

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

Институт - Энергетический
Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Кафедра - Электротехнических комплексов и материалов
Профиль подготовки – Электрические и электронные аппараты

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Анализ технических характеристик гистерезисной муфты
УДК 621.825:621.318.013

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г2Г	Колтунова Екатерина Александровна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сипайлова Надежда Юрьевна	Кандидат технических наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Трофимова Маргарита Николаевна	Доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Невский Егор Сергеевич			

По разделу «Технология производства электрических аппаратов»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Баранов Павел Рудольфович	Кандидат технических наук, доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой ЭКМ	Гарганеев Александр Георгиевич	Доктор технических наук, профессор		

Томск – 2016 г.

Планируемые результаты обучения по направлению

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа электрических устройств, объектов и систем.
P2	Уметь формулировать задачи в области электроэнергетики и электротехники, анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов
P3	Уметь проектировать электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты.
P4	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники, интерпретировать данные и делать выводы.
P5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Иметь практические знания принципов и технологий электроэнергетической и электротехнической отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области электроэнергетики и электротехники
P8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях электроэнергетики и электротехники.
P9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области электроэнергетики и электротехники
P10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
P11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области электроэнергетики и электротехники с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
P12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области электроэнергетики и электротехники.

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

Институт Энергетический
Направление подготовки (специальность) 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
(Электрические и электронные аппараты)
Кафедра Электротехнические комплексы и материалы

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) _____ (Дата) Гарганеев А.Г.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
5Г2Г	Колтуновой Екатерине Александровне

Тема работы:

Анализ технических характеристик гистерезисной муфты	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№343/с от 25.01.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2016
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(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.).</i>	Объект исследования – магнитно-гистерезисная муфта с индуктором типа «звездочка». Материал гистерезисного слоя – сплав Fe-Cr-Co. Область применения – электропривод запорной арматуры нефте- и газопроводов. Технические условия в соответствии с областью применения.
--	---

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>	1. Анализ проблем в сфере электропривода запорной арматуры 2. Анализ требований к электроприводу запорной арматуры, обзор существующих систем электроприводов. 3. Анализ конструкций магнитно-гистерезисных муфт, особенности конструкции муфты с индуктором типа «звездочка». 4. Обзор магнитно-твердых и гистерезисных материалов, используемых в магнитно-гистерезисных муфтах. 5. Разработка автоматизированной методики расчета. 6. Расчет и анализ параметров и технических характеристик.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Чертеж общего вида магнитно-гистерезисной муфты.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Трофимова Маргарита Николаевна
«Социальная ответственность»	Невский Егор Сергеевич
«Технология производства электрических аппаратов»	Баранов Павел Рудольфович

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	07.01.2016
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сипайлова Надежда Юрьевна	Кандидат технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г2Г	Колтунова Екатерина Александровна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5Г2Г	Колтуновой Екатерине Александровне

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль « <u>Электрические и электронные аппараты</u> »

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих.</i>	Прейскуранты, расчетные цены и др
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов»
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные страховые фонды – 27,1 %
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Потенциальные потребители результатов исследования. Расчет конкурентоспособности технических решений. SWOT-анализ.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Расчет длительности и стоимости работы.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Расчет интегральных показателей.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. Альтернативы проведения НИ 4. График проведения и бюджет НИ 5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	12.02.2016
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Трофимова Маргарита Николаевна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г2Г	Колтунова Екатерина Александровна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5Г2Г	Колтуновой Екатерине Александровне

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электрические и электронные аппараты»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения: – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)	Практическое применение исследований ВКР связано с запорной арматурой нефте- и газопроводов в составе электропривода. Рабочей зоной является наземный участок трубопровода, где обслуживающий персонал находится временно. Вредные факторы: -шум и вибрация; -электромагнитное излучение. Опасные факторы: -механически опасные факторы; -поражение электрическим током; -пожаро- и взрывоопасные факторы; -термически опасные факторы. Чрезвычайные ситуации: Пробой нефте- или газопровода, отказ работы задвижки.
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	1)ГОСТ 12.2.003-74 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация факторов». 2)ГОСТ 12.2.007.9-93. «Безопасность электротермического оборудования. часть 1. общие требования; 3)ГОСТ 12.2.007.0-75 «Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности» 4)ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. «Пожарная безопасность. общие требования (с изменением п 1)»;

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды.	Муфта не является источником шума, для предотвращения вибраций необходимо производить сборку в соответствии с документацией. Влияние электромагнитного поля слабое, средств защиты не требуется.
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды.	Муфта механически безопасна, необходим периодический осмотр системы. Электрическая безопасность обеспечивается заземлением кожуха, так как в конструкции нет электрических обмоток. Исполнение кожуха с высокой степенью защиты отвечает требованиям пожаро- и взрывобезопасности.

3. Охрана окружающей среды: – защита селитебной зоны; – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы).	Не требуется селитебной зоны. Выбросы в атмосферу, сбросы в гидросферу, отходы в литосферу отсутствуют.
4. Защита в чрезвычайных ситуациях: – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС.	Возможен пробой нефте- или газопровода или отказ работы задвижки. Мерами предупреждения являются контрольные испытания при производстве арматуры, своевременный осмотр, плано-предупредительные ремонты.
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	– специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
Перечень графического материала:	
При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)	Отсутствуют.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	18.02.2016г
---	-------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры	Невский Егор Сергеевич			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г2Г	Колтунова Екатерина Александровна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «Технология производства электрических аппаратов»

Студенту:

Группа	ФИО
5Г2Г	Колтуновой Екатерине Александровне

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электрические и электронные аппараты»

Исходные данные к разделу «Технология производства электрических аппаратов. Технологический процесс общей сборки гистерезисной муфты с индуктором типа “звездочка”» :

- | | |
|---|----------|
| 1. Сборочный чертеж магнитно-гистерезисной муфты с индуктором типа «звездочка». | 7500 шт. |
| 2. Годовая программа выпуска. | |

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

- | | |
|---|---|
| 1. Анализ конструкции магнитно-гистерезисной муфты на технологичность. | 4. Составить схему сборки магнитно-гистерезисной муфты. |
| 2. Выбрать оборудование, приспособления для сборки и испытаниям магнитно-гистерезисной муфты. | 5. Разработать маршрутную квитанцию сборки магнитно-гистерезисной муфты. |
| 3. Определить нормы времени на операции и оборудования. | 6. Построить график загрузки оборудования для обеспечения заданной программы. |

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

- Комплект маршрутных карт и карты эскизов (в приложении)
- График загрузки оборудования
- Схема сборки электрического аппарата

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	08.02.2016
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Баранов Павел Рудольфович			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г2Г	Колтунова Екатерина Александровна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 101 с., 20 рис., 22 табл., 35 источников, 5 приложений.

Ключевые слова: магнитно-гистерезисная муфта, электропривод, запорная арматура, клиновая задвижка.

Объектом исследования является магнитно-гистерезисная муфта.

Цель работы - анализ технических характеристик магнитно-гистерезисной муфты типа «звездочка» для улучшения системы регулирования запорной арматуры.

В процессе исследования рассматривались требования к электроприводам запорной арматуры, были проанализированы технические характеристики магнитно-гистерезисной муфты.

В результате исследования разработана автоматизированная методика расчета параметров магнитно-гистерезисной муфты, определены технические характеристики конструкции для диапазона моментов существующих электродвигателей.

Область применения – электропривод запорной арматуры.

Содержание

1 Введение	11
2 Обзор электроприводов для запорной арматуры	16
3 Магнитно-гистерезисные муфты	19
3.1 Назначение и области применения	19
3.2 Конструкции	21
3.3 Активные материалы	24
4 Расчет параметров магнитно-гистерезисной муфты	28
4.1 Параметры материалов и коэффициенты использования	29
4.2 Определение геометрии гистерезисной муфты	31
4.2.1 Основное расчетное уравнение	31
4.2.2 Геометрия индуктора	33
4.2.3 Геометрия гистерезисного слоя	34
4.4 Уточнение коэффициентов использования материалов	40
4.4.1 Коэффициент использования постоянного магнита	40
4.4.2 Коэффициент использования гистерезисного материала	41
4.5 Поверочный расчет	42
5 Анализ технических характеристик	44
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	50
6.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований	50
6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	50
6.1.2 Анализ конкурентных технических решений	52
6.1.3 SWOT-анализ	54
6.2 Определение возможных альтернатив проведение научных исследований	54
6.3 Планирование научно-исследовательских работ	57
6.3.1 Структура работ в рамках научного исследования	57
6.3.2 Бюджет научного исследования	59

6.3.3 Бюджет научного исследования	61
6.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	66
7 Социальная ответственность	70
7.1 Техногенная безопасность	70
7.1.1 Вредные факторы производственной среды	70
7.1.2 Опасные факторы производственной среды	72
7.2 Региональная безопасность	76
7.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	70
8 Технология производства электрических аппаратов	78
8.1 Анализ конструкции магнитно-гистерезисной муфты на технологичность	78
8.2 Составление схемы сборки и маршрутной технологии	80
8.3 Выбор оборудования	81
8.4 Расчет норм времени	83
8.5 Расчет количества оборудования	85
9 Заключение	87
Литература	89
Список публикаций	93
Приложение А. ФЮРА.303580.002 Схема сборки гистерезисной муфты	94
Приложение Б. ФЮРА.303580.003 График загрузки оборудования	95
Приложение В. ФЮРА.303580.004 Схема замещения магнитной цепи	96
Приложение Г. ФЮРА.303580.001 Гистерезисная муфта. Сборочный чертеж	97
Приложение Д. Комплект маршрутной документации	98

1 Введение

В настоящее время большой интерес со стороны конструкторских групп и разработчиков вызывает применение магнито-твердых материалов в проектировании электрических машин и аппаратов. Ввиду развития технологии производства и появления новых материалов с высокими энергетическими характеристиками приобретает актуальность ряд решений, имевших ранее довольно узкую специализацию. В частности, новый вектор развития могут получить и магнитно-гистерезисные муфты для трубопроводной арматуры.

Трубопроводную арматуру принято классифицировать по функциональному назначению на несколько классов: запорную, служащую для перекрытия, регулируемую, предназначенную для регулирования состояния среды, распределительную и т.д. Запорная арматура является наиболее применяемым классом, так как одним из методов транспортировки сред является последовательная перекачка, что требует наличие задвижек в большом количестве.

Арматуру классифицируют в зависимости от конструкции привода затвора. Основное разделение по конструкциям происходит на вентили, задвижки, клапаны и краны. Распространенным типом являются задвижки, вследствие ряда достоинств, таких как простота конструкции, малые габариты и малое гидравлическое сопротивление. Недостатком является сильное трение, сказывающееся на быстром износе деталей, и на времени открытия и закрытия, что следует учитывать при проектировании системы управления.

Задвижки различаются в конструкции запорного органа на два основных класса: клиновые и параллельные. Параллельные задвижки используются тогда, когда не требуется полного герметичного перекрытия и среда может содержать примеси. Клиновая задвижка состоит из клинового затвора и уплотнительных поверхностей, расположенных к друг другу под углом. При этом требования к параметрам эксплуатации клиновых задвижек пе-

рекрывают требования к задвижкам всех остальных типов [21]. В связи с этим в работе будет рассматриваться задвижка клинового типа. Показателем качества всей системы является герметичность, которая препятствует прохождению среды в закрытом состоянии и обеспечивается соединением поверхностей клина и уплотнительными кольцами корпуса.

К процессу закрытия и открытия арматуры предъявляются определенные требования, нарушение которых может привести к некорректному функционированию объекта, и, в конечном итоге, к отказу всей системы в целом. Для надежной и длительной работы арматуры необходимо соблюдать требования, предъявляемые к приводам:

1. Величина момента, создаваемая приводом, не должна превышать пределов, заданных производителем задвижки, чтобы не происходила деформация внутренних поверхностей с дальнейшей потерей герметичности. Но при этом требуется соблюдать узкий предписываемый диапазон значений, не допуская образования щелей между задвижкой и трубопроводом. Идеальным результатом является мягкая механическая характеристика, представленная на рисунке 1, для обеспечения максимальной производительности и ограничением по моменту и скорости.

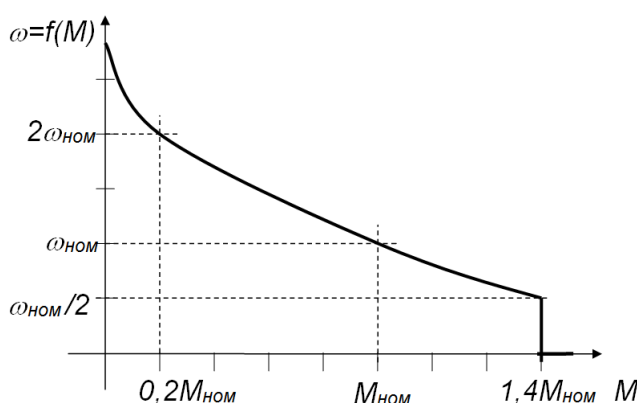


Рисунок 1 — Желаемая механическая характеристика электропривода

2. Открывание и закрывание затвора должно производиться быстро, с постоянной скоростью, но без возникновения гидроударов.

3. Привод должен быть экономичным, а значит энергетически эффективным. Для оценки используется параметр КПД.
4. Выполнение требований по взрывозащите, пожаробезопасности, и технике безопасности, по стойкости к различного вида механическим и температурным воздействиям.

Разработки в области электропривода запорной арматуры ведутся давно, при этом основной целью является уменьшение потребления энергии, увеличение производительности и создание быстрых, адаптивных и оптимальных режимов работы. В состав электропривода входят как правило, электродвигатель, блок управления и редуктор. Подавляющее большинство исследований проводятся в области управления асинхронными двигателями, являющимися одними из самых распространенных, например работы по микропроцессорному управлению [16, 17]. Решением является спроектированная система управления электродвигателем с учетом особенностей работы (ударный момент, работа на упор и т. д), которая позволяет включать некоторые индивидуальные требования от заказчика. Преимуществом является использованием одного процессора для выполнения ряда задач, саморегулирование при изменении момента нагрузки, исключение затяжных переходных процессов, реагирование при возникновении аварийных ситуаций. Недостатком являются ограничения по эксплуатации полупроводниковых элементов.

Применение другого типа двигателей, например, вентильных двигателей с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов Nd-Fe-B в настоящее время являются перспективными исследованиями [21]. Так, данный тип двигателя обладает конструктивными и эксплуатационными преимуществами, такими как отсутствие скользящих электрических контактов по сравнению с двигателями постоянного тока, большая перегрузочная способность, высокие энергетические показатели. Ряд работ направлен на создание интеллектуальных систем для вентильных двигателей [32, 33, 14]. Недостатком является общая стоимость комплекса из-за дорогих материалов

для изготовления и технологий, а также повышенная сложность управления двигателем.

Кроме замены на синхронный вентильный электропривод, возможен вариант с высокоскоростным синхронно-гистерезисным двигателем, так как достоинствами являются наличие пускового момента и плавный вход в синхронизм, независимость частоты вращения ротора от напряжения в сети и другие. Но применение такого типа двигателя в запорной арматуре крайне не развито, а стоимость соизмерима со стоимостью вентильного двигателя.

Для создания необходимых механических характеристик возможно применить магнитно-гистерезисную муфту между двигателем и редуктором для исключения сложных систем управления приводом. Магнитно-гистерезисная муфта способна осуществлять передачу постоянного момента независимо от скорости вращения ведущего вала — в случае достижения максимального момента муфта остановится и не деформирует внутренние поверхности задвижки. Развитие гистерезисных материалов расширяет перспективы применения муфт в более мощных по требуемому моменту системах. Возможность упрощения системы электропривода запорной арматуры является актуальностью данной темы, определяет цели и задачи исследования.

Целью работы является анализ технических характеристик магнитно-гистерезисной муфты типа «звездочка» для улучшения системы регулирования запорной арматуры.

Для реализации данной цели необходимо было решить ряд задач:

1. Рассмотреть требования, предъявляемые к электроприводам запорной арматуры.
2. Выполнить обзор существующих материалов для изготовления гистерезисной муфты.
3. Выполнить автоматизацию методики расчета параметров гистерезисной муфты.
4. Проанализировать технические характеристики, которые возможно по-

лучить для определения оптимального варианта параметров, удовлетворяющих требованиям к запорной арматуре.

Объектом исследования является магнитно-гистерезисная муфта.

Предметом исследования становятся технические характеристики и показатели муфты.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработана автоматизированная методика расчета параметров магнитно-гистерезисной муфты с индуктором типа «звездочка».
2. Определены технические характеристики конструкции для диапазона моментов существующих электродвигателей.

