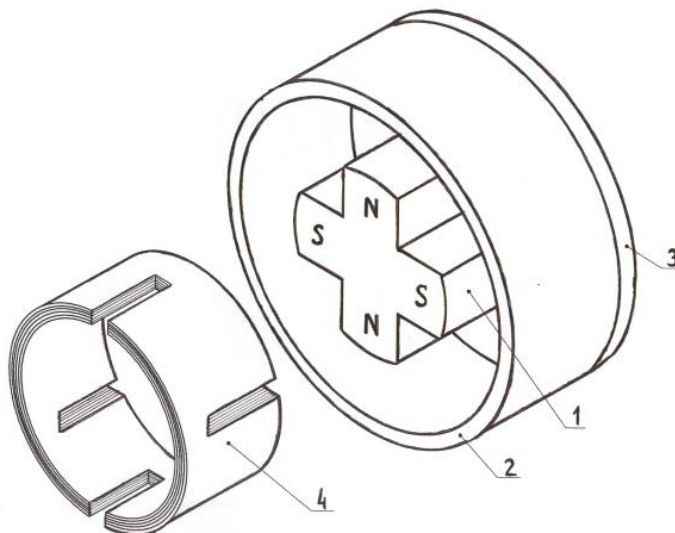


Рисунок 1 - Основные элементы моментного двигателя

1 – постоянный магнит, 2 – магнитопровод, 3 – гильза, 4 – ленточная намотка.

Ленточная намотка представляет собой спирально намотанную на гильзу ленту. Гильза является элементом корпуса двигателя. Лента выполнена из электропроводящего материала и покрыта слоем электроизоляции. По боковым краям ленты имеются поперечные вырезы. Расстояние между центрами вырезов равно полюсному делению магнитной системы ротора. Если к началу и концу ленты подключить источник постоянного тока, то характер протекания тока определяется наличием в ленте поперечных вырезов. На рисунке 2 [1] показано, что ток J имеет две компоненты: J_l – продольную, направленную вдоль ленты, и J_t – поперечную, направленную поперек ленты в направлении, совпадающем с осью вращения ротора моментного двигателя. Полюсы магнита ротора на рисунке отображены прямоугольниками N и S. Взаимодействие компонент тока J_t с магнитным полем приводит к появлению сил F , действующих на магнит. Суммарное действие этих сил приводит к появлению вращающего момента,

который стремится повернуть магнитную систему относительно неподвижной намотки. Продольные составляющие тока J_l вызывают появление сил P , которые действуют со стороны магнита на опоры подвеса ротора.

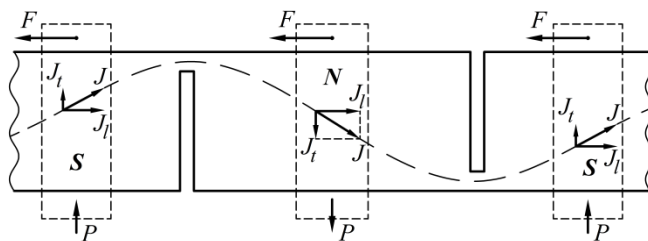


Рисунок 2 - Фрагмент ленточного активного элемента

Предложенный вариант активного элемента имеет следующие преимущества:

- позволяет реализовать новый конструкторско-технологический подход к изготовлению статора двигателя;
- обеспечивает большую линейную нагрузку за счет протекания по намотке большего тока и хорошего отвода тепла на корпус двигателя;
- конструкция и технология изготовления такого активного элемента допускает формирование необходимой функциональной зависимости моментной характеристики двигателя.

Основными источниками тепла, выделяемого при протекании тока, будут сужения ленты, образованные вырезами. Однако указанные участки будут охлаждаться за счет оттока тепла в те зоны ленты, где плотность тока невысока, а поверхности охлаждения имеют достаточные размеры. При этом необходимо учесть тот факт, что контактная поверхность активного элемента и трубчатой части корпуса двигателя, на которой монтируется (наматывается) активный элемент, также имеет достаточные размеры для эффективного сброса тепла на корпус, охлаждение которого, в том числе и принудительное, большой технической проблемы не представляет.

1.2. Характеристики ленточного моментного двигателя.

Так как использовать показатель КПД при оценке эффективности моментного двигателя является невозможным, рекомендуется использовать ряд критериев эффективности. Эти критерии должны быть как можно выше. [2] К этим критериям относятся:

Коэффициент эффективности использования потребляемой мощности:

$$K_{\eta} = \frac{M}{P}$$

- Коэффициент удельной отдачи:

$$K_y = \frac{M}{V}$$

- Статическая добротность:

$$K_Q = \frac{M}{m\sqrt{P}}$$

Для определения данных оценочных критериев необходимо определить развиваемый момент M , массу m и мощность P , потребляемую двигателем. Для определения момента, развиваемого моментным двигателем необходимо построить моментную характеристику данного двигателя. В то же время масса двигателя и потребляемая мощность зависят от конструктивных параметров двигателя.

1.2.1. Моментная характеристика.

Моментная характеристика двигателя с ленточной намоткой была получена аналитическим и экспериментальным путем. Аналитические исследования, проведенные в программном продукте COMSOL Multiphysics, показывают, что сила, создаваемая единичной пластиной ленточной намотки, определяется следующим образом []

$$F_1 = B(\delta) \cdot \Delta \cdot \frac{U}{2p \cdot R \cdot N} \cdot \frac{1}{I_0} \cdot D(x, y, I_0)_{x_c} \quad (1)$$

где $B(\delta)$ - индукция магнитного поля;

δ - длина немагнитного участка магнитной цепи;

Δ - толщина ленты;

U - напряжение источника питания постоянного тока;

R - активное сопротивление единичной пластины;

N - число витков (слоев) катушки;

p - число пар полюсов магнитной системы;

$D(x, y, I_0)_{x_c}$ - величина двойного интеграла по поверхности, представляющей зону действия магнитного потока. Интеграл вычисляется при нахождении центра постоянного магнита в точке x_c .

I_0 - единичный ток, при котором определяется величина двойного интеграла.

С учетом того, что магнитная система имеет $2p$ полюсов, момент, создаваемый двигателем равен

$$M = 2p \cdot M_0 = p \cdot \Delta \cdot N \cdot F_1 \cdot [N + (\frac{2r_0}{\Delta} - 1)] \quad (2)$$

Подставим в полученное выражение (2) величину силы единичной пластины (1), получаем

$$M = \frac{\Delta^2}{2} \cdot \frac{U}{I_0 \cdot R} \cdot B(\delta) \cdot [N + (\frac{2r_0}{\Delta} - 1)] \cdot D(x, y, I_0)_{x_c} \quad (3)$$

Данные аналитические исследования показывают, что момент преимущественно зависит от индукции магнитного потока и числа витков катушки, которые определяют величину немагнитного зазора. Большое число витков должно привести к увеличению момента, но при этом увеличивается сопротивление катушки и уменьшается ток. Кроме того, увеличение числа витков приведет к увеличению зазора и, в итоге, к снижению индукции и момента.

Далее были проведены экспериментальные исследования, позволившие нам построить моментную характеристику двигателя с ленточной катушкой. Методика построения моментной характеристики макета состояла в том, что к

плечу ротора закрепляется груз определенной массы. Далее на обмотку подается ток. В момент, когда ротор электродвигателя отклонится от начального положения, фиксируется пусковой ток. Данная последовательность действий повторяется на отрезке от 0 до 90 градусов по средствам разворота обмотки статора. Зная массу груза (m), величину пускового тока (I), длину плеча ротора (l), можно рассчитать момент, создаваемый двигателем при токе в 1 ампер для каждого угла поворота вдоль оси статора по формуле:

$$M = \frac{m \cdot g \cdot l}{I} \quad (4)$$

Для получения точных значений момента испытания проводились с грузами массой 30, 35, 50, 60, 70, 75 грамм. Полученный график силовых характеристики представлен на Рисунке 3.

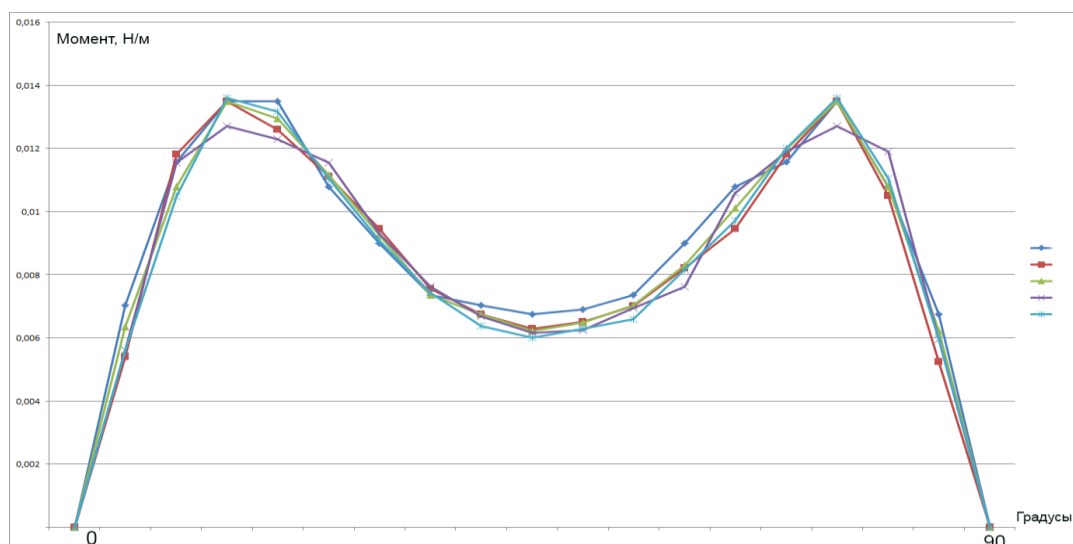


Рис. 3 - График семейства силовых характеристик.

