

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

Школа – Инженерная школа энергетики
Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Отделение школы (НОЦ) – Отделение электроэнергетики и электротехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Математическое моделирование вентильного двигателя

УДК 629.12.06:519.876

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Н	Больных Е.С.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Столярова О.О.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Попова С.Н.	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский А.Г.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электромеханические и электротехнические системы автономных объектов	Гарганеев А.Г.	д.т.н.		

Планируемые результаты обучения по ООП 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника (магистратура)

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Универсальные компетенции</i>		
P1	<i>Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.</i>	Требования ФГОС (ОК-1, 3; ОПК-1, 2), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.</i>	Требования ФГОС (ОПК-3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	<i>Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.</i>	Требования ФГОС (ОК-2, 3; ОПК-1; ПК-1, 2, 3), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	<i>Использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.</i>	Требования ФГОС (ОК-3; ОПК-1, 4), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.</i>	Требования ФГОС (ОПК-4; ПК-4-6) ¹ , Критерий 5 АИОР (п.1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .
P6	<i>Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.</i>	Требования ФГОС (ПК-1, 7,8). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .

P7	Выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.	Требования ФГОС (ПК-2, 9, 10, 11). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .
P8	Проводить инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.	Требования ФГОС (ПК-3, 13, 14, 15, 24-26). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .
P9	Проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.	Требования ФГОС (ПК-11, 12, 13, 16-21, 24, 26), Критерий 5 АИОР (п.1.5, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы</i> электроэнергетического и электротехнического оборудования.	Требования ФГОС (ПК-22, 23, 25, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	<i>Осваивать новое</i> электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.	Требования ФГОС (ПК-27, 28), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P12	Разрабатывать рабочую <i>проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять <i>оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.	Требования ФГОС (ПК-29, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

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

Школа – Инженерная школа энергетики

Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение школы (НОЦ) – Отделение электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

Гарганеев А.Г.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Н	Больных Екатерина Сергеевна

Тема работы:

Математическое моделирование вентильного двигателя

Утверждена приказом директора (дата, номер)

11.01.18 №45/с

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.).

Объектом исследования является вентильный двигатель

Номинальная мощность $P_{2н}=13$ кВт; число фаз $m=3$; номинальное напряжение $U_n=380$ В; соединение фаз звезда; число полюсов $2p = 4$; частота сети $f=100$ Гц; повторно-кратковременный режим работы ПВ = 40%; степень защиты IP65; способ монтажа IM3011; система охлаждения IC40; маркировка взрывозащиты 1ExdПВТ4.

<p>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></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Математическое моделирование вентильного двигателя 2. Моделирование магнита вентильного двигателя в Elcut 3. Имитационное моделирование вентильного двигателя 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 5. Социальная ответственность 6. Английский язык
--	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Попова С.Н.
Социальная ответственность	Дашковский А.Г.
Английский язык	Воробьева В.В.

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Введение
Моделирование магнита вентильного двигателя в Elcut
Заключение

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Столярова О.О.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Н	Больных Екатерина Сергеевна		

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация состоит из 117 страниц, 29 рисунков, 15 таблиц, 39 источников, 1 приложения.

Ключевые слова: вентильный двигатель, постоянные магниты, математическая модель, имитационная модель

В качестве объекта исследования выступает вентильный двигатель (ВД) электропривода, предназначенного для управления запорной, запорно-регулирующей арматурой, шаровых кранов технологических перерабатывающих узлов, газопроводов и другого трубопроводного транспорта, в том числе высокого давления.

Целью работы является проведение математического моделирования вентильного двигателя электропривода для магистральных нефтепроводов.

В процессе исследования **проводились:**

- электромагнитный расчёт вентильного двигателя;
- математическое моделирование вентильного двигателя;
- имитационное моделирование вентильного двигателя.

В **результате** исследования: разработан алгоритм математического моделирования и выбран магнит для ротора вентильного двигателя.

Степень внедрения: для любых вентильных двигателей до их производства.

Область применения: в качестве двигателя в составе электропривода, предназначенного для управления запорной, запорно-регулирующей арматурой, шаровых кранов технологических перерабатывающих узлов,

магистральных нефтепроводов, газопроводов и другого трубопроводного транспорта, в том числе высокого давления.

Экономическая эффективность работы при анализе бюджета затрат на научно-исследовательскую работу, показала что данный проект является весьма стабильным и устойчивым, имеет минимальное количество угроз.

В будущем планируется: создание методики математического моделирования вентильного двигателя.

Текстовая часть выпускной квалификационной работы выполнена в текстовом редакторе MicrosoftWord и представлена на CD-R (в конверте на обороте обложки).

Содержание

Введение.....	9
Глава 1. Обзор вентильного двигателя.....	11
Глава 2. Математическое моделирование вентильного двигателя.....	19
1. Алгоритм математического моделирования вентильного двигателя...20	
2. Электромагнитный расчёт вентильного двигателя.....	23
Глава 3. Моделирование магнита вентильного двигателя.....	54
Глава 4. Имитационное моделирование вентильного двигателя.....	63
Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	71
Глава 6. Социальная ответственность.....	82
Заключение.....	99
Список литературы.....	101
Приложение А.....	105

Введение

Современные тенденции развития полупроводниковой техники дали толчок в развитии давно известных систем электроприводов в новых сферах применения. Одним из таких электроприводов является вентильный электропривод. На сегодняшний день он становится все более популярным благодаря простоте, высоким энергетическим показателям и большому диапазону регулирования. Такой электропривод благодаря особенностям конструкции и простоте реализации управления может найти применение во многих сферах промышленности таких как военная, медицинская, космическая и другие. Вентильный электропривод представляет собой электромеханическую систему, в которой объединены синхронная электрическая машина, с возбуждением от постоянных магнитов, электронный коммутатор, посредством которого осуществляется питание обмоток якоря машины, и система автоматического управления инвертором, оснащенная необходимыми измерительными устройствами (датчиками). Данный двигатель называют вентильным двигателем. Традиционно управление ключами инвертора осуществляется в функции положения ротора синхронного двигателя. Для решения задач контролируемого движения в современных системах все чаще применяются такие двигатели.

Благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам, вентильные двигатели являются наиболее перспективными электрическими машинами в диапазоне малых и средних мощностей, особенно для моментных систем электропривода. Вентильные двигатели конструктивно просты, надежны, имеют абсолютно жесткие механические характеристики и не требуют затрат энергии на возбуждение. Эти качества электрической машины обуславливают применение в промышленных системах автоматизации, роботах и манипуляторах, приводах подач, главного движения металлорежущих станков, координатных устройствах и т.д.

Целью данной работы является провести математическое моделирование вентильного двигателя. В данной магистерской работе

вентильный электродвигатель используется в составе электропривода предназначенного для управления запорной, запорно-регулирующей арматурой, шаровых кранов технологических перерабатывающих узлов, магистральных нефтепроводов, газопроводов и другого трубопроводного транспорта, в том числе высокого давления.

В последние десятилетия при конструировании роторов с постоянными магнитами, предпочтение отдается высокоэнергетическим магнитам на основе сплавов редкоземельных металлов, обладающих большой коэрцитивной силой. Это позволяет значительно улучшить массогабаритные показатели вентильных двигателей и получить более высокий вращающий момент, в том же габарите статора двигателя. Для проектируемого вентильного двигателя выбирается магнит из сплава неодим-железо-бор (NdBFe), так как он показывает наилучшие показатели в передаче магнитной индукции и обладает хорошей магнитной проницаемостью.

В данной работе рассматривается работа спроектированного вентильного двигателя в среде MatLabSimulink. Данная среда позволяет смоделировать работу данного двигателя и посмотреть как бы он себя вёл в готовом виде.

В экономической части производится калькуляция себестоимости двигателя, рентабельность и определяется критическая программа выпуска.

В разделе социальной ответственности диссертации затрагиваются вопросы анализа опасных и вредных факторов, техники, безопасности, производственной санитарии, а также вопросы охраны окружающей среды.

Глава 1. Обзор вентильного двигателя

Более в обобщённом виде вентильным можно назвать любой электропривод, в котором регулирование режима работы электродвигателя производится с помощью управляемых вентильных преобразователей электрической энергии: выпрямителя, импульсного регулятора постоянного тока, преобразователя частоты. В более узком, общепринятом смысле вентильный электропривод (ВЭП) или вентильный двигатель (ВД) представляет собой электромеханотронную систему, в которой объединены синхронная электрическая машина, как правило, с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ), пример представлен на рисунке 1, электронный коммутатор (инвертор), посредством которого осуществляется питание обмоток якоря машины, и система автоматического управления инвертором, оснащенная необходимыми измерительными устройствами (датчиками). Традиционно управление ключами инвертора ВЭП осуществляется в функции положения ротора синхронного двигателя.

Благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам, СДПМ являются наиболее перспективными электрическими машинами в диапазоне малых и средних мощностей, особенно – для моментных систем электропривода. СДПМ конструктивно просты, надежны, имеют абсолютно жесткие механические характеристики и не требуют затрат энергии на возбуждение. Эти качества электрической машины обуславливают применение ВД в промышленных системах автоматизации, роботах и манипуляторах, приводах подач и главного движения металлорежущих станков, координатных устройствах, автоматических линиях по обработке различных материалов или сборке изделий, упаковочных и печатных машинах, принтерах и плоттерах, намоточных и лентопротяжных механизмах, прецизионных системах слежения и наведения, в авиационной и медицинской технике. ВД имеют свою "нишу" в тяговом электроприводе (электровоз ВЛ80ВР), приводах рулевого управления летательных и

подводных аппаратов, электромеханических устройствах автомобилей (электромеханические усилители руля, стартер-генераторные устройства гибридных автомобилей, стеклоподъемники и др.), мотор-колесах аккумуляторных индивидуальных транспортных средствах (электровелосипеды, инвалидные коляски различных разработок), в бытовых устройствах (стиральная машина "Орь-Автомат", проигрыватели компакт-дисков).

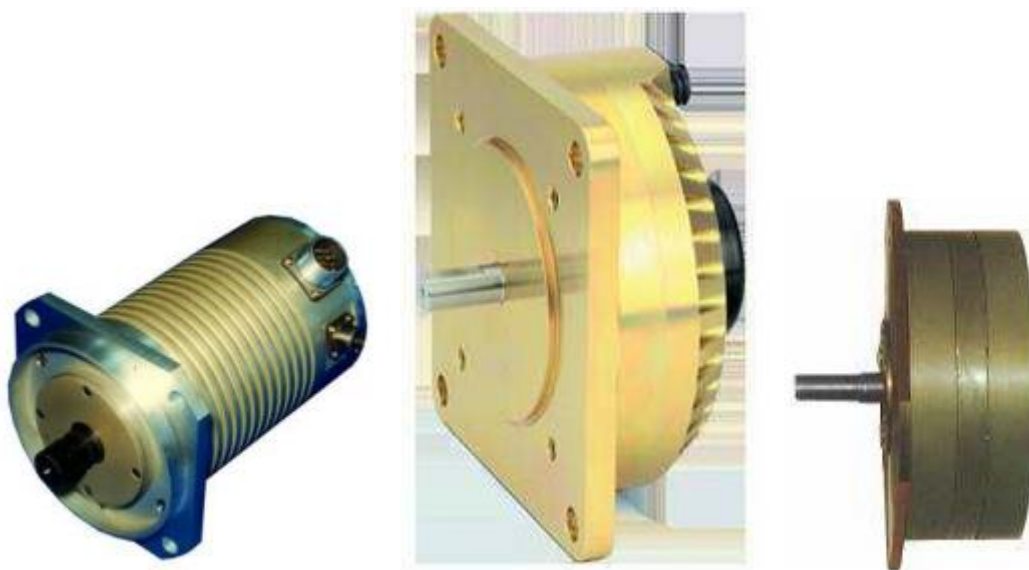


Рисунок 1 – Внешний вид вентильного двигателя

На рисунке 2 , представлена схема работы ВД.

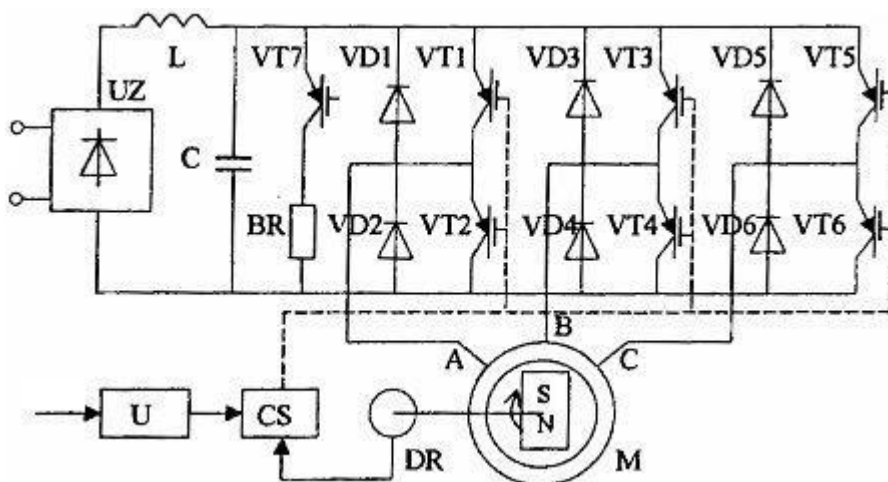


Рисунок 2 – схема работы ВД

Из схемы видно, что в статоре ток образуется в обмотках, а в роторе создается при помощи высокоэнергетических постоянных магнитов.

Условные обозначения: VT1-VT7 – транзисторные коммуникаторы; A, B, C – фазы обмоток; M – момент двигателя; DR – датчик положения ротора; U – регулятор напряжения питания двигателя; S (south), N (north) – направление магнита; UZ – частотный преобразователь; BR – датчик частоты вращения; VD – стабилитрон; L – катушка индуктивности.

Схема двигателя показывает, что одним из основных преимуществ ротора, в котором установлены постоянные магниты, является уменьшение его диаметра и, как следствие, сокращение момента инерции. Такие приспособления могут быть встроенными в сам прибор или расположенными на его поверхности. Понижение этого показателя очень часто приводит к небольшим значениям баланса момента инерции самого двигателя и приведенного к его валу нагрузки, который и усложняет работу привода. По этой причине производители могут предложить стандартный и повышенный в 2-4 раза момент инерции.

Преимущества

Применяя вентильный двигатель в работе, можно отметить такие его достоинства:

- возможность применения широкого диапазона для модифицирования частоты вращения;
- высокая динамика и быстроедействие;
- максимальная точность позиционирования; - небольшие затраты на техническое обслуживание;
- устройство можно отнести к взрывозащищенным объектам;
- имеет способность переносить большие перегрузки в момент вращения;
- высокий КПД, который составляет более 90%;

- имеются скользящие электронные контакты, которые существенно увеличивают рабочий ресурс и срок службы;
- при длительной работе нет перегрева электродвигателя.

Недостатки

Несмотря на огромное количество достоинств, вентильный двигатель также имеет и недостатки в эксплуатации:

- довольно сложное управление электродвигателем;
- относительно высокая цена устройства из-за применения в его конструкции ротора, который имеет дорогостоящие постоянные магниты

Именно благодаря этим преимуществам ВД занимают ведущие позиции в каталогах продукции ведущих зарубежных электротехнических фирм – Siemens AG, GeneralElectric, BoschRexroth AG, Ansaldo, Fanuc и др.

В Российской Федерации вентильные электроприводы и специализированные СДПМ производятся серийно с 1980-х гг. Примерами тому являются комплектный электропривод ЭПБ1 и двигатели серий ДБМ, ДВ (ЗАО "Машиноаппарат", г. Москва). В последние годы работы по созданию современных ВЭП вновь приобрели былую интенсивность. В частности, комплексом электротехнических предприятий, объединенным Чебоксарским электроаппаратным заводом (ОАО "ЧЭАЗ"), на базе электрических машин серий ДВФ и ДВМ спроектирована новая серия современных отечественных вентильных двигателей 5ДВМ, а также тяговый вентильный электродвигатель ВМЭД-01 мощностью 120 кВт для специальных транспортных средств (городской автотранспорт, электромобиль) и автомобилей. В электрических машинах новой серии применены термостабильные отечественные постоянные магниты из материала "неодим-железо-бор" со специальными легирующими добавками, которые способствуют повышению коэрцитивной силы и сохранению свойств магнитов при нагреве до +170°C и пятикратной кратковременной перегрузке двигателя по моменту и току якоря. Это обеспечивает снижение

расхода дорогостоящих магнитных материалов и улучшению массогабаритных показателей машины. Проектированием и изготовлением ВД также занимаются: ОАО "КБ ПА", г. Ковров; лаборатория спецмашин (ЛСМ) ЗАО "СЗЭМО", г. Санкт-Петербург (дисковые СДПМ); конструкторское бюро мехатроники, г. Златоуст Челябинской области; отдел электромеханических систем воспроизведения движений (ОЭСВД) и лаборатория электромеханики Новосибирского государственного технического университета, а также многие другие предприятия.

Виды вентильных двигателей

В зависимости от конструктивных особенностей различают два основных вида вентильных двигателей.

1. Бесконтактные (бесщеточные) двигатели постоянного тока (БДПТ), в англоязычной литературе называемые "brushless DC motors", в которых конструкция синхронной машины магнитоэлектрического возбуждения, т.е. геометрическое расположение витков обмотки якоря на статоре и постоянных магнитов на роторе, обуславливает фазные ЭДС вращения трапецеидальной формы.

2. Бесконтактные двигатели переменного тока – "permanent-magnetbrushless AC motors", фазные ЭДС вращения которых имеют синусоидальный характер. Именно такие системы чаще всего называют вентильными двигателями – ВД.

Бесконтактные двигатели постоянного тока

По принципу действия БДПТ представляет собой обращенную машину постоянного тока с магнитоэлектрическим индуктором на роторе и обмоткой якоря на статоре, функции щеточно-коллекторного узла в которой выполняет полупроводниковый коммутатор, питающий обмотку якоря и переключающийся в функции положения ротора. Наиболее часто используются БДПТ с трехфазной обмоткой на статоре. Статор трехфазного

БДПТ идентичен статору асинхронного двигателя, рисунок 3, и его обмотка, как правило, соединена в звезду. Возможные варианты конструкции ротора двигателя и расположения постоянных магнитов иллюстрируются рисунок 4.



Рисунок 3 – Статор БДПТ

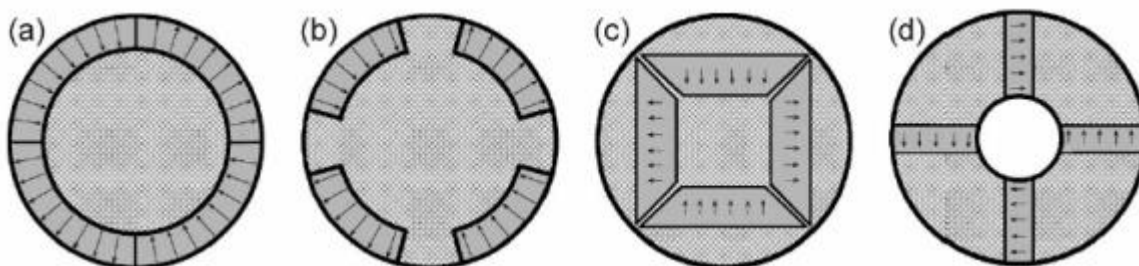


Рисунок 4 – Различные конструкции ротора БДПТ

Момент БДПТ образуется вследствие реакции двух магнитных потоков – статора и ротора. Магнитный поток статора всегда стремится так развернуть ротор с постоянными магнитами, чтобы поток последнего совпал с ним по направлению. Так же действует магнитное поле Земли на стрелку компаса. При этом с помощью датчика положения ротора электрический угол между двумя потоками в БДПТ всегда сохраняется в диапазоне $90 \pm 30^\circ$, что соответствует максимальному вращающему моменту. Для питания обмотки якоря БДПТ принципиально может применяться любой управляемый полупроводниковый преобразователь, реализующий жесткий

алгоритм 120 – градусной коммутации токов или напряжений трехфазной нагрузки.

Механические и электромеханические (скоростные) характеристики БДПТ полностью аналогичны характеристикам классической машины постоянного тока с независимым или магнитоэлектрическим возбуждением. Поэтому и системы автоматического управления скоростью БДПТ обычно строятся по классическому принципу подчиненного регулирования координат электропривода постоянного тока с контурами тока якоря и частоты вращения.

В качестве датчика собственных нужд, необходимого для реализации алгоритма переключения коммутатора БДПТ, могут использоваться согласованные с двигателем по числу пар полюсов индуктивные или емкостные дискретные датчики положения, а также системы на базе датчиков Холла и постоянных магнитов. Однако любой из вышеперечисленных видов датчиков существенно усложняет конструкцию электрической машины и снижает надежность электропривода в целом. Кроме того, существует широкий круг технологических механизмов, где в силу удаленности двигателя от коммутатора использование датчиков положения практически невозможно. В этой связи часто применяются так называемые "бездатчиковые" (sensorless) алгоритмы управления БДПТ, основанные на анализе поведения электромагнитных переменных СДПМ, которые могут быть измерены непосредственно на выходных клеммах полупроводникового преобразователя, и текущей частоты вращения (питания) двигателя.

Одним из проявлений общемировой тенденции развития производства высокотехнологичной электротехнической продукции являются определенные успехи в области создания нового поколения регулируемых электроприводов с использованием вентильных электродвигателей.

Выпуск таких электроприводов осваивают в настоящее время практически все ведущие электротехнические компании. Предложение на

рынке вентильных электродвигателей характеризуется широким мощностным диапазоном - от единиц ватт до сотен киловатт, которые могут использоваться в самых различных отраслях промышленности, в том числе и аэрокосмической.

Вентильный электропривод на базе СДПМ является универсальным средством электромеханического преобразования энергии и автоматизации технологических процессов. Принципы построения силовой части ВЭП уже устоялись и остаются неизменными в течение нескольких последних десятилетий, что не исключает их развитие в части улучшения электромагнитной совместимости электроприводов с питающей сетью. Главным направлением совершенствования ВЭП в ближайшей перспективе будет разработка и оптимизация адаптивных "бездатчиковых" алгоритмов управления, ориентированных на микропроцессорную реализацию и обеспечивающих диапазоны регулирования с постоянством момента 1:150...200.

Таким образом, вентильные двигатели занимают сегодня достойное место в каталогах ведущих зарубежных и отечественных производителей.

Глава 2. Математическое моделирование вентильного двигателя

Вентильный двигатель по своей конструкции представляет собой синхронный двигатель с постоянными магнитами на роторе и встроенным датчиком положения ротора. Индуктор находится на роторе, якорная обмотка на статоре.

Станина двигателя выполняется литой из алюминия, на поверхности которой для охлаждения имеются ребра. В станине имеются три отверстия под рым-болт, позволяющие устанавливать двигатель в горизонтальное или вертикальное положение при монтаже.

Статор представляет собой сердечник, набранный из листов электротехнической стали марки 2412. В пазы пакета статора уложена шаблонная обмотка, намотанная из провода ПЭТД-180. Класс изоляции обмотки статора H.

Ротор двигателя состоит из вала и напрессованной на него втулки. В пазы втулки вставлены и приклеены постоянные магниты, выполненные из сплава Nd-Fe-B неодим железо бор. Приклеенные к втулке магниты, бандажируются углеродной нитью. Вал имеет ступенчатую форму. На ротор напрессованы радиальные однорядные подшипники [1]. На одном конце вала установлена шпонка, в другой конец вала установлен постоянный магнит, являющийся часть датчика положения ротора.

Согласно[2], по следующей маркировке 1ExdIIВТ4, двигатель предназначен для внутренней и наружной установки, в потенциально взрывоопасных средах, кроме подземных выработок шахт и рудников и их наземных строений, опасных по рудничному газу или горючей пыли, температура поверхности двигателя при этом не должна превышать 135°C . При конструировании двигателя нужно учесть тип взрывозащиты, в данном случае тип взрывозащиты - взрывонепроницаемая оболочка, то есть двигатель должен иметь прочную оболочку, способную выдержать

внутренний взрыв без деформирования корпуса. Защита обеспечивается зазорами элементов корпуса, которые обеспечивают выход газов, образовавшихся во время вспышки во внешнюю атмосферу без подрыва окружающей взрывоопасной среды.

Электродвигатель имеет уровень взрывозащиты «взрывобезопасное электрооборудование» и предназначен для установки во взрывоопасных зонах класса по 2 ГОСТ Р 51330.9-99, ГОСТ Р 52350.10-2005 (во взрывоопасных зонах всех классов по классификации гл. 7.3 ПУЭ), в которых возможно образование паро- и газоздушных взрывоопасных смесей категорий ПВ группы Т4 по классификации ГОСТ Р 51330.11-99, ГОСТ Р 51330.5-99. Взрывонепроницаемость оболочки обеспечивается использованием щелевой взрывозащиты, которая исключает передачу возникшего внутри двигателя взрыва в окружающую среду.