2 Обзор электроприводов для запорной арматуры

Производством запорной арматуры занимаются многие российские и зарубежные предприятия. Предприятия Томской области — «Элиси», «ТЭК», «СибМаш», «Томзэл» занимаются выпуском электроприводов для запорной арматуры. «Уфимское приборостроительное производственное объединение» выпускает исполнительные механизмы «ЭВИМ» для эксплуатации во взрывоопасных зонах. Климатическое исполнение УХЛ 1 по ГОСТ 15150-69 (при этом верхнее значение температуры окружающей среды $+50^{\circ}\text{C}$, нижнее — 50°C или -60°C в зависимости от исполнения электропривода) [29].

Компания AUMA (Германия) использует как трехфазные двигатели переменного тока, так и однофазные, что встречается достаточно редко. Питающее напряжение может быть для трехфазных двигателей от 220 до 500 В. При этом некоторые исполнения выдерживают температуру до $+120^{\circ}\text{C}$.

Характеристики электроприводов различных производителей представлены в таблице 1.

Для перемещения затвора задвижки запорной арматуры из открытого положения в закрытое (рисунок 2 — точки L1–L4) необходимо создать усилие трогания, которое способно сдвинуть шток из начального положения. Значение усилия может меняться из-за различных факторов эксплуатации (сухое трение, ржавчина и другие). При нормальных условиях отрыв происходит сразу, точки L1–L2 совпадают. После срыва начинается перемещение штока (L2–L3), при подходе к крайнему положению (L4) «Закрыто» усилие увеличивается, что обусловлено посадкой клина в седло, подразумевающую уплотнение с целью достижения заданного уровня герметичности.

Характерные точки, обозначенные на рисунке 2:

$F_{\text{макс.доп.}}$ — максимально допустимое усилие, при котором не происходит деформация поверхностей;

Таблица 1 — Основные технические данные электроприводов

Предприятие	Электродвигатель		Тип редуктора	Диапазон температур
	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин		
АО «УППО»	0,37 ÷ 5,5	1500, 3000	червячный	-60 до +50
«АУМА»	0,025 ÷ 7,5, 15, 30, 45	750, 1500, 3000	червячный, цилиндрический	-60 до +120
«ТЭК»	0,25 ÷ 11, 45	1500, 3000	планетарный, цилиндрический	-60 до +50
«СИБМАШ»	0,55 ÷ 7,5, 30	1500, 3000	волновой	-60 до +40
«ТОМЗЭЛ»	0,55 ÷ 7,5, 50	1500, 3000	волновой	-60 до +40

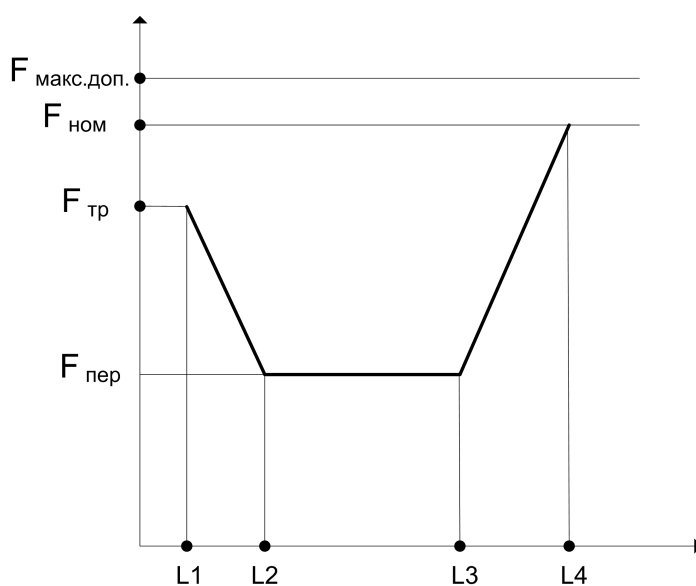


Рисунок 2 — Изменение усилия при работе задвижки

$F_{\text{ном}}$ — номинальное усилие уплотнения;

$F_{\text{тр}}$ — усилие трогания;

$F_{\text{пер}}$ — усилие перемещения.

Для реализации программно-аппаратного управления электроприводом задвижки по указанной траектории существует несколько решений. Примене-

ние транзисторного преобразователя частоты позволяет с помощью широтно-импульсной модуляции формировать напряжение питания двигателя, ограничивать момент на валу и контролировать скорость вращения и положения выходного звена электропривода. Второй вариант — тиристорный регулятор, имеет ограничения в управлении, но при этом стоимость аппаратного блока становится ниже. Такие электронные модули более чувствительны к температурным режимам, нежели остальные элементы. Все это отражается на общей стоимости, а также требует места для размещения сопутствующих преобразователей для создания нужного питания. В связи с различными назначениями задвижек трубопроводов применение преобразователей частоты на некоторых участках не целесообразно.

Самым простым способом регулирования является электромеханическая система. С помощью концевых выключателей привод выключается при достижении конечной позиции задвижки, передача сигналов осуществляется через механические приспособления — кулисы, рычаги, пружины и т.д. Такой способ управления является самым дешевым, но вследствие большого количества механизмов становится самым шумным из возможных. Использование магнитно-гистерезисной муфты в электромеханической системе позволит убрать часть механических элементов, отвечающих за сигнал превышения критического момента, что существенно упростит весь комплекс.

3 Магнитно-гистерезисные муфты

3.1 Назначение и области применения

Гистерезисные муфты относятся к классу синхронных муфт, так как осуществляют передачу вращающего момента с одного вала на другой без механической связи. Любая синхронная муфта состоит из двух частей: ведущей, связанной с ведущим валом, и ведомой, связанной с ведомым валом. Одна из частей муфты, как правило, ведомая, несет на себе гистерезисный слой, выполняемый из материала с большими удельными потерями на гистерезис, причем гистерезисный материал муфты предварительно не намагничивается, так же как роторы гистерезисных синхронных двигателей.

Другая часть гистерезисной муфты является индуктором и представляет собой многополюсную магнитную систему. Отличие гистерезисных синхронных электродвигателей от муфт состоит в том, что вращающееся магнитное поле статора (поле возбуждения) создается посредством двух- или трехфазного переменного тока в обмотках статора. Вращающееся магнитное поле возбуждения в гистерезисных муфтах создается вращающимся индуктором, выполненным в виде явно-выраженных полюсов. Гистерезисные муфты могут выполняться с электромагнитным (постоянным током) и магнитным возбуждением. В последнем случае муфты называют магнитно-гистерезисными. В случае электромагнитного возбуждения ведущая часть должна иметь скользящие щеточные контакты. Это снижает надежность работы и ограничивает области применения. Так как все исполнения электроприводов запорной арматуры выполняются взрывозащищенные, применение магнитно-гистерезисных муфт более логично, поскольку они бесконтактные, просты в эксплуатации, автономны, не требуют источников электроэнергии для питания.

Все типы синхронных муфт, за исключением гистерезисных, имеют принципиальный недостаток: при достаточно высокой скорости вращения веду-

щей части муфты ее ведомая часть не может войти в синхронизм с ведущей, так как ведомая часть муфты не обладает естественным пусковым моментом. Только гистерезисные муфты обладают естественными пусковыми свойствами, что определяет весьма широкую область их применения.

В зависимости от требований гистерезисные муфты могут выполнять различные функции. Одним из распространенных случаев применения является передача вращающего момента с одного вала на другой при синхронном вращении валов без механической связи. В некоторых системах одновременно с синхронной передачей скорости вращения требуется ограничение величины передаваемого момента. Тогда муфта осуществляет функцию ограничительного устройства, предохраняющего приводной двигатель, связанный с ведущей частью муфты, от перегрузок. При этом используется свойство гистерезисных муфт сохранять неизменную величину передаваемого момента независимо от скорости вращения. В случае аварийного механического заклинивания исполнительного механизма, когда ведомая часть муфты остановлена, момент, действующий на вал, то есть приложенный к приводному двигателю, равен максимальному гистерезисному моменту муфты. Максимальный гистерезисный момент при синхронном вращении и при заторможенной ведомой части остается неизменным по величине. Если необходима данная функция муфты, максимальный момент муфты рассчитывается в соответствии с перегрузочной способностью приводного двигателя — в этом случае приводу будет обеспечена автоматическая защита от перегрузок при одновременном осуществлении синхронной передачи.

Также гистерезисные муфты возможно применить в режиме динамического торможения исполнительных двигателей с целью сокращения времени выбега. При этом ведомая часть муфты затормаживается, а ведущая часть соединяется с валом исполнительного двигателя одновременно с его отключением.

В электроприводе запорной арматуры магнитно-гистерезисная муфта

будет обеспечивать передачу вращающего момента и ограничивать максимальный момент.

3.2 Конструкции

Магнитно-гистерезисные муфты выполняются в двух основных конструктивных формах: с радиальным воздушным зазором и аксиальным воздушным зазором. Каждая из этих двух основных конструктивных форм имеет несколько схем конструктивного исполнения. Классификация приведена на рисунке 3.

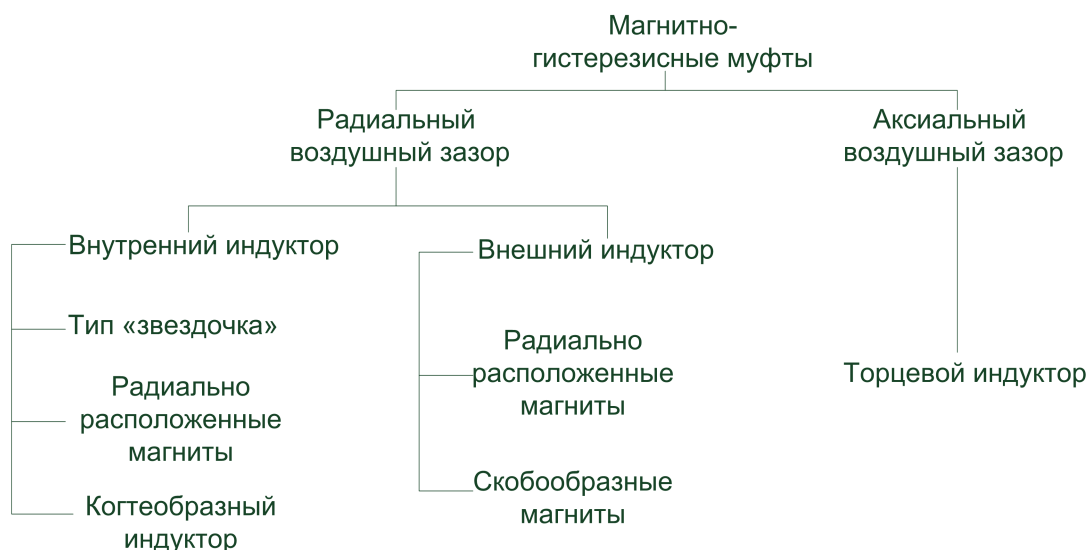


Рисунок 3 — Классификация магнитно-гистерезисных муфт

На рисунке 4 приведены несколько конструктивных схем (без деталей крепления активных частей и подшипников) магнитно-гистерезисной муфты с радиальным воздушным зазором — с внешним индуктором со скобообразными магнитами и внутренним индуктором с радиальными магнитами. Внешний индуктор состоит из двух скобообразных параллельно включенных постоянных магнитов и магнито-мягких полюсов, запрессованных в немагнитный корпус или крепление можно осуществить посредством винтов. Внутренний гистерезисный слой посажен на втулку, которая может быть

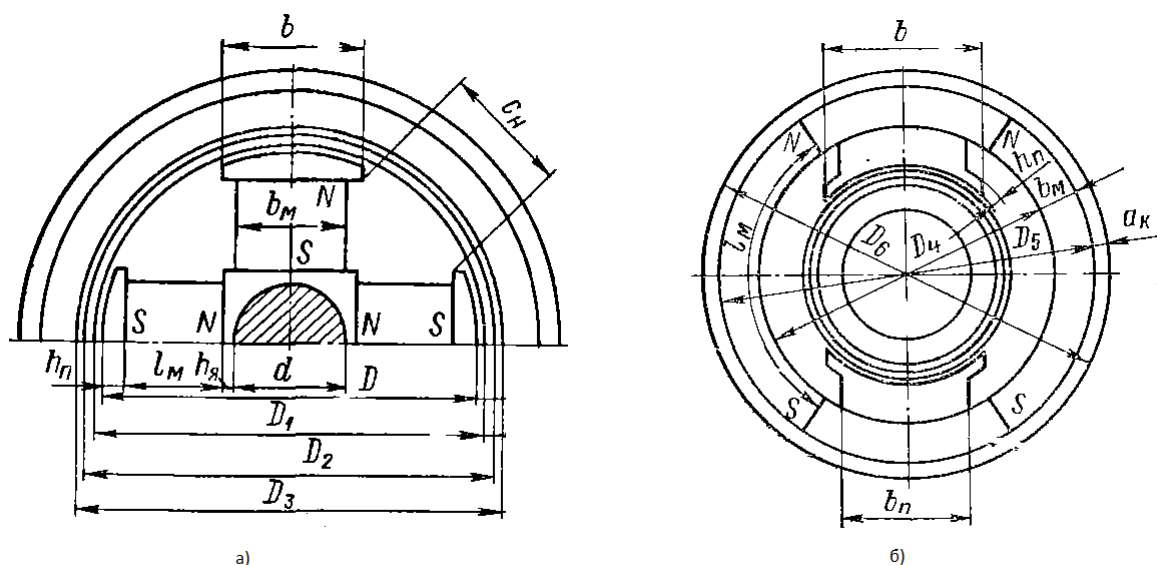


Рисунок 4 — Магнитно-гистерезисная муфта: а) с внутренним индуктором с радиальными магнитами; б) с внешним индуктором со скобообразными магнитами

выполнена как из немагнитного, так и из магнито-мягкого материала. В зависимости от типа применяемого гистерезисного материала и назначения муфты гистерезисный слой может быть шихтованным (наборным из отдельных колец) и в виде отлитой магнитно-твердого материала втулки (стакана). Для внутреннего индуктора существуют отдельные технологии закрепления призматических магнитов на магнито-мягкой втулке.

Если гистерезисный слой выполнен в виде литой втулки, то в асинхронном режиме (разгон до синхронизма) в нем возникают вихревые токи значительной величины, в результате взаимодействия которых с магнитным полем индуктора создается асинхронный момент. Величина асинхронного момента зависит от электропроводности материала гистерезисного слоя, магнитной индукции в воздушном зазоре муфты и от частоты перемагничивания гистерезисного слоя. Полный момент M реальной гистерезисной муфты в асинхронном режиме:

$$M = M_{\Gamma} + M_{a.max} \cdot s, \quad (1)$$

где $M_{a.max}$ – наибольшее значение асинхронного момента при скорости вращения индуктора $n_2 = 0$ и скольжении $s = 1$;

M_T – гистерезисный момент на ведомом валу;

s – скольжение между ведущей и ведомой частью муфты.

Однако наибольшее практическое применение для магнитно-гистерезисных муфт нашел индуктор типа «звездочка» в силу простоты конструкции и технологии изготовления, поэтому дальнейшее рассмотрение ведется относительно данного конструктивного исполнения (рисунок 5). Стоит отметить, что диаметр индуктора данного типа ограничивается окружной скоростью $V \leq 60$ м/сек для большинства сплавов.

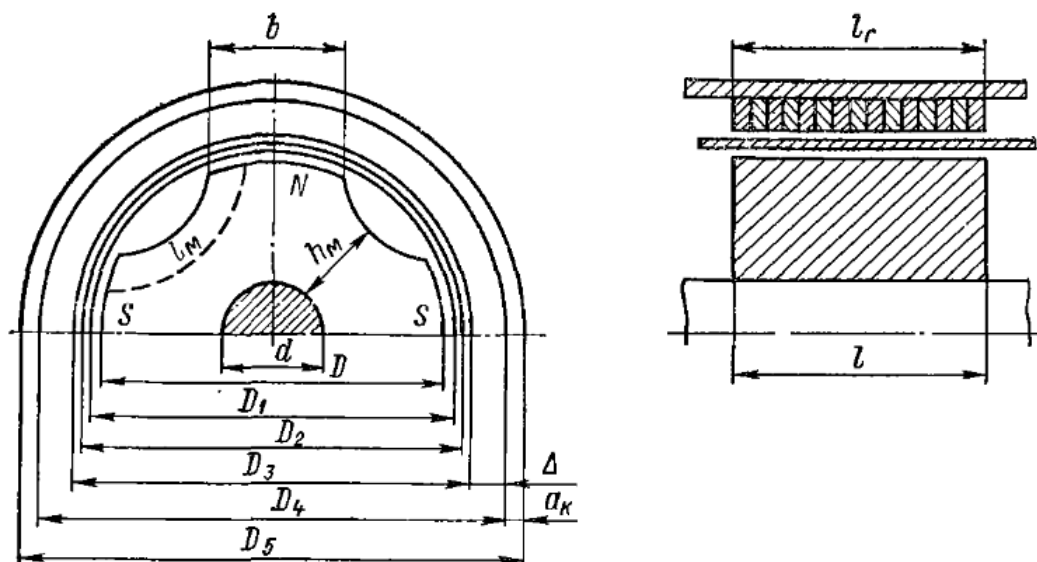


Рисунок 5 — Конструкция муфты типа «звездочка»

Основные требования, предъявляемые к магнитно-гистерезисным муфтам, следуют из требований, которые относятся к синхронной передаче.