Далее был построен график средних значений, опираясь на который, проводились дальнейшие исследования.

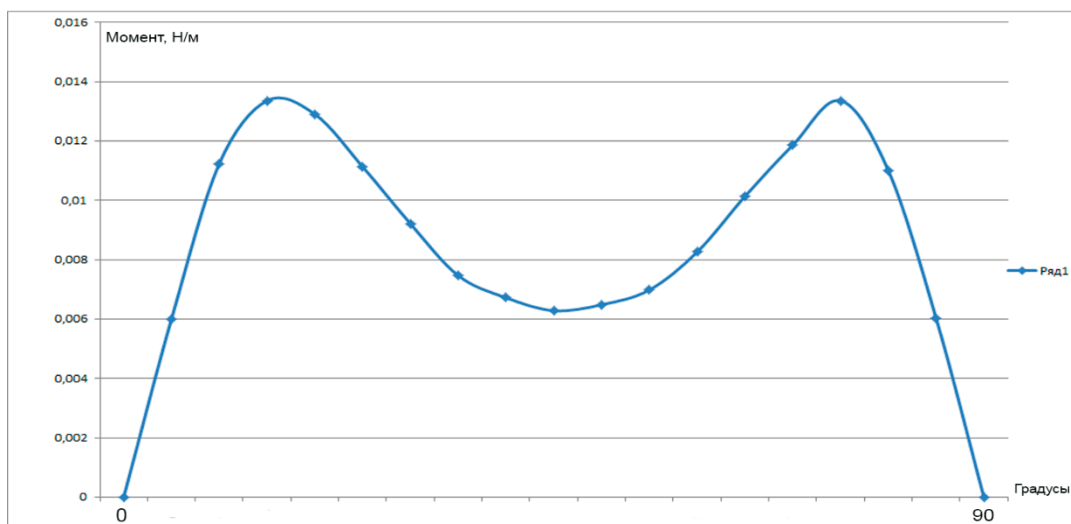


Рис. 4 - Силовая характеристика электродвигателя.

На графике видно, что минимальный момент и максимальный пусковой ток приходится в точке равной половине полюсного деления магнита - 45 градусов. Максимальный момент равен 13,4 мН/м, минимальный момент 6,5 мН/м. Максимальный подаваемый на обмотку ток 6,8 ампер.

Наличие моментной характеристики двигателя предоставляет возможность для составления уравнений, описывающих его движение. Для составления данных уравнений необходимо провести линейно-кусочную аппроксимацию моментной характеристики (рисунок 5). [8]

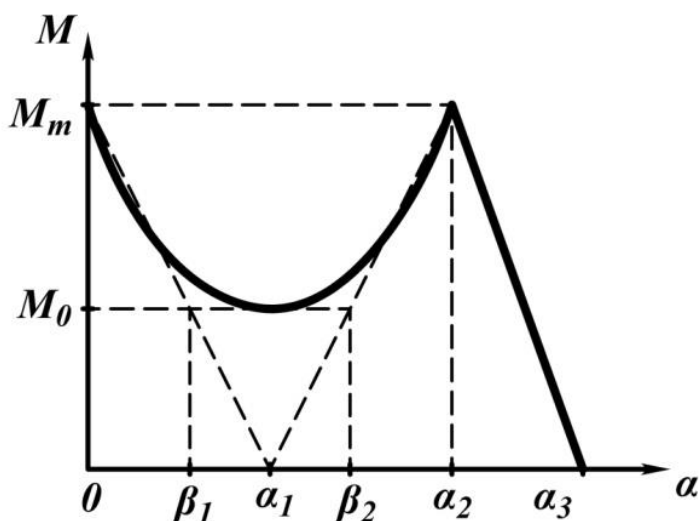


Рисунок 5 – Моментная характеристика двигателя

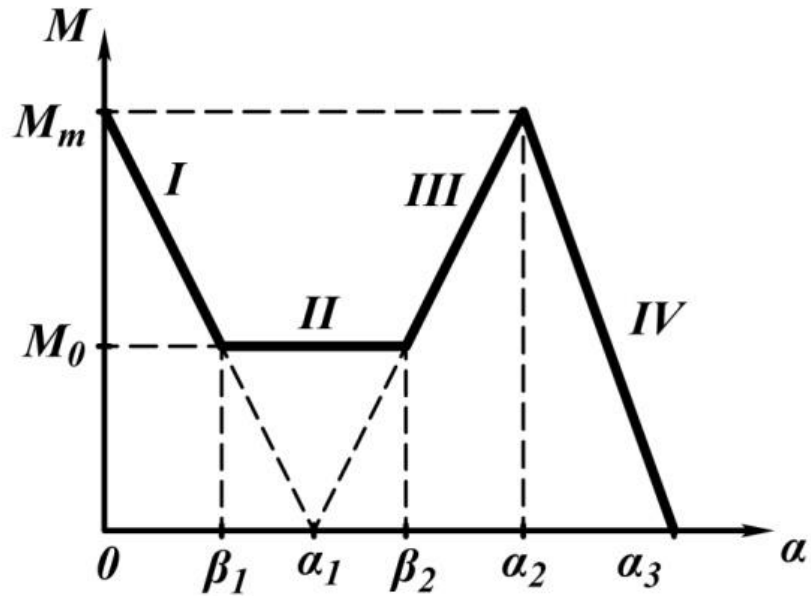


Рис. 6 - Линейно-кусочная аппроксимация моментная характеристики

На тех участках, где момент линейно зависит от угла, решаем однородное линейное дифференциальное уравнение, определяем законы изменения $\alpha(t)$, $\dot{\alpha}(t)$, время движения маховика на этом участке. Полученные результаты в конце данного участка будут начальными условиями для решения уравнения на следующем участке.

На участке 1 уравнение движения имеет вид:

$$J\ddot{\alpha} = M_m - \frac{M_m}{\alpha_1} \cdot \alpha. \quad (5)$$

Решая уравнение (5), получаем:

$$\alpha(t) = \alpha_1 - \alpha_1 \cdot \cos \sqrt{\frac{M_m}{J \cdot \alpha_1}} \cdot t,$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{J \cdot \alpha_1}{M_m}} \cdot \arccos \frac{M_0}{M_m},$$

$$\dot{\alpha}_1 = \sqrt{\alpha_1 \cdot \frac{M_m}{J} \cdot \left(1 - \left(\frac{M_0}{M_m}\right)^2\right)}.$$

Найденный закон изменения скорости $\dot{\alpha}_1$ дает возможность определить начальные условия для расчета движения на втором участке, уравнение движения которого имеет вид:

$$J\ddot{\alpha} = M_0. \quad (6)$$

При решении уравнения (6), получаем:

$$\alpha(t) = \frac{M_0}{2 \cdot J} \cdot t^2 + \dot{\alpha}_1 \cdot t,$$

$$t_2 = \frac{J \cdot \dot{\alpha}_1}{M_0} \left[\sqrt{1 + \frac{2 \cdot M_0^2 \cdot \alpha_2}{J \cdot M_m \cdot \dot{\alpha}_1^2}} - 1 \right],$$

$$\dot{\alpha}_2 = \sqrt{\alpha_1 \cdot \frac{M_m}{J} \cdot \left(1 - \left(\frac{M_0}{M_m}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot M_0^2 \cdot \alpha_2}{J \cdot M_m \cdot \dot{\alpha}_1^2}\right)},$$

Найденный закон изменения скорости $\dot{\alpha}_2$ дает возможность определить начальные условия для расчета движения на третьем участке (рисунок 9), уравнение движения которого имеет вид:

$$J \ddot{\alpha} = \frac{M_m - M_0}{\alpha_2 - \beta_2} \cdot \alpha + M_0, \quad (7)$$

При решении уравнения (7), получаем:

$$\alpha(t) = B(chAt - 1) + \frac{\dot{\alpha}_2}{A} \cdot shAt,$$

где, $A = \sqrt{\frac{M_m - M_0}{J(\alpha_2 - \beta_2)}}, B = \frac{M_0(\alpha_2 - \beta_2)}{M_m - M_0}.$

Время прохождения третьего участка t_3 находим из уравнения:

$$chAt_3 + \frac{\dot{\alpha}_2}{M_0} \sqrt{\frac{J(M_m - M_0)}{\alpha_2 - \beta_2}} \cdot shAt.$$

Закон изменения скорости на третьем участке:

$$\dot{\alpha}_3 = A \cdot B \cdot shAt_3 + \dot{\alpha}_2 \cdot chAt_3.$$

Найденный закон изменения скорости $\dot{\alpha}_3$ дает возможность определить начальные условия для расчета движения на четвертом участке, уравнение движения которого имеет вид:

$$J \ddot{\alpha} = M_m - \frac{M_m}{\alpha_3 - \alpha_2} \cdot \alpha, \quad (8)$$

При решении уравнения (8), получаем:

$$\alpha(t) = (\alpha_3 - \alpha_2) \cdot (1 - \cos Ct) + \dot{\alpha}_3 \sqrt{\frac{J(\alpha_3 - \alpha_2)}{M_m}} \cdot \sin Ct,$$

где, $C = \sqrt{\frac{M_m}{J(\alpha_3 - \alpha_2)}}.$

$$t_4 = \sqrt{\frac{J(\alpha_3 - \alpha_2)}{M_m}} \cdot \arcsin \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{\sqrt{(\alpha_3 - \alpha_2)^2 + \dot{\alpha}_3^2 \cdot \frac{J(\alpha_3 - \alpha_2)}{M_m}}},$$

$$\dot{\alpha}_4 = (\alpha_3 - \alpha_2) \cdot C \cdot \sin Ct + \dot{\alpha}_3 \cdot C \sqrt{\frac{J(\alpha_3 - \alpha_2)}{M_m}} \cdot \cos Ct.$$

С помощью данных уравнений возможен выбор режима управления ленточным моментным двигателем. Предполагается что данный двигатель будет использоваться в импульсном режиме. На обмотку двигателя будет подаваться краткосрочный импульс и далее двигатель будет работать в режиме выбега.