Температура окружающей среды при которой возможна эксплуатация двигателя от минус 50°C до плюс 40°C . Режим работы электродвигателя – повторно кратковременный S3 (ПВ=40%), то есть периоды работы двигателя чередуются с периодами отключения. Степень защиты двигателя от внешних воздействий IP 68 по ГОСТ 14254-96. Маркировка по способу монтажа – IM 3011 ГОСТ 2479-79.

1. Алгоритм математического моделирования вентильного двигателя

Математическое моделирование и связанный с ним компьютерный эксперимент незаменимы в тех случаях, когда натурный эксперимент невозможен или затруднен по тем или иным причинам. Поэтому в данной диссертации проводится математическое моделирование вентильного двигателя. Математическая модель — это приближенное описание какого-либо электротехнического действия или объектов технического исполнения на языке математики. Основная цель моделирования —

исследовать эти объекты и предсказать результаты будущих наблюдений. Однако моделирование — это еще и метод познания возможностей объекта, дающий возможность управлять им и узнать как он себя поведёт при том или ином действии или наоборот. Математическое моделирование и связанный с ним компьютерный эксперимент незаменимы в тех случаях, когда натурный эксперимент невозможен или затруднен по тем или иным причинам. Для такого моделирования используют алгоритм работы исследуемого объекта.

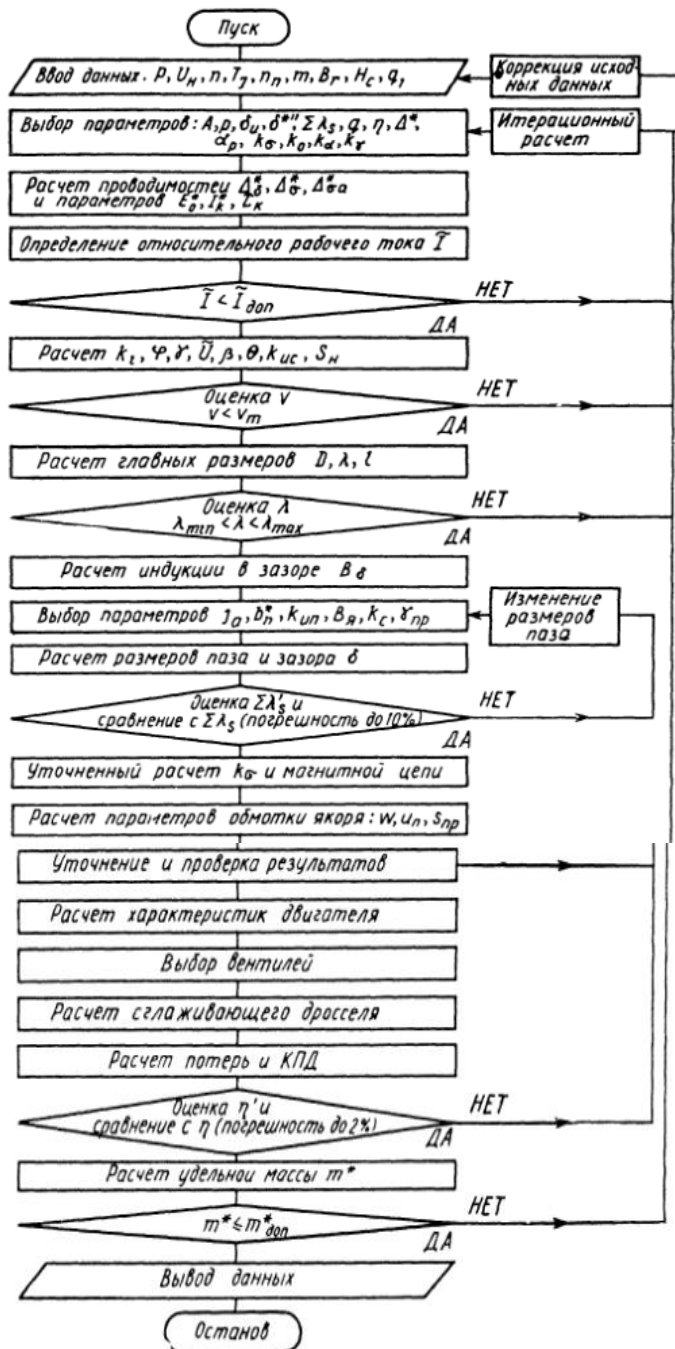


Рисунок 5 – Алгоритм математического моделирования вентильного двигателя

На рисунке 5 представлен алгоритм математического моделирования вентильного двигателя. Он позволяет на основании произведенных электромагнитного, экономического и магнитного расчетов произвести выбор наиболее энергоэффективного ВД, удовлетворяющего требованиям. Ограничивающими факторами расчета являются коэффициент заполнения паза и среднее превышение температуры обмотки статора. Представленный на рисунке 5 алгоритм математического моделирования ВД, позволяет реализовать различные варианты проектирования с изменением длин сердечника и обмоточных данных машины. Для реализации данного алгоритма для ВД с другими параметрами достаточно поменять исходные данные.

В качестве исходных параметров для электромагнитного расчета приняты следующие данные:

Мощность номинальная $P_H = 13 \text{ кВт}$;

Частота вращения $n_c = 3000 \text{ об / мин}$;

Число фаз $m = 3$;

Напряжение линейное $U_l = 380 \text{ В}$;

Перегрузочная способность $k_p = 3$;

Число пар полюсов $2p = 4$;

Частота сети $f_1 = 100 \text{ Гц}$.

В качестве выходных данных для алгоритма математического моделирования ВД приняты следующие величины:

I_H - ток, А

M_H - момент, Н*м

$\cos \phi_H$ - коэффициент мощности

η_H - коэффициент полезного действия

P_{2H} - полезная мощность

2. Электромагнитный расчёт вентильного двигателя

С помощью исходных данных производим электромагнитный расчёт по методике, изложенной в [1].

Выбор основных размеров

В качестве материала постоянных магнитов выбираем сплав НмБ 150/160 (ГОСТ Р 52956-2008), так как магниты изготовленные из неодим-железо-бора обладают большим значением энергетического произведения (до $(BH)_{\max} = 360 \text{ кДж} / \text{м}^3$), высоким значением остаточной индукции (до $B_r = 1,32 \text{ Тл}$) и коэрцитивной силы, высокой температурой Кюри (до 200°C).

Главное преимущество таких сплавов перед другими – это высокие магнитные свойства при существенно меньших размерах и весе, что ведёт за собой уменьшение габаритов и веса выпускаемого изделия.

Выбранный тип сплава имеет следующие параметры:

- остаточная индукция $B_r = 0,94 \text{ Тл}$;
- коэрцитивная сила $H_c = 680 \text{ кА} / \text{м}$;
- максимальное энергетическое произведение $(BH)_{\max} = 150 \text{ кДж} / \text{м}^3$.

Для статора используем лист с параметрами:

внутренний диаметр статора $D = 0,108 \text{ м}$;

наружный диаметр статора $D_a = 0,1915 \text{ м}$.

Параметры паза:

$$h_{ns} = 16,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad b_1 = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad b_2 = 8,42 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$h_{us} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad b_{us} = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Геометрия паза представлена на рисунке 6.

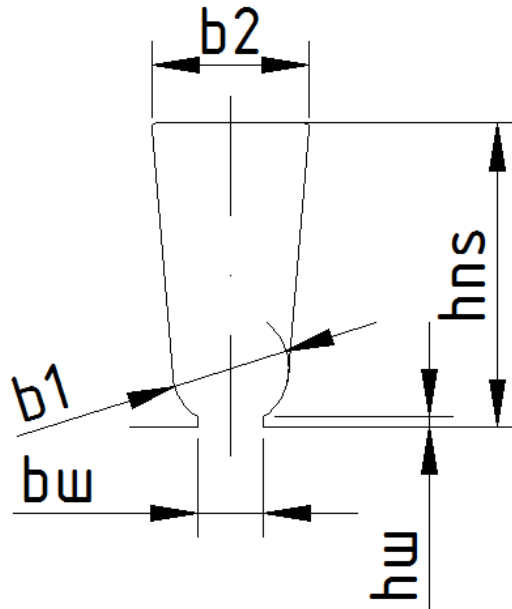


Рисунок 6 - Паз статора

Требуемый объем постоянных магнитов

$$V_M = 0,2 \cdot \frac{k_\phi \cdot k_{ad} \cdot (1 + \varepsilon)}{\xi \cdot f_1 \cdot Br \cdot Hc} \cdot P_{2H} \cdot k_p, \quad (2.1)$$

где k_ϕ - коэффициент формы поля магнита, предварительно принимаем

$$k_\phi = 0,9;$$

k_{ad} - коэффициент приведения продольной м.д.с. реакции якоря,

предварительно принимаем $k_{ad} = 0,8$;

ε - степень возбужденности двигателя, предварительно принимаем $\varepsilon = 0,8$;

ξ - коэффициент использования постоянных магнитов, предварительно

$$\xi = 0,55.$$

$$V_M = 0,2 \cdot \frac{0,9 \cdot 0,8 \cdot (1 + 0,8)}{0,55 \cdot 100 \cdot 0,94 \cdot 680 \cdot 10^3} \cdot 13 \cdot 10^3 \cdot 3 = 2,875 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Воздушный зазор

Зазор выбираем по [4], принимаем $\delta = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. В связи с тем, что магниты бандажируются углеродной нитью, электромагнитный зазор получается больше геометрического, поэтому необходимо учесть диаметр нити

$d_n = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, тогда электромагнитный воздушный зазор

$$\delta_{эм} = \delta + d_n; \quad (2.2)$$

$$\delta_{эм} = 0,5 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Диаметр магнита

$$D_M = D - 2 \cdot \delta_{эм}; \quad (2.3)$$

$$D_M = 0,108 - 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 0,106 \text{ м}.$$

Длина магнита

$$l_M = \lambda_M \cdot D_M, \quad (2.4)$$

где $\lambda_M = 1 \div 1,9$, принимаем $\lambda_M = 1,27$.

$$l_M = 1,27 \cdot 0,107 = 0,135 \text{ м}.$$

Длина пакета статора

$$l_S = \frac{l_M}{(1,02 \div 1,05)}; \quad (2.5)$$

$$l_S = \frac{0,135}{1,02} = 0,132 \text{ м}.$$

Размеры полюса магнита

Ширина полюса магнита

$$b_M = \frac{(0,94 \div 1,1) \cdot D_M}{p}, \quad (2.6)$$

$$b_M = \frac{1 \cdot 0,106}{2} = 0,053 \text{ м}.$$

Площадь поперечного сечения

$$S_M = l_M \cdot b_M; \quad (2.7)$$

$$S_M = 0,135 \cdot 0,053 = 7,14 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Объем одного полюса

$$V_{M1} = \frac{V_M^3}{4}; \quad (2.8)$$

$$V_{M1} = \frac{2,875 \cdot 10^{-4}}{4} = 7,19 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Средняя высота полюса магнита

$$h_M = \frac{V_{M1}}{S_M}; \quad (2.9)$$

$$h_M = \frac{7,19 \cdot 10^{-5}}{7,14 \cdot 10^{-3}} = 0,01 \text{ м}.$$

Принимаем $h_M = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$

Диаметр вала по [4]

$$d_B = 0,23 \cdot Da, \quad (2.10)$$

$$d_B = 0,23 \cdot 0,1915 = 0,044 \text{ м}.$$

Определение количества витков обмотки статора

Число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{Z_s}{2p \cdot m}; \quad (2.11)$$

$$q = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3.$$

По [4] в машинах переменного тока мощностью выше 15 кВт применяются двухслойные обмотки, поэтому для разрабатываемого двигателя принимаем однослойную шаблонную обмотку, соединенную в звезду.

Шаг обмотки

$$\tau_z = \frac{Z_s}{2p}; \quad (2.12)$$

$$\tau_z = \frac{36}{4} = 9;$$

$$y = \tau_z.$$

Обмоточный коэффициент по [6]

$$k_{OS} = k_y \cdot k_p \cdot k_c, \quad (2.13)$$

где k_y - коэффициент укорочения обмотки;

k_p - коэффициент распределения обмотки;

k_c - коэффициент скоса пазов.

Коэффициент укорочения обмотки

$$k_y = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta\right), \quad (2.14)$$

где β - относительный шаг обмотки.

$$\beta = \frac{y}{\tau_z}; \quad (2.15)$$

$$\beta = \frac{9}{9} = 1$$

$$k_y = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot 1\right) = 1$$

Коэффициент распределения обмотки

$$k_p = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2 \cdot q}\right)}, \quad (2.16)$$

где α - электрический угол между осями катушек.

$$\alpha = \frac{2 \cdot 180 \cdot p}{Z_s}; \quad (2.17)$$

$$\alpha = \frac{360 \cdot 2}{36} = 20$$

$$k_p = \frac{\sin\left(\frac{20}{2}\right)}{3 \cdot \sin\left(\frac{20}{2 \cdot 3}\right)} = 0,952$$

Коэффициент скоса пазов

$$k_{ck} = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\gamma_c}{2}\right)}{\gamma_c} ; \quad (2.18)$$

$$\gamma_c = \frac{b_c}{\tau} \cdot \pi , \quad (2.19)$$

где τ - полюсное деление;

b_c - величина скоса пазов.

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} ; \quad (2.20)$$

$$\tau = \frac{\pi \cdot 0,108}{4} = 0,085 \text{ м} ;$$

$$b_c = \frac{2 \cdot p \cdot \tau}{Z_s} ; \quad (2.21)$$

$$b_c = \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,085}{36} = 0,015 \text{ м} ;$$

$$\gamma_c = \frac{0,015}{0,085} \cdot \pi = 0,548 ;$$

$$k_c = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{0,548}{2}\right)}{0,548} = 0,988 ;$$

$$k_{os} = 1 \cdot 0,952 \cdot 0,988 = 0,94 .$$

Магнитный поток на полюс

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} \cdot B_{\delta 1} \cdot \tau \cdot li , \quad (2.22)$$

где $B_{\delta 1}$ - индукция в воздушном зазоре, предварительно принимаем

$$B_{\delta 1} = 0,86 \text{ Тл} ;$$

li - расчетная длина сердечника статора.

$$li = l_s + 2 \cdot \delta_{эм}; \quad (1.23)$$

$$li = 0,126 + 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,134 \text{ м};$$

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} \cdot 0,86 \cdot 0,085 \cdot 0,134 = 6,23 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

Число витков обмотки статора на фазу

$$w_s = \frac{k_e \cdot U_{нф}}{4,44 \cdot f_1 \cdot k_{ос} \cdot \Phi_1}, \quad (2.24)$$

где k_e - отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, выбираем по [4];

$U_{нф}$ - номинальное фазное напряжение.

$$U_{нф} = \frac{U_l}{\sqrt{3}}; \quad (2.25)$$

$$U_{нф} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В};$$

$$w_s = \frac{0,968 \cdot 220}{4,44 \cdot 100 \cdot 0,94 \cdot 6,23 \cdot 10^{-3}} = 82$$

Число проводников в пазу

$$u_{II} = \frac{w_s}{p \cdot q}; \quad (2.26)$$

$$u_{II} = \frac{w_s}{p \cdot q} = \frac{82}{2 \cdot 3} = 13,6$$

Принимаем $u_{II} = 14$, тогда окончательно число витков

$$w_s = u_{II} \cdot p \cdot q; \quad (2.27)$$

$$w_s = 14 \cdot 2 \cdot 3 = 84$$

Высота ярма статора

$$h_{as} = \frac{Da - D}{2} - h_{ns}; \quad (2.28)$$

$$h_{as} = \frac{0,1915 - 0,108}{2} - 16,1 \cdot 10^{-3} = 0,026 \text{ м} .$$

Зубцовый шаг статора

$$t_s = \frac{\pi \cdot D}{Z_s}; \quad (2.29)$$

$$t_s = \frac{\pi \cdot 0,108}{36} = 9,42 \cdot 10^{-3} \text{ м} .$$

Ширина зуба статора

$$b_z = \frac{b'_z + b''_z}{2}; \quad (2.30)$$

$$b'_z = \frac{\pi \cdot (D + b_1 + 2h_{III})}{Z_s} - b_1; \quad (2.31)$$

$$b'_z = \frac{\pi \cdot (0,108 + 6,2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3})}{36} - 6,2 \cdot 10^{-3} = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$b''_z = \frac{\pi \cdot (D + 2h_{II})}{Z_s} - b_2; \quad (2.32)$$

$$b''_z = \frac{\pi \cdot (0,108 + 2 \cdot 16,1 \cdot 10^{-3})}{36} - 8,42 \cdot 10^{-3} = 3,81 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$b_z = \frac{3,85 \cdot 10^{-3} + 3,81 \cdot 10^{-3}}{2} = 3,83 \cdot 10^{-3} \text{ м} .$$

Диаметр элементарного проводника

$$d_{эл.п} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{II} \cdot k_m}{u_{II} \cdot n_{эл} \cdot \pi}}, \quad (2.33)$$

где S_{II} -площадь паза;

k_m -коэффициент заполнения паза медью, $k_m = 0,35$;

$n_{эл}$ -число элементарных проводников, принимаем $n_{эл} = 3$.

$$S_{II} = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h_1 + \frac{\pi \cdot b_1^2}{8}; \quad (2.34)$$

$$S_{II} = \frac{6,2 \cdot 10^{-3} + 8,42 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 14 \cdot 10^{-3} + \frac{3,14 \cdot (6,2 \cdot 10^{-3})^2}{8} = 1,193 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$h_1 = h_{ИС} - \left(h_{III} + \frac{b_1 - b_{III}}{2} \right), \quad (2.35)$$

$$h_1 = 16,1 \cdot 10^{-3} - \left(0,5 \cdot 10^{-3} + \frac{6,2 \cdot 10^{-3} - 3,5 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$d_{эл} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,193 \cdot 10^{-4} \cdot 0,35}{14 \cdot 3 \cdot \pi}} = 1,12 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Принимаем провод ПЭТД 180 по [10], класс нагревостойкости изоляции Н, диаметр неизолированного провода $d_{неиз} = 1,18 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, диаметр изолированного провода $d_{из} = 1,257 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Размеры паза в свету с учетом припуска на сборку [4]

$$b'_1 = b_1 - \Delta b; \quad (2.36)$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b; \quad (2.37)$$

$$h'_{н.к.} = h_{н.к.} - \Delta h, \quad (2.38)$$

где Δb -припуск по ширине паза, $\Delta b = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

Δh -припуск по высоте паза $\Delta h = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

$$b'_1 = 6,2 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^{-3} = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$b'_2 = 8,42 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^{-3} = 8,32 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$h'_{н.к.} = 14 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 10^{-3} = 13,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу

$$S_{уз} = b_{уз} \cdot (2 \cdot h_{ИС} + b_1 + b_2), \quad (2.39)$$

где $b_{уз}$ - односторонняя толщина изоляции в пазу, $b_{уз} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ по [4].

$$S_{уз} = 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot 16,1 \cdot 10^{-3} + 6,2 \cdot 10^{-3} + 8,42 \cdot 10^{-3}) = 11,71 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки по [4]

$$S_{\Pi} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_{н.к.} - (S_{уз} + S_{ПП}), \quad (2.40)$$

где $S_{ПП}$ - площадь поперечного сечения прокладок, $S_{ПП} = 0$.

$$S_{\Pi} = \frac{6,1 \cdot 10^{-3} + 8,32 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 13,9 \cdot 10^{-3} - (11,71 \cdot 10^{-6} + 0) = 9,03 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2;$$

Коэффициент заполнения паза по [4]

$$k_3 = \frac{d_{уз}^2 \cdot u_{\Pi} \cdot n_{эл}}{S_{\Pi}}; \quad (2.41)$$

$$k_3 = \frac{(1,257 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 14 \cdot 3}{9,03 \cdot 10^{-5}} = 0,73$$

Расчет магнитной цепи

Магнитный поток в воздушном зазоре

$$\Phi_{\delta} = \frac{k_e \cdot U_{нф}}{4 \cdot k_{\epsilon} \cdot f_1 \cdot w_s \cdot k_{OS}}, \quad (2.42)$$

где k_{ϵ} - коэффициент зависящий от формы кривой поля. Выбирается по [5, с.108, рис.6-4], $k_{\epsilon} = 1,09$.

$$\Phi_{\delta} = \frac{1,09 \cdot 220}{4 \cdot 1,2 \cdot 100 \cdot 84 \cdot 0,94} = 6,14 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

Индукция в воздушном зазоре

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{\alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot li}, \quad (2.43)$$

где α_{δ} - расчетный коэффициент полюсного перекрытия, по [5] $\alpha_{\delta} = 0,71$.

$$B_{\delta} = \frac{6,14 \cdot 10^{-3}}{0,71 \cdot 0,085 \cdot 0,134} = 0,761 \text{ Тл}$$

Магнитное напряжение воздушного зазора на пару полюсов

$$F_{\delta} = 1,6 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \delta_{эм}, \quad (2.44)$$

где k_{δ} - коэффициент воздушного зазора.

$$k_{\delta} = \frac{5 + \frac{b_{III}}{\delta_{эм}}}{5 + \frac{b_{III}}{\delta_{эм}} \cdot \left(\frac{t_s - b_{III}}{t_s} \right)}; \quad (2.45)$$

$$k_{\delta} = \frac{5 + \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}}}{5 + \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{9,425 \cdot 10^{-3} - 3,5 \cdot 10^{-3}}{9,425 \cdot 10^{-3}} \right)} = 1,18;$$

$$F_{\delta} = 1,6 \cdot 10^6 \cdot 0,761 \cdot 1,18 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 1,44 \cdot 10^3 \text{ А}$$

Индукция в зубцах статора

$$B_{ZS} = B_{\delta} \frac{t_s}{b_z \cdot k_{CS}}, \quad (2.46)$$

где k_{CS} - коэффициент заполнения пакета статора сталью, принимаем

$$k_{CS} = 0,95 \text{ по [5].}$$

$$B_{ZS} = 0,761 \cdot \frac{9,42 \cdot 10^{-3}}{3,83 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95} = 1,97 \text{ Тл}$$

Так как $B_{ZS} > 1,8$ Тл, необходимо учесть ответвление потока в паз и найти действительную индукцию в зубце B_{Z1} .

Коэффициент k_{nx}

$$k_{nx} = \frac{b_{nx}}{b_z \cdot k_{CS}}; \quad (2.47)$$

$$b_{nx} = \frac{b_1 + b_2}{2}; \quad (2.48)$$

$$b_{nx} = \frac{6,2 \cdot 10^{-3} + 8,42 \cdot 10^{-3}}{2} = 7,31 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$k_{nx} = \frac{7,31 \cdot 10^{-3}}{3,83 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95} = 2,01;$$

$$B_{Z1} = B_{ZS} - \mu_o \cdot H_{Z1} \cdot k_{nx}, \quad (2.49)$$

принимаем $B_{Z1} = 1,95$, проверяем соотношение B_{Z1} и B_{ZS}

$$1,95 = 1,97 - 3 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 7200 \cdot 2,01$$

Магнитное напряжение зубцов статора

$$F_{ZS} = H_{ZS} \cdot 2 \cdot h_{IS}, \quad (2.50)$$

где H_{ZS} - напряженность магнитного поля в зубце, $H_{ZS} = 7200 \text{ А / м}$ по[4].

$$F_{ZS} = 7200 \cdot 2 \cdot 16,1 \cdot 10^{-3} = 231,84 \text{ A}$$

Коэффициент насыщения зубцов

$$k_z = \frac{F_\delta + F_{ZS}}{F_\delta} ; \quad (2.51)$$

$$k_z = \frac{1440 + 231,84}{1440} = 1,16$$

Индукция в ярме статора

$$B_{as} = \frac{\Phi_\delta}{2 \cdot h_{as} \cdot li \cdot k_{CS}} , \quad (2.52)$$

$$B_{as} = \frac{6,14 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,026 \cdot 0,134 \cdot 0,95} = 0,95 \text{ Тл}$$

Магнитное напряжение ярма статора

$$F_{as} = \xi_s \cdot H_{as} \cdot \frac{\pi \cdot (Da - h_{as})}{2p} , \quad (2.53)$$

где ξ_s - коэффициент учитывающий неравномерность распределения индукции в ярме, $\xi_s = 0,6$ по [5];

H_{as} - напряженность магнитного поля в ярме статора, $H_{as} = 105 \text{ A/м}$ по [4]

$$F_{as} = 0,6 \cdot 105 \cdot \frac{\pi \cdot (0,1915 - 0,026)}{4} = 7,93 \text{ A}$$

Индукция в ярме ротора

$$B_{ar} = \frac{\Phi_{\delta}}{2 \cdot h_{ar} \cdot l_r \cdot k_{cr}}, \quad (2.54)$$

где h_{ar} - высота ярма ротора, $h_{ar} = 22,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ по рисунку 2;

l_r - длина ротора, принимаем равной длине магнита $l_r = l_M = 0,135 \text{ м}$;

k_{cr} - коэффициент заполнения пакета ротора сталью, $k_{cr} = 1$.

$$B_{ar} = \frac{6,14 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 22,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,135 \cdot 1} = 1,01 \text{ Тл}$$

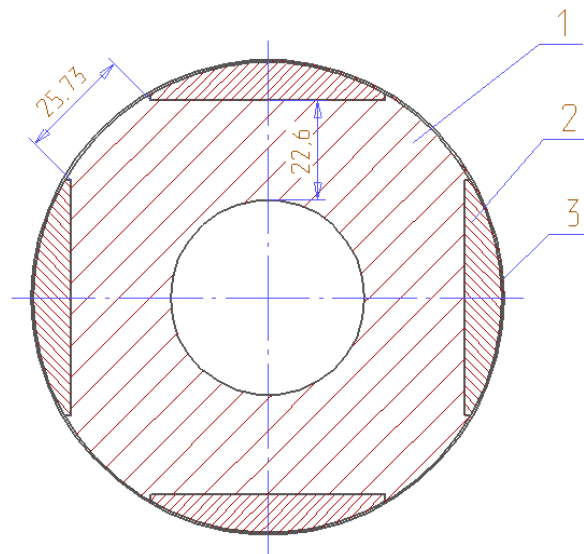


Рисунок 7 - Эскиз ротора

1-штулка; 2-магнит; 3- нить бандажная.