1. Максимальный передаваемый момент должен быть с некоторым запасом больше номинального момента нагрузки на валу ведомой части муфты с таким расчетом, чтобы

$$K_H = \frac{M_T}{M_H} > 1, \quad (2)$$

где K_H – коэффициент запаса или перегрузочная способность муфты.

Величина коэффициента запаса может быть различной в зависимости от условий применения.

2. Муфты должны иметь минимальный вес и габариты при прочих равных условиях.
3. Надежная работа должна обеспечиваться в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды, давления, при любом положении в пространстве, в условиях вибраций с частотой 10-500 Гц.
4. Так как нефтепродукты пожаро- и взрывопасны, то необходимо исполнение корпуса магнитно-гистерезисной муфты с высокой степенью защиты (не ниже IP67).

3.3 Активные материалы

Все материалы, используемые для изготовления магнитно-гистерезисных муфт, делятся на активные и конструктивные. Конструктивные материалы применяются для изготовления вспомогательных узлов и деталей муфт (корпуса, щиты и т.д). Активные же материалы обеспечивают электромагнитные процессы. Для работы магнитно-гистерезисной муфты необходимо несколько типов активных материалов: магнитно-твердый для индуктора, гистерезисный — для ведомой части муфты, магнито-мягкие материалы арматуры гистерезисного слоя — обычные электротехнические стали, применяемые для изготовления электрических машин и аппаратов. При применении магнитно-мягких арматур намагничивание гистерезисного слоя — радиальное, немагнитная арматура дает тангенциальное намагничивание (рисунок 6).

От магнитных свойств напрямую зависят технические и габаритные данные проектируемой муфты. Качество материала постоянных магнитов можно определять по значению максимальной удельной магнитной энергии или по энергетическому произведению BH_{max} . Также стоит учитывать коэффициент формы кривой размагничивания γ .

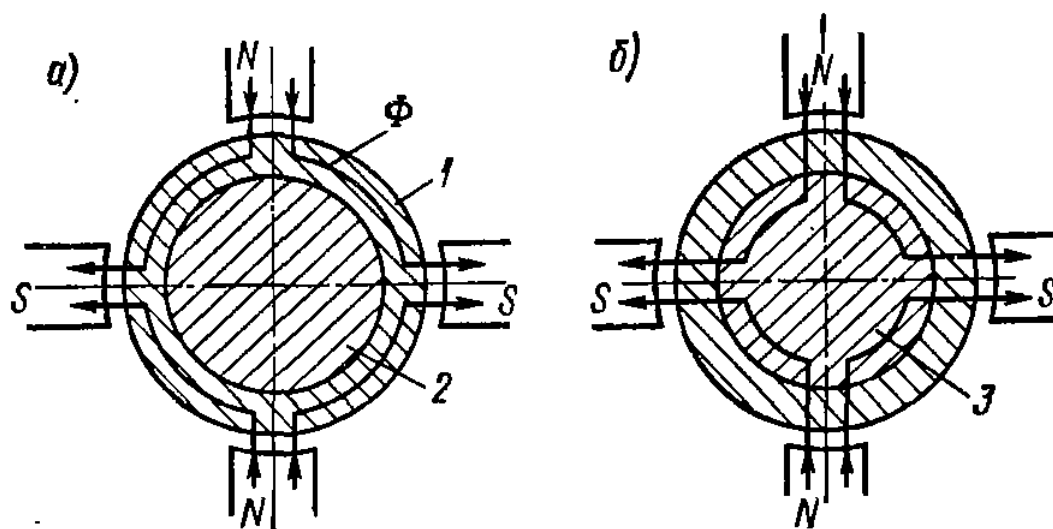


Рисунок 6 — Намагничивание гистерезисного слоя: а) тангенциальное; б) радиальное; 1 – гистерезисный слой; 2 – немагнитный корпус; 3 – магнитопроводящий корпус

Для изготовления индуктора формы «звездочка» зачастую применяется технология литья в формовочную смесь. Для этого необходимы сплавы, которые по химическому составу и магнитным характеристикам соответствуют условиям ГОСТ 25639-83 [5]. Сплавы типа альни и альнико (Al-Ni-Co) с различными легирующими присадками являются практически единственными доступными по стоимости и хорошего качества сплавами. Для индуктора типа «звездочка» следует применять только изотропные материалы для равномерности распределения энергии, что ограничивает число сплавов группы ЮНДК. Для удобства сравнения основные параметры материалов сведены в таблицу 2 [24, 19].

Одной из хороших характеристик данных сплавов является высокая термостойкость. Магниты можно использовать при температурах до 525°C (в случае порошковых магнитов Ne-Fe-B — это 200 °C, магнитов SmCo — 300 °C). Другим большим преимуществом этих магнитов является их высокая устойчивость к кислотам и растворителям.

Отличие гистерезисных сплавов от остальных деформируемых магнитно-

Таблица 2 — Параметры магнитно-твердых сплавов

Марка сплава	Магнитные свойства			
	H_c , кА/м	B_r , Тл	BH_{max} , кДж/м ³	γ
ЮНД4	40	0,5	7,2	0,36
ЮНДЧ	40	0,5 – 0,6	12-16	0,6 – 0,7
ЮНДК18	55	0,9	19,4	0,39
ЮНДК24	46,5 – 52	1,28 – 1,35	16-24	0,27 – 0,34

твердых сплавов в том, что магнитные характеристики определяются не на предельном гистерезисном цикле насыщения, а на цикле, соответствующем максимальной проницаемости. Кроме требований к магнитным свойствам сплавов учитывается и возможность механической обработки, например, горячей или холодной деформацией, обработка на металлорежущих станках и т.д. Именно деформируемые магнитно-твердые сплавы незаменимы при изготовлении цельных конструкций подобной обработкой. Для роторов гистерезисных двигателей обычно используются следующие сплавы:

1. Fe-Co-Mo, Fe-Cr-W (комол);
2. Fe-Co-V, Fe-Co-Cr-V (викаллой);
3. Fe-Cr-Co.

Гистерезисный материал характеризуют прежде всего удельные потери на гистерезис p_H , которые зависят от площади петли гистерезисного цикла. Для удобства сравнения магнитных свойств показатели сведены в таблицу 3.

Комолы — изотропны, стабильность магнитных свойств обеспечивается в пределах температур до 250 °С, у викаллой без потери свойств возможен нагрев только до 150 °С. Сплав викаллой выпускается зачастую только в виде листов, из-за анизотропной структуры гистерезисный слой возможно сделать только шихтованным, так что асинхронный момент будет крайне

Таблица 3 — Параметры гистерезисных сплавов

Марка сплава, состав	Магнитные свойства		
	$H_{г.м}, \text{ кА/м}$	$B_{г.м}, \text{ Тл}$	$p_{г} \cdot 10^{-3},$ Дж/(см ³ ·Гц)
12К12М (Fe-Co-Mo)	16-20	0,95	45
5ХМ12В(Fe-Cr-W-Mo)	10 – 13	0,8	24
52КФ(Fe-Co-V)	28 – 33,5	0,75 – 0,85	43,7 – 56,7
(Fe-Cr-Co)	62	1,05	60,5 – 83,8

мал. Прочностные и механические характеристики сплавов достаточно высоки в сравнении с магнитно-твердыми материалами для индуктора. Но сплавы типа «комол» обладают самыми низкими магнитными характеристиками, викаллой является одним из самых дорогих сплавов.

Магнитно-твердые материалы на основе Fe-Cr-Co предложены Х. Канеко в 1971 г. Данный сплав обладает сочетанием достаточно высоких магнитных свойств с прочностью, пластичностью (по сравнению со всеми группами порошковых и ЮНДК сплавов) и относительно низкой стоимостью из-за отсутствия ванадия. Для повышения магнитных свойств сплавы легируют молибденом или подвергается термомагнитной обработке с последующим отпуском.

При условии постоянных исследований по улучшению свойств данного сплава [30, 31] имеется прямая возможность конструирования магнитно-гистерезисной муфты на базе сплава Fe-Cr-Co и ЮНДК-24 для получения высокоэффективных и экономичных результатов.

4 Расчет параметров магнитно-гистерезисной муфты

Для расчета габаритных размеров магнитно-гистерезисной муфты выбраны следующие значения — номинальный момент $M = 25 \text{ Н}\cdot\text{м}$, скорость вращения $n = 3000 \text{ об/мин}$, мощность двигателя 7,5 кВт (ДАТЭК-250-03Х от компании «ТЭК»). Материалом для изготовления индуктора является ЮДНК24 (рисунок 7), для гистерезисного слоя используется сплав Fe-Cr-Co. Исходные данные находятся в таблице 4.

Таблица 4 — Исходные данные для проектирования

Напряженность гистерезисного материала $H_{г.м}$, А/м	$33,5 \cdot 10^3$
Индукция гистерезисного материала $B_{г.м}$, Тл	0,8
Удельные потери на гистерезис $p_{г\mu}$, Вт/см ³ · Гц	$56,7 \cdot 10^{-3}$
Максимальная магнитная энергия магнитного материала BH_{max} , Дж	$24 \cdot 10^3$
Коэрцитивная сила магнитного материала H_c , А/м	$52 \cdot 10^3$
Остаточная индукция магнитного материала B_r , Тл	1,35
Число пар полюсов p	2

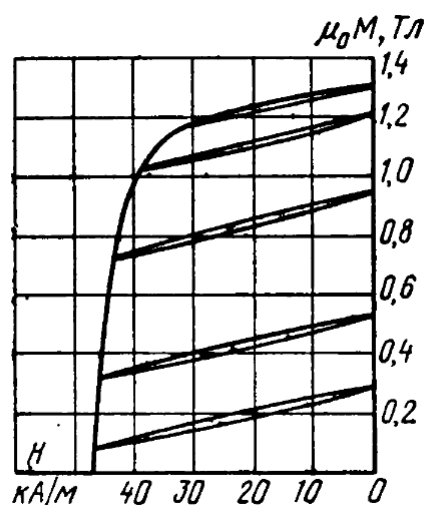


Рисунок 7 — Кривая размагничивания сплава ЮДНК 24

4.1 Параметры материалов и коэффициенты использования

Магнитные свойства сплавов для постоянных магнитов зависят от вида кривой размагничивания — часть предельной гистерезисной петли во втором квадранте, которая показывает, как изменится магнитная индукция в магните при действии на него размагничивающего фактора, например, воздушного зазора (рисунок 8). Степень выпуклости характеризует коэффициент формы кривой γ , который находится по формуле:

$$\gamma = \frac{BH_{max}}{B_r \cdot H_c} = \frac{24 \cdot 10^3}{52 \cdot 10^3 \cdot 1,35} = 0,342. \quad (3)$$

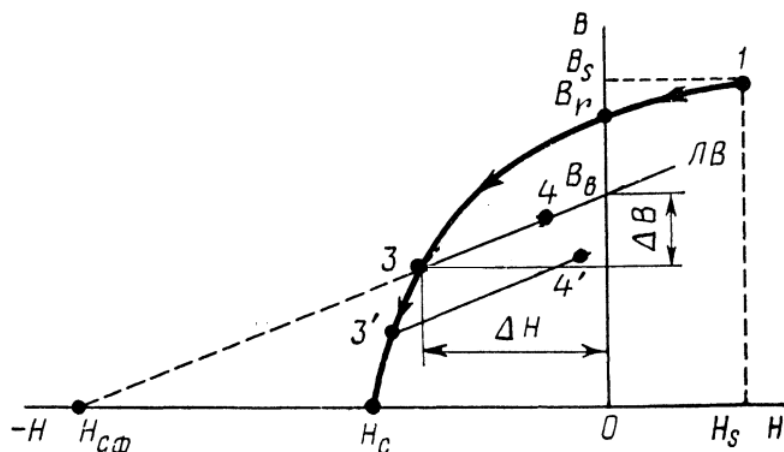


Рисунок 8 — Характерные рабочие точки магнита

Существует несколько способов сборки магнитно-гистерезисной муфты — с применением магнитных шунтов и без. Первый способ заключается в помещении в магнитный шунт («рубашку») из магнито-мягкой стали постоянного магнита (индуктора) после его намагничивания до насыщения. Тогда при работе муфты постоянный магнит будет характеризоваться только кривой размагничивания. Сборка без применения шунтов более экономична и проста. Постоянный магнит, замкнутый на гистерезисный слой через воздушный зазор, и его магнитное состояние будут характеризоваться линией магнитного возврата ЛВ (рисунок 8). То есть рабочая точка будет перемещаться по нижней ветви некоторой частной линии возврата.

Наклон линий возврата в различных точках приблизительно одинаков и характеризуется магнитной проницаемостью возврата:

$$\mu_B = \frac{\Delta B}{\Delta H}. \quad (4)$$

Можно считать, что наклон прямой возврата равен наклону касательной к кривой размагничивания, тогда:

$$\mu_B = \frac{(\sqrt{\gamma} - 1)^2 B_r}{\gamma H_c} = \frac{(\sqrt{0,34} - 1)^2}{0,34} \frac{1,35}{52 \cdot 10^3} = 1,31 \cdot 10^{-5} \text{ Гн/м}. \quad (5)$$

Относительное значение коэффициента магнитного возврата находится как:

$$\mu_B^* = \frac{\mu_B}{\mu_r} = \frac{1,31 \cdot 10^{-5}}{2,6 \cdot 10^{-5}} = 0,51, \quad (6)$$

где $\mu_r = \frac{B_r}{H_c} = \frac{1,35}{52 \cdot 10^3} = 2,6 \cdot 10^{-5}$ – проницаемость магнита, Гн/м.

Гистерезисные материалы работают не на предельном гистерезисном цикле насыщения, а на цикле, соответствующем колену кривой намагничивания, где магнитная проницаемость максимальна:

$$\mu_r = \frac{B_{г.м}}{H_{г.м}} = \frac{0,8}{33,5 \cdot 10^3} = 6,01 \cdot 10^{-5} \text{ Гн/м}. \quad (7)$$

Правильный выбор активных материалов и величин безразмерных коэффициентов в значительной степени определяет оптимальность проектирования магнитно-гистерезисной муфты. Приближенное значение коэффициента использования магнитного материала можно рассчитать как [18]:

$$\begin{aligned} K_{и.м} &= (0,25 + 0,16 \cdot \mu_B^*)\gamma + 0,05\mu_B^* = \\ &= (0,25 + 0,16 \cdot 0,51)0,34 + 0,05 \cdot 0,51 = 0,138. \end{aligned} \quad (8)$$

Коэффициент $K_{и.м}$ характеризует степень использования удельной объемной энергии постоянного магнита в зависимости от внешней магнитной проводимости по отношению к магниту магнитной цепи, состоящей из воздушного зазора, гистерезисного слоя с арматурой и путей рассеяния.

Приближенное значение коэффициента использования гистерезисного материала принимаем равным $K_{и.г} = 0,3$.

4.2 Определение геометрии гистерезисной муфты

4.2.1 Основное расчетное уравнение

Основное расчетное уравнение магнитно-гистерезисной муфты связывает главные и наиболее характерные геометрические размеры постоянного магнита и гистерезисного слоя с величиной максимального момента синхронного режима. При выводе основного расчетного уравнения асинхронный момент от вихревых токов в гистерезисном слое не учитывается, так как в случае литого гистерезисного слоя значительный асинхронный момент лишь улучшает пусковые свойства муфты. Расчет ведется по методике, описанной С.Р. Мизюриным [18].

Гистерезисный момент муфты можно представить следующим соотношением:

$$M_{\Gamma} = K_{и.г} \cdot W_{\delta\Gamma}, \quad \text{Н} \cdot \text{м}, \quad (9)$$

где $W_{\delta\Gamma} = K_{и.м} \cdot W_c$ – магнитная энергия, развиваемая постоянным магнитом в воздушном зазоре муфты в присутствии гистерезисного слоя; W_c – удельная объемная магнитная энергия.

Удельная объемная магнитная энергия постоянного магнита равна:

$$W_c = \frac{B_r \cdot H_c}{2} \cdot V_{\text{м}} \cdot 10^{-6}, \quad \text{Дж}, \quad (10)$$

где $V_{\text{м}}$ – рабочий объем постоянных магнитов, см^3 .