В то же время проводился эксперимент по определению зависимости изменения угла поворота с течением времени при разных токах. Суть опыта состояла в том, что на маховик моментного двигателя закреплялась лазерная указка. На определенном расстоянии, перпендикулярно лучу лазерной указки, закреплялась измерительная шкала со специально размеченными значениями углов. На обмотку моментного двигателя подавались токи разных значений. С помощью видеокамеры, с частотой 25 кадров на секунду, проводилась запись движения отметки луча лазера на измерительную шкалу. Позднее, в видеоредакторе проводилась покадровая расшифровка значений углов. По данным эксперимента удалось построить следующие графики зависимости угла от времени движения, изображенные на Рисунке 11.

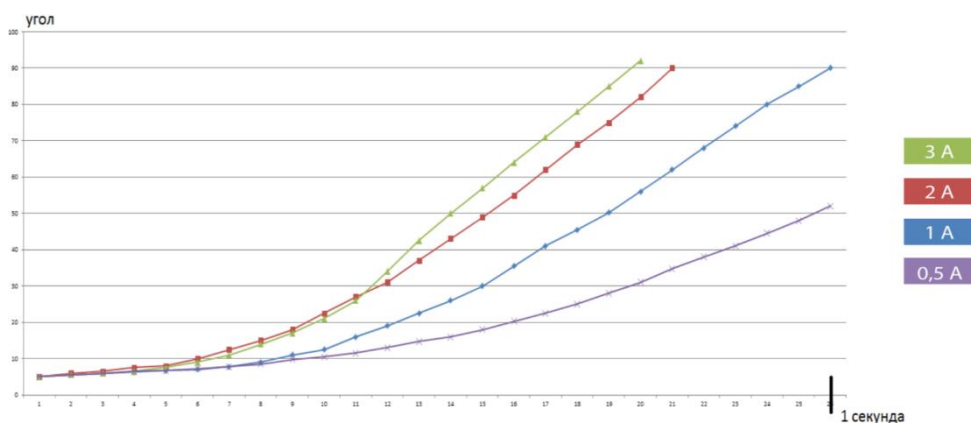


Рисунок 7 - Зависимость изменения угла поворота ротора с течением времени.

1.2.2. Определение скоростного сопротивления.

Для дальнейших исследований двигателя было необходимо рассчитать момент инерции маховика и определить коэффициенты скоростного трения.

Для определения момента инерции маховика, на некотором расстоянии от оси ротора закреплялся эталонный груз, затем, ротор отклонялся от нейтрали на некоторый угол и совершал колебательные движения. Данный колебательный процесс фиксировался на видео и расшифровывался. Далее на основании этих данных стало возможным определить период и амплитуду колебаний. На рисунке 8 представлен график колебаний ротора с закрепленной массой.

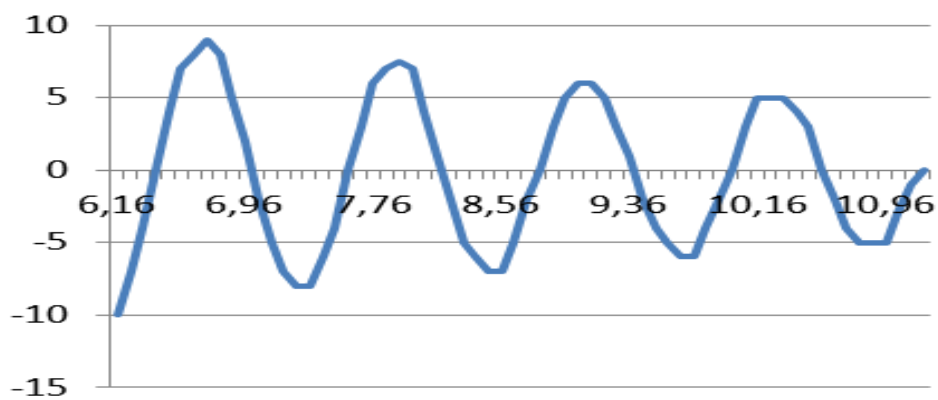


Рисунок 8 - Колебания ротора с закрепленной массой.

Известно, что для затухающих свободных колебаний, определяемых уравнением:

$$J \cdot \alpha^2 + \mu \cdot \alpha^1 + c \cdot \alpha^0 = 0, \text{ или} \\ y^2 + 2 \cdot \beta \cdot y^1 + \omega_0^2 \cdot y^0 = 0, \quad (9)$$

$$\text{где: } 2\beta = \frac{\mu}{J}, \omega_0^2 = \frac{c}{J}.$$

Декремент затухания (λ) определяется как:

$$\lambda = \beta \cdot T = \ln \frac{A_m}{A_{m+1}}, \beta = \frac{1}{T} \cdot \ln \frac{A_m}{A_{m+1}} \quad (10)$$

где: A_m – амплитуда колебания.

Отсюда следует, что искомый параметр коэффициент скоростного трения (μ) определяется как

$$\mu = 2 \cdot J \cdot \beta = \frac{2 \cdot J}{T} \cdot \ln \frac{A_m}{A_{m+1}}. \quad (11)$$

Расчёты показывают, что коэффициент скоростного трения в случае отсутствия линейной намотки, определяется в основном трением в опорах подвеса, равен

$$\mu_b = 0,215 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}, \text{ а при её наличии } \mu_a = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}.$$

Графики на рисунке 5 отображают затухающие колебания ротора с присоединённой массой в случаях наличия (а) и отсутствия (б) в макете ленточной намотки.

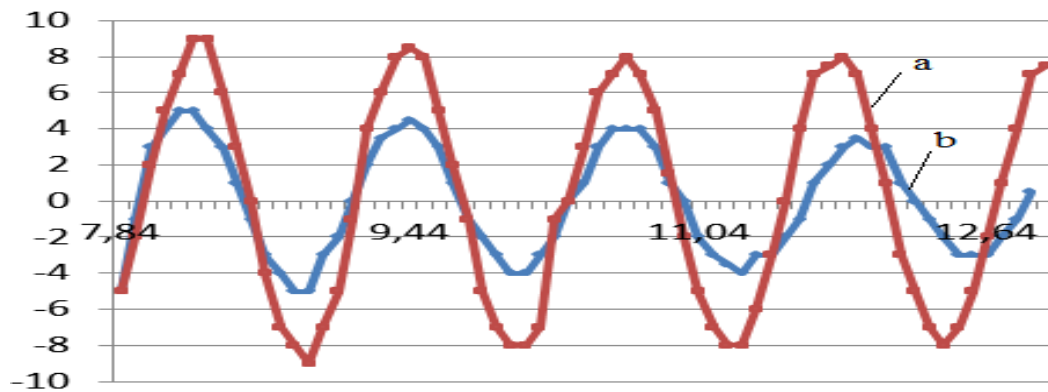


Рисунок 9 - Колебания ротора с отсутствием намоткой(а) и с её наличием(б).

Так же проводились аналитические исследования для определения искомого параметра. В этом случае полагаем, что мощность потерь от нагревания намотки вихревыми токами, развиваемой моментом сил сопротивления, вызываемых этими токами

$$P_{\text{вТ}} = M_{\text{вТ}} \cdot \omega$$

В данном случае ω – угловая скорость вращения ротора. Отсюда получим

$$M_{\text{вТ}} = \frac{P_{\text{вТ}}}{\omega}$$

Коэффициент момента сопротивления при этом определится как

$$\mu_{\text{вТ}} = \frac{M_{\text{вТ}}}{\omega} = \frac{P_{\text{вТ}}}{(\omega)^2}$$

Основная проблема – определение мощности потерь от вихревых токов. В частности, подобные задачи могут быть решены с помощью программного продукта Agros2D [8]. Посредством ряда допущений и упрощений была построена модель исследуемого процесса. Ленточная обмотка заменена на сплошную трубу, выполненную из того же материала и имеющую ту же самую

геометрию. В местах, где магнитный поток ротора пронизывает намотку, воссозданы подобные характеристики поля. Задавался ряд параметров вращения, соответствующих ожидаемым скоростям. Более подробно подход к решению данной задачи изложен в [3]. Определение мощности потерь от вихревых токов заключалось в интегрировании по объему джоулевых потерь на рисунке 14.

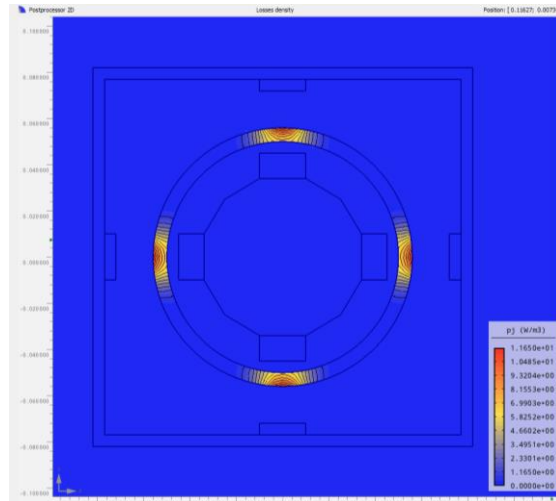


Рисунок 10– Распределение объемных джоулевых потерь в эквиваленте намотки статора

Коэффициент момента сопротивления, полученный расчетным путем, равен $\mu_{\text{вт}} = 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$.