Магнитное напряжение ярма ротора

$$F_{ar} = \xi_r \cdot H_{ar} \cdot \frac{\pi \cdot (D_M - h_{ar})}{2p}, \quad (2.55)$$

где ξ_r - коэффициент учитывающий неравномерность распределения индукции в ярме, $\xi_s = 0,58$ по [5];

H_{ar} - напряженность магнитного поля в ярме ротора, $H_{as} = 938 \text{ А/м}$ по [4].

$$F_{ar} = 0,57 \cdot 938 \cdot \frac{\pi \cdot (0,107 - 19,19 \cdot 10^{-3})}{4} = 54,95 \text{ А}$$

Общий коэффициент насыщения

$$k_{\mu} = k_z + \frac{F_{as} + F_{ar}}{F_{\delta}} ; \quad (2.56)$$

$$k_{\mu} = 1,16 + \frac{7,93 + 54,95}{1440} = 1,21$$

Система базисных величин

Единица индукции

$$B_{\sigma} = Br = 0,94 \text{ Тл}$$

Единица напряженности магнитного поля

$$H_{\sigma} = Hc = 6,8 \cdot 10^5 \text{ А/м}$$

Единица м.д.с.

$$F_{\sigma} = Fc = Hc \cdot h_M ; \quad (2.57)$$

$$F_{\sigma} = 6,8 \cdot 10^5 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3} = 4220 \text{ А}$$

Единица магнитного потока

$$\Phi_{\sigma} = \Phi r = Br \cdot S_M ; \quad (2.58)$$

$$\Phi_{\sigma} = 0,94 \cdot 7,14 \cdot 10^{-3} = 6,71 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

Единица магнитной проводимости

$$G_{\delta} = \frac{1}{R_{\delta}} = \frac{\Phi r}{F c} ; \quad (2.59)$$

$$G_{\delta} = \frac{6,71 \cdot 10^{-3}}{4220} = 1,59 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$$

Единица Э.Д.С.

$$E_{\delta} = \frac{2\pi}{k_{\phi}} \cdot f_1 \cdot w_s \cdot k_{OS} \cdot \Phi r \quad (2.60)$$

где k_{ϕ} -коэффициент формы поля магнита.

$$k_{\phi} = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{\alpha_i}{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \alpha_i\right)} \quad (2.61)$$

где α_i -расчетный коэффициент полюсного перекрытия для поля магнита.

$$\alpha_i = \frac{b_M}{\tau} ; \quad (2.62)$$

$$\alpha_i = \frac{0,053}{0,085} = 0,623 ;$$

$$k_{\phi} = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{0,623}{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot 0,623\right)} = 0,927 ;$$

$$E_{\delta} = \frac{2\pi}{0,927} \cdot 100 \cdot 84 \cdot 0,94 \cdot 6,71 \cdot 10^{-3} = 358,93 \text{ В}$$

Расчет магнитных сопротивлений и проводимостей

Магнитная проводимость магнита на один полюс

$$G_{md} = \rho_{\epsilon} \frac{S_M}{h_M} , \quad (2.63)$$

где ρ_{ϵ} -коэффициент возврата по [2].

Для определения коэффициента возврата строим кривую размагничивания магнита в относительных единицах.

Кривая размагничивания магнита определяется уравнением

$$B = \frac{1 - H}{1 - aH}; \quad (2.64)$$

$$a = \frac{2\sqrt{\gamma} - 1}{\gamma}, \quad (2.65)$$

где γ - коэффициент формы кривой размагничивания [2].

$$\gamma = \frac{(BH)_{\max}}{Br \cdot Hc}; \quad (2.66)$$

$$\gamma = \frac{150000}{0,94 \cdot 680000} = 0,25;$$

$$a = \frac{2\sqrt{0,25} - 1}{0,25} = 2,5 \cdot 10^{-3}.$$

Таблица 1

Н	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
В	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0

Пример расчета для первого столбца

$$B = \frac{1 - 0}{1 - 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0} = 1.$$

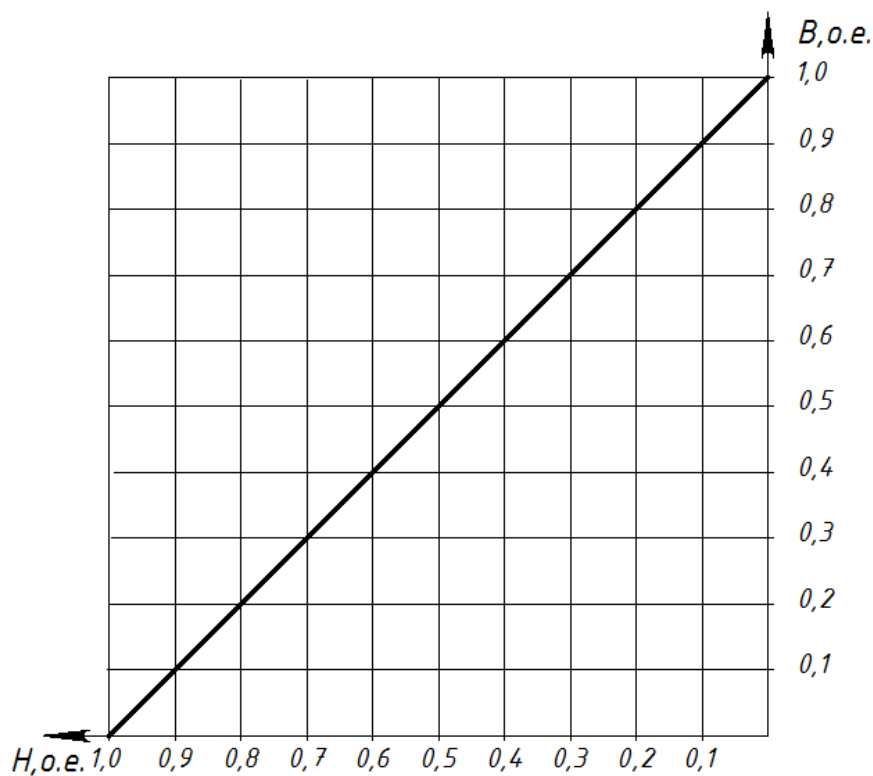


Рисунок 8 - Кривая размагничивания сплава НмБ 150/160 в относительных единицах

Из рисунка 8 определяем коэффициент возврата.

$$\Delta Bx = (0,8 - 0,6) \cdot Br ; \quad (2.67)$$

$$\Delta Bx = (0,8 - 0,6) \cdot 0,94 = 0,188 \text{ Тл} ;$$

$$\Delta Hx = (0,4 - 0,2) \cdot Hc ; \quad (2.68)$$

$$\Delta Hx = (0,4 - 0,2) \cdot 680 \cdot 10^3 = 1,36 \cdot 10^5 \text{ А/м} ;$$

$$\rho_s = \frac{\Delta Bx}{\Delta Hx} ; \quad (2.69)$$

$$\rho_s = \frac{0,188}{1,36 \cdot 10^5} = 1,382 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м} ;$$

$$G_{md} = 1,382 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{7,14 \cdot 10^{-3}}{6,2 \cdot 10^{-3}} = 1,59 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} .$$

Магнитная проводимость рассеяния магнита

$$G_{\sigma m} = k_{\lambda} \cdot k_{\sigma} \cdot G_{\sigma m}, \quad (2.70)$$

где k_{λ} -коэффициент учитывающий конечную проницаемость и неравномерное распределение удельной м.д.с. по высоте магнита, $k_{\lambda} = 0,5$ по [1];

k_{σ} -коэффициент, учитывающий различие между фактическим потоком рассеяния магнита и расчетным потоком, $k_{\sigma} = 1,9$ по [1];

$G_{\sigma m}$ -проводимость рассеяния фиктивного электромагнита.

$$G_{\sigma m} = 10^{-6} \cdot \left(5 \cdot I_M \cdot \frac{h_M}{a_p} + 1,6 \cdot h_M \cdot \phi_{\beta} \right), \quad (2.71)$$

где $a_p = 25,73 \cdot 10^{-3}$ м определяем из рисунка 2.

$$\phi_{\beta} = 1,8 \text{ для } \frac{b_M}{a_p} = \frac{0,053}{25,73 \cdot 10^{-3}} = 2,09;$$

$$G_{\sigma m} = 10^{-6} \cdot \left(5 \cdot 0,135 \cdot \frac{6,2 \cdot 10^{-3}}{25,73 \cdot 10^{-3}} + 1,6 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,8 \right) = 1,82 \cdot 10^{-7} \text{ Гн};$$

$$g_M = \sqrt{\frac{G_{\sigma m}}{G_{md}}}; \quad (2.72)$$

$$g_M = \sqrt{\frac{1,82 \cdot 10^{-7}}{1,59 \cdot 10^{-6}}} = 0,339;$$

$$G_{\sigma m} = 0,5 \cdot 1,95 \cdot 1,82 \cdot 10^{-7} = 1,73 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}.$$

Магнитное сопротивление воздушного зазора

$$R_{\delta} = \frac{0,8 \cdot \delta_{\Sigma} \cdot k_{\delta} \cdot k_{\mu}}{\alpha_i \cdot \tau \cdot li} \cdot 10^6, \quad (2.73)$$

$$R_{\delta} = \frac{0,8 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,18 \cdot 1,21}{0,623 \cdot 0,085 \cdot 0,134} \cdot 10^6 = 1,68 \cdot 10^5 \text{ Гн}^{-1}.$$

Магнитная проводимость путей потока рассеяния обмотки якоря

$$G_s = 7,9 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{l_s \cdot \sum \lambda_s \cdot k_\phi}{m \cdot q \cdot k_{OS}^2 \cdot k_{ad}}, \quad (2.74)$$

где $\sum \lambda_s$ - суммарная проводимость потока рассеяния статора;

k_{ad} - коэффициент приведения продольной м.д.с. реакции якоря.

$$k_{ad} = \frac{\pi \cdot \alpha_i + \sin(\pi \cdot \alpha_i)}{4 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \alpha_i\right)}; \quad (2.75)$$

$$k_{ad} = \frac{\pi \cdot 0,623 + \sin(\pi \cdot 0,623)}{4 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot 0,623\right)} = 0,868;$$

$$\sum \lambda_s = \lambda_{IS} + \lambda_{JS} + \lambda_{DS}, \quad (2.76)$$

где λ_{IS} - коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния, по [4];

λ_{JS} - коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния, по [4];

λ_{DS} - коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния,

по [4].

$$\lambda_{IS} = \frac{h_2}{3 \cdot b_1} + \left(0,785 - \frac{b_{III}}{2 \cdot b_1} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_{III}}{b_{III}}\right), \quad (2.77)$$

$$h_2 = h_1 - b_{уз}; \quad (2.78)$$

$$h_2 = 0,014 - 0,2 \cdot 10^{-3} = 13,8 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$\lambda_{IS} = \frac{13,8 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3}} + \left(0,785 - \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,014}{6,2 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{3,5 \cdot 10^{-3}}\right) = 3,69;$$

$$\lambda_{JS} = 0,34 \cdot \frac{q}{li} \cdot (l_n - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau), \quad (2.79)$$

где l_n - длина лобовой части по [4];

$$l_n = K_n \cdot b_{sm} + 2B, \quad (2.80)$$

где $K_l = 1,3$ - коэффициент, учитывающий наличие изоляции в лобовых частях, по [4];

$b_{км}$ - средняя ширина катушки, по [4];

B - длина вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части, в обмотках укладываемых до запрессовки сердечника в корпус $B = 0,01 м$.

$$b_{км} = \frac{\pi \cdot (D + h_{ИС})}{2p} ; \quad (2.81)$$

$$b_{км} = \frac{\pi \cdot (0,108 + 16,1 \cdot 10^{-3})}{4} = 0,097 м$$

$$l_n = 1,3 \cdot 0,097 + 2 \cdot 0,01 = 0,147 м ;$$

$$\lambda_{ИС} = 0,34 \cdot \frac{3}{0,134} \cdot (0,147 - 0,64 \cdot 1 \cdot 0,085) = 0,708 ;$$

$$\lambda_{ИС} = \frac{t_s}{12 \cdot \delta_{эм} \cdot k_\delta} \cdot \zeta , \quad (2.82)$$

где ζ - зависит от числа q , укорочения шага обмотки и размерных соотношений зубцовых зон и воздушного зазора, по [4].

$$\zeta = 2 + 0,022 \cdot q^2 - k_{ос}^2 \cdot (1 + \Delta z) , \quad (2.83)$$

где $\Delta z = 0,1$ по [4], при $\frac{b_{III}}{t_s} = 0,371$ и $\frac{b_{III}}{\delta_{эм}} = 3,5$.

$$\zeta = 2 + 0,022 \cdot 3^2 - 0,94^2 \cdot (1 + 0,1) = 1,227 ;$$

$$\lambda_{ИС} = \frac{9,425 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,18} \cdot 1,227 = 0,806 ;$$

$$\sum \lambda_s = 3,69 + 0,708 + 0,806 = 5,2 ;$$

$$G_s = 7,9 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,134 \cdot 5,2 \cdot 0,927}{3 \cdot 3 \cdot 0,94^2 \cdot 0,868} = 7,13 \cdot 10^{-7} Гн .$$

Расчет параметров обмотки статора

Активное сопротивление обмотки статора приведенное к 115° С

$$r_s = \frac{10^{-6}}{41} \cdot \frac{w_s \cdot l_{cp}}{S_{qs}}, \quad (2.84)$$

где l_{cp} -средняя длина витка обмотки статора;

S_{qs} -площадь поперечного сечения неизолированного проводника.

$$l_{cp} = 2 \cdot (li + l_n), \quad (2.85)$$

$$l_{cp} = 2 \cdot (0,134 + 0,147) = 0,56 \text{ м};$$

$$S_{qs} = \frac{d_{\text{неуз}}^2}{4} \cdot \pi \cdot n_{эл}; \quad (2.86)$$

$$S_{qs} = \frac{(1,18 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot \pi \cdot 3 = 3,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$r_s = \frac{10^{-6}}{41} \cdot \frac{84 \cdot 0,56}{3,28 \cdot 10^{-6}} = 0,351 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

$$x_s = 0,158 \cdot f_1 \cdot w_s^2 \cdot \frac{li}{p \cdot q} \cdot \sum \lambda_s \cdot 10^{-6}; \quad (2.87)$$

$$x_s = 0,158 \cdot 100 \cdot 84^2 \cdot \frac{0,134}{2 \cdot 3} \cdot 5,2 \cdot 10^{-6} = 0,013 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси

$$x_{ad} = k_{np} \cdot \frac{1}{R_s + \frac{1}{G_{\sigma m} + G_{md}}}, \quad (2.88)$$

где k_{np} -коэффициент приведения.

$$k_{np} = 2 \cdot \frac{m}{p} \cdot f_1 \cdot (w_s \cdot k_{os})^2 \cdot \frac{k_{ad}}{k_\phi}; \quad (2.89)$$

$$k_{np} = 2 \cdot \frac{3}{2} \cdot 100 \cdot (84 \cdot 0,94)^2 \cdot \frac{0,868}{0,927} = 1,78 \cdot 10^6;$$

$$x_{ad} = 1,78 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{1,68 \cdot 10^5 + \frac{1}{1,73 \cdot 10^{-7} + 1,59 \cdot 10^{-6}}} = 2,42 \text{ Ом}$$

Полное индуктивное сопротивление обмотки якоря по поперечной оси d

$$x_d = x_{ad} + x_s; \quad (2.90)$$

$$x_d = 2,42 + 0,013 = 2,42 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление реакции якоря по поперечной оси

$$x_{aq} = k_{np} \cdot \frac{k_{aq}}{k_{ad}} \cdot \frac{1}{R_\delta}, \quad (2.91)$$

где k_{aq} - коэффициент приведенной поперечной м.д.с. реакции якоря.

$$k_{aq} = \frac{\pi \cdot \alpha_i - \sin(\pi \cdot \alpha_i)}{4 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \alpha_i\right)}; \quad (2.92)$$

$$k_{aq} = \frac{\pi \cdot 0,623 - \sin(\pi \cdot 0,623)}{4 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot 0,623\right)} = 0,312;$$

$$x_{aq} = 1,78 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,312}{0,868} \cdot \frac{1}{1,68 \cdot 10^5} = 3,8 \text{ Ом}$$

Полное индуктивное сопротивление обмотки по оси q

$$x_q = x_{aq} + x_s; \quad (2.93)$$

$$x_q = 3,8 + 0,013 = 3,8 \text{ Ом}$$

Определение точки отхода прямой возврата. Электродвижущая сила холостого хода

Рабочую характеристику магнита строим в относительных единицах. Для этого вначале строим кривую размагничивания сплава НмБ 150/160.

$$\operatorname{tg}(\alpha_0) = \frac{G_{\text{см}} + G_{\delta}}{G_{\delta}} ; \quad (2.94)$$

$$\operatorname{tg}(\alpha_0) = \frac{1,73 \cdot 10^{-7} + (1/1,68 \cdot 10^5)}{1,59 \cdot 10^{-6}} = 3,84$$

Электродвижущая сила холостого хода

$$E_o = \frac{E_{\delta}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E'_f}{1 + G_{\text{см}} \cdot R_{\delta}} , \quad (2.95)$$

где E'_f - ордината точки пересечения прямой возврата с характеристикой холостого хода, $E'_f = 0,785$ определяем по рисунку 9.

$$E_o = \frac{358,93}{\sqrt{2}} \cdot \frac{0,785}{1 + 1,73 \cdot 10^{-7} \cdot 1,68 \cdot 10^5} = 193,7 \text{ В}$$

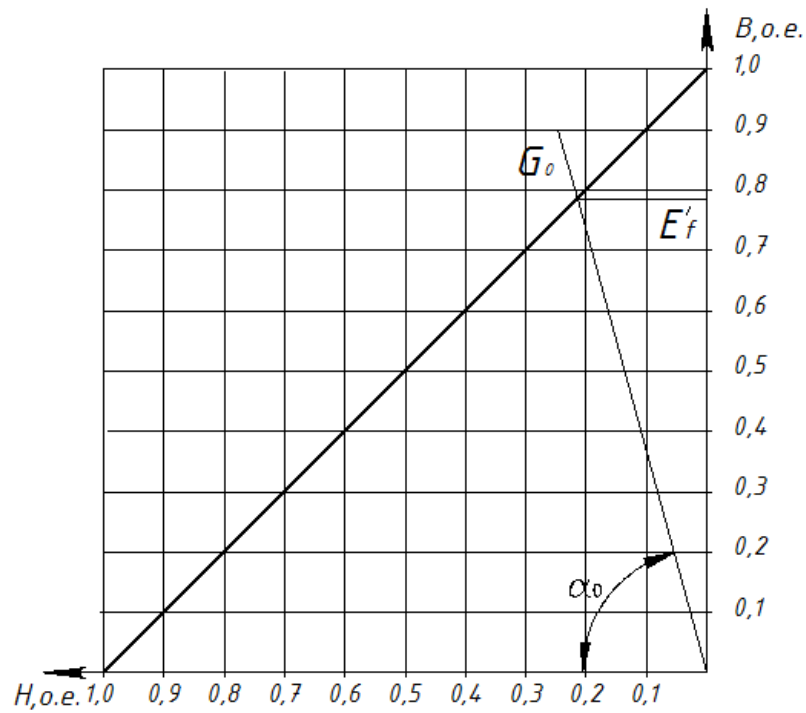


Рисунок 9 - К определению точки отхода прямой возврата

Степень возбужденности двигателя

$$\varepsilon = \frac{E_o}{U_{нф}} ; \tag{2.96}$$

$$\varepsilon = \frac{193,7}{220} = 0,88$$

Расчет рабочих характеристик

Ток обмотки статора

Пример расчета для $\Theta_u = 23,4^\circ$.

$$I = \frac{U_{нф}}{x_d} \cdot \left[\left(1 + \varepsilon^2 - 2 \cdot \varepsilon \cdot \cos(\Theta_u) \right) - \left(1 - \zeta_d^2 \right) \cdot \sin(\Theta_u)^2 \right]^{1/2} , \tag{2.97}$$

где Θ_u - угол между напряжением и электродвижущей силой холостого хода.

$$\zeta_d = \frac{x_d}{x_q}; \quad (2.98)$$

$$\zeta_d = \frac{2,42}{3,8} = 0,637;$$

$$I = \frac{220}{2,42} \cdot \left[(1 + 0,88^2 - 2 \cdot 0,88 \cdot \cos(23,4)) - (1 - 0,637^2) \cdot \sin(23,4)^2 \right]^{1/2} = 23,19 A$$

Потребляемая мощность

$$P_1 = m \cdot \frac{U_{\text{нф}}^2}{x_q} \cdot \frac{1}{\zeta_d + \rho_s^2} \cdot \left[\varepsilon \cdot \sin(\Theta_u) + \rho_s \cdot (1 - \varepsilon \cdot \cos(\Theta_u)) - \frac{1}{2} \cdot (1 - \zeta_d) \cdot \sin(2 \cdot \Theta_u) \right]; \quad (2.99)$$

$$\rho_s = \frac{r_s}{x_q}; \quad (2.100)$$

$$\rho_s = \frac{0,351}{3,8} = 0,09;$$

$$P_1 = 3 \cdot \frac{220^2}{3,8} \cdot \frac{1}{0,637 + 0,09^2} \cdot \left[0,88 \cdot \sin(23,43) + 0,09 \cdot (1 - 0,88 \cdot \cos(23,43)) - \frac{1}{2} \cdot (1 - 0,637) \cdot \sin(2 \cdot 23,43) \right] = 13870 \text{ Вт}$$

Потери в стали

$$P_{cm} = \rho \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (k_{\text{oa}} \cdot B_{\text{as}}^2 \cdot m_a + k_{\text{oz}} \cdot B_{\text{zs}}^2 \cdot m_z), \quad (2.101)$$

где ρ - удельные потери, $\rho = 1,3 \text{ Вт} / \text{кг}$ по [4];

$k_{\text{oa}}, k_{\text{oz}}$ - коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали

неравномерности распределения потока по сечениям участков

магнитопровода и технологических факторов, принимаем $k_{\text{oa}} = 1,6, k_{\text{oz}} = 1,8$

по [4];

m_a - масса стали ярма;

m_z - масса стали зубцов;

β -показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемангничивания, принимаем $\beta = 1,3$ по [4].

$$m_z = h_{ПС} \cdot b_z \cdot Z_s \cdot li \cdot k_c \cdot \gamma_c, \quad (2.102)$$

где γ_c -удельная масса стали, $\gamma_c = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3$ по [4].

$$m_z = 16,1 \cdot 10^{-3} \cdot 3,83 \cdot 10^{-3} \cdot 36 \cdot 0,134 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 2,21 \text{ кг};$$

$$m_a = \pi(Da - h_{ас}) \cdot h_{ас} \cdot li \cdot k_c \cdot \gamma_c; \quad (2.103)$$

$$m_a = \pi(0,1915 - 0,026) \cdot 0,026 \cdot 134 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 13,28 \text{ кг};$$

$$P_{см} = 1,3 \cdot \left(\frac{100}{50}\right)^{1,3} \cdot (1,6 \cdot 0,88^2 \cdot 13,045 + 1,8 \cdot 1,887^2 \cdot 2,169) = 110,37 \text{ Вт}$$

Потери электрические

$$P_{эл} = m \cdot I^2 \cdot r_s; \quad (2.104)$$

$$P_{эл} = 3 \cdot 23,19^2 \cdot 0,351 = 565,56 \text{ Вт}$$

Добавочные потери по [4]

$$P_{доб} = 0,005 \cdot P_1; \quad (2.105)$$

$$P_{доб} = 0,005 \cdot 13870 = 69,35 \text{ Вт}$$

Потери механические по [4]

$$P_{мех} = K_T \cdot \left(\frac{n_c}{10}\right)^2 \cdot Da^4, \quad (2.106)$$

где K_T -коэффициент трения.