Подставляя выражение (10) в равенство (9), определяем момент гистерезисный:

$$M_{\Gamma} = \frac{B_r \cdot H_c}{2} \cdot V_{\text{м}} \cdot K_{и.м} \cdot K_{и.г} \cdot 10^{-6}, \quad \text{Н} \cdot \text{м}. \quad (11)$$

Тогда активный объем постоянных магнитов, необходимый для создания заданного гистерезисного момента муфты M_{Γ} , определяется соотношением:

$$V_{\text{м}} = \frac{2 \cdot M_{\Gamma} \cdot 10^6}{B_r \cdot H_c \cdot K_{и.м} \cdot K_{и.г}} = \frac{2 \cdot 27,5 \cdot 10^6}{52 \cdot 10^3 \cdot 1,35 \cdot 0,3 \cdot 0,138} = 1,89 \cdot 10^4 \text{ см}^3, \quad (12)$$

где $M_r = M \cdot 1,1 = 25 \cdot 1,1 = 27,5$ Н·м – максимальный передаваемый муфтой момент, который характеризует перегрузочную способность муфты.

Объем постоянных магнитов связан с габаритным объемом индуктора соотношением

$$V_m = V_{\text{и}} K_{\text{з.м}}, \quad \text{см}^3, \quad (13)$$

где $K_{\text{з.м}}$ – коэффициент заполнения габаритного объема индуктора магнитом.

Величина коэффициента заполнения габаритного объема индуктора магнитом прежде всего зависит от типа индуктора. Коэффициент заполнения находится по формуле:

$$K_{\text{з.м}} = 2\alpha p^{-\rho} = 2 \cdot 0,75 \cdot 2^{-0,63} = 0,97. \quad (14)$$

где $\alpha = 0,75$ – коэффициент полюсного перекрытия;

$\rho = 0,59 \div 0,64$ – показатель степени.

Отсюда габаритный объем индуктора равен:

$$V_{\text{и}} = \frac{V_m}{K_{\text{з.м}}} = \frac{1,89 \cdot 10^4}{0,97} = 1,95 \cdot 10^4 \text{ см}^3. \quad (15)$$

При этом объем индуктора можно выразить через диаметр D и осевую длину l как:

$$V_{\text{и}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot l, \quad \text{см}^3. \quad (16)$$

Введем конструктивный коэффициент $\lambda = \frac{l}{D} = 1$. Для муфт с радиальным воздушным зазором $\lambda = 0,5 \div 2,5$. Чем больше скорость вращения муфты и меньше относительная величина воздушного зазора, тем меньше должна быть осевая длина l , а следовательно, и величина конструктивного коэффициента λ . Подставляя конструктивный коэффициент λ в выражение (16), получаем, что объем индуктора:

$$V_{\text{и}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^3 \cdot \lambda, \quad \text{см}^3. \quad (17)$$

Тогда расчетная формула для определения диаметра индуктора выглядит следующим образом:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{\text{и}}}{\pi \cdot \lambda}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,95 \cdot 10^4}{\pi \cdot 1}} = 29,1 \text{ см.} \quad (18)$$

Следует также иметь в виду, что увеличение осевой длины и снижение диаметра при заданной величине гистерезисного момента приводит к снижению полярного момента инерции и повышению быстродействия муфты.

Основные геометрические размеры и объем муфты зависят от величины передаваемого момента, магнитных характеристик сплава постоянного магнита и ряда коэффициентов, которые, в свою очередь, зависят от применяемых активных материалов и конструктивной схемы муфты.

4.2.2 Геометрия индуктора

Геометрию индуктора определяют следующие величины:

1. Полусная дуга индуктора

$$b_{\text{м}} = \alpha \tau = 0,75 \cdot 22,9 = 17,2 \text{ см,} \quad (19)$$

где $\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 29,1}{2 \cdot 2} = 22,9 \text{ см}$ – полюсное деление.

2. Ширина полюса

$$b'_{\text{м}} = D \sin \frac{\alpha \pi}{2p} = 29,7 \sin \frac{0,75\pi}{2 \cdot 2} = 16,2 \text{ см.} \quad (20)$$

3. Высота ярма индуктора

$$h_{\text{а.м}} = 1,05 \frac{b_{\text{м}}}{2} = 1,05 \frac{17,2}{2} = 9 \text{ см.} \quad (21)$$

4. Диаметр отверстия под вал принимается стандартным в размере вала электродвигателя $d_{\text{в}} = 3,8 \text{ см.}$

5. Высота втулки

$$h_{\text{в.т}} = 0,03D = 0,03 \cdot 29,1 = 0,88 \text{ см.} \quad (22)$$

6. Длина средней магнитной силовой линии по пути намагничивания на один полюс

$$l_m = 0,5Dp^{-\rho} = 0,5 \cdot 29,1 \cdot 2^{-0,63} = 9,4 \text{ см.} \quad (23)$$

7. Высота полюса

$$h_m = \frac{D - 2(h_{a.m} + h_{b.t} + \frac{d_b}{2})}{2} = \frac{29,1 - 2(9 + 0,88 + \frac{3,8}{2})}{2} = 2,8 \text{ см.} \quad (24)$$

Для дальнейших расчетов необходимо определить площадь индуктора:

$$S_m = D \cdot \sin(\alpha \cdot \frac{\pi}{2p}) \cdot l = 29,1 \cdot \sin(0,75 \cdot \frac{\pi}{2 \cdot 2}) \cdot 29,1 = 472,6 \text{ см}^2. \quad (25)$$

4.2.3 Геометрия гистерезисного слоя

Исходя из заданной величины гистерезисного момента, развиваемого магнитно-гистерезисной муфтой, определенного числа пар полюсов индуктора и выбранного материала гистерезисного слоя, можно определить необходимый объем гистерезисного слоя посредством отношения:

$$V_\Gamma = \frac{2\pi \cdot M_\Gamma}{p \cdot p_\Gamma}, \text{ см}^3. \quad (26)$$

Для муфт с радиальным зазором объем гистерезисного слоя через размеры можно выразить как

$$V_\Gamma = \frac{\pi}{4}(D_{н.г}^2 - D_{вн.г}^2) \cdot l_\Gamma \cdot K_{з.п}, \text{ см}^3, \quad (27)$$

где $D_{н.г}$, $D_{вн.г}$ – наружный и внутренний диаметры гистерезисного слоя;

$l_\Gamma = (1 \div 1,05)l$ – осевая длина гистерезисного слоя, примерно равно осевой длине индуктора;

$K_{з.п}$ – коэффициент заполнения гистерезисным материалом пакета с осевой длиной l_Γ .

Для муфт с внешним гистерезисным слоем и внутренним индуктором

$$D_{вн.г} = D + 2\delta = 29,1 + 2 \cdot 0,05 = 29,3 \text{ см,} \quad (28)$$

где δ – принимаемый воздушный зазор, см.

Приравнивая выражения (26) и (27), определяем один из линейных размеров гистерезисного слоя, обеспечивающий для заданной величины гистерезисного момента объем:

$$\begin{aligned} D_{н.г} &= \sqrt{(D + 2\delta)^2 + \frac{8M_{\Gamma}}{l_{\Gamma} \cdot K_{з.п} \cdot p \cdot p_{\Gamma}}} = \\ &= \sqrt{(29,1 + 2 \cdot 0,05)^2 + \frac{8 \cdot 27,5}{29,1 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0,057}} = 30,4 \text{ см}, \end{aligned} \quad (29)$$

Тогда толщина гистерезисного слоя

$$\Delta_{\Gamma} = 0,5(D_{н.г} - D_{вн.г}) = 0,5(30,4 - 29,3) = 0,55 \text{ см}. \quad (30)$$

При этом толщина гистерезисного слоя Δ_{Γ} не должна превосходить $\Delta_{\Gamma max}$, так как на практике с достаточной степенью точности можно получить наибольшее значение толщины гистерезисного слоя, при котором весь объем гистерезисного слоя переманчивается по одному и тому же гистерезисному циклу. Для этого должно соблюдаться условие:

$$\Delta_{\Gamma max} \leq 0,5 \cdot D_{вн.г}(\sqrt[3]{1,55} - 1) = 3,6 \text{ см}. \quad (31)$$

4.3 Расчет проводимостей

Значения магнитных проводимостей по существу определяют оптимальность проектирования при заданных магнитном сплаве магнита и гистерезисном материале, то есть максимальную степень использования магнитной энергии магнитного сплава.

В соответствии с картиной распределения магнитных потоков в магнитно-гистерезисной муфте можно составить эквивалентную схему замещения магнитной цепи муфты (рисунок 9).

Тогда магнитная цепь муфты характеризуется:

1. магнитной проводимостью воздушного зазора Λ_{δ} ;

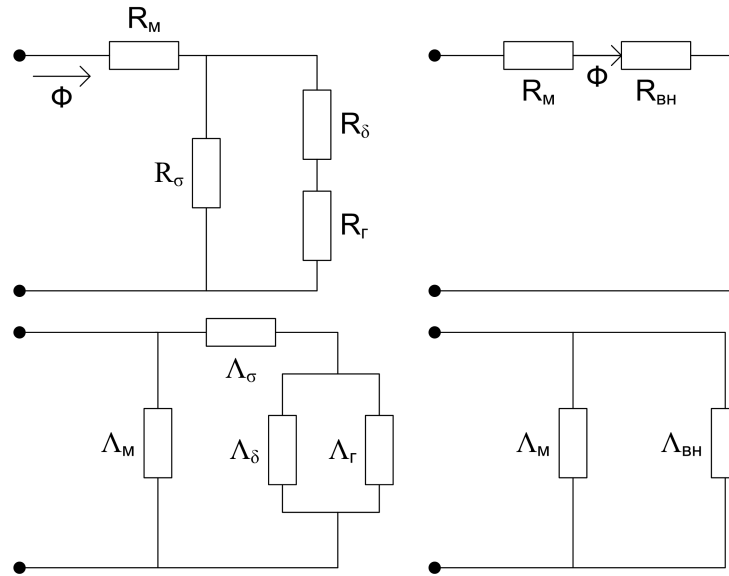


Рисунок 9 — Схема замещения магнитной цепи магнитно-гистерезисной муфты

2. магнитной проводимостью гистерезисного слоя Λ_Γ ;
3. полезной, внешней по отношению к магниту магнитной проводимостью воздушного зазора и гистерезисного слоя:

$$\Lambda_{\delta\Gamma} = \frac{\Lambda_\delta \cdot \Lambda_\Gamma}{\Lambda_\delta + \Lambda_\Gamma} \quad \text{Гн.} \quad (32)$$

4. магнитной проводимостью путей рассеяния для магнитного потока магнита Λ_σ ;
5. магнитной проводимостью свободного состояния $\Lambda_{св}$.

Магнитная проводимость радиального воздушного зазора на один полюс рассчитывается по формуле:

$$\Lambda_\delta = 0,4\pi \frac{\alpha_i \cdot \tau \cdot l \cdot 10^{-8}}{\delta \cdot K_s} = 0,4\pi \frac{0,76 \cdot 22,9 \cdot 29,1 \cdot 10^{-8}}{0,05 \cdot 1,05} = 1,21 \cdot 10^{-4} \quad \text{Гн}, \quad (33)$$

где $K_s = 1,0 \div 1,1$ – коэффициент магнитной цепи, учитывающий падение магнитного потенциала в магнито-мягкой арматуре гистерезисного слоя при радиальном намагничивании;

α_i – расчетный коэффициент полюсного перекрытия:

$$\alpha_i = \alpha(1 + K); K = \frac{4}{\alpha \frac{\tau}{\delta} + \frac{6\alpha}{1 - \alpha}}. \quad (34)$$

Магнитная проводимость гистерезисного слоя зависит как от типа муфты, так и от вида намагничивания гистерезисного слоя. При радиальном намагничивании:

$$\Lambda_{\Gamma} = \mu_{\Gamma} \frac{\alpha_i \cdot \tau_{\Gamma, \text{ср}} \cdot l_{\Gamma} \cdot 10^{-2}}{\Delta_{\Gamma}} = 2,4 \cdot 10^{-5} \frac{0,76 \cdot 22,9 \cdot 29,1 \cdot 10^{-2}}{0,55} = 2,22 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}, \quad (35)$$

где $\tau_{\Gamma, \text{ср}}$ – полюсное деление по среднему диаметру гистерезисного слоя:

$$\tau_{\Gamma, \text{ср}} = \frac{\pi}{4p} (D_{\text{н.г}} + D_{\text{вн.г}}) = \frac{\pi}{4 \cdot 2} (30,4 + 29,3) = 24,6 \text{ см}. \quad (36)$$

Полезная магнитная проводимость воздушного зазора и гистерезисного слоя, внешняя по отношению к магниту, находится по выражению (32):

$$\Lambda_{\delta\Gamma} = \frac{\Lambda_{\delta} \cdot \Lambda_{\Gamma}}{\Lambda_{\delta} + \Lambda_{\Gamma}} = \frac{1,21 \cdot 10^{-4} \cdot 2,22 \cdot 10^{-4}}{2,22 \cdot 10^{-4} + 1,21 \cdot 10^{-4}} = 7,8 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}.$$

Магнитная проводимость рассеяния (рисунок 10) между двумя полюсами в свободном состоянии (без арматуры) определяется как [1]:

$$\Lambda_{\text{св}} = 2\Lambda_{\sigma 1} + 4\Lambda_{\sigma 2} + 2\Lambda_{\sigma 3} + 4\Lambda_{\sigma 6} + 4\Lambda_{\sigma 7} + 4\Lambda_{\sigma 8}, \quad \text{Гн}, \quad (37)$$

где $\Lambda_{\sigma 1}$ – проводимость между боковыми сторонами полюсов магнита;

$\Lambda_{\sigma 2}$ – между торцевыми сторонами магнита;

$\Lambda_{\sigma 3}$ – между радиальными поверхностями полюса;

$\Lambda_{\sigma 6}$ – между углами полюсов;

$\Lambda_{\sigma 7}$ – между полюсными дугами;

$\Lambda_{\sigma 8}$ – между торцевыми ребрами полюсов.

Проводимость между боковыми поверхностями можно найти как

$$\Lambda_{\sigma 1} = 0,4\pi \cdot 10^{-8} \cdot \frac{l}{2 \cdot \alpha_1} = 0,4\pi \cdot 10^{-8} \cdot \frac{29,1}{2 \cdot 0,25} = 7,3 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}, \quad (38)$$

где $\alpha_1 = \arctg \frac{\tau - b_{\text{м}}}{2 \cdot (D - 2h_{\text{а.м}})}$ – угол между поверхностью полюса и биссектрисой угла между двумя полюсами.

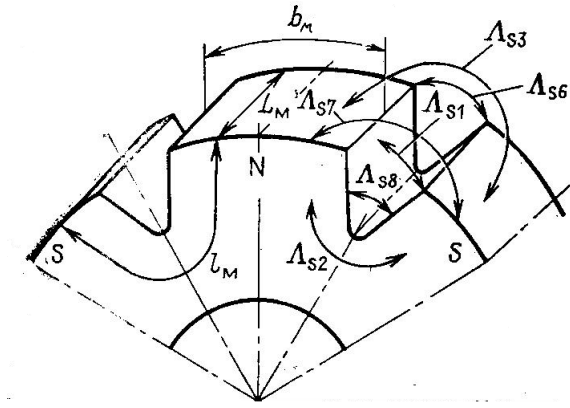


Рисунок 10 — К расчету проводимостей рассеяния магнита звездочка

Проводимость между торцевыми сторонами магнита:

$$\Lambda_{\sigma 2} = 0,4\pi \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\sin \alpha_1}{2\pi} \cdot \left[\frac{b_m}{2}(1 + 0,5\cos \alpha_1) + h_m \sin(\alpha_1) \right] = \quad (39)$$

$$= 0,4\pi \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\sin 0,25}{2\pi} \cdot \left[\frac{17,2}{2}(1 + 0,5\cos(0,25) + 2,8\sin(0,25)) \right] = 6,7 \cdot 10^{-9} \text{ Гн.}$$

Аналитическое выражение для подсчета $\Lambda_{\sigma 3}$ имеет вид:

$$\Lambda_{\sigma 3} = \frac{1}{\pi} \mu_0 \frac{\lambda D^2}{l} \frac{p}{p + 1 - \frac{1}{2}\alpha} \cdot \left(\left[1 - \left(\frac{\pi}{2p} \right)^2 \left(p - 1 + \frac{1}{2}\alpha \right) \right] \cdot \quad (40)$$

$$\cdot (1 - \alpha) \ln \frac{1}{1 - \alpha} + \alpha \left(\frac{\pi}{2p} \right)^2 \left(p - 1 + \frac{1}{2}\alpha \right) \right) =$$

$$= \frac{1}{\pi} 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{29,1^2}{29,1} \frac{2}{2 + 1 - \frac{1}{2}0,75} \cdot \left(\left[1 - \left(\frac{\pi}{2 \cdot 2} \right)^2 \left(2 + 1 - \frac{1}{2}0,75 \right) \right] \cdot \right.$$

$$\left. \cdot (1 - 0,75) \ln \frac{1}{1 - 0,75} + 0,75 \left(\frac{\pi}{2 \cdot 2} \right)^2 \left(2 - 1 + \frac{1}{2}0,75 \right) \right) = 6,1 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