Как видно, найденная таким образом величина коэффициента лежит внутри диапазона, полученного при проведении экспериментальных исследований на макете двигателя, что подтверждает возможность применения программного продукта AGROS2D при расчете параметров моментного двигателя.

1.2.3. Исследования температурных режимов.

Одним из эксплуатационных преимуществ моментного двигателя с ленточной намоткой является возможность пропуска по последней достаточно большого тока. В местах, где выполнены вырезы, происходит резкое увеличение плотности тока и интенсивное выделение тепла. Повышенная токовая нагрузка рассматриваемого двигателя объясняется тем, что вблизи зон повышенного тепловыделения находятся области, в которых это тепло поглощается и рассеивается.

В связи с этим были проведены экспериментальные и аналитические исследования температурных режимов активного элемента ленточного моментного двигателя. [4]

Методика проведения экспериментальных исследований заключается в том, что в теле пластины создаются зоны сужения сечения, по которому протекает ток, и фиксируется закон изменения температуры теплонапряженного участка. Геометрия исследуемых пластин приведена на рисунке 11.

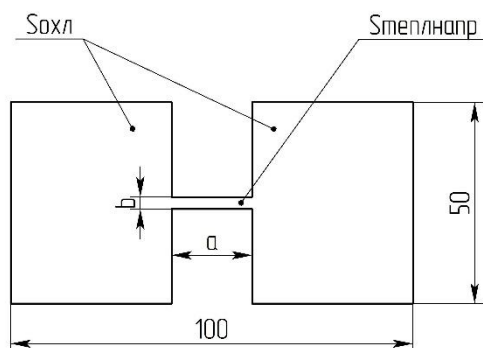


Рисунок 11 - Геометрия исследуемой пластины

В данном случае общие размеры пластины выбирались как 100x50 мм, ширина теплонапряженного участка у всех пластин была $b=3$ мм, а длина этого участка a задавалась в диапазоне от 4 мм до 80 мм.

Измерение температуры теплонапряженного участка производилось как с помощью термопары, входящей в состав электронного мультиметра VC9808, оптического пирометра АКИП-9307, так и посредством металлического

термометра сопротивления. При этом последний прием измерения температуры оказался наиболее стабильным. Термометр сопротивления изготавливался из медной изолированной проволоки диаметром 0,09 мм и длиной 2-2,5 метра, которая наматывалась на тот участок, температуру которого необходимо измерять. Зная температурный коэффициент сопротивления материала проволоки, температуру окружающей среды и изменение сопротивления нагретой проволоки, достаточно просто можно определить температуру нагретого участка пластины. Сопротивление проволочного датчика измерялось с помощью миллиомметра Е6-18 и цифрового мультиметра VC9808. По исследуемой пластине пропусклся постоянный ток силой 10 А, и через каждые 10 секунд определялась искомая температура. Пластина закреплялась в специальном приспособлении, как показано на рисунке 12.

Результаты экспериментальных исследований приведены на графиках рисунке 13. Эти графики показывают, что установившаяся температура теплонапряженного участка наименьшей длины ($a=4\text{ мм}$) не превышает 45°C , а участок длиной $a=80\text{ мм}$ через 80 с достигает температуры 300°C и перегорает. Необходимо отметить, что температура плавления алюминия составляет 660°C , а разрушение теплонапряженного участка происходит за счет сгорания пропитанной клеем бумажной изоляции алюминиевой ленты.

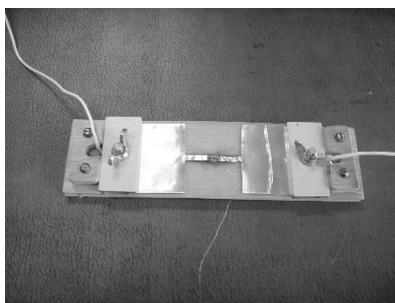


Рисунок 12 - Исследуемая пластина

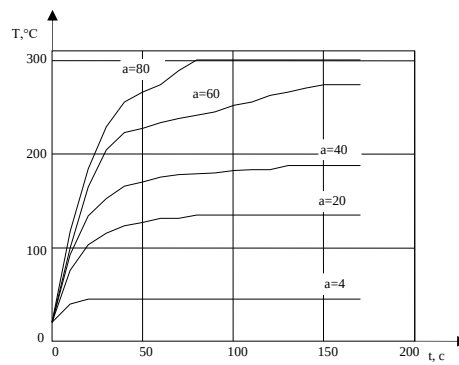


Рисунок 13 - Характер изменения температуры теплонапряженных участков пластин

На рисунке 14 приведен график, показывающий связь установившейся температуры пластины и геометрического параметра α , представляющего собой отношение площади теплонапряженного участка $S_{\text{теплонапр}}$ к площади тех участков пластины $S_{\text{охл}}$, которые рассеивают тепло в окружающую среду:

$$\alpha = \frac{S_{\text{теплонапр}}}{S_{\text{охл}}}.$$

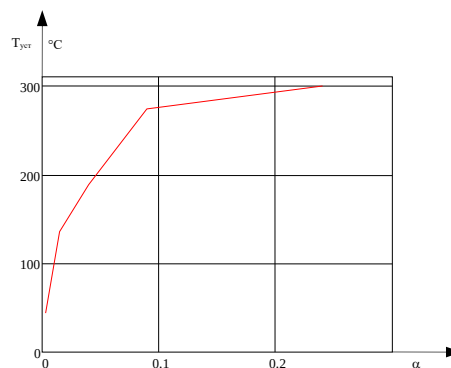


Рисунок 14 - Связь установившейся температуры и геометрии пластины

Полученные результаты показывают, что при значении параметра α , не превышающего 0,02, температура пластины не будет превышать величин, препятствующих длительной работе макета исполнительного устройства. Однако можно указать, что возможно проведение экспериментов и при $\alpha > 0,02$, но при этом время проведения эксперимента на макете должно быть ограниченным. Для этого следует воспользоваться результатами, представленными на рисунке 13.

Кроме того были проведены эксперименты по исследованию собранного пакета, содержащего 20 пластин. В таком случае происходит взаимное нагревание соседних пластин. По конструктивным соображениям на пакете в верхней и нижней его поверхностях закреплены плоские пластины из алюминиевого сплава толщиной 0,8 мм, служащие как для поддержания геометрической конфигурации пакета, так и для организации токоподвода. На пакет был намотан металлический термометр сопротивления из тонкой медной проволоки и по известной методике произведено определение его температуры при протекании по его пластинам тока силой 10 А. Результаты этого эксперимента приведены на рисунке 15.

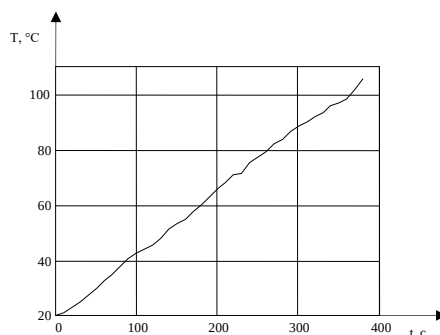


Рисунок 15 - Характер нагрева пакетного элемента

Из приведенного графика следует, что длительность проведения исследования макета исполнительного элемента без серьезных для него последствий может достигать 5 - 6 минут, что бывает вполне достаточным для определения необходимых параметров макета.

1.2.4. Выбор конструктивных параметров двигателя.

Для оценки моментного двигателя рекомендуется использовать такой показатель как статическая добротность.[2] Его значение обратно пропорционально массе двигателя и квадратному корню из потребляемой им мощности.

На массу двигателя главное влияние оказывает количество витков в активном элементе. Данный двигатель имеет модульную конструкцию и

производится в виде отдельных узлов, которые устанавливаются в конструкции привода по специальным требованиям. В связи с этим, будем рассматривать массу только активных элементов, к числу которых отнесем магнитную систему возбуждения и ленточную намотку, нанесенную на основание-гильзу.

Упрощенно структура расположения активных элементов показана на рисунке 16.

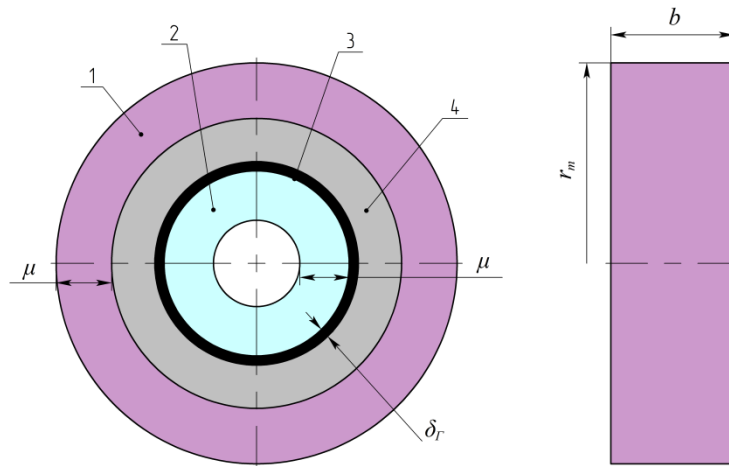


Рисунок 16 - Упрощенная структура расположения активных элементов.

1 - внешняя магнитная система; 2 - внутренняя магнитная система; 3 - гильза; 4 - ленточная намотка.

К числу исходных данных относятся максимальный радиус активных частей двигателя r_m , ширина ленты намотки и размеры магнитных систем в осевом направлении, равные b . Внешняя и внутренняя магнитные системы в радиальном направлении имеют размер μ . Внешний радиус трубчатой гильзы, на которую нанесена ленточная намотка, равен r_r , а ее толщина - δ_r . Механические воздушные зазоры ввиду малости их размеров считаем входящими в величину δ_r . Толщина ленты намотки Δ включает в себя толщины медной фольги и электрической изоляции. [5]

Суммарную массу активных элементов двигателя определяем в виде

$$m(N) = m_{m1} + m_{m2}(N) + m_r(N) + m_n(N), \quad (12)$$

где: m_{m1}, m_{m2} - массы соответственно внешней и внутренней магнитных систем;

m_{Γ} - масса гильзы;

m_{H} - масса намотки;

N - число витков намотки.