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - Da); \quad (2.107)$$

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - 0,1915) = 1,051;$$

$$P_{\text{мех}} = 1,051 \cdot \left(\frac{3000}{10} \right)^2 \cdot 0,1915^4 = 127,22 \text{ Вт}$$

Полезная мощность на валу

$$P_2 = P_1 - (P_{\text{ст}} + P_{\text{эл}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}); \quad (2.108)$$

$$P_2 = 13870 - (110,37 + 565,56 + 127,22 + 69,35) = 13000 \text{ Вт};$$

КПД

$$\eta = 1 - \frac{(P_{\text{ст}} + P_{\text{эл}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}})}{P_1}; \quad (2.109)$$

$$\eta = 1 - \frac{870}{13870} = 0,937$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{m \cdot U_{\text{ном.ф}} \cdot I}; \quad (2.110)$$

$$\cos \varphi = \frac{13870}{3 \cdot 220 \cdot 23,19} = 0,906$$

Вращающий момент

$$M_c = \frac{P_2}{\omega_c}, \quad (2.111)$$

$$\text{где } \omega_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 100}{2} = 314,159$$

$$M_c = \frac{13000}{314,159} = 41,38 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Зависимость момента от угла нагрузки представлена на рисунке 10.

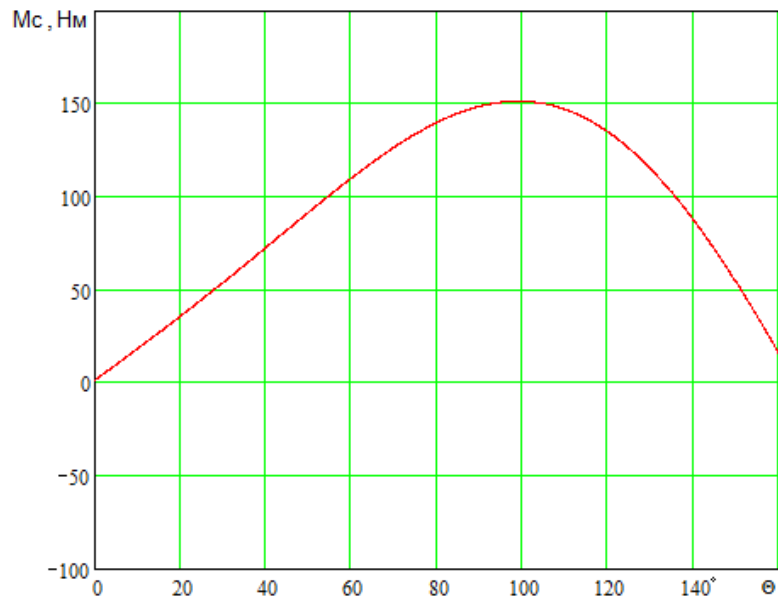


Рисунок 10 – Угловая характеристика

Результаты расчета рабочих характеристик приведены в таблице 2.

Таблица 2

$\Theta_u, ^\circ$	0	5	10	15	20	23,43	30	35	40
$P_1, Вт$	651	3330	6070	8890	11810	13870	17970	21220	24580
$I, А$	10,86	11,68	13,8	16,83	20,45	23,19	28,87	33,54	38,48
$\sum P$	365	397,28	468,24	580,21	736,81	870	1200	1530	1920
$P_2, Вт$	0	2940	5610	8310	11070	13000	16760	19690	22660
η	0	0,88	0,922	0,934	0,937	0,937	0,932	0,928	0,921
$\cos \phi$	0,09	0,433	0,667	0,8	0,875	0,906	0,943	0,958	0,968
$M_c, Н \cdot м$	0	9,35	17,85	26,46	35,24	41,38	53,36	62,69	72,14

где $\sum P = P_{ст} + P_{эл} + P_{мех} + P_{доб}$.

Номинальный режим работы двигателя характеризуется следующими данными

$$P_{2H} = 13000 \text{ Вт}; I_H = 23,19 \text{ А}; M_H = 41,38 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\eta_H = 0,937; \cos \phi_H = 0,906; P_{1H} = 13870 \text{ Вт}.$$

Рабочие характеристики представлены на рисунке 11.

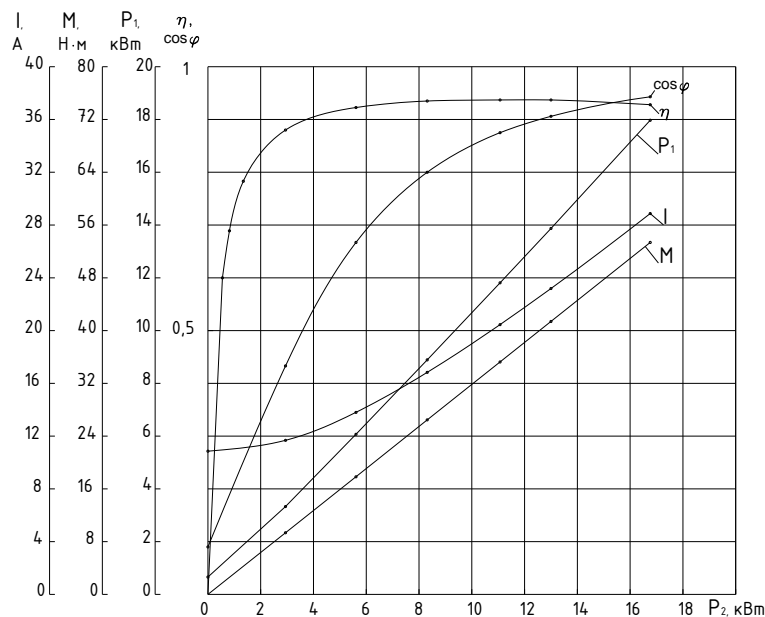


Рисунок 11 - Рабочие характеристики спроектированного двигателя

Таким образом, выполненное математическое моделирование ВД охватывает основные разделы электромагнитного расчёта, такие как выбор основных параметров, магнитов, ротора, статора и расчёт магнитной цепи. На базе рабочих характеристик можно сделать вывод, что при $P_{2H} = 13000 \text{ Вт}$ значение $\cos \phi_H$ и КПД η_H получились соответственно 0,906 и 0,937. Характеристики показывают, что рассчитанные параметры данного двигателя удовлетворяют всем условиям и являются наиболее эффективными для работы ВД. Данное математическое моделирование рекомендуется использовать для любых ВД, но особенно для применяемых в промышленных системах автоматизации, роботах и манипуляторах, приводах подачи, главного движения металлорежущих станков, координатных устройствах и т.д.

Глава 3. Моделирование магнита вентильного двигателя

В данном разделе производится моделирование постоянного магнита для рассчитанного вентильного двигателя в программе ELCUT. С помощью программы производится сравнение производимого магнита на предприятии и его же проектов ELCUT. На основании проделанной работы, строится модель в программе для спроектированного вентильного двигателя мощностью 13 кВт. В сравнении с аналогом, в проектируемом двигателе изменена конфигурация применяемых постоянных магнитов, увеличена их длина и ширина. Так же заложена электротехническая сталь марки 2412 с меньшими удельными потерями. Данные мероприятия позволили получить коэффициент полезного действия двигателя 93%. Увеличение к.п.д. вызвано снижением магнитных потерь в сердечнике статора, за счет снижения индукции в ярме, зубцах и воздушном зазоре, вследствие увеличения длины статора.

В связи с тем, что магниты поступают на завод от поставщиков и для того чтобы предотвратить запуск производства двигателей, с не соответствующими требованиям конструкторской и нормативно-технической документации магнитами, производится их входной контроль. При контроле производится проверка конструкции и размеров, проверка внешнего вида и проверка магнитных параметров магнитов, в частности проверка величины индукции магнитного поля. Так как величина индукции магнитного поля изменяется по ширине, длине и зависит от геометрии магнита, то для проверки магнита необходимо знать распределение магнитного поля и значение индукции магнита в каждой его точке. Так же есть необходимость проверки распределения магнитного поля изготовленных роторов и роторов двигателей поступивших на ремонт, так как одни могут быть повреждены во время технологических операций, а другие могут выйти из строя во время эксплуатации. В связи с этим в данной части дипломного проекта рассмотрена методика входного контроля магнитов, роторов в сборе, для

чего построены картины магнитных полей магнитов, ротора в сборе, определены основные зоны замеров магнитной индукции, а так же определено значение индукции в этих зонах.

Построение модели магнита, ротора и дальнейшее определение индукции произведено с помощью специального программного продукта ELCUT 5.1, предназначенного для моделирования различных физических полей в двумерных плоскостях. Моделирование осуществляется с помощью метода конечных элементов, при котором объект разбивается на много дискретных элементов простой формы, поле в которых изменяется линейно.

Для подтверждения верности методики определения параметров магнитов, измерены параметры магнита, взятого из выпускаемого двигателя и произведено сравнение этих данных, с данными из ELCUT. Магнит из выпускаемого двигателя представлен на рисунке 12, сплав магнита НМБ 250/160 ГОСТ Р 52956-2008.

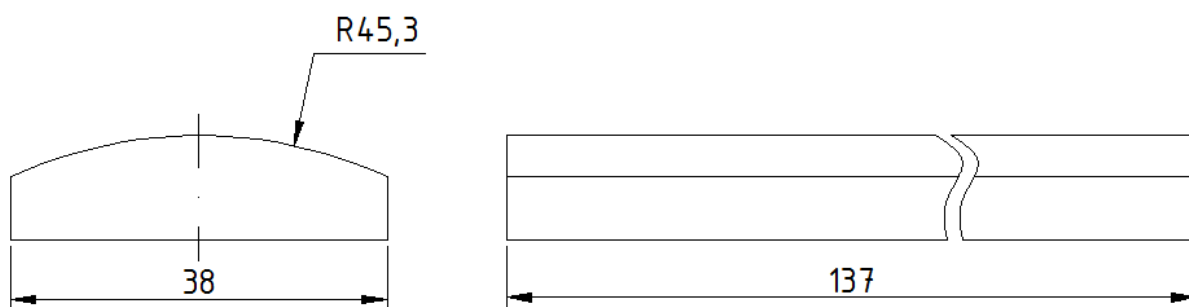


Рисунок 12 - Эскиз магнита выпускаемого двигателя

Данные экспериментальных измерений представлены в таблице 1, точки измерений на рисунке 13. Измерения произведены с помощью тесламетра ЭМ4305.



Рисунок 13 - Точки измерений индукции на магните

Таблица 3 – Данные экспериментальных измерений

Место измерения	Индукция, Тл
1-2	0,30
1-3	0,23
1-4	0,30

Затем произведено моделирование данного магнита в ELCUT, картина магнитного поля с торца магнита представлена на рисунке 14, в сечении магнита на рисунке 15. При создании модели магнита учтена его кривая размагничивания.

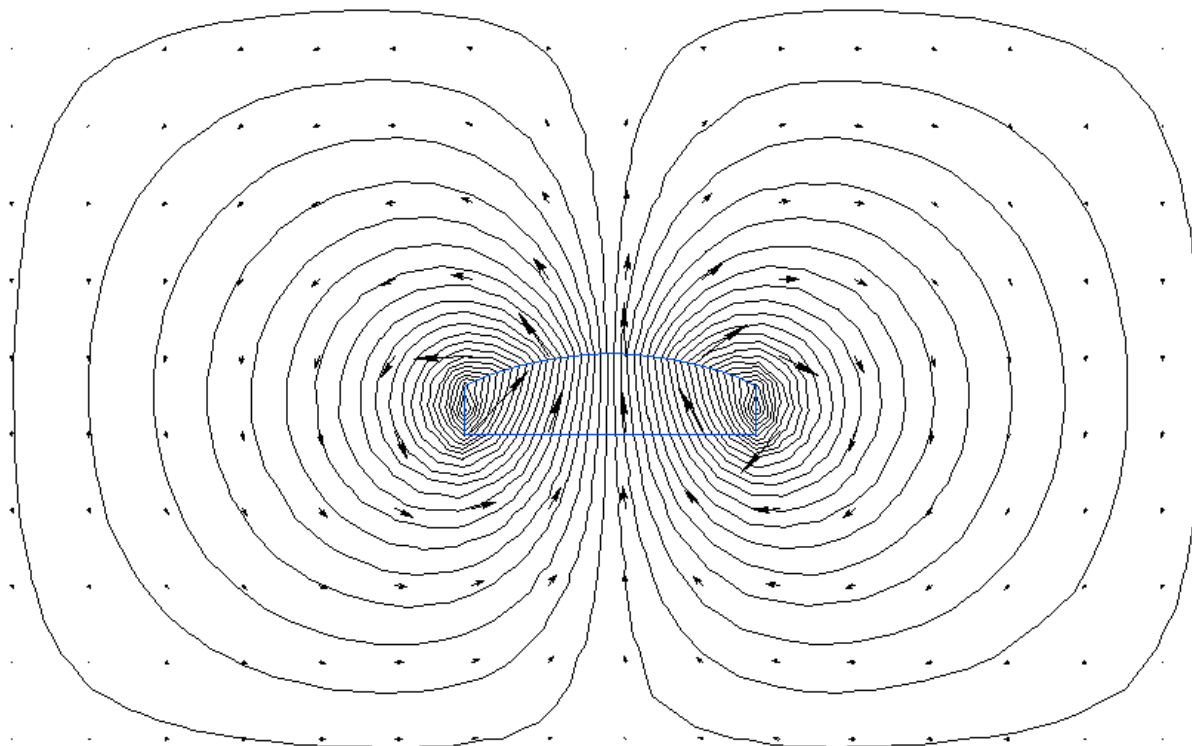


Рисунок 14 – Картина магнитного поля с торца магнита

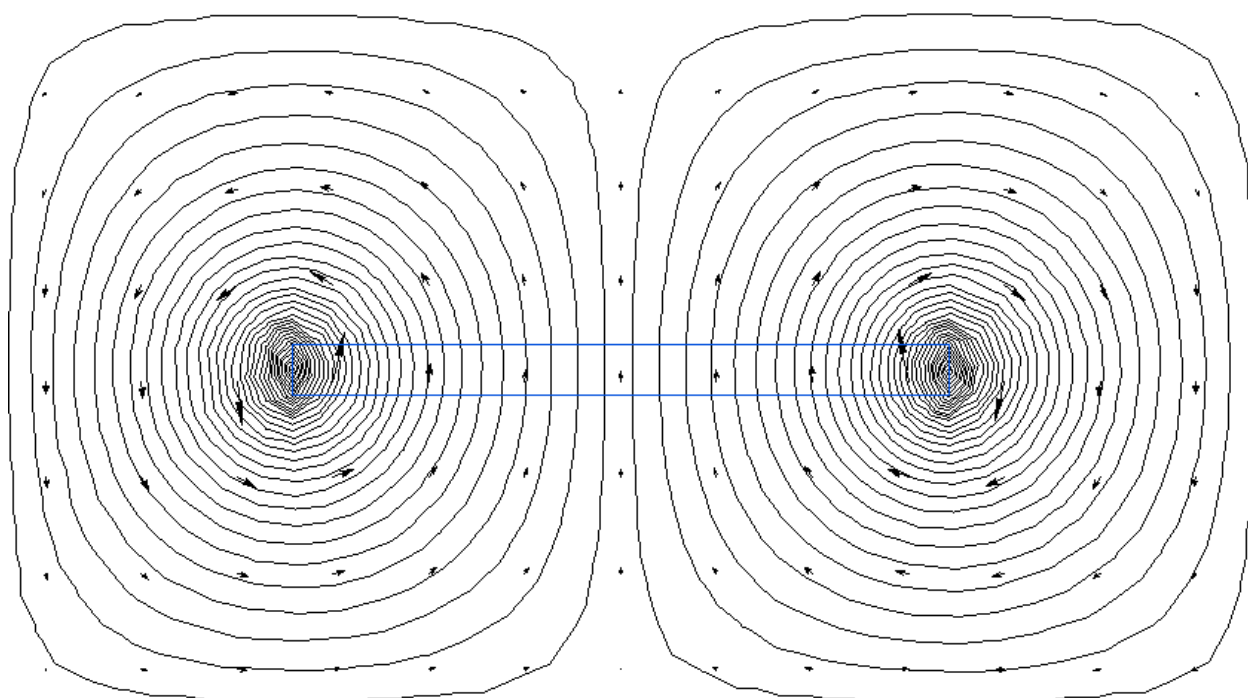


Рисунок 15 – Магнитное поле в продольном сечении магнита

На картине магнитного поля линиями показаны линии магнитной индукции, а так же векторы магнитной индукции. Индукция полученная при построения модели, в точках указанных на рисунке 13, составила:

точка 1 - $B_1 = 0,224$ Тл;

точка 2 - $B_2 = 0,192$ Тл;

точка 3 - $B_3 = 0,035$ Тл;

точка 4 - $B_4 = 0,192$ Тл.

Для сравнения с экспериментальными значениями необходимо произвести сложение индукций по точкам, то есть значение индукции в точке 1 складываем со значениями в точках 2,3,4 и результаты сводим в таблицу 4.

Пример для точки 1-2:

$$B_{1-2} = \sqrt{B_1 + B_2} ; \quad (3.1)$$

$$B_{1-2} = \sqrt{0,224^2 + 0,192^2} = 0,295$$

Таблица 4 – Результаты сложений индукций по точкам

Точка измерения	Индукция, Тл
1-2	0,295
1-3	0,228
1-4	0,295

Как видно из таблицы 4, полученные данные отличаются от экспериментальных не более 1,7%, отсюда можно сделать вывод о том, что параметры модели совпадают с параметрами реального магнита и теперь можно с точностью смоделировать магнитное поле магнита, полученного в электромагнитном расчете.

Производим моделирование магнита разрабатываемого двигателя, исходные данные для моделирования магнита получены в электромагнитном расчете, эскиз магнита представлен на рисунке 16.

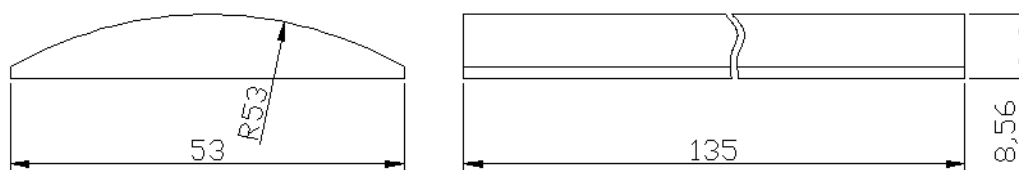


Рисунок 16 –Эскиз магнита спроектированного двигателя

Картина магнитного поля полученная с торца магнита представлена на рисунке 17, сечения магнита, на рисунке 18.

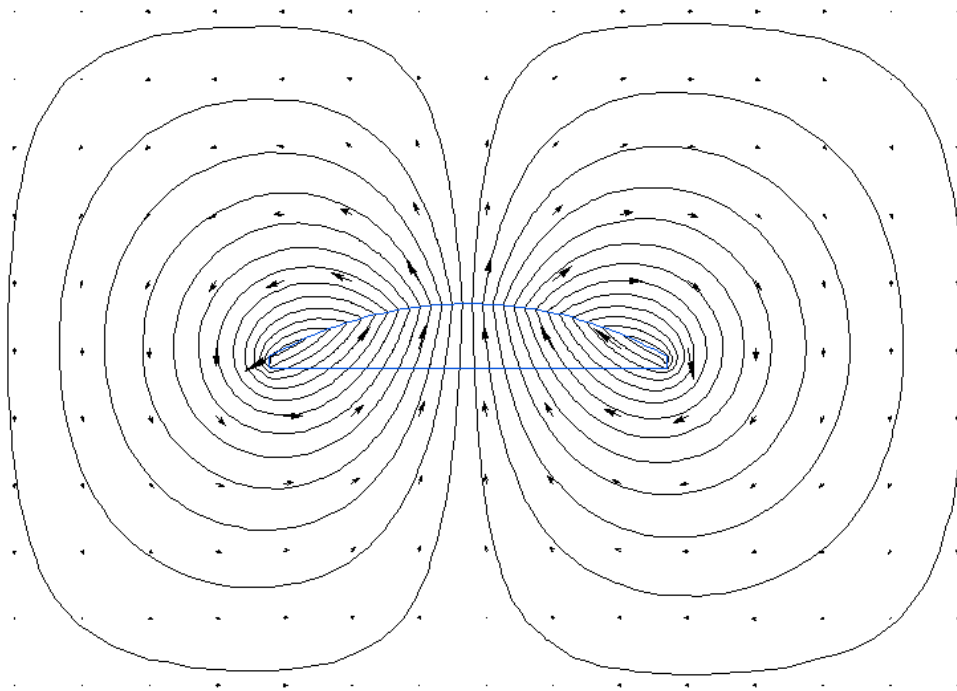


Рисунок 17 - Картина магнитного поля с торца магнита

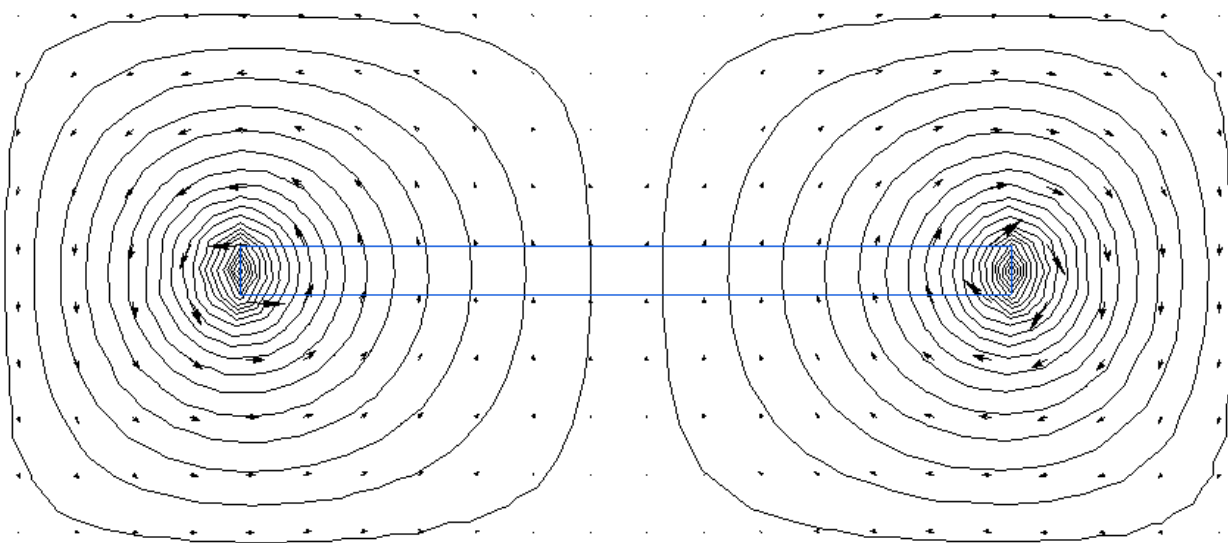


Рисунок 18– Магнитное поле в продольном сечении магнита

Измерения индукции производим в тех же местах, что и при моделировании предыдущего магнита, индукция составила:

точка 1 - $B_1 = 0,141$ Тл;

точка 2 - $B_2 = 0,162$ Тл;

точка 3 - $B_3 = 0,016$ Тл;

точка 4 - $B_4 = 0,162$ Тл.

Складываем полученные результаты по формуле (3.1) и сводим в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты сложения индукций

Точка измерения	Индукция, Тл
1-2	0,215
1-3	0,142
1-4	0,215

Далее производим моделирование ротора в сборе. На рисунке 19 и 20 представлены результаты построений магнитных полей, а так же точки измерений. Результаты сведены в таблицу 5. Измерения индукции производим в тех же местах магнита, что и в предыдущем случае.