Аналитические выражения для подсчета остальных проводимостей имеют вид:

$$\Lambda_{\sigma 6} = 0,077\mu_0 \frac{\lambda D^2}{l} \frac{\sin^2(\pi/2p)(1 - \alpha)}{\sin(\pi/2p)} = \quad (41)$$

$$= 0,077\mu_0 \frac{29,1^2}{29,1} \frac{\sin^2(\pi/4)(1 - 0,75)}{\sin(\pi/4)} = 4,8 \cdot 10^{-7} \text{ Гн,}$$

$$\Lambda_{\sigma 7} = 0,25\mu_0 D \cdot \sin(\pi/4p) \cdot \alpha [\cos(\pi/2p) + \sin(\pi/2p)] = \quad (42)$$

$$= 0,25\mu_0 \cdot 29,1 \cdot \sin(\pi/8) \cdot 0,75 [\cos(\pi/4) + \sin(\pi/4)] = 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ Гн,}$$

$$\begin{aligned}
\Lambda_{\sigma 8} &= 0,06\mu_0 \frac{\lambda D^2}{l} (1 + ctg(\pi/2p)) \frac{\sin^2(\pi/2p)(1 - \alpha)}{\sin(\pi/2p)} = \\
&= 0,06\mu_0 \frac{29,1^2}{29,1} (1 + ctg(\pi/4)) \frac{\sin^2(\pi/4)(1 - 0,75)}{\sin(\pi/4)} = 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ Гн.}
\end{aligned} \tag{43}$$

Тогда магнитная проводимость рассеяния в свободном состоянии по формуле (37):

$$\begin{aligned}
\Lambda_{\text{св}} &= 2 \cdot 7,3 \cdot 10^{-7} + 4 \cdot 6,7 \cdot 10^{-9} + 2 \cdot 6,1 \cdot 10^{-6} + \\
&4 \cdot 4,8 \cdot 10^{-7} + 4 \cdot 3,8 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 7,5 \cdot 10^{-7} = 3,37 \cdot 10^{-5} \text{ Гн.}
\end{aligned}$$

В собранном состоянии муфты проводимость $\Lambda_{\sigma 3}$ теряет смысл, так как из активной поверхности полюса выходит рабочий магнитный поток. Проводимость рассеяния:

$$\Lambda_{\sigma} = \Lambda_{\text{св}} - 2\Lambda_{\sigma 3} = 3,37 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 6,1 \cdot 10^{-6} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ Гн.} \tag{44}$$

Относительные величины получаются делением соответствующих абсолютных значений на магнитную проводимость $\Lambda_r = \mu_r \frac{S_M}{l_M} \cdot 10^{-2}$, тогда:

$$\begin{aligned}
\Lambda_{\delta}^* &= \frac{\Lambda_{\delta}}{\Lambda_r} = \frac{1,21 \cdot 10^{-4}}{1,3 \cdot 10^{-5}} = 9,3; \\
\Lambda_{\Gamma}^* &= \frac{\Lambda_{\Gamma}}{\Lambda_r} = \frac{2,2 \cdot 10^{-4}}{1,3 \cdot 10^{-5}} = 17,5; \\
\Lambda_{\delta\Gamma}^* &= \frac{\Lambda_{\delta\Gamma}}{\Lambda_r} = \frac{7,84 \cdot 10^{-5}}{1,3 \cdot 10^{-5}} = 6,1; \\
\Lambda_{\sigma}^* &= \frac{\Lambda_{\sigma}}{2\Lambda_r} = \frac{2,2 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 1,3 \cdot 10^{-5}} = 0,83; \\
\Lambda_{\text{BH}}^* &= \frac{\Lambda_{\delta\Gamma} + \Lambda_{\sigma}}{\Lambda_r} = \frac{7,84 \cdot 10^{-5} + 2,2 \cdot 10^{-5}}{1,3 \cdot 10^{-5}} = 6,8; \\
\Lambda_{\text{св}}^* &= \frac{\Lambda_{\text{св}}}{2\Lambda_r} = \frac{3,37 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 1,3 \cdot 10^{-5}} = 1,3.
\end{aligned}$$

4.4 Уточнение коэффициентов использования материалов

4.4.1 Коэффициент использования постоянного магнита

Коэффициент использования магнита можно представить в общем виде:

$$K_{\text{и.м}} = \frac{W_{\delta}}{W_c} = \frac{B_{\delta} \cdot H_{\delta\Gamma}}{B_r \cdot H_c} = B_{\delta}^* H_{\delta\Gamma}^*, \quad (45)$$

где B_{δ}^* – относительное значение магнитной индукции в воздушном зазоре муфты;

$H_{\delta\Gamma}^*$ – относительное значение напряженности магнитного поля в воздушном зазоре в присутствии гистерезисного слоя.

Кривую размагничивания можно аппроксимировать в виде:

$$B = B_r \frac{H_c - H}{H_c - aH}, \quad (46)$$

где

$$a = \frac{B_r}{B_s} = \frac{2\sqrt{\gamma} - 1}{\gamma}. \quad (47)$$

Из (46) получается уравнение приведенной кривой размагничивания:

$$B = \frac{1 - H^*}{1 - aH^*}. \quad (48)$$

Эта кривая построена на рисунке 11 вместе с линией возврата и лучом, исходящим из начала координат под углом α и характеризующим внешнюю цепь. Очевидно, что $tg\beta = \mu_B^*$, $tg\alpha = \Lambda_{\text{вн}}^*$.

Координаты точки отхода линии возврата B_2^* и H_2^* :

$$H_2^* = \frac{B_s^*}{2} \cdot \frac{1 + \Lambda_{\text{св}}^*}{\Lambda_{\text{св}}^*} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4\Lambda_{\text{св}}^*}{B_s^*(1 + \Lambda_{\text{св}}^*)^2}} \right] = \quad (49)$$

$$= \frac{2,02}{2} \cdot \frac{1 + 1,3}{1,3} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 1,3}{2,02(1 + 1,3)^2}} \right] = 0,51, \quad (50)$$

$$B_2^* = \Lambda_{\text{св}}^* \cdot H_2^* = 0,51 \cdot 1,3 = 0,66 \quad (51)$$

Исходя из выражений (10, 55), коэффициент использования гистерезисного слоя можно представить:

$$K_{и.г} = \frac{M_{\Gamma}}{W_{\delta\Gamma}} = \frac{1}{2\pi} \frac{p_{\Gamma} V_{\Gamma}}{\Phi_{\delta} F_{\delta\Gamma}}. \quad (56)$$

Магнитный поток в воздушном зазоре:

$$\Phi_{\delta} = \alpha_i \cdot \tau \cdot B_{\delta} \cdot l \cdot 10^{-4} = 0,76 \cdot 0,82 \cdot 22,9 \cdot 29,1 \cdot 10^{-4} = 0,042 \text{ Вб}, \quad (57)$$

где $B_{\delta} = \overset{*}{B}_{\delta} \cdot B_r$ – магнитная индукция в воздушном зазоре.

Намагничивающая сила воздушного зазора и гистерезисного слоя на один полюс:

$$F_{\delta\Gamma} = H_{\delta\Gamma} \cdot l_{\text{м}} \cdot 10^{-2} = 9,5 \cdot 10^3 \cdot 9,4 \cdot 10^{-2} = 891 \text{ А}, \quad (58)$$

где $H_{\delta\Gamma} = \overset{*}{H}_{\delta\Gamma} \cdot H_c$ – намагничивающая сила воздушного зазора и гистерезисного слоя на один полюс.

Объем гистерезисного слоя по выражению (27):

$$V_{\Gamma} = \frac{\pi}{4} (D_{н.г}^2 - D_{вн.г}^2) \cdot l_{\Gamma} \cdot K_{з.п} = \frac{\pi}{4} (30,4^2 - 29,1^2) \cdot 29,1 \cdot 1 = 1,5 \cdot 10^3 \text{ см}^3.$$

Коэффициент использования гистерезисного слоя

$$K_{и.г} = \frac{1}{2\pi} \frac{p_{\Gamma} \cdot V_{\Gamma}}{\Phi_{\delta} \cdot F_{\delta\Gamma}} = \frac{1}{2\pi} \frac{56,7 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^3}{0,042 \cdot 890} = 0,37.$$

4.5 Поверочный расчет

После уточнения коэффициентов использования материалов необходимо пересчитать объем постоянных магнитов и основные геометрические величины. Все значения сведены в таблицу 5.

Необходимо установить, обеспечивает ли постоянный магнит индуктора перемагничивание гистерезисного слоя по оптимальному гистерезисному циклу, при котором магнитная индукция в зазоре B_{δ} обеспечивает определенную магнитную индукцию в гистерезисном слое, равную оптимальной

Таблица 5 — Уточненные геометрические размеры

D , см	l , см	b_M , см	h_M , см	$D_{BH.Г}$, см	$D_{H.Г}$, см	$\Delta_{H.Г}$, см
27,1	27,1	15,9	2,45	27,3	28,6	0,67

индукции $B_{Г.М} = B_{Г.ОПТ} = 0,8$ Тл. Соотношение между магнитной индукцией воздушного зазора и в гистерезисном слое определяется выражением:

$$B_{Г} = \frac{l}{(1 + \frac{\delta}{D} + \frac{\Delta_{Г}}{D}) \cdot l_{Г} \cdot K_{з.п}} = \frac{l}{(1 + \frac{0,1}{27,1} + \frac{0,67}{27,1}) \cdot 27,1 \cdot 1} = 0,796. \quad (59)$$

Постоянный магнит обеспечивает эти условия, значит максимальный момент, развиваемый муфтой, равен

$$M \cong M_{Г} \left(\frac{B_{Г}}{B_{Г.ОПТ}} \right)^2 = 27,5 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (60)$$

Магнитно-гистерезисная муфта обеспечивает заданный изначально гистерезисный момент, что говорит о правильном подборе материала и расчете габаритных размеров.

5 Анализ технических характеристик

Для упрощения анализа технических характеристик используется автоматический расчет параметров магнитно-гистерезисной муфты, который в общем случае можно выразить как алгоритм, представленный на рисунке 12.

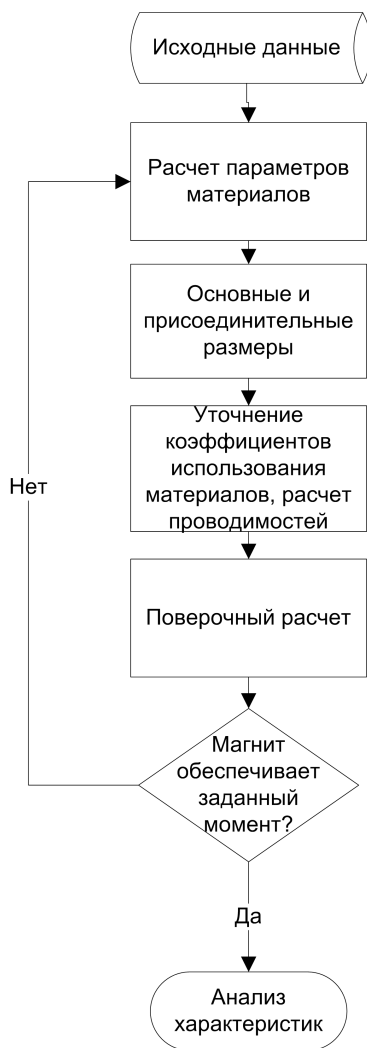


Рисунок 12 — Алгоритм работы программы

Расчет произведен в программной среде «Matlab», так как позволяет использовать большое количество инструментов для исследований и автоматизации, подборки оптимальных параметров.

При проектировании магнитно-гистерезисных муфт с литыми магнитами необходимо учитывать ограничение окружной скорости (не больше 60 – 70 м/с). Допустимое значение диаметра магнита в метрах можно определить

как:

$$D_{max} \leq \frac{60 \cdot v_d}{\pi n}. \quad (61)$$

Для двигателей со скоростью вращения 3000 об/мин максимальный радиус составляет 44,6 см, 1500 об/мин — 89,1 см. Параметры спроектированной муфты отвечают этому ограничению.

Одной из характеристик магнитно-гистерезисной муфты в системе электропривода являются габаритные размеры, которые не должны превышать размеры двигателя для удобства эксплуатации. Для электроприводов запорной арматуры типа «ЭПЦ(М)», выпускаемой компанией «Томзэл», существует линейка электродвигателей от компании «ТЭК» – ДАТЭК-250, ДАТЭК-350, ДАТЭК-450. Также, есть серия электродвигателей малой мощности ДАТЭК-158М, использующихся в электроприводе «ЭРА-10». Для каждой серии была составлена ориентировочная линейка магнитно-гистерезисных муфт (таблица 6), с числом пар полюсов $p = 2$, $\lambda = 1,3$. Так как расчет ведется без учета конкретной задвижки, то принимается максимально допустимый момент без деформации клина равным 125% от номинального.

Для больших значений моментов (больше 100 Н·м) оптимальная скорость вращения является 1500 об/мин. Максимальный крутящий момент для 1500 об/мин при неизменных параметрах, описанных в главе примера проектирования, 600 Н·м.

Для серий ДАТЭК-250 с большей мощностью диаметр двигателя без фланца равен 300 мм, с меньшей — 265 мм, в серии 158М диаметр двигателя составляет не больше 160 мм, серии 350, 450 — диаметр равен 350–400 мм. Магнитно-гистерезисные муфты не подходят для применения с серией ДАТЭК-250-09Х, для серий 350-01(02), 450-01(02) есть возможность коррекции диаметра под необходимые типоразмеры, при которых диаметр муфты не будет превышать диаметр двигателя, но при этом есть риск потери перегрузочной способности муфты, так как при увеличении длины и сокра-

Таблица 6 — Типоразмеры магнитно-гистерезисных муфт

Тип двигателя	n , об/мин	M_n , Н·м	Диаметр муфты, мм	Длина муфты, мм
ДАТЭК-158М-01(02) 0,37; 1,5 кВт	1500	3,9; 5,1	140; 150	182; 195
ДАТЭК-250-01Х(02Х) 4; 5,5 кВт	3000	13,3; 18,1	210; 233	257; 285
ДАТЭК-250-03Х(04Х), 7,5; 11 кВт	3000	24,7; 36,2	260; 295	316; 358
ДАТЭК-250-05Х(08Х) 3; 7,5 кВт	1500	20; 49,4	240; 325	295; 400
ДАТЭК-250-09Х 11 кВт	1500	72,9	370	450
ДАТЭК-350-01(02), 15; 18,5 кВт	3000	48,7; 60	325; 350	400; 425
ДАТЭК-350-03(04), 15; 18,5 кВт	1500	98; 121	410; 440	500; 535
ДАТЭК-450-01(02), 37; 45 кВт	3000	120; 146	440; 470	535; 570
ДАТЭК-450-03(04), 37; 45 кВт	1500	240; 292	550; 590	670; 717

щения диаметра потоки рассеяния увеличиваются. Из всех серий лучше всего муфты сочетаются с двигателями серии 158 и 250 малых мощностей. Кривая зависимости диаметра от гистерезисного момента представлена на рисунке 13.

Стоит отметить возможности корректировки габаритных размеров муфты через изменения таких параметров как число пар полюсов p , отношение длины к диаметру λ и коэффициент полюсного перекрытия α . Зависимости приведены на рисунке 14.