Определяем массу внешней магнитной системы:

$$m_{\text{M1}} = \rho_{\text{M}} \cdot V_1 = \rho_{\text{M}} \cdot b \cdot \pi \cdot [r_m^2 - (r_m - \mu)^2] = \rho_{\text{M}} \cdot b \cdot \pi \cdot \mu^2 \cdot \left(\frac{2r_m}{\mu} - 1 \right) \quad (13)$$

где: ρ_{M} - плотность материала магнитной системы;

V_1 - объем внешней магнитной системы.

Переходим к определению массы внутренней магнитной системы.

Внешний радиус этой системы:

$$(r_{\Gamma} - \delta_{\Gamma}) = [(r_m - \mu) - \Delta \cdot N] - \delta_{\Gamma} = (r_m - \mu - \delta_{\Gamma}) - \Delta \cdot N.$$

Внутренний радиус внутренней магнитной системы:

$$(r_{\Gamma} - \delta_{\Gamma}) - \mu = (r_m - 2\mu - \delta_{\Gamma}) - \Delta \cdot N.$$

В приведенных выражениях $r_{\Gamma} = (r_m - \mu - \Delta \cdot N)$ - внешний радиус гильзы.

В итоге масса внутренней магнитной системы определяется выражением:

$$\begin{aligned} m_{\text{M2}}(N) &= \rho_{\text{M}} \cdot V_2 \\ &= \rho_{\text{M}} \cdot b \cdot \pi \cdot \{[(r_m - \mu - \delta_{\Gamma}) - \Delta \cdot N]^2 - [(r_m - 2\mu - \delta_{\Gamma}) - \Delta \cdot N]^2\} \\ &= 2 \cdot \rho_{\text{M}} \cdot b \cdot \pi \cdot \mu \cdot \left(\frac{r_m - 1,5 \cdot \mu - \delta_{\Gamma}}{\Delta} - N \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Масса гильзы:

$$\begin{aligned} m_{\Gamma}(N) &= \rho_{\Gamma} \cdot V_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} \cdot b \cdot \pi \cdot \{[(r_m - \mu) - \Delta \cdot N]^2 - [(r_m - \mu - \delta_{\Gamma}) - \Delta \cdot N]^2\} = \\ &= 2 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot b \cdot \pi \cdot \delta_{\Gamma} \cdot \Delta \cdot \left(\frac{2 \cdot (r_m - \mu) - \delta_{\Gamma}}{2 \cdot \Delta} - N \right), \end{aligned} \quad (15)$$

где: ρ_{Γ} - плотность материала гильзы.

Определение массы ленточной намотки.

Масса первого слоя: $2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot \Delta \cdot b \cdot \rho_{\text{H}}$.

Масса второго слоя: $2 \cdot \pi \cdot (r_1 + \Delta) \cdot \Delta \cdot b \cdot \rho_{\text{H}}$.

Масса третьего слоя: $2 \cdot \pi \cdot (r_1 + 2 \cdot \Delta) \cdot \Delta \cdot b \cdot \rho_{\text{H}}$.

.....

Масса N – ого слоя: $2 \cdot \pi \cdot [(r_1 + (N - 1) \cdot \Delta) \cdot \Delta \cdot b \cdot \rho_H]$.

В данном случае ρ_H – плотность материала намотки; $r_1 = (r_r + \frac{\Delta}{2})$ – радиус первого слоя намотки, лежащего на внешнем радиусе гильзы r_r . Суммируем массы всех N слоев:

$$\begin{aligned} m_H &= 2 \cdot \pi \cdot \Delta \cdot b \cdot \rho_H \cdot \{N \cdot r_1 + [\Delta + 2 \cdot \Delta + \dots + (N - 1) \cdot \Delta]\} \\ &= 2 \cdot \pi \cdot \Delta \cdot b \cdot \rho_H \cdot \left[N \cdot r_1 + \Delta \cdot \frac{(N - 1) \cdot N}{2} \right] = \\ &= \pi \cdot \Delta^2 \cdot b \cdot \rho_H \cdot N \cdot \left[N + \left(\frac{2 \cdot r_1}{\Delta} - 1 \right) \right]. \end{aligned}$$

Учитывая, что

$$\begin{aligned} \frac{2 \cdot r_1}{\Delta} - 1 &= \frac{2 \cdot (r_r + \Delta/2)}{\Delta} - 1 = \frac{2 \cdot r_r}{\Delta} = \frac{2 \cdot (r_m - \mu - \Delta \cdot N)}{\Delta} \\ &= \frac{2}{\Delta} \cdot (r_m - \mu) - 2 \cdot N, \end{aligned}$$

получаем:

$$m_H = \pi \cdot \Delta^2 \cdot b \cdot \rho_H \cdot N \cdot \left[\frac{2 \cdot (r_m - \mu)}{\Delta} - N \right]. \quad (16)$$

Проводим суммирование всех составляющих массу активных частей двигателя, определенных выражениями (1) - (4). В итоге получаем:

$$\begin{aligned} m &= \pi \cdot b \cdot \mu^2 \cdot \rho_M \cdot \left(2 \frac{r_m}{\mu} - 1 \right) + 2 \cdot \pi \cdot b \cdot \Delta^2 \cdot \rho_H \\ &\cdot \left\{ \begin{aligned} &\frac{\mu}{\Delta} \cdot \frac{\rho_M}{\rho_H} \left[\left(\frac{r_m - \mu}{\Delta} - 0,5 \cdot \frac{\mu}{\Delta} - \frac{\delta_r}{\Delta} \right) - N \right] + \\ &+ \frac{\delta_r}{\Delta} \cdot \frac{\rho_r}{\rho_H} \cdot \left[\left(\frac{r_m - \mu}{\Delta} - 0,5 \cdot \frac{\delta_r}{\Delta} \right) - N \right] + \\ &+ 0,5 \cdot N \cdot \left(2 \cdot \frac{r_m - \mu}{\Delta} - N \right). \end{aligned} \right\} \quad (17) \end{aligned}$$

Воспользовавшись выражениями (13), (14), (15), (16), (17) и задаваясь такими параметрами конструкции активных элементов моментного двигателя, как $b = 0,05$ м, $r_m = 0,13$ м, $\mu = 0,015$ м, $\Delta = 10^{-4}$ м, $\delta_r = 0,003$ м, $\rho_M = 7,4 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_r = 8,93 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_H = 8,93 \cdot 10^3$ кг/м³ построены графики зависимостей от количества витков намотки каждой из масс, составляющих активную структуру

двигателя (рисунок 17). График 1 соответствует массе внешней магнитной системе, график 2 – внутренней магнитной системе, график 3 – изменению массы гильзы и график 4 – ленточной намотке. На данном рисунке кривой 5 показан результат суммирования всех масс, составляющих совокупность активных элементов.

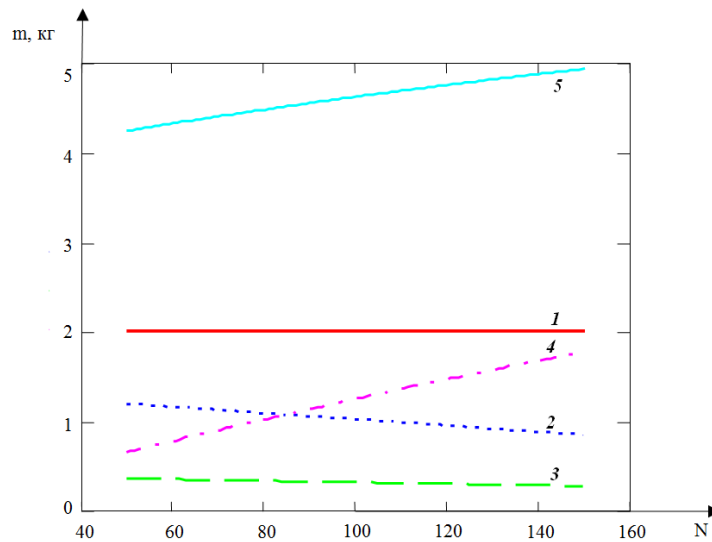


Рисунок 17 - Масса активной структуры двигателя от количества витков намотки

Потребляемая мощность, в свою очередь, зависит не только от числа витков активного элемента, но и от числа пар полюсов магнитной системы. [5]

Мощность, потребляемая намоткой моментного двигателя [6], определяется следующим образом

$$P = \frac{U^2}{R_{\text{нам}}} = \frac{U^2}{2 \cdot p \cdot N \cdot R} = \frac{U^2}{2 \cdot N \cdot (p \cdot R)}, \quad (18)$$

где: p – число пар полюсов магнитной системы;

N – число слоев намотки;

R – сопротивление единичной пластины.

В данном случае под величиной R предполагается сопротивление пластины, лежащей в среднем витке ленточной намотки.

Предполагаем, что геометрические размеры двигателя при изменении числа пар полюсов не меняются. Предварительно рассмотрим наиболее простую

задачу, когда фактически распределенный ток, протекающий по пластинам намотки, представим в виде сосредоточенного тока, который протекает строго в диагональных направлениях (рисунок 18).