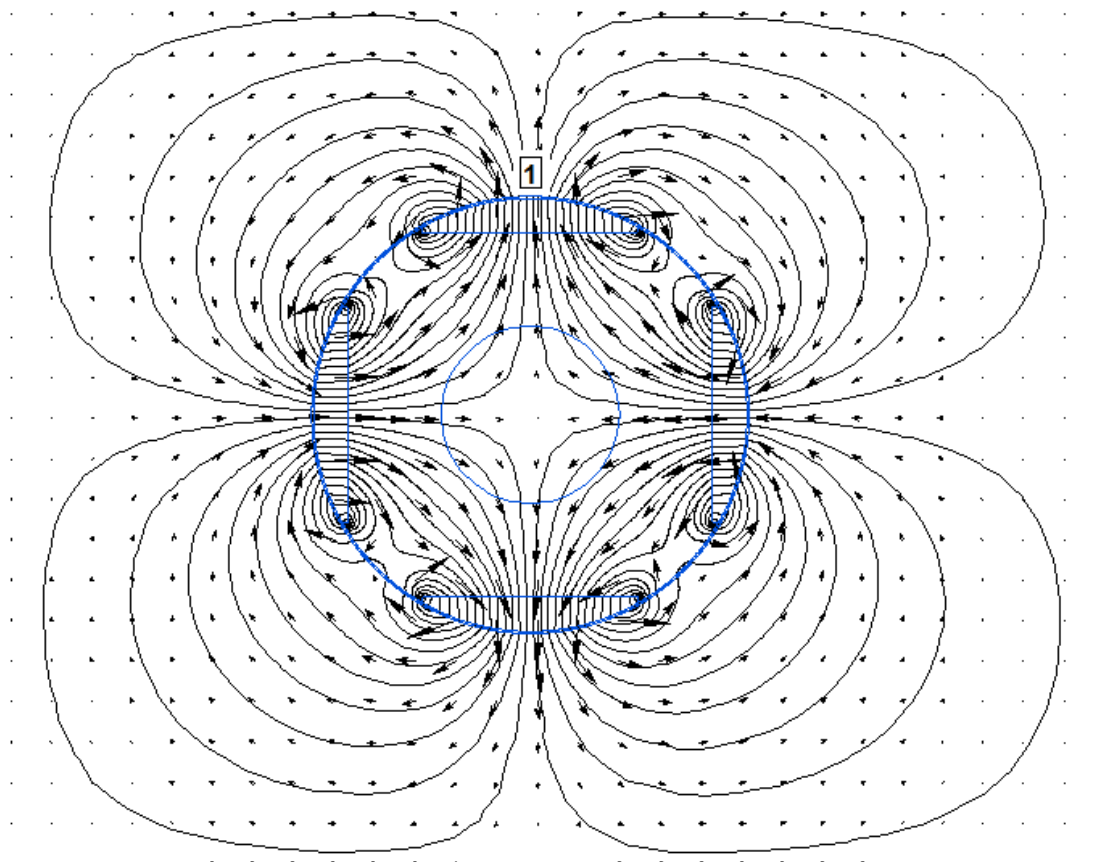


Рисунок 19 – Картина магнитного поля сечения ротора в сборе

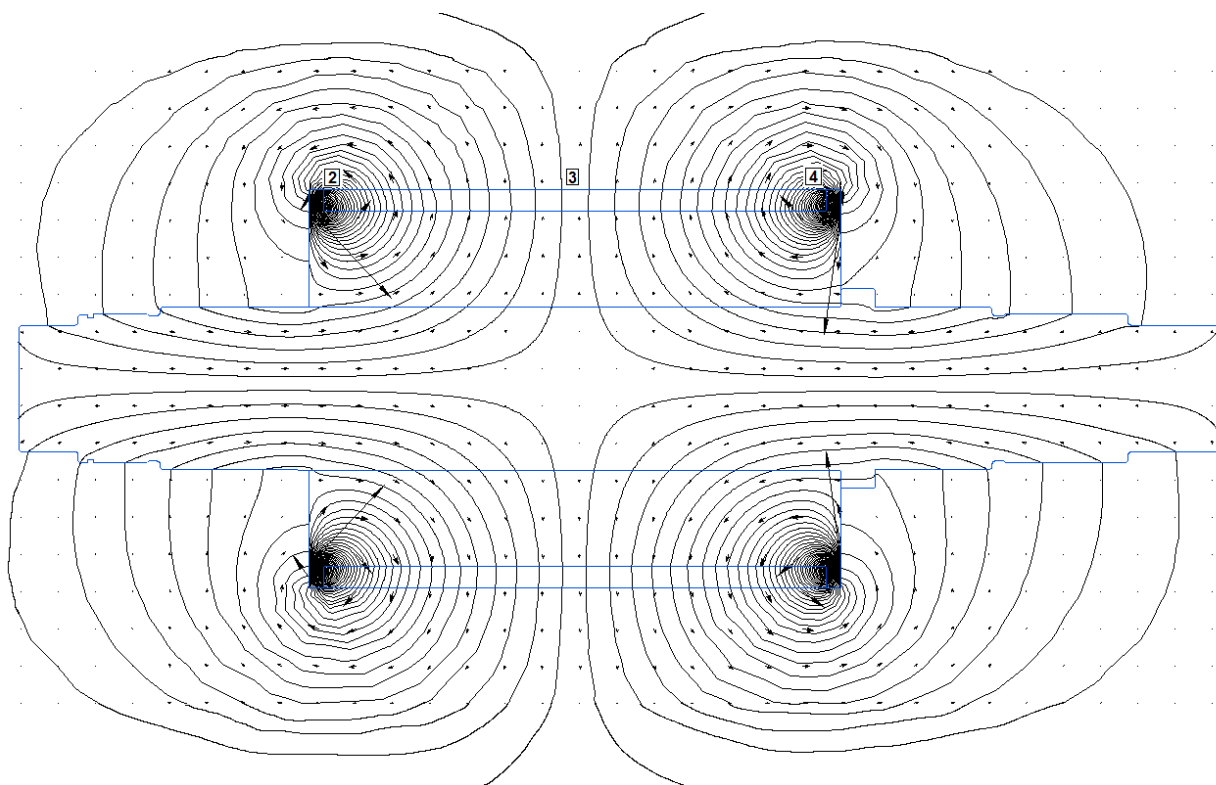


Рисунок 20 – Картина магнитного поля в продольном сечении ротора

Индукции в точках с 1 по 4 составила:

точка 1 – 0,215 Тл;

точка 2 – 0,352 Тл;

точка 3 – 0,027 Тл;

точка 4 – 0,352 Тл.

Складываем точки по формуле (1), результаты сводим в таблицу 6.

Таблица 6 – Результаты сложения индукций

Точка измерения	Индукция, Тл
1-2	0,412
1-3	0,217
1-4	0,412

Так как ротор симметричен, аналогичные результаты получаются при измерении других магнитов.

При создании моделей в программе задавались следующие параметры:

- магнитная проницаемость воздуха в относительных единицах $\mu = 1$, в абсолютных $\mu = 1,257 \text{ Гн/м}$;
- магнитная проницаемость магнита в о.е. $\mu = 1,1$, в абсолютных $\mu = 1,382 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$;
- коэрцитивная сила спроектированного магнита $H_c = 680000 \text{ А/м}$;
- кривая намагничивания втулки изготовленной из стали марки Ст3.

Получившиеся значения индукции в ходе моделирования магнитов и ротора в сборе, можно использовать при проверке готовых образцов. Это подтверждается выполненным сравнением экспериментальных данных, снятых с реального магнита и данными полученными в ходе моделирования этого магнита в программе Elcut 5.1. Магниты состава «неодим-железо-бор» вполне способны создавать индукцию в зазоре порядка 0,8 Тл, то есть на уровне асинхронных машин, причем основные электромагнитные потери в таком роторе отсутствуют. Линейная нагрузка на ротор может быть повышена без повышения общих потерь. Этим и обуславливается более высокая электромеханическая эффективность вентильных двигателей по сравнению с другими бесколлекторными машинами, например с асинхронными двигателями.

Глава 4. Имитационное моделирование вентильного двигателя в среде MatLabSimulink

В современном мире обойтись без моделирования практически невозможно в любой сфере. Имитационное моделирование может заменить реальные события, необходимые для получения конкретных результатов, создание и анализ которых стоят слишком дорого. Или же может быть случай, когда проводить реальные эксперименты запрещено. Также имитационное моделирование используется, когда просто невозможно построить аналитическую модель из-за ряда случайных факторов, последствий и причинных связей. Последний случай, когда используется этот метод, - это тогда, когда необходимо имитировать поведение какой-либо системы на протяжении данного отрезка времени. Для всего этого создаются симуляторы, которые пытаются максимально воспроизвести качества первоначальной системы.

MatLab— пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений и одноимённый язык программирования, используемый в этом пакете. Пакет используют более миллиона инженерных и научных работников, он работает на большинстве современных операционных систем.

Simulink – это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов, строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы. Интерактивная среда Simulink, позволяет использовать уже готовые библиотеки блоков для моделирования электросиловых, механических и гидравлических систем, а также применять развитый модельно-ориентированный подход при разработке систем управления, средств цифровой связи и устройств реального времени.

Дополнительные пакеты расширения Simulink позволяют решать весь спектр задач от разработки концепции модели до тестирования, проверки, генерации кода и аппаратной реализации. Simulink интегрирован в среду

MATLAB, что позволят использовать встроенные математические алгоритмы, мощные средства обработки данных и научную графику. На рисунке 21 представлена имитационная модель работы ВД в среде MatLab.

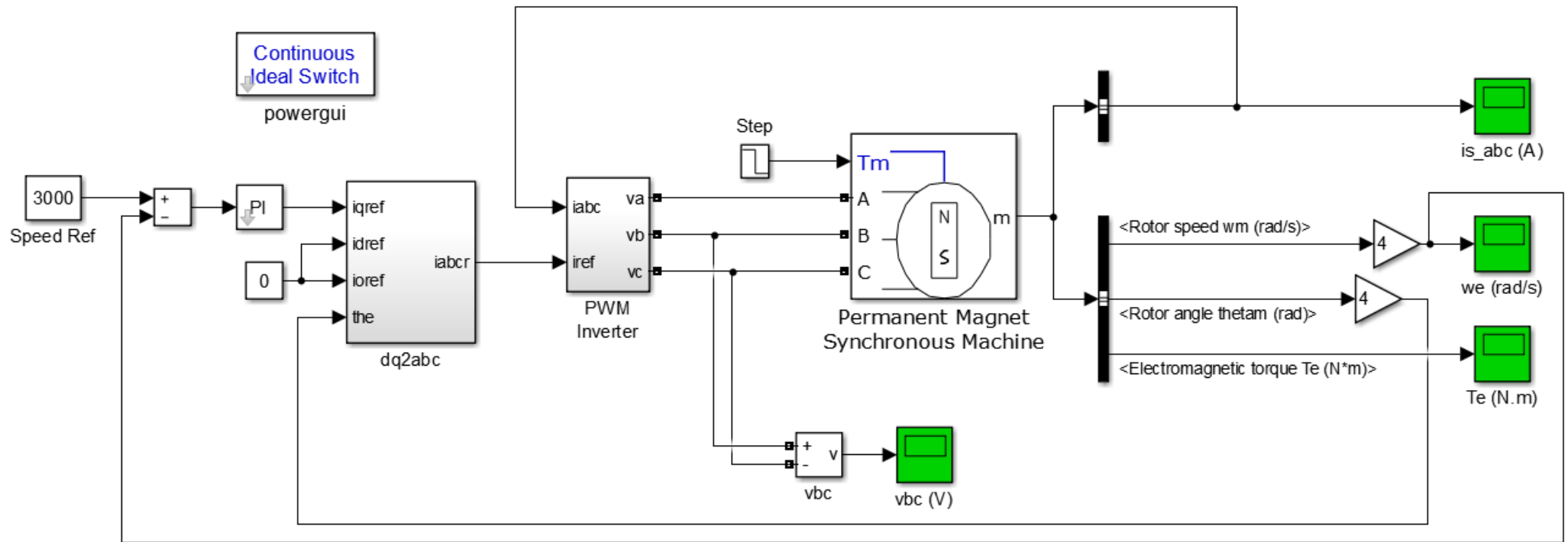


Рисунок 21 – Имитационная модель вентильного двигателя

В данной схеме показана работа вентильного двигателя с замкнутым контуром и регулятором тока на двигателе мощностью 13 кВт, 3000 об/мин. Он питается инвертором PWM. Преобразователь PWM полностью построен со стандартными блоками MatLabSimulink®. Его выход проходит через блоки источника контролируемого напряжения, прежде чем применяется к обмоткам статора блока ВД. Управление ключами инвертора вентильного электродвигателя традиционно выполняется в функции положения его ротора. Высокие эксплуатационные характеристики, достигаемые таким образом, делают ВД весьма перспективным в диапазоне малых и средних мощностей. Переключение коммутатора ВД происходит в зависимости от текущего положения ротора. Датчик положения ротора позволяет сохранить угол между потоками постоянным на уровне $90 \pm 30^\circ$, в таком положении вращающий момент оказывается максимальным. Полупроводниковый коммутатор для питания обмоток статора ВД – это управляемый полупроводниковый преобразователь с жестким алгоритмом 120° коммутации напряжений или токов трех рабочих фаз.

Используются две петли управления в данной модели. Внутренний контур регулирует токи статора двигателя. Внешняя петля управляет скоростью двигателя.

Вентильный двигатель рассматриваемого типа выполнен на базе трехфазной синхронной машины с постоянными магнитами на роторе. Трехфазные обмотки статора питаются постоянным током, подаваемым поочередно в две последовательно соединенные фазные обмотки. Переключение обмоток производится транзисторным коммутатором, выполненным по трехфазной мостовой схеме. Транзисторные ключи открываются и закрываются в зависимости от положения ротора двигателя. Схема вентильного двигателя представлена на рисунке 22.

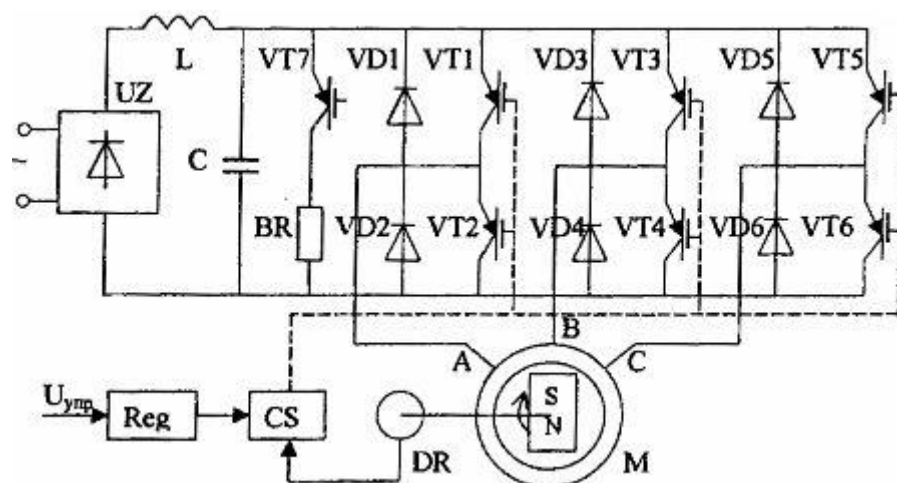


Рисунок 22 – Схема вентильного двигателя с транзисторным коммутатором

Здесь инвертор с амплитудно-импульсной модуляцией выхода выполнен на IGBT-транзисторах, причем амплитуда регулируется благодаря широтно-импульсной модуляции на промежуточном звене постоянного тока.

Вообще для данной цели используются: тиристорные преобразователи частоты с автономным инвертором напряжения или тока с управлением по питанию и транзисторные преобразователи частоты с автономным инвертором напряжения с управлением в режиме ШИМ или с релейным регулированием тока на выходе.

Однако инерция двигателя в данной модели предотвращает появление шума в форме волны двигателя. Это можно видеть из графиков характеристик скорости и момента, которые представлены на рисунке 23 и 24 соответственно.

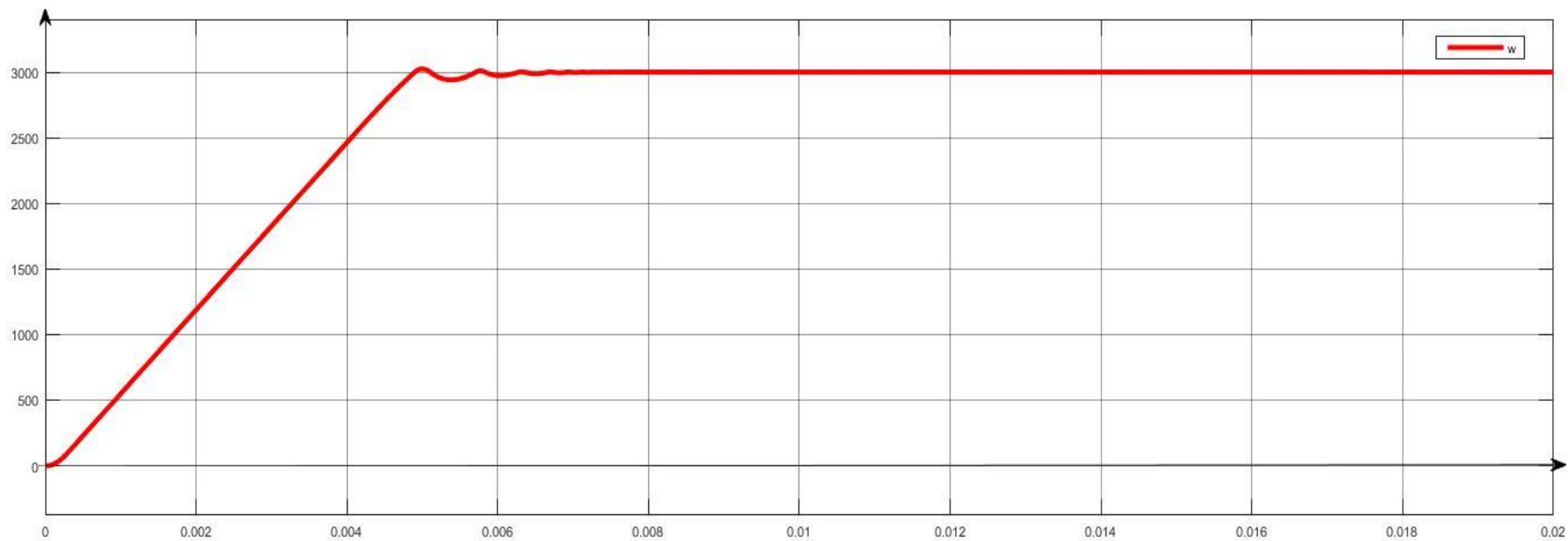


Рисунок 23 – График скорости работы, спроектированного ВД.

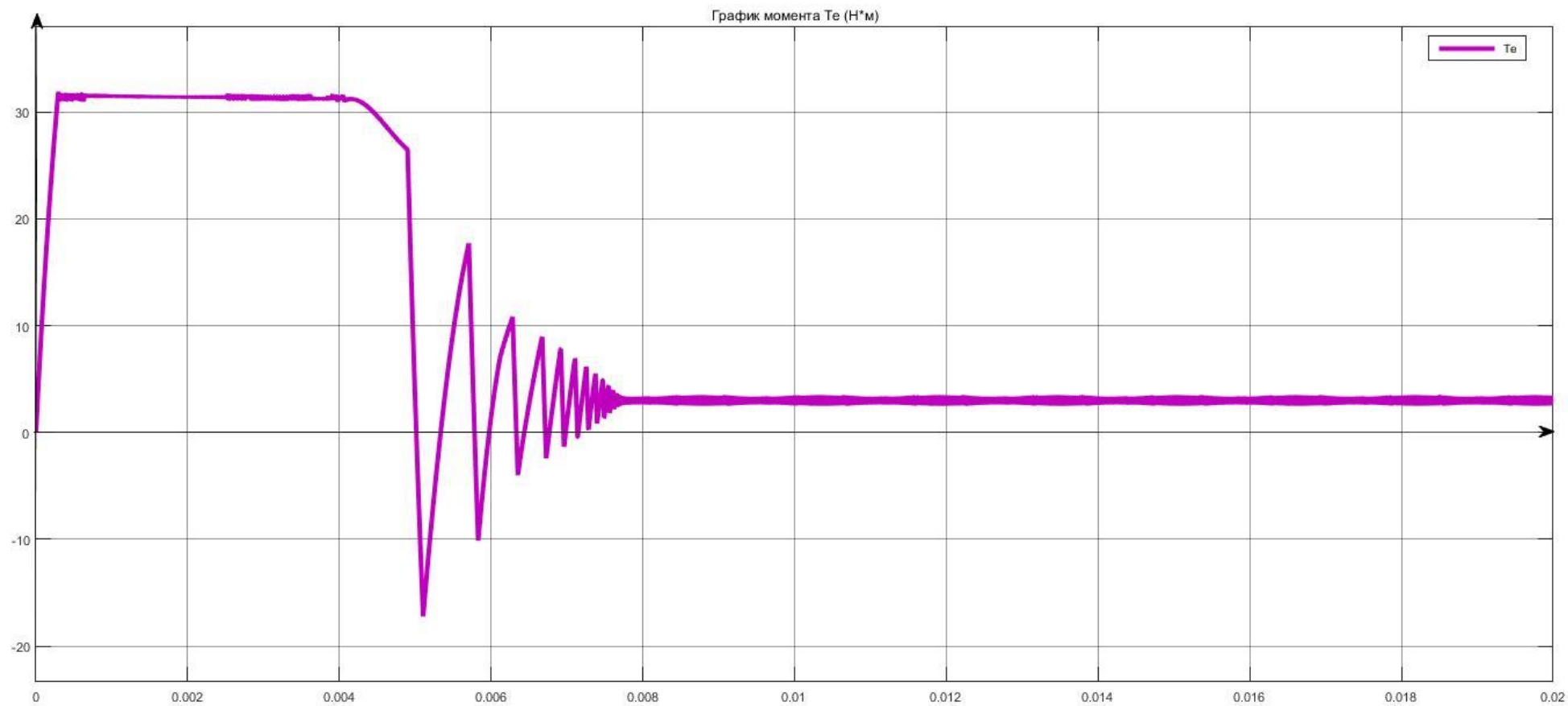


Рисунок 24 – График момента для ВД

Таким образом, применение имитационной модели вентильного двигателя позволяет спрогнозировать поведение двигателя до производства, на этапе проектирования. Такие модели строятся на том, что они копируют качества и характеристики неких реальных систем. Полученные электромеханические характеристики двигателя соответствуют традиционным машинам постоянного тока с магнитоэлектрическим или независимым возбуждением, потому системы управления вентильным двигателем и строятся по классическому принципу подчиненного регулирования координат привода постоянного тока с контурами частоты вращения ротора и тока статора. В данной имитационной модели, видно, что шум, создаваемый инвертором PWM, влияет на момент T_e .

Момент, создаваемый двигателем, определяется взаимодействием двух потоков:

- статора, создаваемого током в обмотках статора,
- ротора, создаваемого высокоэнергетическими постоянными магнитами (на основе сплавов самарий-кобальт и других).

Момент в ВД образуется в результате взаимодействия магнитных потоков статора и ротора: магнитный поток статора все время стремится, как бы развернуть ротор в такое положение, чтобы магнитный поток, установленных на нем постоянных магнитов совпал по направлению с магнитным потоком статора.

Наибольший момент, создаваемый на валу ротора, будет при угле между векторами потоков равным $\pi/2$ и будет уменьшаться до нуля по мере сближения векторов потоков.

После пуска вентильный двигатель разгоняется до скорости 3000 об/мин и выходит на режим нормальной работы за время $t=0.008$ с. В это же время момент колеблется в диапазоне от 30Нм до -15Нм и выходит на нормальную работу с моментом $T_e=4$ Нм. Такая работа двигателя, смоделированная в среде MatLab, помогает снять необходимые характеристики до его проектирования на практике.

Глава 5. **ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

В экономической части магистерской работы рассмотрено математическое моделирование вентильного двигателя. В этой части произведен расчет затрат на материалы, себестоимости электродвигателя, определен критический объем производства, построен график безубыточности.

Расчет себестоимости производства электродвигателя

Себестоимость промышленной продукции – это выраженная в денежной форме затраты предприятия связанные с производством и реализацией продукции.

Себестоимость включает в себя:

- материальные затраты;
- расходы на оплату труда;
- отчисления на социальные нужды;
- накладные расходы.

5.1 Материальные затраты

Материальные затраты – это затраты, связанные с приобретением и заготовлением материалов для изготовления единицы продукции. Сведем перечень материалов, необходимых для изготовления одной единицы продукции, в таблицу 7.