Самое значительное изменение диаметра индуктора происходит при увеличении λ , но как упоминалось ранее, сильное увеличение длины отрицатель-

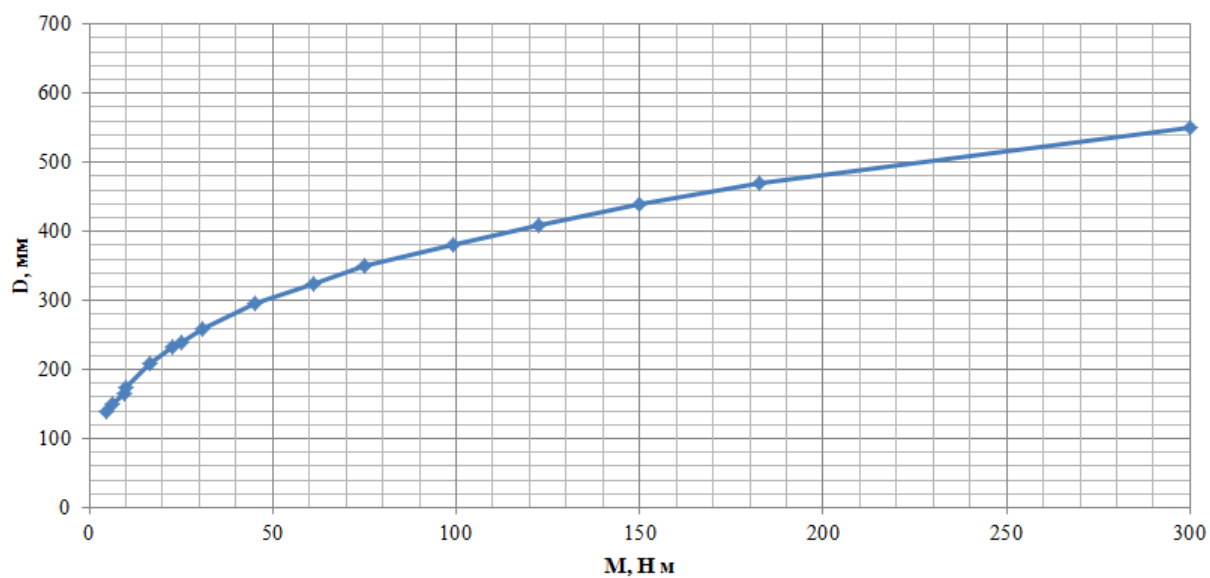


Рисунок 13 — Изменение диаметра от гистерезисного момента

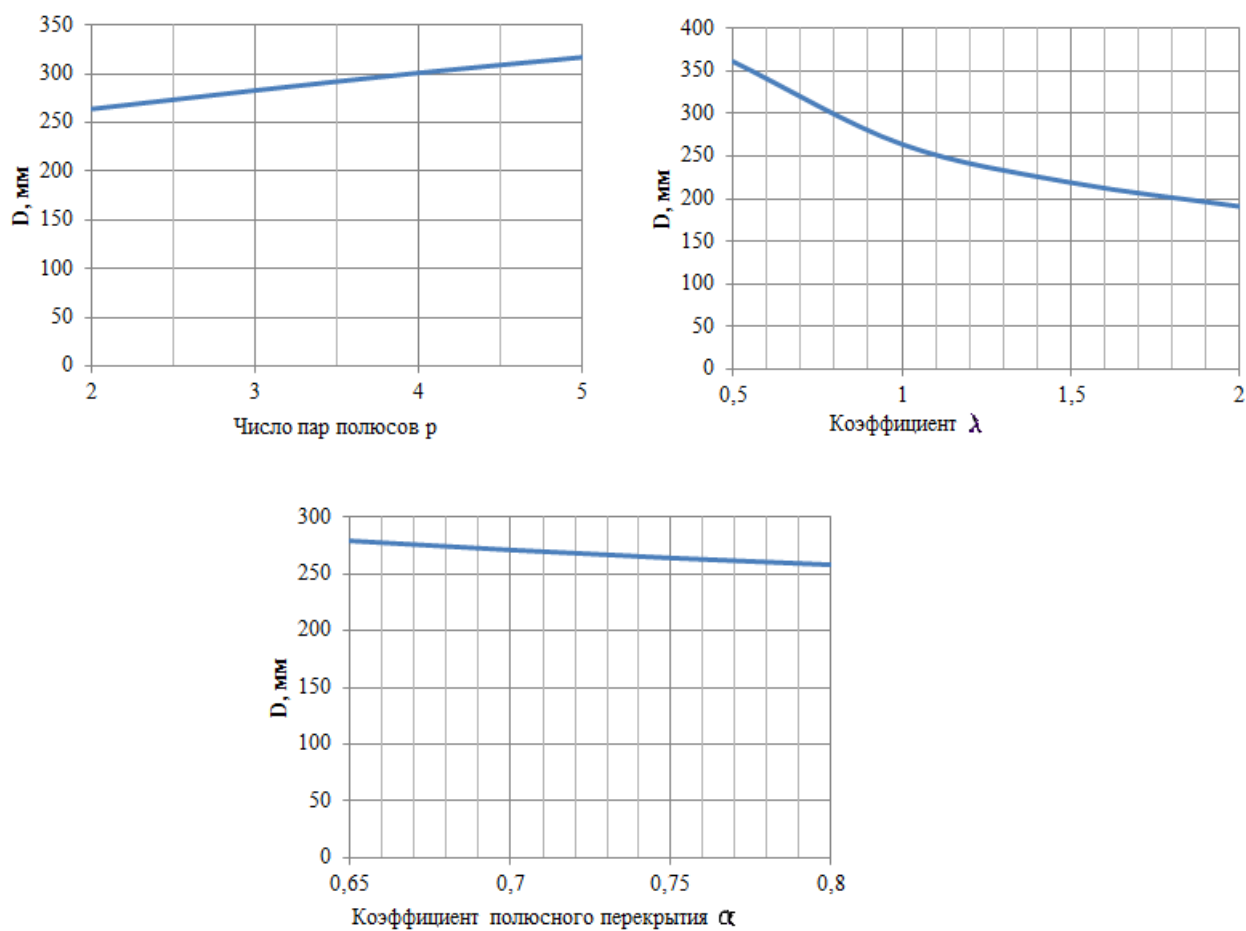


Рисунок 14 — Изменение размера диаметра индуктора от параметров α, λ, p

но сказывается на гистерезисном моменте. Число пар полюсов уменьшает толщину гистерезисного слоя (в пределах 5 мм), но сильно изменяются раз-

меры индуктора, что перекрывает улучшения по гистерезисному слою.

Одним из критериев оценки технических характеристик является масса получившейся конструкции. Плотность материала ρ для изготовления постоянных магнитов $7,8 \cdot 10^3$ кг/м³ и для гистерезисного материала $8,8 \cdot 10^3$ кг/м³. Масса муфты на 10 Н·м составляет примерно 15 кг. Большие весовые значения являются отрицательным результатом, так как цена изделия будет крайне высока.

Механическая характеристика магнитно-гистерезисной муфты $M(s)$ представлена на рисунке 15 (кривая 1). Установившаяся скорость вращения ведомого вала муфты зависит от величины момента нагрузки запорной арматуры, (кривая 2).

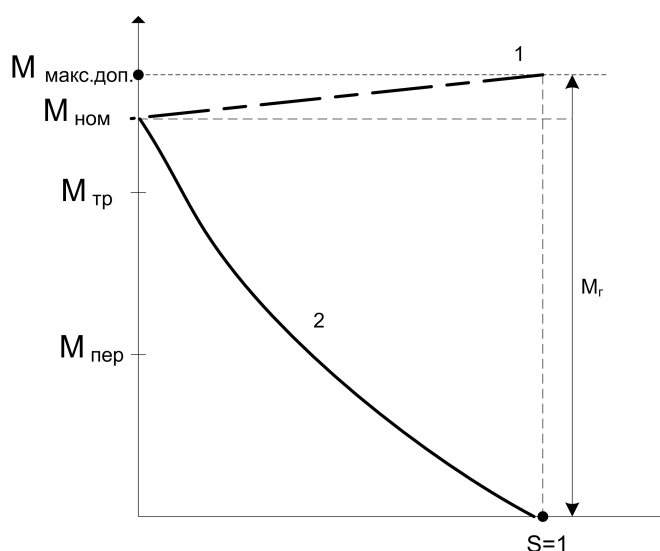


Рисунок 15 — Механическая характеристика гистерезисной муфты

Характерные точки, обозначенные на рисунке 15:

$M_{\text{макс.доп.}}$ — максимально допустимый момент, при котором не происходит деформация задвижки;

$M_{\text{ном}}$ — номинальный момент работы задвижки;

$M_{\text{тр}}$ — момент, при котором происходит трогание задвижки;

$M_{\text{пер}}$ — момент, при котором происходит перемещение.

При правильном подборе гистерезисного момента муфты обеспечивается

защита задвижки запорной арматуры, а также и самого электродвигателя.

Погрешность в работе электропривода возникает из-за различных факторов, но основное влияние вносят климатические условия, так как задвижки работают в широком температурном диапазоне. Передаточное число редуктора может меняться в силу физических процессов сужения или расширения материалов, создавая угрозу передавливания клина. Усилие в 1 Н·м на валу электродвигателя через редуктор становится в десятки раз больше, что может стать критическим значением для задвижки. Одним из возможных вариантов применения муфты — это расположение после редуктора в электроприводе «ЭПЦ(М)-100» с диапазоном ограничения крутящего момента на выходном звене 25–100 Н·м. По габаритам муфта данного диапазона не превышает ширину всей конструкции (420 мм).

Магнитно-гистерезисная муфта с индуктором типа «звездочка» из материала ЮНДК-24 применима в достаточно узком диапазоне двигателей от 0,37 кВт до 7,5 кВт, муфты для серии ДАТЭК-250 проявляют лучшие показатели. Для малых мощностей 0,37–1,1 муфта получается тяжелой, что не дает очевидных преимуществ перед другими способами ограничения момента. Причиной является, прежде всего, низкая энергоэффективность материала индуктора, которую отражает коэффициент использования материала. Только изменение конструкции и материала ведущей части позволит расширить область применения магнитно-гистерезисных муфт с индуктором типа «звездочка».

6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Нефтяной рынок является одним из ключевых рынков энергоносителей, поэтому транспортировка нефтепродуктов требует качественного оборудования, способного работать в любых условиях. Научные исследования в этой сфере необходимы, ввиду наличия ряда научных и технических проблем, решение которых требует системного подхода и решению как математических, так и технологических задач. Результаты разработок должны быть не только направлены на достижение конечных целей в виде улучшения показателей, но и учитывать принципы ресурсоэффективности и ресурсосбережения. В данной работе рассматривается возможность применения магнитно-гистерезисной муфты в электроприводе запорной арматуры на основе анализа технических характеристик, поэтому необходимо рассмотреть коммерческий потенциал и оценить эффективность исследования.

6.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований

6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Во многих областях промышленности необходима трубопроводная арматура, предназначенная для перемещения и управления потоками различных сред. Применение исследований возможно не только в сфере запорной арматуры нефте- и газопроводов, но и в других областях, где требования к защитному исполнению или характеристикам несколько ниже. На отечественном рынке отсутствуют фирмы-производители магнитно-гистерезисных муфт, но в сферах применения есть и другие конкурентные решения. Отсюда можно произвести сегментирование рынка коммерческих организаций по двум наиболее значимым критериям — сферы применения, и техническое решение,

это может быть гистерезисная муфта с электромагнитным возбуждением или моментный электропривод. Карта сегментирования представлена таблицей 7.

Таблица 7 — Карта сегментирования рынка

		Техническое решение		
		м.-г. муфта	электром.-г. муфта	моментный привод
Сфера применения	запорная арматура			
	конвейерные ленты	StS	A&G, ЗЭМ	S
	обмоточная и скручивающая промышленность	StS	A&G, M, ЗЭМ, ВПК	H.D., S
	авиационная техника, испытательные стенды	StS	M	H.D., S

Обозначения, используемые в таблице 7 — *A&G* «Automation and Gears» (Германия) [4], *S* — «Siemens» (Германия), *H.D* — «Harmonic Drive» (Германия, США, Япония) [34], ЗЭМ — «Завод Электромагнитных Муфт» (Россия) [?], *StS* — «StS Coupling GmbH» (Германия) [35], *M* — «Magtrol» (Германия) [3].

Преимущественно производители — зарубежные фирмы. Исходя из карты сегментирования основным направлением действительно является электропривод запорной арматуры и авиационная промышленность, где низкая конкурентная способность и крайне мало фирм отечественного происхожде-

ния. В будущем перспективой будут является рынок общетехнической промышленности, в насосных системах, пищевой промышленности, тестовых стендах, упаковочной технике, в наматывающих и разматывающих системах, медицинском оборудовании.

6.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Так как развитие новых методов и применение их на практике не останавливается, то необходимо постоянно анализировать разработки, которые могут стать прямыми конкурентами. Такой анализ поможет вовремя скорректировать ход научного исследования для устойчивости на рынке. Для определения сильных и слабых сторон разработок конкурентов используется вся информация, которую можно найти. Данный анализ проводится через оценочную карту (таблица 8), в которой рассматривается конкурентоспособность исследования магнитно-гистерезисной муфты с индуктором типа «звездочка» и двух конкурентных решений — электромагнитной гистерезисной муфты от завода электромагнитных муфт (ЗЭМ) и магнитно-гистерезисной муфты фирмы StS Coupling.

Главным преимуществом электромагнитных муфт перед гистерезисными — это возможность передачи большого номинального момента, то есть применение в некоторых системах без редуктора, что существенно экономит процесс настройки и эксплуатации. Но недостатком является и сама конструкция, так как щеточно-коллекторный узел требует постоянного контроля, быстро выходит из строя и не проходит по условиям пожаро- и взрывобезопасности. Только по этим двум критериям разработка немецкой компании уже лидирует по отношению к продукции ЗЭМ, но недостатком ее решения является способ соединения муфты с рабочим валом, так как такое соединение при больших нагрузках расшатывается и может скользить по валу и нарушать работу муфты. То есть, если правильно организовать процесс производства и отношения с покупателями (сертификация продукции, ценовая

Таблица 8 — Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкуренто-способность		
		Б _и	Б _{к1}	Б _{к2}	К _и	К _{к1}	К _{к2}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Удобство и простота в эксплуатации	0,09	4	4	3	0,36	0,36	0,27
2. Энергоэкономичность	0,01	5	2	5	0,5	0,2	0,5
3. Надежность	0,11	5	2	4	0,55	0,22	0,44
4. Уровень шума	0,07	4	2	3	0,28	0,14	0,21
5. Безопасность	0,09	5	1	5	0,45	0,09	0,45
6. Функциональная мощность	0,11	4	5	2	0,44	0,55	0,22
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,13	4	2	3	0,52	0,26	0,39
2. Уровень проникновения на рынок	0,08	0	4	1	0	0,32	0,08
3. Цена	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,06	5	2	4	0,3	0,12	0,24
5. Послепродажное обслуживание	0,02	0	3	0	0	0,06	0
6. Наличие сертификации разработки	0,04	0	2	5	0	0,08	0,02
Итого	1	40	33	38	3,8	2,8	3,3

политика, обслуживание и гарантия), то конкурентная способность магнитно-гистерезисной муфты по предложенному решению в исследовании крайне высока.

6.1.3 SWOT-анализ

Кроме анализа конкурентных решений необходимо комплексно рассмотреть научно-исследовательскую работу методом SWOT-анализа, что поможет выявить сильные и слабые стороны будущей коммерциализации. Анализ подразделяется на несколько этапов. В первом этапе описываются сильные, слабые стороны проекта, возможности и угрозы реализации в матрице SWOT.

Второй этап — это построение интерактивной матрицы проекта, где иллюстрируется взаимосвязи сильных и слабых сторон внешним условиям рыночной экономики.

Третьим этапом является объединение двух предыдущих этапов и заполнение итоговой матрицы (таблица 9).

Анализируя результаты интерактивных матриц, можно утверждать, что научно-исследовательская работа обладает сильными сторонами в области конечного получаемого конструктивного и технологического решения, что позволяет использовать возможности получения финансирования по государственным и не только грантам и программам для ликвидации слабых сторон проекта в виде отсутствия доказательной базы, а также помощь со стороны ТПУ и его структур поможет решить проблемы осуществления выхода на рынок и производства в целом.

6.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

Кроме оценки потенциала проекта и его коммерческого успеха, необходимо рассмотреть возможные альтернативные решения проектирования, где

Таблица 9 — Матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны НИР: С1.Высокая степень электро- и взрывобезопасности. С2. Заявленная высокая надежность конструкции,мудобство и простота в эксплуатации. С3. Применение ресурсо-экономичных материалов, энергоэкономичность. С4. Квалифицированный персонал. С5. Перспективы получения новых разработок.	Слабые стороны НИР: Сл1. Отсутствие имитационной модели. Сл2. Отсутствие прототипа научной разработки. Сл3. Отсутствие рабочей команды разносторонних профессионалов. Сл4. Отсутствие стороннего финансирования. Сл5. Сложность осуществления выхода на рынок.
Возможности: В1. Свободный сегмент рынка. В1. Использование бизнес-инкубатора ТПУ. В3. Гранты и гос.программы поддержки инноваций. В4. Появление спроса на новый продукт.	В1С1С2С3, В2В3С3С5, В4С3С2.	В2Сл3Сл5, В1В4Сл4Сл3, В3Сл1Сл2Сл5.
Угрозы: У1. Появление предпочтения импортной продукции отечественной.	У1С1С2С3, У2С5С2, У3У4С4С5.	У1У4Сл5, У2Сл2Сл4Сл5, У3Сл1.

Продолжение таблицы 9

У2. Увеличение стоимости исходных материалов по разным причинам.		
У3. Прекращение финансового обеспечения научного исследования.		
У4. Изобретение более экономичной конструкции муфты.		

можно предложить не менее трех основных направлений.

Научно-исследовательская работа по проектированию и анализу магнитно-гистерезисной муфты ведется относительно индуктора типа «звездочка». Как одно из решений возможно смена расположения индуктора и ведомой части муфты относительно друг друга, тогда вместо радиального зазора будет аксиальный (рисунок 16). Такое изменение меняет ход дальнейшего проектирования, в том числе и выбор активных материалов для изготовления.