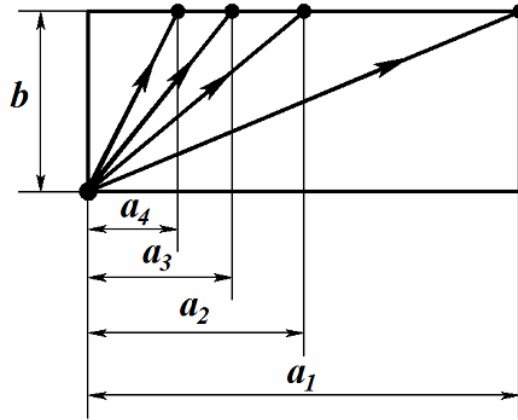


Рисунок 18 - Протекание сосредоточенного тока по пластинам разной длины

При таких условиях сопротивление току будет пропорционально длине диагонали пластины:

$$R_i = k \cdot \sqrt{a_i^2 + b^2} \quad (19)$$

где k – коэффициент пропорциональности;

a_i – длина пластины при $i = p$;

b – ширина пластины.

Отметим, что ширина пластины b – ширина ленты, из которой выполнена намотка, имеет неизменную величину. Длина пластины в случае различного числа пар полюсов определится следующим образом

$$a_i = \frac{a_1}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{cp}}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot r_{cp}}{p}, \quad (20)$$

где: $a_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{cp}}{2} = \pi \cdot r_{cp}$ – длина пластины, лежащей в среднем витке намотки при

условии того, что магнитная система имеет одну пару полюсов $p = 1$;

r_{cp} – радиус центральной линии среднего витка намотки.

Подставим (20) в выражение (19)

$$R_i = k \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi \cdot r_{cp}}{p}\right)^2 + b^2} = k \cdot \pi \cdot r_{cp} \cdot \sqrt{\left[\frac{1}{p^2} + \left(\frac{b}{\pi \cdot r_{cp}}\right)^2\right]} = R_1 \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{p^2} + \left(\frac{b}{\pi \cdot r_{cp}}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{b}{\pi \cdot r_{cp}}\right)^2}}. \quad (21)$$

В данном случае R_1 – сопротивление пластины при $p = 1$.

Зададим некоторую исходную величину, связанную с геометрией двигателя $\frac{b}{\pi \cdot r_{cp}} = 0,4$. При этом условии получим соотношения величин сопротивлений для различного числа пар полюсов

$$\begin{aligned} p = 2 & \quad R_2 = 0,57 \cdot R_1; \\ p = 3 & \quad R_3 = 0,465 \cdot R_1; \\ p = 4 & \quad R_4 = 0,422 \cdot R_1. \end{aligned}$$

Указанные выше выкладки относятся к условию, что ток протекает только в области, совпадающей с диагональю пластины. Однако в реальной ситуации по пластине протекает распределенный ток, часть которого течет по диагонали, а остальные – по линиям, которые можно представить как проводники при параллельном включении. Сопротивление протеканию тока в этом случае можно определить численными методами, в частности использованием программного продукта COMSOL Multiphysics. В качестве примера для расчета была задана медная пластина толщиной $1 \cdot 10^{-4}$ м, шириной $5 \cdot 10^{-2}$ м, начальной длины 0,12 м.

К электродам в диагонально расположенных углах пластины прикладывалось напряжение 0,001 В; на торцевых поверхностях электродов определялся ток, вызванный приложенным напряжением. Увеличенная длина электродов, как показано на рис. 2, принята в связи с тем, что среди опций COMSOL версии 3.5 имеется возможность интегрирования только нормальной компоненты тока, что при малой длине электрода приводит к искажению результатов, так как токовые линии начинают искривляться перед входом в пластину. В дальнейшем, из полного сопротивления, определяемого по закону Ома, вычитаются сопротивления электродов, сложности в получении значений которых нет.

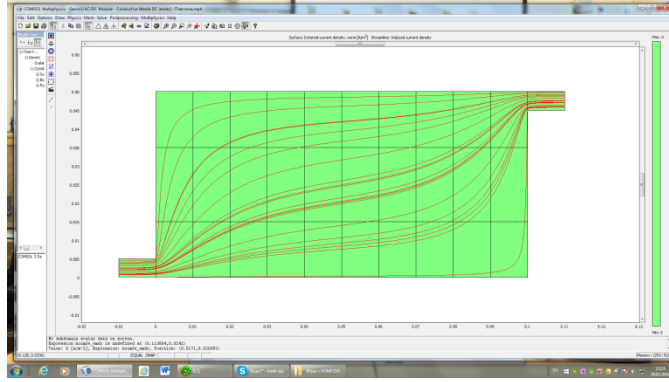


Рисунок 19- Характер протекания распределенного тока по пластине

Результаты численного эксперимента показали следующее:

$$R_1 = 8,26 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$R_2 = 6,14 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}, \quad R_2 = 0,743 \cdot R_1;$$

$$R_3 = 5,76 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}, \quad R_3 = 0,697 \cdot R_1;$$

$$R_4 = 5,92 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}, \quad R_4 = 0,717 \cdot R_1;$$

$$R_6 = 6,26 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}, \quad R_6 = 0,758 \cdot R_1.$$

Сравнивая полученные результаты с аналогичными для случая, когда ток считался сосредоточенным в диагональном направлении, можно сделать вывод, что изменение (уменьшение) сопротивления пластины в реальной ситуации, когда ток распределен, происходит в меньшей степени.

Если обратиться к выражению (18), заметим, что величина потребляемой мощности обратно пропорциональна величине произведения ($p \cdot R$). Так, если считать, что $p = 1$, потребляемая двигателем мощность равна

$$P_1 = \frac{U^2}{2 \cdot N \cdot R_1},$$

то тогда при $p = 2$

$$P_2 = \frac{U^2}{2 \cdot N \cdot 2 \cdot 0,743 \cdot R_1}.$$

Другими словами, уменьшение потребляемой мощности при $p = 2$ происходит в 1,486 раз. Аналогично, при $p = 3$ потребляемая мощность уменьшится в $3 \cdot 0,697 = 2,091$ раз, при $p = 4$ в 2,868 раз и т.д.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что увеличение числа пар полюсов магнитной системы существенно снижает потребляемую двигателем мощность. Однако при этом необходимо учесть, что значительно уменьшается и рабочий угловой диапазон моментного двигателя, определяемый как $\varphi_{\text{раб}} = \frac{\pi}{p} - \alpha$, где α – угловой размер полюса магнитной цепи. Указанный недостаток может быть исключен, если данный двигатель реализовать как вентильный.

Уменьшение потребляемой мощности происходит за счет увеличения полного сопротивления обмотки, поэтому будет уменьшаться и ток, протекающий по последней. Это должно привести к изменению момента, развиваемого двигателем; при этом однако необходимо учитывать, что увеличивается число сил каждого полюса, создающих момент; изменяется характер протекания распределенного тока по пластине, приводящего к изменению поперечных компонент токовых линий [6, 7].

Полученные в работе результаты дают основу и предпосылки для определения параметров моментного двигателя, обеспечивающих оптимальные величины удельных характеристик последнего.

1.2.5. Реакции тока пластины.

Активный элемент ленточного моментного двигателя является проводником с постоянным током, помещенным в магнитное поле. Следовательно, на ток, текущий по нему, будет оказывать влияние эффект Холла.

Эффект Холла — явление возникновения поперечной разности потенциалов (называемой также холловским напряжением) при помещении проводника с постоянным током в магнитное поле. [9]

В простейшем рассмотрении эффект Холла выглядит следующим образом. Пусть через проводящий брусок в слабом магнитном поле течёт электрический ток под действием напряжённости . Магнитное поле будет отклонять носители

заряда к одной из граней бруса от их движения вдоль или против электрического поля.

Таким образом, сила Лоренца приведёт к накоплению отрицательного заряда возле одной грани бруса, и положительного — возле противоположной. Накопление заряда будет продолжаться до тех пор, пока возникшее электрическое поле зарядов не скомпенсирует магнитную составляющую силы Лоренца.

В то же время, постоянный ток, протекающий по обмотке будет создавать собственное магнитное поле обмотки, которое будет деформировать основной магнитный поток. Магнитные силовые линии этого поля располагаются по концентрическим окружностям, в центре которых находится пластина с током. Направление магнитного поля вокруг проводника с током всегда находится в строгом соответствии с направлением тока, проходящего по проводнику. Направление магнитных силовых линий можно определить по правилу буравчика.

1.2.6. Постановка задачи создания экспериментальной установки.

Для оценки влияния эффекта Холла на смещение токовых линий в пластине и деформации основного магнитного потока магнитным полем пластины необходимо создание экспериментальной установки, которая позволит получить некоторые поправочные коэффициенты. С помощью данных коэффициентов станет возможным связать разработанную методику расчетов с реальными характеристиками ленточного моментного двигателя.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

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

4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, *сегмент рынка* – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга). Можно применять географический, демографический, поведенческий и иные критерии сегментирования рынка потребителей, возможно применение их комбинаций с использованием таких характеристик, как возраст, пол, национальность, образование, любимые занятия, стиль жизни, социальная принадлежность, профессия, уровень дохода.

В зависимости от категории потребителей (коммерческие организации, физические лица) необходимо использовать соответствующие критерии сегментирования. Например, для коммерческих организаций критериями сегментирования могут быть: месторасположение; отрасль; выпускаемая продукция; размер и др.

Для физических лиц критериями сегментирования могут быть: возраст; пол; национальность; образование; уровень дохода; социальная принадлежность; профессия и др.

Из выявленных критериев целесообразно выбрать два наиболее значимых для рынка. На основании этих критериев строится карта сегментирования рынка.

4.1.2. Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;
- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

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

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, пример которой приведен в табл. 2. Для этого необходимо отобрать не менее трех-четырех конкурентных товаров и разработок.