Таблица 7 – Затраты на материалы

Наименование	Ед. изм.	Норма расхода	Цена, руб	Стоимость, руб	Структур, %
<i>Ротор</i>					
Заклепка 4x10.00.АД1	шт	16	0,08	1,28	
Вал 45-3-	кг	7,72	19,29	148,92	

ГП-М2-ТВ2-ТО d45-В-II					
Втулка Сталь 45-3ГП- М2-ТВ-ТО	кг	8,96	1,86	16,67	
Кольцо торцевое 12x18H10T	кг	0,96	259,51	248,85	
Втулка магнита D16 d 12мм	кг	0,0048	111,21	0,53	
Фиксатор ЛОСТИТЕ 648	шт	1	1,12	1,12	
Винт М4- 8gx12.58	шт	4	0,17	0,69	
Клей BT25-200	кг	0,122	2835,16	427	
Лента миткалевая х/б 12x0,22	м	1,5	0,56	0,84	
Нить углеродная конструкционная УКН-5000	кг	0,05	5424,16	271,28	
Шайба плоская 4мм	шт	32	0,1	3,20	
Магнит	шт	4	685,67	2742,68	
Подшипни ки 208	шт	2	121,00	242,00	
Итого				4105,06	32,12
<i>Крышка</i>					
Пруток D16	кг	2,168	120,82	261,94	2,05
<i>Щит подшипниковый- проставка</i>					
Пруток D16	кг	14,894	116,70	1738,13	13,6
<i>Щит подшипниковый</i>					
Пруток D16	кг	8,514	6,70 ¹¹	993,58	7,78
<i>Станина</i>					
Станина Пруток D16	кг	33,408	116,70	3898,71	30,51
<i>Статор обмотанный</i>					
Азот	бал	0,052	205,93	10,71	
Канифоль	кг	0,003	0,17	0,01	
Ксилол каменноугольный	л	0,113	48,42	5,47	

Лак КО-916К	кг	0,245	221,88	54,36	
Нить ПЭ 111 2x3	кг	0,011	122,18	1,37	
Отвердитель ПЭПА	кг	0,0002	429,74	0,09	
Припой ПОС40	кг	0,006	61,24	0,37	
Спиртосодержащая смесь	дал	0,0003	565,68	0,17	
Тальк	кг	0,005	25,40	0,13	
Толуол	кг	0,008	37,36	0,30	
Эмаль КО-983	кг	0,0275	358,19	9,85	
Группа катушечная Провод ПЭТД-180 d=0,9	кг	1,71	308,68	527,84	
Провод выводной ПВКВ 380 d=1,5 мм	кг	0,479	10,73	5,14	
Прокладка междуфазная Стеклоткань ЛСК 150/180-1 S=0,15	м ²	0,24	165,35	39,68	
Клин пазовый Синтофлекс 818Н 0,27	кг	0,0198	908,87	18,00	
Коробка пазовая Синтофлекс 818Н 0,27	кг	0,059	908,87	53,62	
Лист статора Лента 0,5x140-Н-Ш-С-1-ТО-ТШ-А	кг	20,002	33,26	665,27	
Итого				1392,38	10,9
Плата датчика положение ротора	шт	1	389,29	389,29	3,04
Итого				12779,09	100

В стоимость материалов сборочной единицы включаются транспортно-заготовительные расходы, которые составляют 5% от стоимости материалов.

$$C_M = C \cdot ТЗР, \quad (5.1)$$

где С– стоимость всех использованных материалов, руб.;

$TЗР$ - транспортно–заготовительные расходы, $TЗР=5\%$;

$$C_M = 12783,41 \cdot 1,05 = 13,4 \text{ тыс.руб.}$$

Из таблицы 7 видно, что основную часть затрат составляют затраты на ротор 32,12%, это объясняется наличием дорогостоящих постоянных магнитов.

5.2 Расходы на оплату труда

Расходы на оплату труда включают в себя основную и дополнительную заработную плату рабочих.

Основная заработная плата рабочих определяется на основании трудоёмкости изготовления электродвигателя по операциям, тарифной сетки и тарифных ставок. Основная заработная плата предусматривает оплату труда за проработанное время.

Основная заработная плата рассчитана на основании данных взятых из интернета.

Таблица 8 – Расчет тарифной заработной платы

	Название операции	Трудоёмкость, нормо-час	Тарифная ставка, руб./час	Тарифная заработная плата, руб.
	Отрезная	1,31	73,8	96,68
	Токарная	17,73	82,8	1468,04
	Слесарная	1	61,2	61,2
	Сборочная	2,25	77,4	174,15
	Прессование	0,17	63	9,45
	Расточная	1,12	82,8	92,74
	Электромонтажная	8,61	57,6	495,94
	Пропитка	0,5	63	31,5
	Окрашивание	0,39	63	24,57
	Сварочная	1,5	82,8	124,2

0				
1	Гальваническая	0,01	57,6	0,58
2	Намотка	1,4	57,6	80,64
3	Порезка	2,74	63	172,62
4	Шлифование	4,31	82,8	356,87
5	Балансировка	2,98	73,8	219,92
6	Фрезерная	7,04	82,8	582,91
	Итого	53,06		3992,01

Необходимо учесть районный коэффициент в основной заработной плате, который включает составляет 30% от основной заработной платы

$$Z_{осн} = Z \cdot p^k, \quad (5.2)$$

где Z - тарифная заработная плата;

p^k - районный коэффициент, $p^k = 1,3$.

$$Z_{осн} = 3992,01 \cdot 1,3 = 5,2 \text{ тыс.руб.}$$

Дополнительная заработная плата производственных рабочих (не связанная с производством) - оплата труда, полагающаяся по закону за непроработанное время (отпуска, недоработанные часы подросткам, и т.д.), составляет 9% от основной заработной платы

$$Z_{доп} = Z_{осн} \cdot 0,09, \quad (5.3)$$

$$Z_{доп} = 5,2 \cdot 0,09 = 0,5 \text{ тыс.руб.}$$

Полная заработная плата

$$Z_{пол} = Z_{осн} + Z_{доп}; \quad (5.4)$$

$$Z_{пол} = 5,2 + 0,5 = 5,7 \text{ тыс.руб.}$$

5.3 Отчисления на социальные нужды

Отчисления на социальные нужды составляют 36,5% от суммы основной и дополнительной заработной платы.

Отчисления на социальные цели включают в себя отчисления в следующие фонды:

- пенсионный;
- обязательного медицинского страхования;
- социального страхования

$$C_{соц} = Z_{пол} \cdot 36,5\%; \quad (5.5)$$

$$C_{соц} = 5,7 \cdot 0,365 = 2,1 \text{ тыс.руб.}$$

Выше перечисленные статьи расходов относятся к прямым затратам. Отличительная черта, что они могут быть непосредственно отнесены на себестоимость продукции и поэтому рассчитываются как на весь объём производимой продукции, так и на единицу отдельных видов продукции.

Остальные расходы (неучтённые в прямых затратах) образуют накладные расходы. Эти расходы относятся на весь объём производимой продукции. Отношение их на конкретную продукцию может быть осуществлено лишь косвенным путём.

К накладным расходам относятся общепроизводственные, общехозяйственные расходы и расходы на продажу.

5.4 Накладные расходы

При определении накладных расходов используются данные сети интернет, в которых общепроизводственные расходы составляют 385%, от

основной заработной платы, общехозяйственные 200% и расходы на продажу 1,5%.

Накладные расходы включают расходы по содержанию и эксплуатации оборудования, управлению предприятием, по реализации продукции и прочие, которые не могут быть непосредственно отнесены на ту или на иную продукцию, изготавливаемую на предприятии.

Накладные расходы включают в себя следующие затраты:

- амортизация основных фондов предприятия;
- отчисления в ремонтный фонд;
- вспомогательные материалы на содержание оборудования;
- затраты на силовую электроэнергию;
- износ инструмента;
- заработная плата вспомогательных рабочих;
- командировочные расходы;
- представительские расходы;
- на рекламу;
- плата за кредиты;
- прочие расходы.

Общепроизводственные расходы

$$C_{об.пр.} = Z_{осн} \cdot 385\% , \quad (5.6)$$

$$C_{об.пр.} = 5,2 \cdot 3,85 = 20 \text{ тыс.руб.}$$

Общехозяйственные расходы

$$C_{об.хоз.} = Z_{осн} \cdot 200\% , \quad (5.7)$$

$$C_{об.хоз.} = 5,2 \cdot 2 = 10,4 \text{ тыс.руб.}$$

Накладные расходы

$$C_{накл} = C_{об.пр.} + C_{об.хоз.} \quad (5.8)$$

$$C_{накл} = 20 + 10,4 = 30,4$$

Расчет себестоимости двигателя сведем в таблицу 9.

Таблица 9 - Калькуляция на электродвигатель

Наименование статей	Сумма, тыс.ру б./шт	Удельный вес, %
Материалы	13,4	25,9
Заработная плата	5,7	11,0
Отчисления на социальные нужды	2,1	4,1
<i>Итого прямые затраты:</i>	<i>21,2</i>	<i>41</i>
Накладные расходы	30,4	58,8
<i>Итого производственная себестоимость:</i>	<i>51,6</i>	<i>99,8</i>
Расходы на продажу	0,1	0,2
Итого полная себестоимость:	51,7	100,0

Из таблицы 9 видно, что наибольшую часть затрат составляют материальные затраты (26%) и накладные расходы (59%).

В полной себестоимости учитываем расходы на продажу, которые составляют 1,5% от накладных расходов.

Таким образом, полная себестоимость сборочной единицы составила $C_{полн} = 51,7$ руб.

Определение рентабельности продукции

Для того чтобы установить цену на данный тип двигателя, необходимо провести исследования рынка, и выявить конкурентов. Рыночная стоимость аналога без НДС составляет 60 тыс.руб [11].

Установим цену на единицу продукции 60 тыс.руб, тогда рентабельность составит:

$$\rho = \frac{C_{рын} - C_{полн}}{C_{полн}}, \quad (5.9)$$

где ρ - рентабельность продукции, %;

$C_{рын}$ - рыночная цена, руб.

$$\rho = \frac{60 - 51,7}{51,7} \cdot 100\% = 16\%$$

Определение критического объёма производства и построение графика безубыточности

Критическая программа характеризуется тем, что при данном выпуске объёма производства предприятие не несет убытков, но и не получает прибыли от производства данного вида продукции.

Критический объем производства определяется по формуле (5.10)

$$Q_{кр} = \frac{C_{пост} \cdot Q_{пл}}{C - C_{пер}}, \quad (5.10)$$

где $Q_{пл}$ - планируемый объём производства, $Q_{пл} = 8000$ шт/год;

$C_{пост}$ - постоянные издержки, это затраты производства, которые в краткосрочном периоде остаются неизменными вне зависимости от изменения величины объёма производства, принимаем за постоянные расходы накладные расходы и расходы на продажу $C_{пост} = 30,5$ тыс. руб. (таблица 3);

$C_{пер}$ - переменные издержки, это затраты, непосредственно связанные с объемом производства, изменяющиеся в зависимости от объема, например затраты на материалы, сырье, полуфабрикаты, сдельная оплата труда работников, принимаем $C_{пер} = 21,2$ (таблица 9).

$$Q_{кр} = \frac{30,5 \cdot 8000}{60 - 21,2} = 6289 \text{ шт/год.}$$

Выручка от реализации продукции

$$V_{рн} = Q_{пл} \cdot C; \quad (5.11)$$

$$V_{рн} = 8000 \cdot 60 = 480000 \text{ тыс.руб/год.}$$

Точка безубыточности характеризует запас финансовой устойчивости предприятия. Чем больше планируемый или фактический объем продаж превышает точку безубыточности, тем устойчивее финансовое положение предприятия и тем меньше риск убытков от возможного падения производства. Запас финансовой прочности можно представить как в абсолютном, так и в относительном выражениях.

В абсолютном выражении запас финансовой устойчивости определяется по разности планируемого (фактического) объема продаж и точки безубыточности.

В относительном выражении рассчитывается коэффициент финансовой устойчивости ($k_{\text{ф.у.}}$).

$$k_{\text{ф.у.}} = \frac{Q_{\text{пл}} - Q_{\text{кр}}}{Q_{\text{пл}}} \cdot 100\% ; \quad (5.12)$$

$$k_{\text{ф.у.}} = \frac{8000 - 6289}{8000} \cdot 100\% = 21\%$$

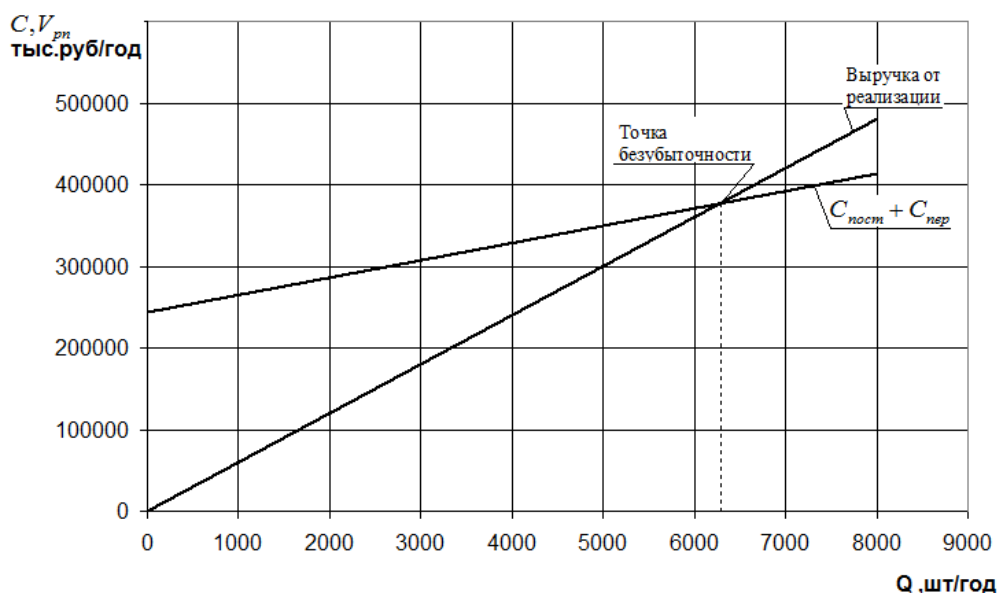


Рисунок 25 - График безубыточности. $V_{\text{рп}}$ - объем реализованной продукции (тыс.руб/год); C - себестоимость продукции (тыс.руб/год); Q - программа выпуска.

По получившейся величине коэффициента финансовой устойчивости $k_{ф.у} = 21\%$ можно сделать вывод о том, что финансовое положение предприятия производящее данные двигатели устойчивое, так как планируемый объем производства на предприятии, больше критического объема производства, то есть даже при снижении объема производства, предприятие будет функционировать без убытков.

В ходе расчета была произведена калькуляция себестоимости двигателя, установлена его цена и рентабельность, построен график безубыточности, определена критическая программа выпуска для предприятия и коэффициент финансовой устойчивости. На основе проведенного экономического анализа, производство данного двигателя при объеме производства 8000 тыс.шт./год можно считать экономически целесообразным.

Глава 6. Социальная ответственность

Выполнение магистерской диссертации предполагало нахождение в нескольких рабочих зонах, среди которых основным являлась научно-исследовательская лаборатория «Моделирование электроэнергетических систем» – помещение, оборудованное компьютерной и офисной техникой, которая необходима для выполнения аналитических исследований по диссертации, связанных с использованием стандартного и специального программного компьютерного обеспечения. В процессе выполнения работы возможно столкновение с различными вредными и опасными факторами, в том числе физического, химического и психофизиологического типа в зависимости от выбранной рабочей зоны: повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека; недостаток естественного света; недостаточная освещенность рабочей зоны; неудовлетворительные микроклиматические условия и т.д.

Данный раздел диссертации посвящён анализу опасных и вредных факторов при данном виде производственной деятельности и решению вопросов безопасности, на основе требований действующих нормативно-технических документов, охране окружающей среды.

6.1. Техногенная безопасность

Рабочей зоной является рабочее место инженера-исследователя моделирования электроэнергетических систем. Это помещение линейными размерами 6х7 м, высотой 2,8 м. Имеется три окна. Кабинет оборудован четырьмя светильниками общего освещения.

Рабочее место располагает пятью рабочими местами, оборудованными персональными компьютерами, также помещение оборудовано программно-аппаратными комплексами (ПАК РВ), шкафами релейной защиты и офисной техникой – двумя многофункциональными устройствами (МФУ). Расположение элементов рабочей зоны приведено на рисунке 26.

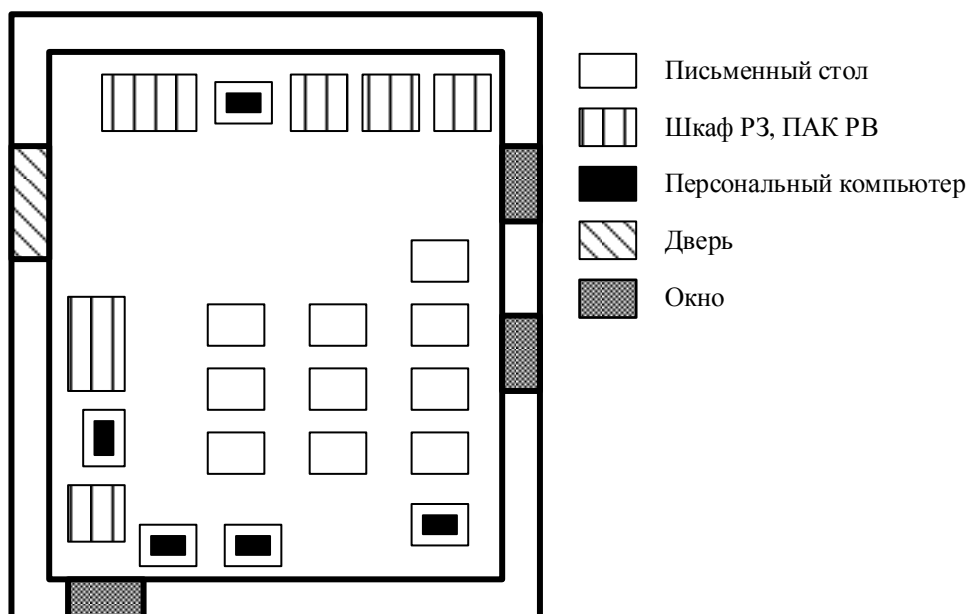


Рисунок 26 – План рабочего места инженера-исследователя моделирования электроэнергетических систем

В параграфе «Техногенная безопасность» необходимо проанализировать факторы рабочей зоны на предмет выявления их вредных и опасных проявлений. К таким факторам относятся микроклимат помещения, освещение рабочей зоны, электромагнитное поле и шум.

6.1.1. Освещение

Большее количество информации внешнего мира воспринимается человеком через зрительные органы. Качество этой информации зависит в большей степени от освещенности зоны, в которой находится человек. В случае, если освещение является неудовлетворительным, возможно искажение получаемой информации, утомление зрения и организма в целом, причинение травм вследствие потери ориентации, снижение производительности труда [1].

Освещение в помещениях регламентируется нормами в зависимости от характера зрительной работы, системы и вида освещения, фона, контраста объекта с фоном. Характеристика зрительной работы определяется наименьшим размером объекта различения. Данные виды работ можно отнести к разряду зрительных работ по категории Пб(очень высокой

точности) [2, 3]. Рациональное освещение рабочих мест в корпусах ТПУ имеет большое значение для выполнения сотрудниками своих функциональных обязанностей в условиях, когда в большинстве помещений отсутствует естественное освещение.

В университете предусматривается совмещенное и искусственное освещения. Для освещения помещений применяются, как правило, газоразрядные лампы низкого и высокого давления – люминесцентные, металлогенные, натриевые, ксеноновые и дуговые ртутные лампы. Неудовлетворительное освещение может исказить информацию, кроме того, оно вызывает утомление всего организма в целом. Освещение должно обеспечивать выполнение работы без напряжения зрения.

Таблица 10 – Нормы освещенности помещений

Место работы	Характеристика зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Освещенность рабочей поверхности, лк
Помещения лабораторий	Высокой точности	Б	300
Учебные аудитории	Высокой точности	Б	300

Освещение подразделяется на рабочее, аварийное и охранное. Рабочее освещение включает в себя общее стационарное, ремонтное и местное освещение. Охранное освещение предусматривается по периметру. Ремонтное освещение необходимо выполнять от понижающего трансформатора 12-42 В.

6.1.2. Микроклимат

Нормы производственного микроклимата установлены системой стандартов безопасности труда [4, 5]. Микроклимат в производственных условиях определяется следующими параметрами:

- температура воздуха $t^{\circ}\text{C}$;
- относительная влажность φ , %;

- скорость движения воздуха v , м/с;
- интенсивность теплового излучения I , Вт/м².

Таблица 11 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Катег. работ по уровню энергозатрат	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относ.влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Іб	21-23	20-24	40-60	0,1
Теплый	Іб	22-24	21-25	40-60	0,1

Интенсивность теплового облучения работающих от нагретых поверхностей технологического оборудования не должна превышать 100 Вт/м² при облучении не более 25% поверхности тела. Мероприятия по созданию условий для нормальной терморегуляции организма [1]:

- механизация и автоматизация технологических процессов;
- защита от источников теплового излучения с помощью теплозащитных экранов;
- устройство систем вентиляции;
- кондиционирование воздуха и отопление.

Для холодного периода года используется кондиционирование воздуха и отопление. Устройства систем вентиляции используются круглогодично, т.к. воздух загрязнен вредными парами и пылью. Теплозащитные экраны применяются по необходимости, в основном в теплый период. Мероприятия по борьбе с загрязненностью воздуха вредными газами, парами и аэрозолями:

- удаление или ограничение использования вредных веществ;
- рационализация технологического процесса, устраняющая образование газов, паров и аэрозолей;
- максимальная герметизация оборудования;

- устройство различных систем вентиляции от мест выделения газов, паров или аэрозолей;
- снабжение рабочих средствами индивидуальной защиты.

6.1.3. Шум

Длительное воздействие шума может привести к ухудшению слуха, а в отдельных случаях – к глухоте. Шумовое загрязнение среды на рабочем месте неблагоприятно воздействует на работающих: снижается внимание, увеличивается расход энергии при одинаковой физической нагрузке, замедляется скорость психических реакций и т.п. В результате снижается производительность труда и качество выполняемой работы.

Уровни шума на рабочих местах пользователей персональных компьютеров не должны превышать значений, установленных в [6, 7]. Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для такой категории приведены в таблице 3 [7].
Таблица 12 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука

Уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами									Уровни звука в дБА
31,5 Гц	63 Гц	125 Гц	250 Гц	500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц	8000 Гц	
93 дБ	93 дБ	70 дБ	68 дБ	58 дБ	55 дБ	52 дБ	52 дБ	49 дБ	60

В рассматриваемой рабочей зоне основным источником шума являются компьютеры (охладительные установки, накопители на жестких и мягких магнитных дисках, CD-ROM), мониторы. Необходимо указать и такой дополнительный источник шума, как работающие светильники люминесцентных ламп и вентиляторы. Кроме этого шум проникает извне через открытые проемы форточек, окон и дверей из кабинета в коридор.

Согласно [6], в производственных помещениях при выполнении основных или вспомогательных работ с использованием ЭВМ уровни шума и вибрации на рабочих местах не должны превышать предельно допустимых

значений, установленных для данных видов работ в соответствии с действующими санитарно-эпидемиологическими нормативами. Согласно [7], при выполнении работы на ПК (ЭВМ) уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Для снижения шума применяют различные методы: уменьшение уровня шума в источнике его возникновения, звукопоглощение и звукоизоляция, установка глушителей шума, рациональное размещение оборудования, применение средств индивидуальной защиты. Шумящее оборудование, уровни шума которого превышают нормированные, должно находиться вне помещения с компьютерами.

6.1.4. Электромагнитное поле

Согласно [8], оценка и нормирование электростатического поля (ЭСП) осуществляется по уровню электрического поля дифференцированно в зависимости от времени его воздействия на работника за смену.

- Предельно допустимый уровень напряженности электростатического поля ($E_{ПДУ}$) при воздействии ≤ 1 час за смену устанавливается равным 60 кВ/м;
- При воздействии ЭСП более 1 часа за смену $E_{ПДУ}$ определяются по формуле:

$$E_{ПДУ} = \frac{60}{\sqrt{t}},$$

где t – время воздействия (час)

- При напряженностях электростатического поля, превышающих 60 кВ/м, работа без применения средств защиты не допускается;

Предельно допустимые уровни электромагнитного поля для ПК приведены в таблице 13 [9].

Таблица 13 – Предельно допустимые уровни электромагнитного поля

Источник	Диапазон	Значение ПДУ
Видеодисплейный терминал ПЭВМ	5 Гц – 2 кГц	$E_{ндy} = 25 \text{ В/м}$ $B_{ндy} = 250 \text{ нТл}$
	2 – 400 кГц	$E_{ндy} = 2,5 \text{ В/м}$ $B_{ндy} = 25 \text{ нТл}$
	поверхностный электростатический потенциал	$U = 500 \text{ В}$

При напряженностях ЭСП менее 20 кВ/м время пребывания в электростатических полях не регламентируется. Основными источниками электромагнитных полей в помещении являются системы потребления электроэнергии; средства визуального отображения информации (мониторы); оборудование на электропитании. Фактически основанным источником электромагнитного излучения является персональный компьютер (ПК), частоты излучения приведены в таблице 14 [10].

Таблица 14 – ПК как источник электромагнитных полей

Источник	Диапазон частот
Монитор: – сетевой трансформатор блока питания – статический преобразователь напряжения в импульсном блоке питания – блок кадровой развертки и синхронизации – блок кадровой развертки и синхронизации – ускоряющее анодное напряжение монитора (только для мониторов с ЭЛТ)	50 Гц 20 - 100 кГц 48 - 160 Гц 15 - 110 кГц 0 Гц (электростатика)
Системный блок	50 Гц - 1000 МГц
Устройства ввода/вывода информации	0 Гц, 50 Гц
Источники бесперебойного питания	50 Гц, 20 - 100 кГц

В России система стандартов по электромагнитной безопасности состоит из [11-13].

6.2. Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих вредное и опасное воздействие на работающих электрического тока и электрической дуги. Современное производство характеризуется широким применением различных электроустановок. В этой связи большое значение в общей системе инженерно-экологических мероприятий приобретают вопросы обеспечения электробезопасности. В данном помещении присутствуют только электроустановки напряжением до 1кВ. По электробезопасности помещение относится к первому классу – помещения без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой 18-20°, с влажностью 40-50%) [12].

Большинство специалистов и исследователей в области электробезопасности указывают на термические, электролитические, механические, биологические действия, которые производит электрический ток, проходя через организм человека.