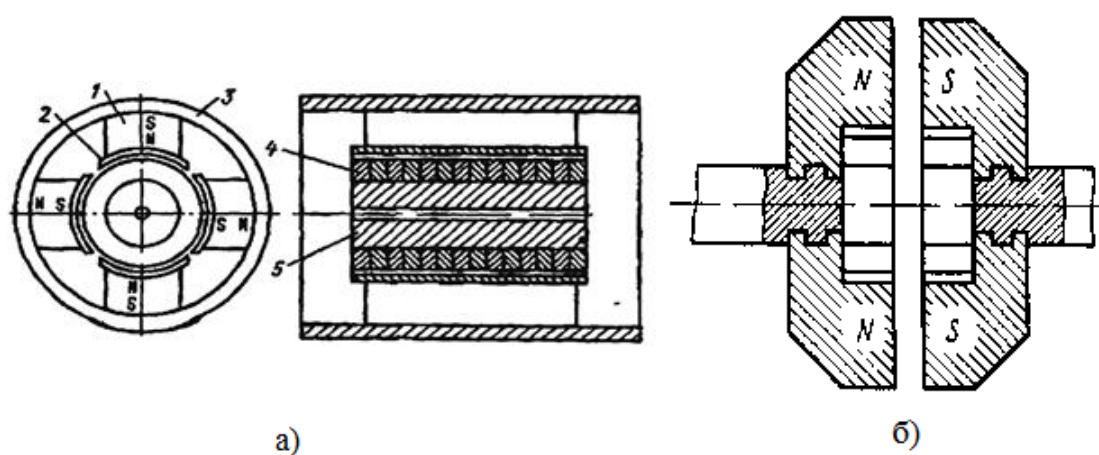


Рисунок 16 — Виды конструкций муфт: а) с радиальным зазором; б) с аксиальным зазором

Второй вариант альтернативного исполнения — выбор другого типа ин-

дуктора, не изменяя основного расположения. Тип «звездочка» является одним из распространенных, но при этом существуют и другие типы: с внешним индуктором со скобообразными магнитами и внутренним индуктором с радиальными магнитами (рисунок 4).

Третьим вариантом развития исследования может быть изменение сплава гистерезисного материала. В работе применяется сплав системы $Fe - Cr - Co$ по многим причинам: из-за ранее не применяемого сплава в таких муфтах, экономическим, по энергетическим показателям, описанным в пункте 3.3 «Гистерезисные материалы». Например, можно использовать сплав системы $Fe - Co - V$ (викаллой), но тогда в дальнейшем при коммерциализации исследования это значительно увеличит конечную стоимость магнитно-гистерезисной муфты.

Все возможные решения являются альтернативными путями развития научно-исследовательской работы, и в дальнейшем будут использоваться в расчетах для определения эффективности основного направления исследования.

6.3 Планирование научно-исследовательских работ

Для реализации научно-исследовательской работы исследования необходимо разработать такую структуру разбиения работ, чтобы достичь оптимального результата за минимальные сроки. Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ.

Таблица 10 — Перечень работ и распределение исполнителей

№	Содержание работ	Исполнители
1	Постановка целей и задач	НР, И
2	Знакомство с литературой по теме, обзор электроприводов запорной арматуры	И
3	Составление технического задания	НР
4	Изучение методов расчета, программного обеспечения	И
5	Разработка принципов и алгоритма работы программы расчета	И
6	Расчет параметров заданного диапазона	И
7	Оформление пояснительной записки	И
8	Проверка готовой пояснительной записки руководителем	НР, С

6.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

В данном подпункте необходимо составить структуру работ и распределить исполнителей для каждого этапа. Для выполнения научных исследований в рамках бакалаврской работы требуются следующие специалисты:

- инженер (И);
- научный руководитель (НР).

Порядок этапов выполнения работ приведен в таблице 10.

Предлагаемая структура работ является оптимальной по выполнению исследований в рамках бакалаврской работы.

6.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Основной частью стоимости разработки являются трудовые затраты, поэтому необходимо определить трудоемкость работ каждого из участников научно-исследовательской работы.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается в человеко-днях, для определения среднего значения трудоемкости используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{min.i} + 2t_{max.i}}{5}, \quad (62)$$

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

$t_{min.i}$ – минимально возможное время, за которое может быть выполнена работа, измеряется в чел.-дн.;

$t_{max.i}$ – максимальное время, за которое работа может быть выполнена, измеряется в чел.-дн.

Далее необходимо определить продолжительность работы в рабочих днях, при этом учитывая возможное исполнение несколькими исполнителями параллельно. Такое вычисление нужно для расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей смете научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} \quad (63)$$

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

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

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

В таблице 11 приведена длительность работ и число исполнителей этих работ.

Таблица 11 — Длительность и трудоемкость работ

Содержание работ	Исполнители	Минимально возможная трудоемкость $t_{min,i}$, чел.-дн.	Максимально возмож. трудоем-кость $t_{max,i}$, чел.-дн.	Ожидаемая трудоем-кость $t_{ож,i}$, чел.-дн.	Продолж-тельность работы T_{pi} , раб. дни
Постановка целей и задач	НР, И	3	7	5	3
Знакомство с литературой по теме, обзор электроприводов запорной арматуры	И	12	21	16	16
Составление технического задания	НР	10	15	12	12
Изучение методов расчета, программного обеспечения	И	16	30	22	22
Разработка принципов и алгоритма работы программы расчета	И	14	16	19	19
Расчет параметров заданного диапазона	И	27	38	32	32
Оформление пояснительной записки	И	14	21	17	17
Проверка готовой пояснительной записки руководителем	НР, С	9	17	12	12
Итого:				135	133

Ожидаемое время работы $t_{ож,i} = 135$ дней. Результаты планирования показали, что время, затраченное на проектирование для: инженера (И) — 121 день, научного руководителя проекта НР — 27 дней.

6.3.3 Бюджет научного исследования

Планирование бюджета должно быть максимально полным и достоверным для отражения всех видов расходов при исполнении научных исследований.

Так как в процессе работы использовались только теоретические исследования и расчеты без изготовления опытных образцов и закупки материалов без привлечения стороннего персонала, то в бюджет входит несколько статей затрат:

- Основная заработная плата исполнителей;
- Дополнительная заработная плата исполнителей;
- Отчисления во внебюджетные страховые фонды;
- Накладные расходы.

Основная заработная плата исполнителей. В настоящую статью включается основная заработная плата участвующих непосредственно в выполнении работ исследования. Величина расходов по заработной плате считается исходя из трудоемкости работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера.

Основная заработная плата (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ включает в себя оклад и стимулирующих выплат за эффективный труд, умноженных на районный коэффициент:

$$З_{\text{осн}} = (\text{Окл} + \text{Прем}) \cdot \text{р.к.}, \quad (64)$$

где $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата участника, руб.;

Окл – оклад, размер денежной выплаты определяется ТПУ, которые распределены в соответствии с занимаемыми должностями, руб.;

Прем – премия, стимулирующие выплаты за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д, руб.;

р.к. – районный коэффициент, % .

Месячный оклад (Окл) руководителя (доцента, к.т.н) составляет 23264,86 рублей [23], а месячный оклад инженера (на должности ассистента кафедры ЭКМ НИ ТПУ) 14584,32 рублей. Размер премий принимается 20 % от оклада, районный коэффициент р.к. для Томской области равен 1,3.

При условии, что научный руководитель был занят при разработке 27 дней, а инженер – 121, расчет заработной платы участника исследований рассчитывается как произведение дневной заработной платы участника проекта и количества дней участия в работе:

$$З = З_{\text{д}} \cdot N_{\text{д}}, \quad (65)$$

где $З$ – заработная плата участника за весь период, руб.;

$З_{\text{д}}$ – дневная заработная плата участника, руб.;

$N_{\text{д}}$ – количество дней, проведенных в работе, дн.

Для расчёта дневной заработной платы необходимо основную заработную плату разделить на среднее количество рабочих дней в месяце. Среднее количество рабочих дней в месяце принимаем равным 22 дням:

$$З_{\text{д}} = \frac{З_{\text{осн}}}{22}, \quad (66)$$

где $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата участника, руб.

Основная заработная плата рассчитана и сведена в таблицу 12.

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили 169675,10 рублей.

Дополнительная заработная плата исполнителей. Затраты по дополнительной заработной плате учитывают предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат при отклонении от нормальных условий труда или гарантии и компенсации.

Таблица 12 — Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	Премия, руб.	Осн. зар. плата $Z_{\text{осн}}$, руб.	Зарплата дневная $Z_{\text{д}}$, руб.	Зарплата Z , руб.
Руководитель	23264,86	4652,97	36293,18	1649,69	44541,63
Инженер	14584,32	2916,86	22751,54	1034,16	125133,47
Итого:					169675,10

Дополнительная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (67)$$

где $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата участника, руб.;

$Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата участника, руб.;

$k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы, %.

Коэффициент дополнительной заработной платы принимается равным 0,12. Дополнительная заработная плата рассчитана и сведена в таблицу 13.

Таблица 13 — Расчёт дополнительной заработной платы

Исполнители	Основная заработная плата $Z_{\text{осн}}$, руб.	Дополн. заработная плата $Z_{\text{доп}}$, руб.
Руководитель	36293,18	5345
Инженер	22751,54	15016,02
Итого:		20361,01

Таким образом, затраты на дополнительную заработную плату составили 20361,01 рублей.

Отчисления во внебюджетные страховые фонды. В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам страховым фондам.

Величина отчислений от затрат на оплату труда определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (68)$$

где $З_{внеб}$ – величина отчислений во внебюджетные фонды, руб.;

$k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды, %;

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата участника, руб.;

$З_{осн}$ – основная заработная плата участника, руб.

Коэффициент отчислений принимается равным 27,1%. Отчисления во внебюджетные страховые фонды рассчитаны и сведены в таблицу 14.

Таблица 14 — Отчисления во внебюджетные страховые фонды

Исполнители	Основная заработная плата $З_{осн}$, руб.	Дополн. заработ- ная плата $З_{доп}$, руб.	Отчисления $З_{внеб}$, руб.
Руководитель	36293,18	5345	13469,39
Инженер	22751,54	15016,02	37840,36
Итого:			51309,75

Всего затраты на отчисления во внебюджетные фонды составили 51309,75 рублей.

Накладные расходы. Накладные расходы учитывают прочие затраты научно-исследовательской работы, не относящиеся к предыдущим статьям

расходов: печать и ксерокопирование, услуги связи и интернета, электроэнер-
гии, и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма предыдущих статей}) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (69)$$

где $Z_{\text{накл}}$ – величина накладных затрат, руб.;

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

Коэффициент накладных расходов принят в размере 10

Полученные значения статей затрат формируют бюджет научно-исследо-
вательской работы как сумма всех значений (таблица 15).

Таблица 15 — Расчет бюджета затрат

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.		
	Руководитель	Инженер	Итоговая сумма
1. Затраты по основной за- работной плате	36	23	170
2. Затраты по дополни- тельной заработной плате	5,3	15	21
3. Отчисления во внебюд- жетные фонды	13,4	38	51,3
Промежуточный результат			242
4. Накладные расходы			24
Бюджет затрат НИР			266

От грамотного планирования зависит эффективное исполнение научно-
исследовательских работ. Результатом является план, в котором продуманы
не только этапы, но и исполнители, а также затраты с учетом необходимых
отчислений и накладных расходов, в том числе и заработная плата.

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

Определить эффективность исследования можно через интегральный показатель эффективности, который рассчитывается с использованием двух средних величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности. Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования. Так как альтернативные варианты исполнения отразятся только изменениями в итоговых показателях, то бюджеты не будут отличаться друг друга, потому что изменения не затрагивают статьи расходов с зарплатой, накладными расходами и отчислениями во внебюджетные фонды. Тогда:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{266}{266} = 1, \quad (70)$$

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

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения, тыс. руб.;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения, тыс. руб.

Полученная величина интегрального финансового показателя отражает отсутствие изменения бюджета при различных вариантах проектирования.

Интегральный показатель ресурсоэффективности. Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проводится при помощи сравнительных характеристик (таблица) и рассчитывается по формуле:

$$I_{pi} = \sum_{k=1}^n a_i \cdot b_i, \quad (71)$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки;

n – число параметров сравнения.

Таблица 16 — Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэф-т a_i	Базовое исп.	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1. Цена	0,3	4	5	4	2
2. Надежность	0,25	5	4	3	5
3. Энергосбережение	0,1	5	5	5	5
4. Помехоустойчивость	0,15	4	4	4	3
5. Удобство в эксплуатации	0,2	4	3	3	4
Итого, I_{pi} :	1	4,35	4,2	3,65	3,6

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп\,i} = \frac{I_{pi}}{I_{финр}^{исп.\,i}}, \quad (72)$$

где $I_{исп\,i}$ – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения для i -го варианта исполнения разработки;

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

$I_{финр}^{исп.\,i}$ – интегральный финансовый показатель разработки.

Результаты расчетов представлены в итоговой таблице 17 сравнительной эффективности.

Сравнительная эффективность разработки. Сравнительную эффективность проводят на основе сравнения интегральных показателей эффективности вариантов исполнения по формуле:

$$\Theta_{cpi} = \frac{I_{испi}}{I_{исп}}, \quad (73)$$

где Θ_{cpi} – Сравнительная эффективность альтернативного исполнения по отношению к базовому исполнению;

$I_{испi}$ – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения для i-го варианта исполнения разработки;

$I_{исп}$ – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения для базового исполнения.

Результаты по всем показателям для удобства анализа сведены в таблицу 17.

Таблица 17 — Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Базовое исп.	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Интегральный финансовый показатель	1	1	1	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,35	4,2	3,65	3,6
3	Интегральный показатель эффективности	4,35	4,2	3,65	3,6
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,97	0,84	0,83

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять, что другие варианты исполнения без изготовления практически соответствуют базовому исполнению. Такие результаты говорят о том, что без изготовления опытного образца и прототипа теоретические исследования

будут крайне похожи, так как не затрагивают статей расхода на материалы и оборудование. Без этого нельзя говорить с уверенностью, что одно исполнение будет хуже другого.

В данном разделе научно-исследовательская работа была рассмотрена с различных позиций — ресурсоэффективности, финансовой, бюджетной, социальной и экономической. По результатам различных способов анализа у работы есть большой коммерческий потенциал и возможности для реализации, но не хватает нескольких существенных разработок в виде отсутствия прототипа и испытательного стенда, что говорит о дальнейшей необходимости проведения исследований, которые позволят более точно определить критерии оценок и их результаты о конкурентоспособности технического решения.

7 Социальная ответственность

Целью работы является анализ технических характеристик магнитно-гистерезисной муфты типа «звездочка» для улучшения системы регулирования запорной арматуры. Для этого необходимо изучить аспекты теории электропривода запорной арматуры, рассмотреть существующие новейшие магнитные материалы, создать автоматизированный расчет параметров магнитно-гистерезисной муфты, проанализировать технические характеристики и определить возможность применения разработки в электроприводе запорной арматуры. Так как практическое применение исследований данной работы связано с запорной арматурой нефте- и газопроводов в составе электропривода, то рабочей зоной является наземный участок трубопровода, где обслуживающий персонал находится временно, рабочее место отсутствует. Исходя из этого, можно сделать вывод, что основная работа персонала связана непосредственно с электроприводом запорной арматуры на открытом пространстве при обслуживании, которой сопутствует соответствующий список вредных и опасных производственных факторов. Необходимо проанализировать влияние проектируемой производственной среды и разработать комплекс мероприятий, снижающий негативные последствия.

7.1 Техногенная безопасность

7.1.1 Вредные факторы производственной среды

В соответствии с пунктом 4.3 общих требования безопасности трубопроводной арматуры [6] можно выделить ряд вредных проявлений рабочей зоны:

1. Шум и вибрация;
2. Электромагнитное излучение.

Уровень шума в рабочей зоне не должен превышать в соответствии с

нормами СН 2.2.4/2.1.8.562 [26] предельно-допустимых значений (таблица 18). Допустимые уровни вибрации установлены санитарными нормами СН 2.2.4/2.1.8.566 [27].

Таблица 18 — Предельно уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности

Вид трудовой деятельности	Уровни звука (в дБА)
Высококвалифицированная работа, требующая сосредоточенности, измерительные и аналитические работы в лаборатории; рабочие места в помещениях цехового управленческого аппарата	60
Работа, требующая сосредоточенности; работа с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами. В помещениях лабораторий с шумным оборудованием	75

Так как магнитно-гистерезисная муфта осуществляет бесконтактную передачу вращающего момента, то она не может являться источником шума. Конечное значение звукового уровня определяется производителем электропривода запорной арматуры.