Таблица 2

Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений
(разработок)

Критерии оценки	Вес критерии	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
3. Помехоустойчивость	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
4. Энергоэкономичность	0,03	4	4	5	0,12	0,12	0,15
5. Надежность	0,07	5	5	3	0,35	0,35	0,21
6. Уровень шума	0,03	5	5	5	0,15	0,15	0,15
7. Безопасность	0,09	5	3	5	0,45	0,27	0,45
8. Потребность в ресурсах памяти	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2

9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,03	4	4	5	0,12	0,12	0,15
10. Простота эксплуатации	0,05	5	4	5	0,25	0,2	0,25
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,15	5	5	4	0,75	0,75	0,6
2. Уровень проникновения на рынок	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
3. Цена	0,02	4	4	5	0,08	0,08	0,1
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,02	5	5	5	0,1	0,1	0,1
5. Послепродажное обслуживание	0,03	5	5	5	0,15	0,15	0,15
6. Финансирование научной разработки	0,01	5	5	4	0,05	0,05	0,04
7. Срок выхода на рынок	0,01	5	5	5	0,05	0,05	0,05
8. Наличие сертификации разработки	0,01	5	5	5	0,05	0,05	0,05
Итого	1				4,87	4,49	4,4

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 2, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

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 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, (1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Основываясь на знаниях о конкурентах, следует объяснить:

- чем обусловлена уязвимость позиции конкурентов и возможно занять свою нишу и увеличить определенную долю рынка;
- в чем конкурентное преимущество разработки.

Итогом данного анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, может стать выработка конкурентных преимуществ, которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие покупателей посредством предложения товаров, заметно отличающихся либо высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров, либо нестандартным набором свойств, интересующих покупателя.

4.1.3. Технология QuaD

Технология QuaD (Q^Uality A^Dvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект. По своему содержанию данный инструмент близок к методике оценки конкурентных технических решений, описанных в разделе 1.2.

Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации.

Для упрощения процедуры проведения QuaD рекомендуется оценку проводить в табличной форме (табл. 3).

В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по стобалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений
(разработок)

Критерии оценки	Вес критерии	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5*2)
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Энергоэффективность	0,1	80	100	0,8	0,08
2. Помехоустойчивость	0,05	80	100	0,8	0,04
3. Надежность	0,07	90	100	0,9	0,063
4. Унифицированность	0,05	70	100	0,7	0,035
5. Уровень материалоемкости разработки	0,05	70	100	0,7	0,035
6. Уровень шума	0,03	5	100	0,05	0,0015
7. Безопасность	0,09	100	100	1	0,09
8. Потребность в ресурсах памяти	0,05	60	100	0,6	0,03
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,03	80	100	0,8	0,024
10. Простота эксплуатации	0,05	80	100	0,8	0,04
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,05	95	100	0,95	0,0475
12. Ремонтопригодность	0,05	70	100	0,7	0,035
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
13. Конкурентоспособность продукта	0,15	100	100	1	0,15

14. Уровень проникновения на рынок	0,1	90	100	0,9	0,09
15. Перспективность рынка	0,01	90	100	0,9	0,009
16. Цена	0,02	80	100	0,8	0,016
17. Послепродажное обслуживание	0,02	80	100	0,8	0,016
18. Финансовая эффективность научной разработки	0,01	90	100	0,9	0,009
19. Срок выхода на рынок	0,01	80	100	0,8	0,008
20. Наличие сертификации разработки	0,01	100	100	1	0,01
Итого	1				

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum B_i \cdot B_i, (2)$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

$$P_{cp} = 82,9$$

Значение P_{cp} позволяет говорить о том, что разработка перспективная.

По результатам оценки качества и перспективности делается вывод об объемах инвестирования в текущую разработку и направлениях ее дальнейшего улучшения.

Технология может использоваться при проведении различных маркетинговых исследований, существенным образом снижая их трудоемкость и повышая точность и достоверность результатов.

4.2. Планирование научно-исследовательских работ.

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования.

В данном разделе были составлены перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, проведено распределение исполнителей по видам работ. Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в табл. 4.

Таблица 4 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Создание темы проекта	1	Составление и утверждение темы проекта	Научный руководитель
	2	Анализ актуальности темы	Научный руководитель, студент
Выбор направления исследования	3	Поиск и изучение материала по теме	Студент
	4	Выбор направления исследований	Научный руководитель, студент
	5	Календарное планирование работ	
Теоретические исследования	6	Изучение литературы по теме	Студент
	7	Составление сравнительной таблицы	
Практические исследования	8	Проведение экспериментов	Научный руководитель, студент
Оценка полученных результатов	9	Анализ результатов	Научный руководитель, студент
	10	Заключение	Научный руководитель, студент

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

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 используется следующая формула:

$$t_{ожi} = \frac{3*t_{mini}+2*t_{maxi}}{5}, \quad (29)$$

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

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

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

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_{pi} , 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 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{q_i}, \quad (30)$$

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

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

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

4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – 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:

$$T_{ki} = T_{pi} * k_{\text{кал}}, \quad (31)$$

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:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (32)$$

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.

Согласно производственному и налоговому календарю на 2016 год, количество календарных 366 дней, количество рабочих дней составляет 247 дней, количество выходных и праздничных 119 дней (количество предпраздничных дней – 15, количество выходных дней – 104), таким образом: $k_{\text{кал}} = 1,48$.

Все рассчитанные значения вносим в таблицу 5.

После заполнения таблицы 5 строим календарный план-график (табл. 6). График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделим различной штриховкой в зависимости от исполнителей.

Таблица 5 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ									Исполни- тели	Длительность работ в рабочих днях			Длительность работ в календарных		
	$t_{\min}$, чел-дни			$t_{\max}$, чел-дни			$t_{ож\bar{c}i}$, чел-дни				T_{pi}			T_{ki}		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Составление и утверждение темы ВКР	1	2	3	3	5	6	2	4	5	Науч. рук.	2	4	5	3	6	7
Анализ актуальности темы	1	1	1	2	2	2	1	1	1	Студ. и науч. рук.	1	1	1	1	1	1
Постановка задач	2	3	4	4	5	6	3	4	5	Студент	3	4	5	4	6	7
Определение стадий, этапов и сроков написания ВКР	5	5	5	8	8	8	6	6	6	Студ. и науч. рук.	3	3	3	4	4	4
Подбор литературы по тематике работы	5	6	5	7	8	7	6	7	6	Студент	6	7	6	9	10	9
Сбор материалов и анализ существующих методов	15	15	20	20	20	25	17	17	22	Студент	17	17	22	25	25	33
Выбор оптимального метода	3	3	3	5	5	5	4	4	4	Студ. и науч. рук.	2	2	2	3	3	3
Проведение экспериментов по выбранному методу	10	15	10	15	20	15	12	17	12	Студ. и науч. рук.	6	8	6	9	12	9
Оценка и анализ полученных результатов	5	4	4	7	6	6	6	5	5	Студ. и науч. рук.	3	2	2	4	3	3
Работа над выводами по проекту	4	5	4	6	7	6	5	6	5	Студ. и науч. рук.	2	3	2	3	4	3
Итого														65	74	79

Таблица 6 – Календарный план-график проведения ВКР по теме

№ рабо т	Вид работ	Исполнители	T _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ											
				февр.		март			апрель			май			
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление и утверждение темы ВКР	Научный руководитель	7	■											
2	Анализ актуальности темы	Студент и научный руководитель	1		■										
3	Постановка задач	Студент	7			■									
4	Определение стадий, этапов и сроков написания ВКР	Студент, научный руководитель	4				■								
5	Подбор литературы по тематике работы	Студент	9				■								
6	Сбор материалов и анализ существующих методов	Студент	33					■	■	■					
7	Выбор оптимального метода	Студент и научный руководитель	3								■				
8	Проведение экспериментов по выбранному методу	Студент и научный руководитель	9									■			
9	Оценка и анализ полученных результатов	Студент и научный руководитель	3										■		
10	Работа над выводами по проекту	Студент, научный руководитель	3											■	

■ – студент; ■ – научный руководитель.

4.2.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}, \quad (33)$$

где: m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов.

Таблица 7 – Материальный затраты

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за ед., руб.			Затраты на материалы, (З _м), руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Бумага	лист	150	150	150	2	2	2	345	345	345
Картридж для	шт.	1	1	1	1000	1000	1000	1150	1150	1150
Интернет	М/бит (пакет)	1	1	1	350	350	350	402,5	402,5	402,5
Ручка	шт.	1	1	1	20	20	20	23	23	23
USB накопитель	(Гб)	8	8	8	65	65	65	600	600	600
Итого								2520		

Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме.

При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены.

Таблица 8 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/ п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования			Цена единицы оборудования,			Общая стоимость оборудования,		
		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
3	Принтер	1	1	1	1200 0	1200 0	1200 0	12000	12000	12000
5	Ноутбук с программным обеспечением	1	1	1	4000 0	4000 0	4000 0	40000	40000	40000
Итого								52000	52000	52000

Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы

В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в таблице 6.