Основными техническими средствами защиты, согласно ПУЭ [14], являются защитное заземление, автоматическое отключение питания (зануление), устройства защитного отключения. Наличие таких средств защиты предусмотрено в рабочей зоне. В целях профилактики периодически проводится инструктаж работников по технике безопасности.

Согласно требованиям ПУЭ, сопротивление защитного заземления в любое время года не должно превышать:

- в установках напряжением до 1000 В, если мощность источника тока (генератора или трансформатора) более 100 кВА – 4 Ом;
- в установках напряжением до 1000 В, если мощность источника тока 100 кВА и менее – 10 Ом.

Защитное заземление – это система металлических деталей, помещенных в грунт и электрически соединенных специализированными проводами с металлическими частями электрооборудования, не

находящимися под напряжением в нормальном состоянии. Защитное заземление высокоэффективно предохраняет человека от возможности поражения током в сетях напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью и в сетях напряжением выше 1000 В – с любым режимом нейтрали.

Расчет заземлителей заключается в определении численности заземлителей и длины соединителей исходя из разрешенного сопротивления заземления. В данной работе рассчитано защитное заземление для шкафов релейной защиты и ПАК РВ, находящихся в аудитории.

Порядок расчета устройства защитного заземления [15]:

1. В качестве заземляющего устройства выбирается стальная трубка диаметром $d = 55$ мм, а в качестве соединяющего элемента – стальная полоска шириной $b = 50$ мм.

2. Выбирается значение сопротивления грунта близкое по величине к удельному сопротивлению грунта в районе размещения установки или устройства.

Таблица 15 – Исходные данные

Вид заземления	контурное
Длина заземлителя l , м	2,7
Глубина заземлителя в грунте h , м	0,65
Сезонный коэффициент K_c	2,0
Удельное сопротивление земли ρ , Ом·м	70
Диаметр d , мм	55
Ширина соединительной полоски b , мм	50
Допустимое сопротивление системы заземления по ПУЭ $R_{з.у.}$, Ом	4

3. Определяется величина электрического сопротивления растекания тока в грунт с одиночного заземлителя:

$$R_s = 0,366 \frac{\rho \cdot K_c}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right) =$$

$$= 0,366 \frac{70 \cdot 2}{2,7} \left(\lg \frac{2 \cdot 2,7}{0,055} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 2 + 2,7}{4 \cdot 2 - 2,7} \right) = 40,62 \text{ Ом,}$$

где $\rho = 70$ Ом – удельное сопротивление грунта,

$K_c = 2$ – коэффициент сезонности,

$l = 2,7$ м – длина заземлителя,

$d = 0,055$ м – диаметр заземлителя,

$t = h + 0,5l = 0,65 + 0,5 \cdot 2,7 = 2$ м – длина от поверхности земли до

середины заземлителя.

4. Рассчитывается число заземлителей без взаимных помех, получаемых друг от друга, без так называемого явления «экранирования»:

$$n' = \frac{R_3}{R_{3,y.}} = \frac{40,62}{4} = 10,15 \approx 10$$

5. Рассчитывается число заземлителей с коэффициентом экранирования:

$$n = \frac{n'}{\eta_3} = \frac{10}{0,58} = 17,24 \approx 18$$

где $\eta_3 = 0,58$ – коэффициент экранирования [15].

Принимаем расстояние между заземлителями $a = l = 2,7$ м.

6. Определяется длина соединительной полосы:

$$l_n = 1,05 \cdot n \cdot a = 1,05 \cdot 18 \cdot 2,7 = 51,03 \text{ м}$$

7. Рассчитывается значение сопротивления растекания тока с соединительной полосы:

$$R_{II} = 0,366 \frac{\rho K_c}{l_n} \lg \frac{2l_n^2}{b \cdot h} = 0,366 \frac{70 \cdot 2}{51,03} \lg \frac{2 \cdot 51,03^2}{0,05 \cdot 0,65} = 5,2 \text{ Ом}$$

8. Рассчитывается полное сопротивление системы заземления:

$$R_{3y} = \frac{R_3 \cdot R_{II}}{R_3 \cdot \eta_n + R_{II} \cdot \eta_3 \cdot n} = \frac{40,62 \cdot 5,2}{40,62 \cdot 0,51 + 5,2 \cdot 0,58 \cdot 18} = 2,82 \text{ Ом},$$

где $\eta_n = 0,51$ – коэффициент экранирования полосы.

Таким образом, полученное сопротивление $R_{3y} = 2,82$ Ом меньше допустимого сопротивления, равного 4 Ом. Следовательно, диаметр заземлителя $d = 55$ мм при числе заземлителей $n = 18$ является достаточным для обеспечения защиты при контурной схеме расположения заземлителей.

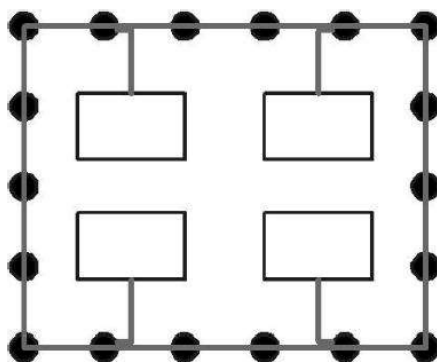


Рисунок 27– Схема полученного контурного заземления

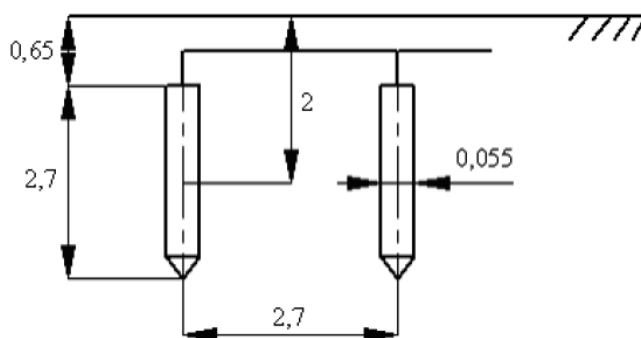


Рисунок 28– Схема расположения заземлителей

6.3. Пожарная безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайно высокие потоки негативных воздействий создают чрезвычайные ситуации (ЧС), которые изменяют допустимое состояние среды обитания и переводят жизнедеятельность в условия высокой травмоопасности или гибели. При ЧС на первое место выходят задачи защиты от высоких уровней негативного воздействия, ликвидации последствий, реабилитации пострадавших и восстановления повседневной жизнедеятельности. Среди возможных ЧС наиболее вероятным является возникновение пожара в одном из ПЭК РВ или шкафу релейной защиты. Порядок действий персонала при возникновении пожара в электроустановке [16]:

1. при появлении признаков возгорания в электроустановке первое, что следует сделать – это оценить ситуацию, составить общее представление о происходящем;

2. далее без промедления необходимо сообщить о случившемся вышестоящему персоналу – научному руководителю, заведующему лабораторией и т.д.
3. оценив масштаб возгораний, определяется дальнейший порядок действий. Если возгорание не удастся ликвидировать своими силами, находящемуся в электроустановке персоналу, то необходимо вызвать пожарную охрану по имеющейся связи – мобильному или стационарному телефону, внутренней телефонной связи.
4. при приезде пожарной бригады необходимо встретить ее, предварительно приняв требуемые меры электробезопасности. Также необходимо показать возможные подъездные пути, места заземления техники, место расположения пожарного гидранта и других элементов водоснабжения.

При тушении электроустановок, находящихся под напряжением персонал, состав пожарной охраны обязан выполнять следующие требования:

1. работать со средствами пожаротушения в диэлектрических перчатках и ботах (сапогах);
2. находиться на безопасном расстоянии от электроустановок;
3. заземлить пожарный ствол и насос пожарного автомобиля.

Таблица 15 – Типы используемых огнетушителей при пожаре в электроустановках

Напряжение, кВ	Тип огнетушителя
До 0,4	хладоновый
До 1,0	порошковый
До 10,0	углекислотный

Тушение пожаров в электроустановках, находящихся под любым напряжением, всеми видами пен и с помощью ручных средств запрещается, так как пена и раствор пенообразователя в воде обладают повышенной электропроводимостью.

Пожары причиняют значительный материальный ущерб, в ряде случаев вызывают тяжелые травмы и гибель людей. Основополагающими законодательными актами в области пожарной безопасности являются [17-18], определяющие общие правовые, экономические и социальные основы обеспечения пожарной безопасности в Российской Федерации. Технический регламент [17] регламентирует классификацию зданий по степенюогнестойкости, конструктивной и функциональной пожарной опасности.

К основным видам техники, предназначенной для защиты различных объектов от пожаров, относятся средства сигнализации и пожаротушения. Важную роль при возникновении ЧС играет успешная эвакуация людей. Для того чтобы чётко обозначить пути эвакуации, эвакуационные выходы, обеспечивающие безопасность процесса организованного самостоятельного движения людей из помещений, а также указать расположение пожарного оборудования и средств оповещения о пожаре и напомнить о первоочередных действиях при пожаре применяется план эвакуации. Разработка плана эвакуации людей в случае пожара, инструкции к нему, устройство системы оповещения людей о пожаре, а также назначение лиц, имеющих право на её включение регламентированы в [18].



Рисунок 29 – План эвакуации людей на случай пожара

6.4. Охрана окружающей среды

Работа в научно-исследовательской лаборатории «Моделирование электроэнергетических систем» 8 корпуса ТПУ сопряжена с образованием и выделением газообразных, жидких и твердых отходов. Газообразные отходы, загрязняющие воздух помещения, это в первую очередь естественные выделения – углекислый газ, пары воды; бытовая пыль; летучие органические соединения, выделяющиеся в процессе эксплуатации оборудования и др. Воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения. Жидкие отходы – бытовые отходы, образующиеся в процессах влажной уборки помещений, при пользовании водопроводом, туалетом и т.п., сбрасываются в городскую канализацию и далее поступают в системы централизованной очистки на городских очистных сооружениях.

При обращении с твердыми отходами – бытовой мусор (отходы бумаги, отработанные специальные ткани для протирки офисного оборудования и экранов мониторов, пищевые отходы); отработанные люминесцентные лампы; офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства – надлежит руководствоваться [19]: бытовой мусор после предварительной сортировки складировать в специальные контейнеры для бытового мусора (затем специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку); утратившее потребительские свойства офисное оборудование передают специальным службам (предприятиям) для сортировки, вторичного использования или складирования на городских мусорных полигонах. Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с [20]. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Интоксикация ртутью возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является

сохранность целостности отработанных ртутьсодержащих ламп. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки.

К сфере защиты окружающей среды и рационального использования природных ресурсов относится и экономия ресурсов, в частности, энергетических. Реальным вкладом здесь может стать экономия электрической и тепловой энергии на территории ТПУ. Во-первых, это улучшает экономические показатели деятельности предприятия (уменьшение расходов на электротепловую энергию). Во-вторых, экономия энергии означает уменьшение количества газа, мазута, угля, сжигаемого в топках котлов ТЭС и электроустановок (котельных) промпредприятий города Томска и области и одновременное уменьшение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Несмотря на кажущуюся малость вклада в энергосбережение и в защиту атмосферного воздуха от загрязнения массовое движение в этом направлении, в том числе, в быту, принесет значимый эффект.

6.5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В соответствии с [21] обязательному социальному страхованию подлежат все лица, выполняющие работу в организациях на основании трудовых договоров, а также физические лица, выполняющие работу на основании гражданско-правового договора, если в соответствии с этим договором страхователь (организация) обязан уплачивать страховщику (ФСС) страховые взносы. Все страхователи (предприятия, организации) обязаны перечислять страховщику (ФСС) страховые взносы, которые определены на основании страховых тарифов к фонду оплаты труда предприятия и устанавливаются федеральными законами по видам экономической деятельности. Из этих средств ФСС возмещает работнику,

получившему повреждение здоровья на производстве, его утраченный заработок (доход), а также связанные с этим дополнительные расходы [22]. В случае смерти пострадавшего указанные пособия получают определенные члены его семьи и лица, состоявшие у него на иждивении. Условия страховых выплат устанавливаются федеральными законами и, как правило, корректируются на каждый очередной финансовый год.

Установлены следующие виды страховых выплат в случае профессионального заболевания или производственной травмы:

- 1) пособие по временной нетрудоспособности;
- 2) единовременное страховое пособие;
- 3) ежемесячные страховые выплаты;
- 4) оплата дополнительных расходов на медицинскую, социальную и профессиональную реабилитацию.

Пособие по временной нетрудоспособности вследствие профессионального заболевания и в связи с несчастным случаем на производстве выплачивают застрахованному в размере 100% его среднего заработка за весь период временной нетрудоспособности до его выздоровления или установления стойкой утраты профессиональной трудоспособности. Единовременное страховое пособие и ежемесячные страховые выплаты застрахованному пострадавшему выплачивают в случае стойкой частичной или полной утраты профессиональной трудоспособности, которую устанавливает учреждение медико-социальной экспертизы и выражает ее в процентах. Оплата дополнительных расходов, связанных с медицинской, социальной и профессиональной реабилитацией застрахованного по заключению учреждения медико-социальной экспертизы, включает расходы на лечение застрахованного, приобретение лекарств, санаторно-курортное лечение, оплату отпуска застрахованного, профессиональное обучение и получение дополнительного профессионального образования и т.д.

В разделе социальная ответственность были проанализированы и выявлены вредные факторы производственной среды, произведен расчет освещенности рабочего места, а также выбран вариант освещения помещения. Кроме этого было рассчитано устройство защитного заземления для электроустановок в аудитории. Изучен перечень возможных чрезвычайных ситуации, разработаны действия в результате возникновения ЧС и меры по ликвидации её последствий.

Заключение

В магистерской работе основные исследования были направлены на исследования вентильного двигателя мощностью 13 кВт. Был проведен анализ литературы по тематике исследования.

Произведен электромагнитный расчёт. Сделано проектирование магнита ротора в среде Elcut. Разработана имитационная модель, позволяющая исследовать рассчитанный вентильный двигатель в среде Matlab.

Математическое моделирование вентильного двигателя охватывает основные разделы электромагнитного расчёта, такие как выбор основных параметров, магнитов, ротора, статора и расчёт магнитной цепи. Так же произведен электромагнитный расчет, в котором определены геометрические размеры магнитов из сплава неодим-железо-бор, ширина магнита составила 53 мм, длина 135 мм, высота 8,6 мм. Рассчитаны и построены рабочие характеристики, определены энергетические показатели, коэффициент полезного действия составил $\eta = 0,937$ и коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,906$. Разработан алгоритм математического моделирования вентильного двигателя.

Примоделирование магнита в среде Elcut, получившиеся значения индукции можно использовать при проверке готовых образцов. Это подтверждается выполненным сравнением экспериментальных данных с данными полученными в ходе моделирования этого магнита в программе Elcut. Магниты состава «неодим-железо-бор» вполне способны создавать индукцию в зазоре порядка 0,8 Тл, то есть на уровне асинхронных машин, причем основные электромагнитные потери в таком роторе отсутствуют.

При имитационном моделировании вентильного двигателя в среде MatLab можно исследовать рабочие характеристики двигателя до производства, на этапе проектирования. Такое моделирование копирует качество и характеристики реальных систем. Электромеханические характеристики двигателя соответствуют традиционным машинам

постоянного тока с магнитоэлектрическим или независимым возбуждением, потому системы управления вентильным двигателем и строятся по классическому принципу подчиненного регулирования координат привода постоянного тока с контурами частоты вращения ротора и тока статора.

В экономической части была произведена калькуляция себестоимости двигателя, установлена его цена и рентабельность, построен график безубыточности, определена критическая программа выпуска. Критическая программа выпуска составила 6289 шт, коэффициент финансовой устойчивости $k_{\phi y} = 21\%$. Рассчитаны различные виды затрат, проанализирован бюджет затрат на научно-исследовательскую работу, по итогам всего проекта хотелось бы отметить, что данный проект является весьма стабильным и устойчивым, имеет минимальное количество угроз.

В разделе безопасности и экологичности проекта были затронуты вопросы анализа опасных и вредных факторов, техники безопасности, производственной санитарии, а также вопросы охраны окружающей среды. Рассмотрены различные вредные факторы, влияющие на работу проектировщика.

Список литературы

1. Осин И. Л., Колесников В. П., Юферов Ф. М. Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами. — М. : Энергия, 2015. — 231 с.
2. Балагуров В. А., Галтеев Ф. Ф., Ларионов А. Н. Электрические машины с постоянными магнитами . — М. ; Л. : Энергия, 2013. — 480 с.
3. Бут Д. А. Бесконтактные электрические машины.— М. : Высшая школа, 2014. — 255 с.
4. Копылов И. П., Клоков Б. К, Морозкин В. П., Токарев Б. Ф. Проектирование электрических машин: учебник для вузов. Под ред. И. П. Копылова. — М. : Высшая школа, 2012. — 767 с.
5. Сергеев П. С., Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А. Проектирование электрических машин.— М. : Энергия, 1970. — 632 с.
6. Вольдек А. И. Электрические машины. — Л. : Энергия, 1974. — 823 с.
7. ГОСТ Р 52956-2008 Материалы магнитотвердые спеченные на основе сплава неодим-железо-бор. Классификация. Основные параметры. Стандартиформ 2014.-7с.
8. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность). — СПб. : Корона-Век, 2006. — 333 с.
9. Кацман М. М. Электрический привод. — М. : Академия, 2005. — 384 с.
10. <http://www.kamkabel.ru/>
11. <http://www.kubtrade.ru/>
12. Мушников В.С., Победоносцев В.Е., Фетисов И.Н. Расчет величины сопротивления защитного заземления. Методические указания. ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2009
13. Корсакова В. С., Замятина В. К. Сборка и монтаж изделий машиностроения. Справочник — М. : Машиностроение, 2014.

14. Мягков В. Д., Палей М. А., Романов А. Б., Брагинский В. А. Допуски и посадки. Справочник: В 2-х частях — Л. : Машиностроение, 1982. — 543 с.
15. Охрана окружающей среды : учебное пособие / Под ред. С. В. Белова. — М. : Высшая школа, 1991. — 318 с.
16. Охрана труда : учебник для вузов / Под ред. Б. А. Князевского. — М. : Высшая школа, 1972. — 332 с.
17. Ильин А. И. Экономика предприятия: учебное пособие для вузов. Новое знание, 2013. — 698 с.
18. Белов С.В. Ильницкая А.В., Козьяков А.Ф. Безопасность жизнедеятельности. – М.: Высшая школа, 2007. – 616 с.
19. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. Утв. главным государственным санитарным врачом РФ от 6 апреля 2003 г.
20. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение. Утв. постановлением Минстроя РФ от 2 августа 1995 г. N 18-78.
21. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора России от 1 октября 1996 г., N 21.
22. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Изд-во стандартов, М. – 1988.
23. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Минздрав России, Москва. – 1996.
24. ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. Изд-во стандартов, М. – 1983.
25. ГОСТ 12.1.045-84. Система стандартов безопасности труда. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. Изд-во стандартов, М. – 1984.

26. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. Минздрав России, М. – 2003.
27. Новиков С.Г., Маслова Т.Н., Копылова Л.Н. Безопасность жизнедеятельности. Учебно-методический комплекс. Электронный учебник.
28. ГОСТ 12.1.002-84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. Изд-во стандартов, М. – 1984.
29. ГОСТ 12.1.006-84. Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. Изд-во стандартов, М. – 1984.
30. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях. Минздрав России, М. – 2003.
31. Правила устройств электроустановок. 6-е и 7-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 640 с.
32. Дашковский А.Г. Расчет устройства защитного заземления. Методические указания к выполнению самостоятельной работы по дисциплине «Электробезопасность» для студентов всех специальностей ЭЛТИ. Томск, изд. ТПУ, 2010. – 8 с.
33. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации. Государственная противопожарная служба, Москва. – 2003.
34. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
35. Федеральный закон от 21.12.1994 N 69-ФЗ (ред. от 12.03.2014) «О пожарной безопасности».
36. Постановление Администрации города Томска «Об организации сбора, вывоза, утилизации и переработки бытовых и промышленных отходов на территории муниципального образования «Город Томск» от 11 ноября 2009 года № 1110.

37. Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 N 681 (ред. от 01.10.2013) «Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде».

38. Федеральный закон от 24.07.1998 № 125-ФЗ «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний».

39. Трудовой кодекс Российской Федерации. Официальный текст. – М.: Пропаганда: Омега-Л, 2002. – 176 с.: ил. – (Российская правовая библиотека).

Приложение А

(обязательное)

Введение, Моделирование магнита вентильного двигателя, Заключение
Introduction, Simulation of the valve motor magnet, Conclusion

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Н	Больных Екатерина Сергеевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Столярова О.О.	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Воробьева В.В.	к.фил.н.		

Introduction

Modern trends in the development of semiconductor technology have given impetus to the development of long-known electric drive systems in new applications. Such electric drives are a synchronous motor with permanent magnets. To date, it is becoming increasingly popular due to its simplicity, high energy performance and a large range of regulation. Such electric drive due to design features and simplicity of control implementation can find application in many spheres of industry such as military, medical, space and others. The permanent magnet synchronous motor is an electromechanical system in which a synchronous electric machine is combined with excitation from permanent magnets, an electronic switch, through which the windings of the armature of the machine are powered, and an automatic control system of the inverter equipped with the necessary measuring devices (sensors). This engine is called a valve motor. Traditionally, the inverter's keys are controlled in the rotor position function of the synchronous motor. To solve the tasks of controlled motion in modern systems, such engines are increasingly being used.

Due to their high performance characteristics, permanent magnet synchronous motor are the most promising electric machines in the range of small and medium capacities, especially for torque drive systems. Permanent magnet synchronous motor are structurally simple, reliable, have absolutely rigid mechanical characteristics and do not require energy for excitation. These qualities of the electrical machine stipulate the use of automation, robots and manipulators in industrial systems, feed drives, the main movement of metal-cutting machines, coordinate devices, etc.

The purpose of this work is to perform a mathematical simulation of the valve motor. In that work, the valve motor is used as part of an electric drive designed for control of shut-off, shut-off and control valves, ball valves of technological processing units, main oil pipelines, gas pipelines and other pipeline transport, including high pressure.

In recent decades, when designing rotors with permanent magnets, preference is given to high-energy magnets based on rare-earth metal alloys having a large coercive force. This allows to significantly improve the mass-dimensions of the permanent magnet synchronous motor and to obtain a higher torque, in the same dimension of the stator of the engine. Over the past few decades, the development of permanent magnets for permanent magnet synchronous motor has been a big leap. Such magnets are produced with good magnetic properties, such as neodymium-iron-boron (NdFe). "Samarium-cobalt" (Sm-Co) and "neodymium-iron-boron" (Nd-Fe-B) are the most common materials of modern rare-earth magnets.

Simulation of the permanent magnet synchronous motor

In that work the calculation of the explosion-proof valve motor with a power of 13 kW is made. The engine is used as part of an electric drive designed for control of shut-off, shut-off and control valves, ball valves of technological processing units, main oil pipelines, gas pipelines and other pipeline transport, including high pressure. In the engine being designed, the configuration of the permanent magnets used is changed, their length and width are increased in comparison with the accepted standards. The electrotechnical steel of mark 2412 with smaller specific losses is also laid. These measures allowed to get the efficiency of the engine 93%. Increase in efficiency is caused by a reduction in magnetic losses in the stator core, due to a reduction in induction in the yoke, teeth and air gap, due to the increase in the length of the stator.

Due to the fact that the magnets come to the plant from the suppliers and in order to prevent the start of engine production, with inadequate magnets, design and technical documentation, their input control is performed. When checking, the design and dimensions are checked, the appearance is checked and the magnetic parameters of the magnets are checked, in particular, the value of the magnetic field induction is checked. Since the magnitude of the induction of the magnetic

field varies in width, length, and depends on the geometry of the magnet, then to check the magnet it is necessary to know the distribution of the magnetic field and the value of the induction of the magnet at each of its points. There is also a need to check the distribution of the magnetic field of the rotors and rotors of the engines that have been delivered for repair, as some may be damaged during technological operations, while others may fail during operation. In this regard, in this part of the technique is considered degree project control input magnets, rotor assembly, which are constructed picture of the magnetic fields of the magnets, the rotor assembly, the basic area of the magnetic induction measurements, as well as the value determined by induction in these zones.

The model of the magnet, the rotor and the further induction definition were produced using a special software product ELCUT 5.1, designed to simulate various physical fields in two-dimensional planes. Modeling is carried out using the finite element method, in which the object is divided into many discrete elements of simple form, the field in which varies linearly.

To confirm the correctness of the procedure for determining the parameters of magnets, the parameters of the magnet taken from the produced engine and the comparison of these data are measured with data from the ELCUT. The magnet from the produced engine is shown in Fig. 9, the magnet alloy Nmb 250/160 GOST R 52956-2008.

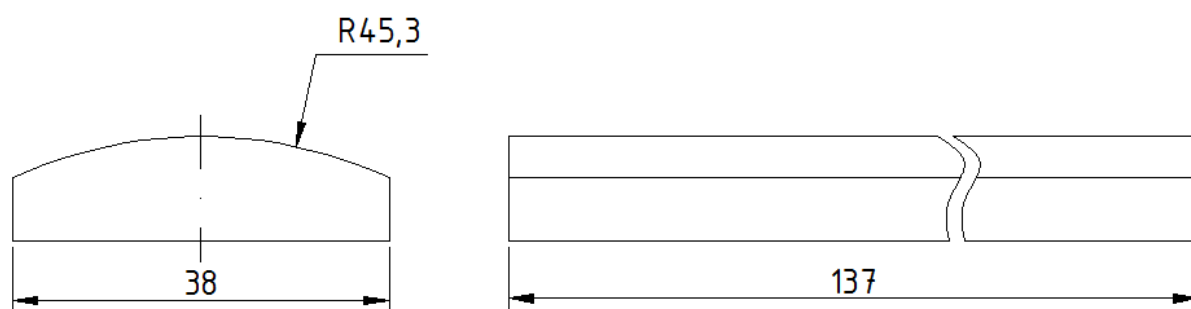


Figure 9 - Esquisse of the magnet of the engine

The experimental measurement data are presented in Table 4, the measurement points in Fig. 10. The measurements were made using the EM4305 teslameter.

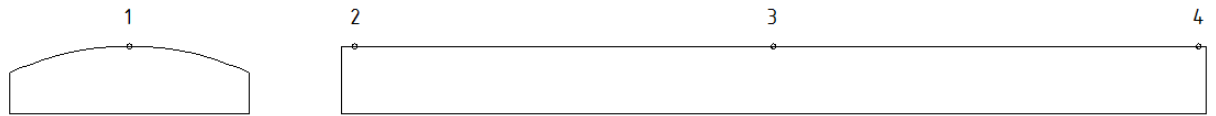


Figure 10 - Induction measurement points on a magnet

Table 4

Measuringpoint	Induction, tesla
1-2	0,30
1-3	0,23
1-4	0,30

Then, the simulation of this magnet in the ELCUT was performed, the magnetic field pattern from the end of the magnet is shown in Fig. 11, in the cross section of the magnet in Fig. 12. When creating the magnet model, its demagnetization curve is taken into account.

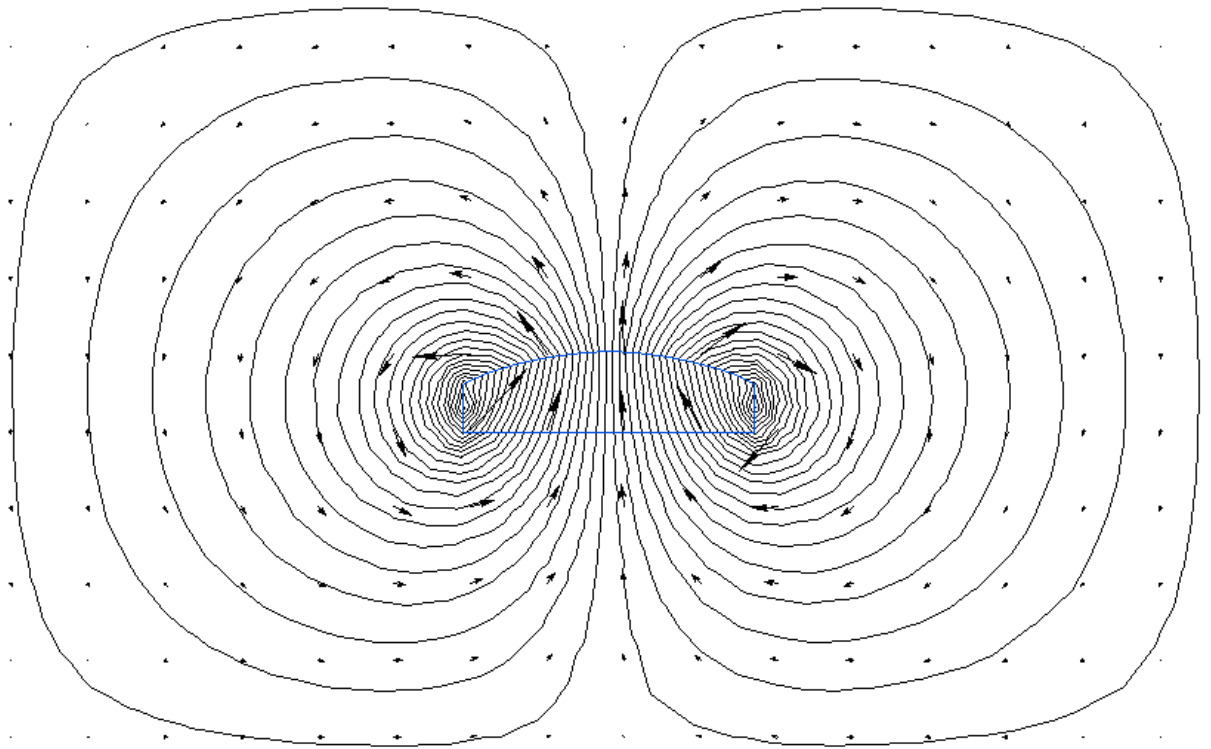


Figure 11 - The magnetic field pattern from the end of the magnet

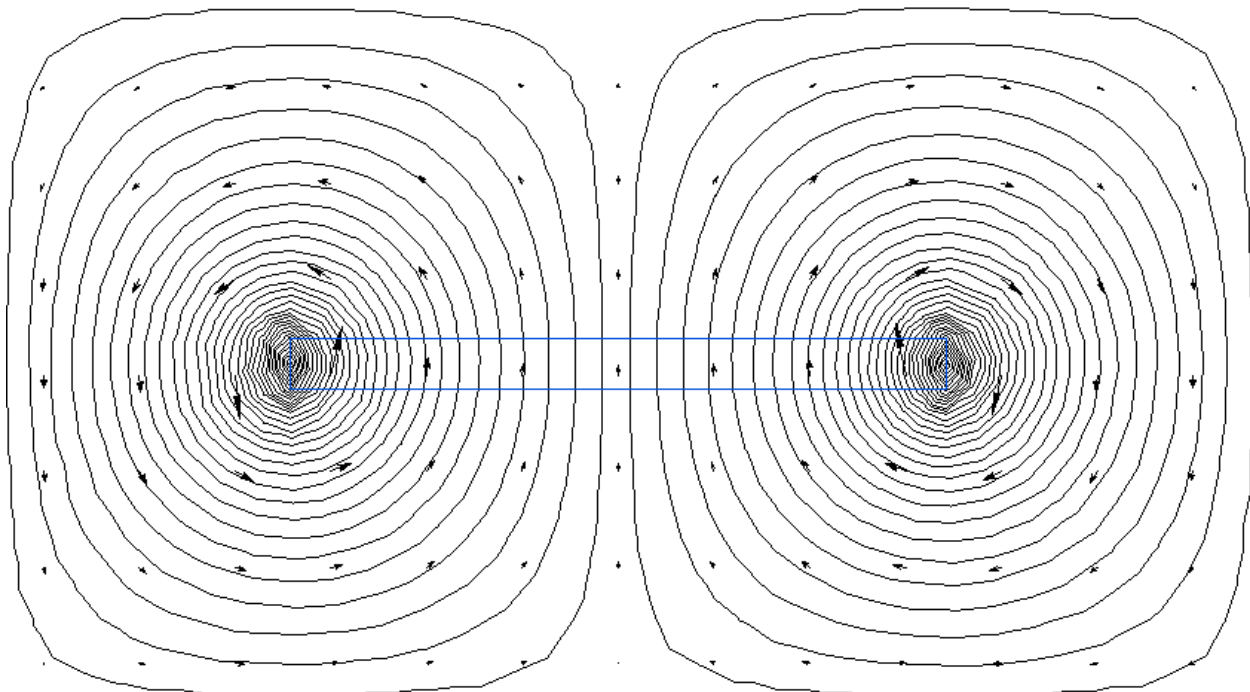


Figure 12 - Magnetic field in the longitudinal section of the magnet

In the picture of magnetic field lines, magnetic induction lines, as well as vectors of magnetic induction. The induction obtained in the construction of the model at the points indicated in Fig.10 was:

- point 1 - $B_1 = 0,224$ tesla ;
- point 2 - $B_2 = 0,192$ tesla ;
- point 3 - $B_3 = 0,035$ tesla ;
- point 4 - $B_4 = 0,192$ tesla .

For comparison with the experimental values, it is necessary to add the inductions to the points, that is, the induction value at the point 1 is added to the values at the points 2,3,4 and the results are summarized in Table 5.

Examplefordot 1-2:

$$B_{1-2} = \sqrt{B_1 + B_2} ; \tag{4.1}$$

$$B_{1-2} = \sqrt{0,224^2 + 0,192^2} = 0,295$$

Table 5

Measuringpoint	Induction, tesla
1-2	0,295
1-3	0,228
1-4	0,295

As seen from Table 5, the data obtained from different experimental no more than 1.7%, hence it can be concluded that the parameters of the model coincide with the real magnet and the parameters can now be modeled to an accuracy of the magnetic field of the magnet obtained in the electromagnetic calculation.

We produce simulation developed magnet motor, input data for simulation of the magnet obtained in the electromagnetic calculation magnet esquisse shown in Fig.13.

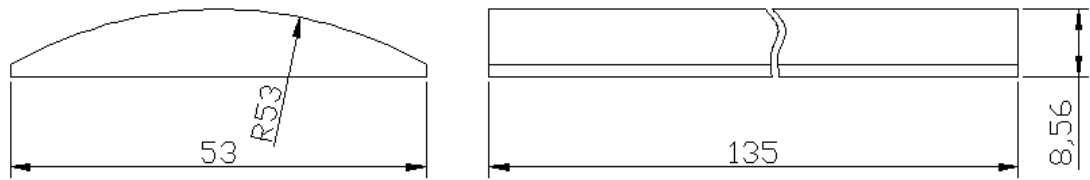


Figure 13 – The esquisse of the magnet of the engine

The magnetic field pattern obtained from the end of the magnet is shown in Fig. 14, the cross section of the magnet, in Fig. 15.

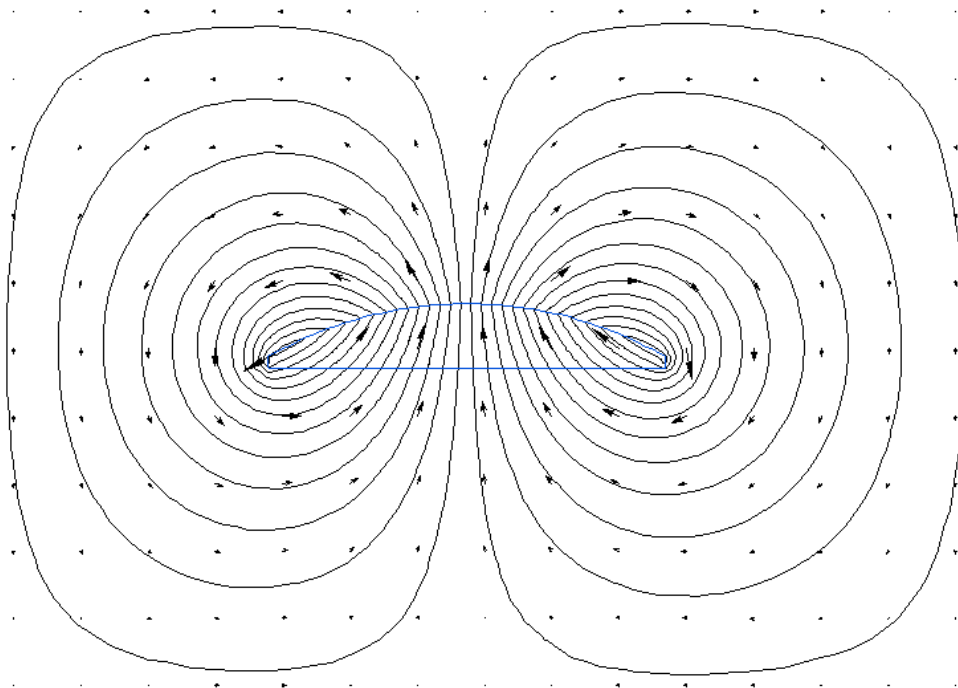


Figure 14 - The magnetic field pattern from the end of the magnet

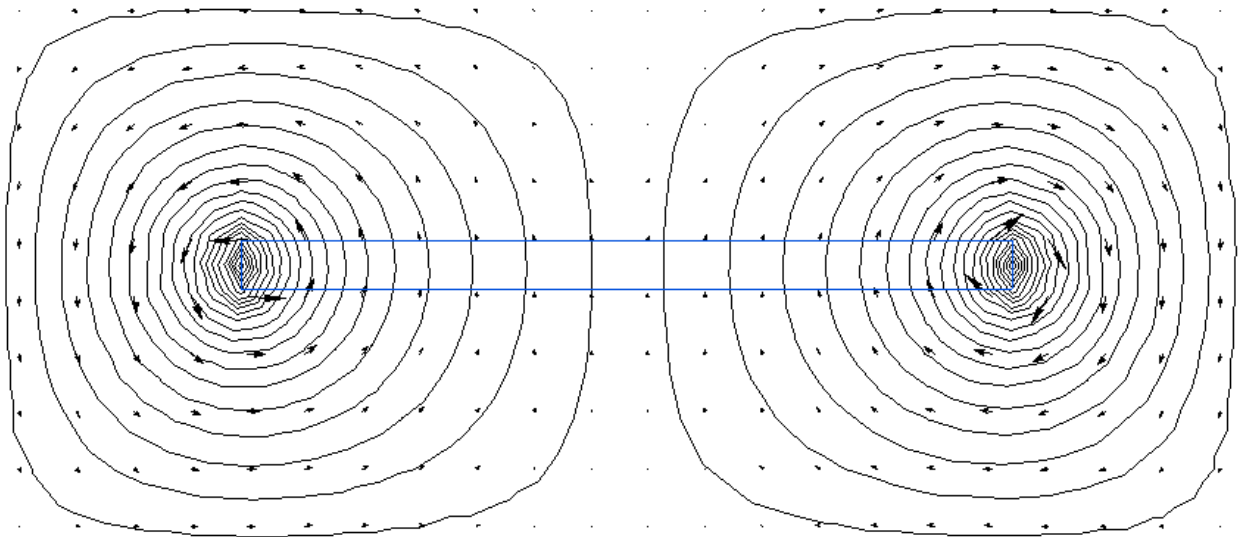


Figure 15 - Magnetic field in the longitudinal section of the magnet

Induction measurements are made in the same places as when modeling the previous magnet, the induction was:

dot 1 - $B_1 = 0,141$ tesla ,

dot 2 - $B_2 = 0,162$ tesla ,

dot 3 - $B_3 = 0,016$ tesla ,

dot 4 - $B_4 = 0,162$ tesla .

Add the obtained results by the formula (4.1) and reduce it to Table 6.

Table 6

Measurepoint	Induction, tesla
1-2	0,215
1-3	0,142
1-4	0,215

Next, we make the simulation of the rotor assembly. Fig. 16 and 17 show the results of constructing magnetic fields, as well as measurement points. The results

are summarized in Table 7. We make induction measurements in the same places of the magnet as in the previous case.

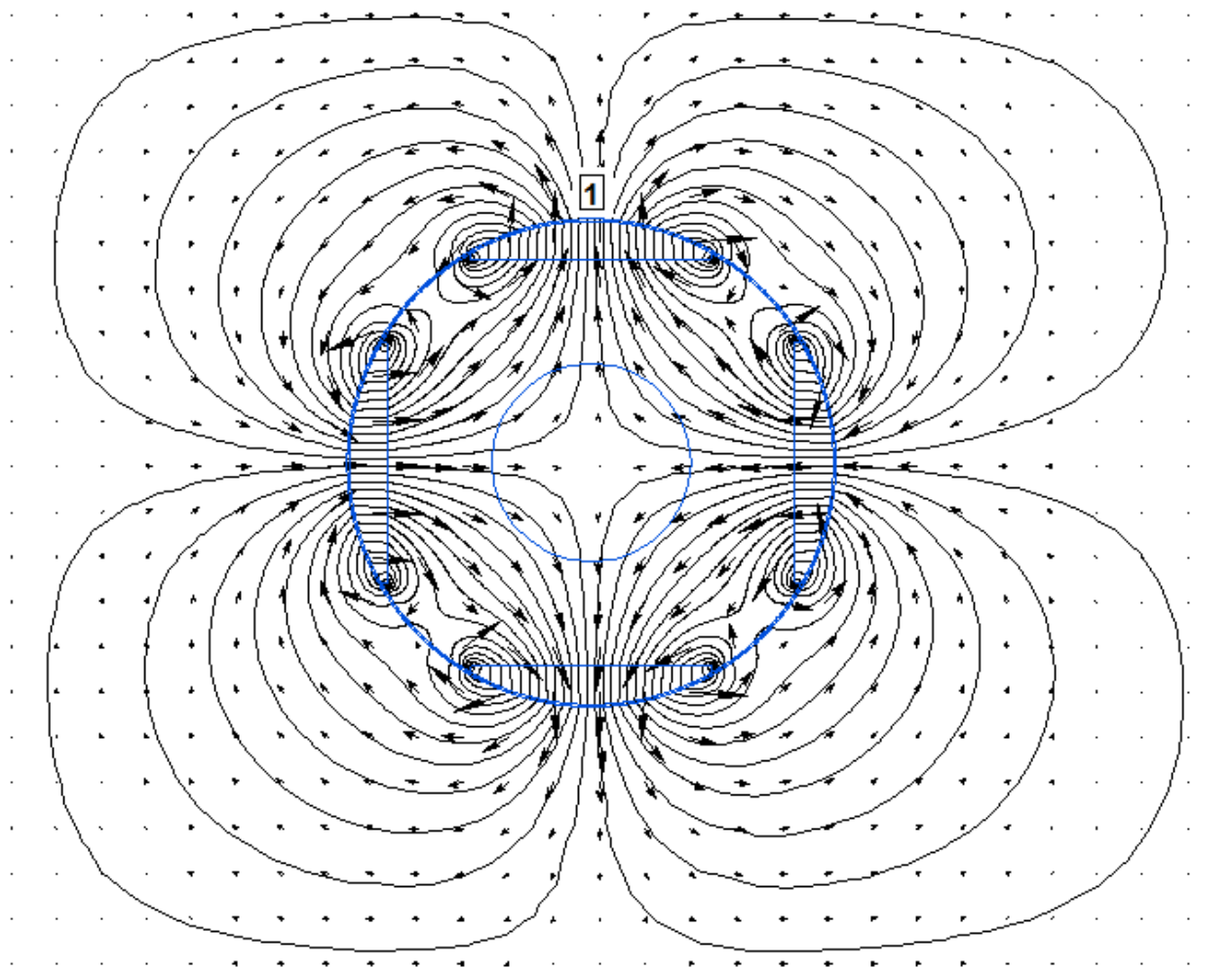


Figure 16 - Painting of the magnetic field of the section of the rotor assembly

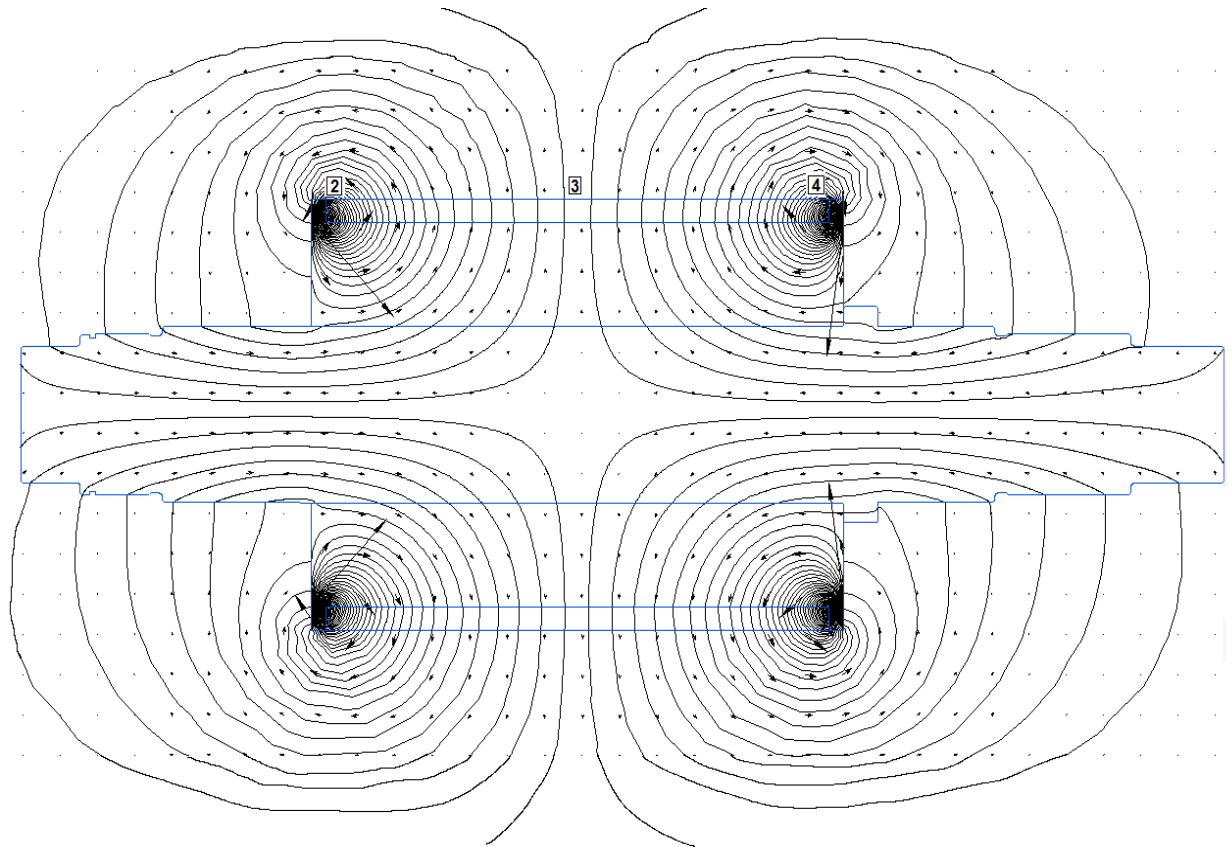


Figure 17 - The magnetic field pattern in the longitudinal section of the rotor

Inductions in points 1 to 4 were as follows:

point 1 – 0,215 tesla;

point 2 – 0,352 tesla;

point 3 – 0,027 tesla;

point 4 – 0,352 tesla.

We add the points by the formula (4.1), the results are summarized in Table 7.

Table 7

Measurepoint	Induction, tesla
1-2	0,412
1-3	0,217
1-4	0,412

Since the rotor is symmetrical, similar results are obtained when measuring other magnets.

When creating models in the program set the following parameters:

- magnetic permeability of air in relative units $\mu=1$, in absolute $\mu=1,257 \Gamma_{H/M}$;
- magnetic permeability of a magnet in relative units $\mu=1,1$, in absolute $\mu=1,382 \cdot 10^{-6} \Gamma_{H/M}$;
- coercive field strength of the projected magnet $H_c = 680000 A/M$;
- magnetization curve of the bushing made of steel grade St3.

The resulting induction values during the simulation of the magnets and the rotor assembly can be used to verify the finished samples. This is confirmed by the performed comparison of the experimental data taken from the real magnet and the data obtained during the simulation of this magnet in the program Elcut 5.1.

Conclusion

In the final qualifying work an explosion-proof permanent magnet synchronous motor with a power of 13 kW was designed, satisfying all the requirements set in the terms of reference.

In the course of the work, an electromagnetic calculation was made in which the geometric dimensions of the magnets from the neodymium-iron-boron alloy were determined, the width of the magnet was 53 mm, the length 135 mm, and the height 8.6 mm. The working characteristics were calculated and constructed, the energy indicators were determined, the efficiency factor was 0.937.

Also thermal calculation, mechanical calculation of a shaft and check of bearings was made. According to the results of thermal calculation, the average temperature rise of the stator winding above the ambient temperature was 104.9 C0, for the class of heat resistance H the maximum permissible temperature rise is 125 C0, the heating of the winding is within acceptable limits. According to the

results of mechanical calculation it is determined that the critical speed of the shaft is many times higher than the rated frequency. The shaft satisfies the condition of strength and rigidity. Checking the bearings showed that the bearings satisfy the condition of dynamic load-carrying capacity.

When simulating the valve motor magnet, the technique of input control of the magnets parameters, as well as the rotors in the assembly, was considered on the basis of the data obtained during modeling in the Elcut program. Data obtained from Elcut have been confirmed practically.

In the economic part, the calculation of the prime cost of the engine was made, its price and profitability were established, a break-even schedule was constructed, and a critical output program was determined. The critical program of the issue was 6289 units, the financial stability factor, which means that the financial position of the enterprise producing these engines is stable, as the planned volume of production at the enterprise is more than the critical volume of production.

In the safety and environmental aspects of the project, issues of analysis of hazardous and harmful factors, safety, industrial sanitation, as well as environmental issues were raised.