Таблица 9 – Расчет основной заработной платы

№ п/ п	Наименование этапов	Исполнитель и по категориям	Трудо- емкость, чел.- дн.			Заработная плата, прихо- дящаяся на			Всего зара- ботная плата по тарифу (окладам), руб.		
			Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1.	Составление и утверждение темы ВКР	Науч. рук.	2	4	3	1374,7			2749,4	5498,8	4124,1
2.	Анализ актуальности	Студ. и науч. рук.	1	1	1	1786,9			1786,9	1786,9	1786,9
3.	Постановка задач	Студент	2	3	4	412,2			824,4	1236,6	1648,8
4.	Определение стадий, этапов и сроков	Студ. и науч. рук.	3	2	3	1786,9			5360,7	3573,8	5360,7
5.	Подбор литературы по	Студент	5	7	7	412,2			2061	2885,4	2885,4
6.	Сбор материалов и	Студент	8	15	20	412,2			3297,6	6183	8244
7.	Выбор оптимального метода	Студ. и науч. рук.	4	8	8	1786,9			7147,6	14295,2	14295,2
8.	Проведение экспериментов по выбранному	Студ. и науч. рук.	6	6	6	1786,9			10721,4	10721,4	10721,4
9.	Оценка и анализ полученных результатов	Студ. и науч. рук.	4	2	3	1786,9			7147,6	3573,8	5360,7
10.	Анализ результатов, заключение	Студ. и науч. рук.	5	2	3	1786,9			8934,5	3573,8	5360,7
11.	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-	Студент	9	9	9	412,2			3709,8	3709,8	3709,8
Итого			49	59	67	13744,9			53740,8	57038,5	63497,7

Проведем расчет заработной платы относительно того времени, в течение которого работал руководитель и студент.

$$Z_{\text{зн}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (34)$$

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

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

Максимальная основная заработная плата руководителя (ассистента, преподавателя) равна примерно 23264.86 рублей, а студента 6976.22 рублей.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} * Z_{\text{осн}} \quad (35)$$

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

Таблица 10 – Расчет дополнительной заработной платы

Исполните ль	Основная заработная плата, руб.			Коэффицие нт дополнител ьной заработной платы	Дополнительная заработная плата, руб.		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Руководите ль	22864, 4	23486,4	25863,5	0,12	2743,7	2818, 4	3103, 6
Студент	32663, 4	33552	36947,9		3919,6	4026, 2	4433, 7
Итого					6663,3	6844, 6	7537, 3

Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (36)$$

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

На 2016 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%.

Таблица 11 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб			Дополнительная заработная плата, руб		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Руководитель	22864,4	23486,4	25863,5	2743,7	2818,4	3103,6
Студент-дипломник	32663,4	33552	36947,9	3919,6	4026,2	4433,7
Коэффициент отчислений во внебюджетные	0,271					
Итого						
Исполнение 1	62191,1 руб.					
Исполнение 2	63883,1 руб.					
Исполнение 3	70348,7 руб.					

Накладные расходы

Величина накладных расходов определяется по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\sum \text{статей}) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (37)$$

где: $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

4.2.4.1. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Таблица 12 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	
Материальные затраты НТИ	3000,5	3000,5	3000,5	Пункт 3.4.1
Затраты на специальное оборудование для научных	534,05	534,05	534,05	Пункт 3.4.2
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	53740,8	57038,5	63497,7	Пункт 3.4.3

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей	6663,3	6844,6	7537,3	Пункт 3.4.4
Отчисления во внебюджетные	62191,1	63883,1	70348,7	Пункт 3.4.5
Накладные расходы	20356,9	131911, а	143499, а	16 % от суммы ст. 1-
Бюджет затрат НТИ	146486,	263212,	288418,	Сумма ст. 1-с

Исходя из данных, приведенных в таблице 10, наиболее бюджетным вариантом является исполнение 1. Самым затратным является исполнение 3.

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 финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{финр}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (38)$$

где $I_{финр}^{исп.i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно – исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{финр}^{исп.1} = \frac{147587,6}{286999,9} = 0,51; \quad I_{финр}^{исп.2} = \frac{263823,9}{286999,9} = 0,92;$$

$$I_{финр}^{исп.3} = \frac{286999,9}{286999,9} = 1$$

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

$$I_{pi} = \sum a^i \cdot b^i, \quad (39)$$

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 – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (табл. 13).

Таблица 13 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1. Способствует росту производительности труда	0,1	5	3	3
2. Удобство в эксплуатации	0,15	4	2	4
3. Ремонтопригодность	0,15	5	3	3
4. Энергосбережение	0,20	4	5	5
5. Надежность	0,15	4	4	2
6. Пусковой период	0,1	5	3	3
7. Материалоемкость	0,15	5	4	4
Итого	1	4,5	3,55	3,55

$$I_{p-исп1} = 5*0,1+4*0,15+5*0,15+4*0,2+4*0,15+5*0,1+5*0,15=4,5$$

$$I_{p-исп1} = 3*0,1+2*0,15+3*0,15+5*0,2+4*0,15+3*0,1+4*0,15=3,55$$

$$I_{p-исп1} = 3*0,1+4*0,15+3*0,15+5*0,2+2*0,15+3*0,1+4*0,15=3,55$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{испi}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр}},$$

$$I_{исп.1}^1 = \frac{4,5}{0,51} = 8,82; \quad I_{исп.1}^2 = \frac{3,55}{0,92} = 3,85; \quad I_{исп.1}^3 = \frac{3,55}{1} = 3,55. \quad (40)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см.табл.14) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{cp}$):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.2}}{I_{исп.1}} \quad (41)$$

Таблица 14 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,51	0,92	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,5	3,55	3,55
3	Интегральный показатель эффективности	8,82	3,85	3,55
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	2,3	0,43	0,40

Вывод

В результате проделанной работы, определена трудоемкость выполнения работ и разработан график проведения научного исследования.

Посчитана заработная плата научного руководителя и студента.

Был сформирован бюджет затрат проекта. Наиболее бюджетным оказалось исполнение 1, а наиболее затратным исполнение 3. По окончанию выполнения данного раздела была определена эффективность исследования.

Реализация технологии в первом исполнении, является наиболее эффективным вариантом, для решения задачи, поставленной в данной работе.

Список публикаций

- 1. Долгих, А. Г.** Зависимость потребляемой мощности моментного двигателя с ленточной намоткой от числа пар полюсов магнитной системы [Электронный ресурс] = Tape winding torque motor power consumption dependence from the magnetic system poles pairs / А. Г. Долгих, И. Н. Самодуров; науч. рук. В. М. Мартемьянов // Инженерия для освоения космоса : сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного форума с международным участием, г. Томск, 12-14 апреля 2016 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2016. — [С. 34-37]. — Заглавие с экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/23251>
- 2. Самодуров, Иван Николаевич.** Зависимость массы моментного двигателя от числа витков ленточной намотки [Электронный ресурс] = The torque motor mass dependance from the tape winding coils number / И. Н. Самодуров; науч. рук. А. Г. Долгих // Инженерия для освоения космоса : сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного форума с международным участием, г. Томск, 12-14 апреля 2016 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2016. — [С. 70-74]. — Заглавие с экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/23210>
- 3. Dolgikh, Antonina Gennadievna.** Analytical studies of torque motor tape active element [Electronic resource] / A. G. Dolgikh, V. M. Martemyanov, I. N. Samodurov // MATEC Web of Conferences. — Les Ulis: 2016. — Vol. 48 : Space Engineering. — [01004, 7 p.]. — Title screen. — Свободный доступ из сети Интернет. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20164801004>
- 4. Samodurov, Ivan Nikolaevich.** Insulation Systems in Spacecraft [Electronic resource] / I. N. Samodurov; sci. adv. V. S. Ivanova // Космическое приборостроение : сборник научных трудов III Всероссийского форума школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, г. Томск, 8-10 апреля 2015 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2015. — [С. 370-372]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader. Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C22/091.pdf>
- 5. Иванова, Антонина Геннадьевна.** Магнитное поле прямоугольного проводника с током [Электронный ресурс] = Magnetic field of rectangular conductor with current / А. Г. Иванова, И. Н. Самодуров, В. М. Мартемьянов // Международный студенческий научный вестник. — 2015. — № 6. — [5 с.]. — Заглавие с экрана. — Доступ по договору с организацией-держателем ресурса. — Свободный доступ из сети Интернет. Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25279220> <http://eduherald.ru/135-14265>
- 6. Иванова, Антонина Геннадьевна.** Двигатель-маховик в импульсном режиме [Электронный ресурс] / А. Г. Иванова, Р. Э. Кодермятов, И. В. Самодуров; науч. рук. В. М. Мартемьянов // Космическое приборостроение : сборник научных трудов II Всероссийского форума школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, г. Томск, 10-12 апреля 2014 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2014. — [С. 91-93]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети

- Интернет. — Adobe Reader.
Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C22/019.pdf>
- 7. Кодермятов, Р. Э.** Экспериментальное определение характеристик двигателя с ленточной намоткой статора [Электронный ресурс] / Р. Э. Кодермятов, И. Н. Самодуров; науч. рук. А. Г. Иванова // Современные техника и технологии : сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14-18 апреля 2014 г. в 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) . — 2014. — Т. 1. — [С. 239-240]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.
Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C01/V1/115.pdf>
- 8. Самодуров, Иван Николаевич.** Аналитическое исследование движения ротора моментного двигателя при импульсном питании [Электронный ресурс] / И. В. Самодуров, Р. Э. Кодермятов, А. Г. Иванова; науч. рук. В. М. Мартемьянов // Современные техника и технологии : сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14-18 апреля 2014 г. в 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) . — 2014. — Т. 1. — [С. 263-264]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.
Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C01/V1/127.pdf>
- 9. Кодермятов, Р. Э.** Исследование моментного двигателя [Электронный ресурс] / Р. Э. Кодермятов, И. В. Самодуров; науч. рук. В. М. Мартемьянов // Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность : сборник трудов IV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 26-30 мая 2014 г. в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 2014. — Т. 2. — [С. 29-32]. — Заглавие с титульного листа. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.
Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C36/V2/008.pdf>
- 10. Самодуров, Иван Николаевич.** Вращение ротора моментного двигателя при импульсном питании [Электронный ресурс] / И. В. Самодуров, М. В. Ляпунова // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи : материалы Второй российской молодежной научной школы-конференции, г.Томск, 29-31 октября 2014 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ) ; ред. кол. А. С. Ивашутенко ; Е. П. Богданов ; Т. В. Усачева. — Томск: СКАН, 2014. — [С. 94-96]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.
Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C50/032.pdf>