Возникновение вибраций в магнитно-гистерезисной муфте возможно по ряду механических причин:

1. Неуравновешенность вращающихся частей: сборка индуктора, ведомой части муфты, подшипников, подшипниковых щитов;
2. Недостаточная центровка линий валов двигателя, муфты и редуктора.

Для предотвращения вибраций необходимо производить сборку в соответствии с технической документацией. При эксплуатации требуется мониторинг уровня вибрации, при увеличении уровня следует принимать своевременные меры по устранению причин. Установка всей запорной арматуры на вибропоглощающий материал позволит уменьшить вибрации в номинальном

режиме работы.

По санитарным правилам СанПиН 2.2.4.1191-03 [12] должны соблюдаться нормы при проектировании и эксплуатации технического оборудования, являющихся источниками электромагнитных полей. Предельно допустимый уровень напряженности постоянного магнитного поля устанавливается равным 40 кА/м в течении времени локального воздействия за рабочий день 10 минут. Материалы для изготовления магнитно-гистерезисной муфты создают поле больше этой нормы. Так как муфта находится во взрывозащищенном корпусе, то ослабление поля будет существенным. При условии того, что работа задвижки осуществляется в течении 15-20 минут раз в несколько дней или более, то средств индивидуальной защиты не требуется.

7.1.2 Опасные факторы производственной среды

В соответствии с пунктом 4.3 общих требований безопасности трубопроводной арматуры можно выделить ряд опасных проявлений рабочей зоны: механическая, электрическая, пожарная, термическая, химическая, промышленная безопасность, взрывобезопасность.

Механическая безопасность. К средствам защиты предъявляются требования от механических опасностей, зафиксированные в нормативных документах: в ГОСТ 12.4.011-87 [7], а их классификация — в ГОСТ 12.4.125-83 [8].

Наиболее типичным источником механических негативных факторов являются вращающиеся детали, неправильно выбранные методы обработки, неправильно выбранное техническое обслуживание, непредвиденные нагрузки на оборудование. К перечисленным источникам можно добавить непрочность конструкции, связанной с коррозией металла.

В конструкции магнитно-гистерезисной муфты отсутствуют острые выступающие части, а кожух защищает персонал от движущихся частей муфты. Крепежные элементы предохранены от самоотвинчивания путем установки

пружинных разрезных шайб. Поэтому муфта является механически безопасной.

Мероприятиями по предотвращению возможных несчастных случаев являются периодические осмотры технического состояния системы электропривода запорной арматуры. Участок нефте- или газопровода с запорной арматурой, не прошедшего осмотр, эксплуатировать запрещается. При осмотре особое внимание обращают на устройства, обеспечивающие безопасность работы всей системы.

Электрическая безопасность. Так как в конструкции магнитно-гистерезисной муфты нет электрических обмоток, то поражение током возможно только при неправильном заземлении остальных элементов системы. Например, при повреждении или пробое изоляции электродвигателя кожух муфты может оказаться под напряжением.

Электрический ток, проходя через живую ткань, производит электролитическое, термическое, биологическое и механическое воздействие. Существуют три основных вида поражения электрическим током: электрические травмы, электрические удары, электрический шок.

Для обеспечения безопасности использования электроустановок, все мероприятия можно разделить на три группы.

1. К организационным мероприятиям относят:

- правильный подбор персонала, обслуживающего электроустановки (недопущение к работе лиц младше 18 лет, а также лиц без наличия документов о медицинском освидетельствовании и обучении работе данного вида);
- обучение правилам безопасности при работе с электроустановками, например, инструктаж по безопасности труда, аттестация, проведение специального обучения, разработка и издание инструкций по охране труда;

- контролирование правильности монтажа электрооборудования в соответствии с ПУЭ [9];
- проведение периодических осмотров, контрольных измерений и испытаний электрооборудования. Рекомендуется ежегодное обслуживание оборудования, в случае несоответствия предъявляемым требованиям — его ремонт.

2. Технические мероприятия:

- применение устройств защиты электроустановок и сетей от перегрузок (предохранителей, автоматических выключателей и т. п.) и токов коротких замыканий;
- защита посторонних людей и животных от прикосновения к оборудованию посредством применения защитного ограждения или расположение части электрооборудования на недоступной (более 2 м) высоте для животных и людей;
- предотвращение поражения электрическим током (в случае нарушения изоляции и перехода напряжения на металлические корпуса) путем организации защитного заземления, зануления с глухозаземленной нейтралью;
- использование изолирующих площадок, диэлектрических настилов и т. п.

3. Применение индивидуальных электрозащитных средств для электроустановок с напряжением до 1000 В:

- слесарно-монтажный инструмент с изолированными рукоятками, изолирующие и токоизмерительные клещи;
- диэлектрические перчатки, коврики и т.п.;
- указатели напряжения.

Пожарная и взрывобезопасность. Так как нефтепродукты пожаро- и взрывопасны, то при несоблюдении требований безопасности возможно воз-

никновение аварийных ситуаций, которые могут не только травмировать работников, но и угрожать экологической среде. По правилам охраны труда для магистральных нефтепродуктопроводов все приборы, устанавливаемые в помещениях и наружных установках, должны соответствовать требованиям к исполнению по ПУЭ [9], требованиям к взрывозащищенному оборудованию по ГОСТ 12.2.021 [10], ГОСТ 12.2.020 [11].

В соответствии с этими требованиями пожаро- и взрывобезопасность магнитно-гистерезисной муфты возможно обеспечить:

- выполнением эргономических требований;
- наличием предупредительных надписей на внешних съемных элементах оболочки;
- включением требований безопасности в техническую документацию по монтажу, эксплуатации, транспортированию и хранению;
- исполнением с высокой степенью защиты не ниже IP67;
- Взрывозащищенность обеспечивается заключением во взрывонепроницаемую оболочку, выдерживающую давление взрыва внутри нее и исключающую передачу взрыва в окружающую среду.

Пожаро- и взрывобезопасность должна быть обеспечена организационно-техническими мероприятиями, включающие в себя организацию пожарной охраны, разработку инструкций по соблюдению противопожарного режима и действиях при возникновении чрезвычайных ситуаций и т.д.

Термическая безопасность. В соответствии с пунктом 4.3 общих требований безопасности трубопроводной арматуры необходимо обеспечить герметичность магнитно-гистерезисной муфты относительно внешней среды путем исполнения корпуса с высокой степенью защиты, а также провести монтаж в соответствии с технической документацией.

7.2 Региональная безопасность

Магнитно-гистерезисная муфта не является источником загрязнения окружающей среды, так как не наносит вред гидросфере, воздушному бассейну и литосфере. При нормальном режиме работы нет выбросов, сбросов или отходов.

7.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Опасность нанесения вреда окружающей среде, человеку и его жизнедеятельности возможна при нарушении целостности нефте- и газопровода, когда происходит выброс транспортируемой среды. Причинами могут являться стихийные бедствия, технологические и человеческие факторы.

Неисправности системы запорной арматуры можно разделить на полные, исключающие возможность использования задвижки до устранения причины, и частичные, при которых задвижка еще может использоваться.

К полным отказам из-за технологических факторов, возникших при проектировании, можно отнести отсутствие перемещения запорного клина между положениями “Открыто” — “Закрыто” в случае, когда магнитно-гистерезисная муфта не сработала. Это приведет к уменьшению давления в системе нефте- или газопровода, так как передача происходит порциями от одного сегмента трубопровода до другого. Также возможно пропускание среды через затвор в избыточном количестве из-за малого передаваемого момента от редуктора, необходимого для закрытия задвижки. В этом случае необходимо закрыть задвижку в ручном режиме, что возможно, так как при проектировании всей запорной арматуры всегда предполагается возможность ручного управления. Поэтому ущерб человеку или окружающей среде будет минимизирован.

К частичным отказам относится пропуск среды через затвор, в результате чего снизится экономичность работы. Запорная арматура сможет дальше функционировать, но до определенного времени, то есть частичные отказы

необходимо диагностировать на ранней стадии. Выявить внутренние неисправности можно по косвенным признакам — изменение давления в перекрытом трубопроводе или в некоторых случаях визуальным осмотром на наличие подтеков на корпусе запорной арматуры.

Самой серьезной аварийной ситуацией предполагается пробой трубопровода из-за неправильно подобранного номинального момента двигателя, муфты и редуктора. В этом случае будет происходить постоянное передавливание сальниковых уплотнений задвижки вплоть до разрушения целостности трубопровода.

Прежде всего необходимо контролировать качество запорной арматуры, ответственность за которое несут производители. При всех видах контрольных испытаний запорной арматуры главными являются испытания на герметичность по отношению к окружающей среде и испытания герметичности затвора. В числе мер, призванных предупредить сбои в работе запорной арматуры, является регулярное обслуживание, так как долговечность и надежность запорной арматуры зависит в том числе и от грамотной организации профилактического обслуживания и планово-предупредительных ремонтов, что является человеческим фактором, который влияет на возможность возникновения аварийных ситуаций.

Так как повышение надёжности приводит и к дополнительным затратам, а недооценка надёжности — к экологическим катастрофам, следует соблюдать технику эксплуатации запорной арматуры и делать качественный подбор оборудования.

8 Технология производства электрических аппаратов

Технологический процесс общей сборки гистерезисной муфты с индуктором типа «звездочка»

Основной и наиболее важной частью технологической подготовки сборочного производства является проектирование технологического процесса сборки, который представляет собой совокупность операций по соединению деталей в определенной, технически и экономически целесообразной последовательности для получения сборочных единиц и изделий, полностью отвечающих установленным требованиям. В зависимости от типа производства затраты времени на сборочные работы составляют от 20 — 30% в массовом и крупносерийном производстве до 35 — 40% в мелкосерийном и единичном. Поэтому разработка технологии сборки магнитно-гистерезисной муфты является одной из важных составных частей технологической подготовки. В работе следует оценить технологичность конструкции, составить схему сборки и маршрутную технологию общей сборки, рассчитать нормы времени, выбрать оборудование и его количество для выполнения годовой программы на выпуск 7500 штук.

8.1 Анализ конструкции магнитно-гистерезисной муфты на технологичность

Рациональные конструкции изделия, обеспечивающие необходимые эксплуатационные требования, не могут быть созданы без учета трудоемкости и материалоемкости их изготовления. Соответствие конструкции изделий требованиям минимальной трудоемкости и материалоемкости определяет технологичность конструкции.

Магнитно-гистерезисная муфта состоит из: индуктора типа «звездочка» поз. 2, сборочной единицы ведомой части муфты поз. 1, подшипники поз.

6, корпусов поз. 4, 3, подшипниковые щиты поз. 5, а также стандартных изделий.

Компоновка муфты исключает необходимость проведения промежуточной разборки и повторной сборки его составных частей, а также сборочные единицы являются унифицированными, что позволяет заменять одни детали другими в случае дефектов.

Магнитно-гистерезисная муфта – сборочная единица, состоящая из малого числа составных частей, что является подтверждением технологичности конструкции. В конструкции муфты предусмотрена базовая часть – индуктор, являющийся основой для установки остальных частей. Для сборки муфты применены технологичные виды соединений. Фиксация частей муфты относительно корпуса обеспечивает прессовая посадка подшипников. Подшипники поз. 3 напрессованы на поз. 1, 2. Неподвижность обеспечивается за счёт посадки с натягом под действием осевой силы, создаваемой термовоздействием. Защита подшипников обеспечивается подшипниковыми щитами поз. 4. Применение посадки подшипников с натягом позволяет уменьшить число деталей и снизить трудоемкость при сборке. Установлены закрытые подшипники с двухсторонними контактными уплотнениями, благодаря которым в будущем не надо проводить проверочные и смазочные работы.

Для того, чтобы обеспечить качество продукции, то есть вращающего момента (величину, стабильность) необходимо соблюдать точность формы, размеров, относительного положения и движения исполнительных поверхностей муфты. При малейших перекосах и отклонениях от соосности механизм разлаживается и усиленно изнашивается. Свидетельством этого могут быть чрезмерный нагрев подшипников, стук и т. д. Поэтому предусмотрены нормы соосности и шероховатости поверхности, а также контрольные испытания.

Конструкция обеспечивает свободный доступ рабочих органов оборудования и сборочных инструментов к соответствующим местам соединения деталей. Конструкцию изделия считать технологичной, так как магнитно-

гистерезисную муфту можно изготовить, используя экономичные и производительные методы, при этом изделие будет соответствовать современному уровню техники.

8.2 Составление схемы сборки и маршрутной технологии

В качестве базовой детали принимаем индуктор муфты, так как его проще зафиксировать в приспособлении. Сначала нагретые подшипники одеваем на индуктор и ведомую часть муфты, одеваем корпус. Далее закрепляются подшипниковые щиты болтами. Провести контроль сборки (рисунок 17).

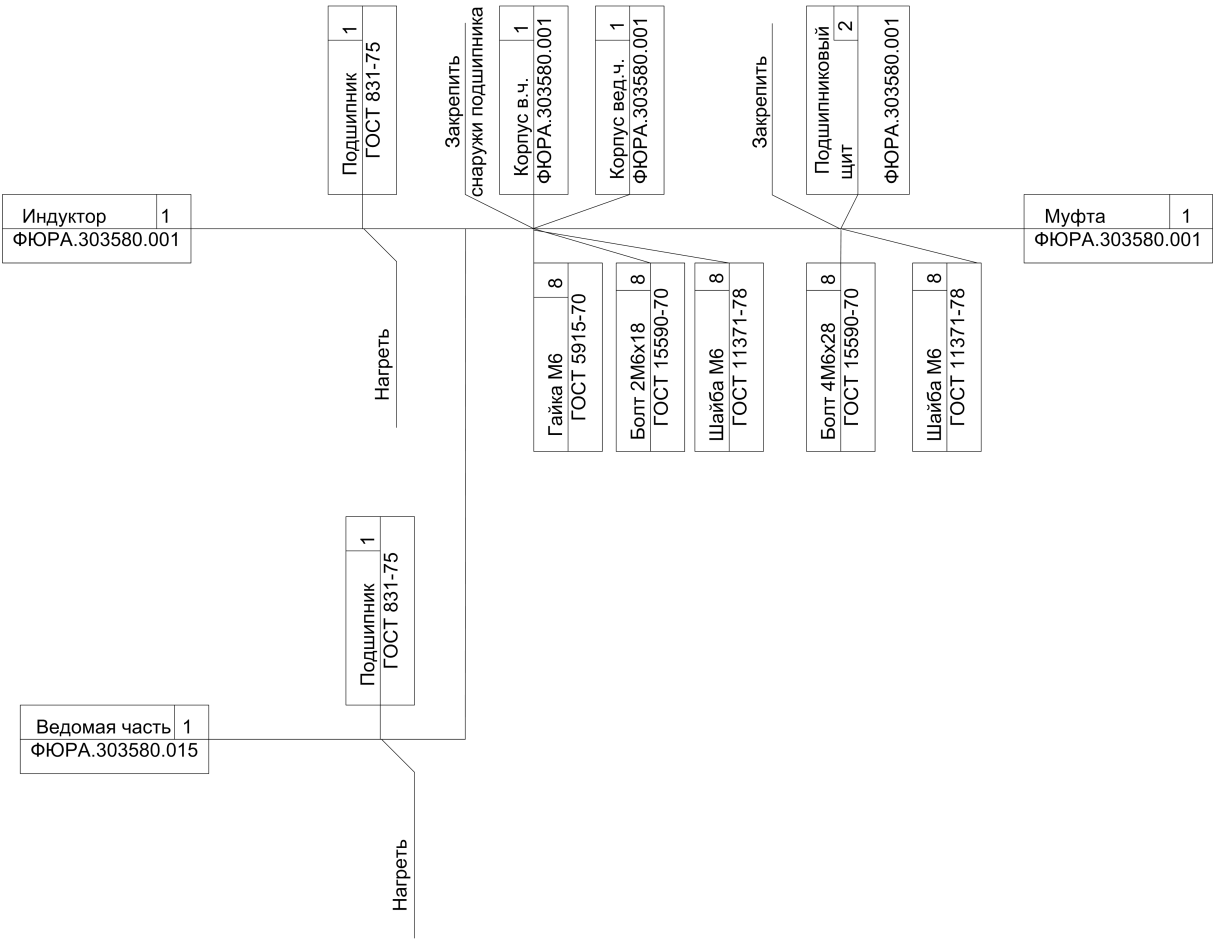


Рисунок 17 — Схема сборки

На базе схемы сборки разрабатывается маршрутная технология, устанавливающая последовательность и содержание операций. Если последова-

тельность операций уже predeterminedена схемой сборки, то содержание операций устанавливаются в зависимости от выбранного типа производства и темпа сборки.

8.3 Выбор оборудования

Для запрессовки подшипников используется метод горячей посадки. Нагрев подшипников осуществляется индукционным способом. Индукционное нагревание – это безопасный и экологически чистый метод нагревания подшипников, альтернатива традиционным способам нагрева: нагревание в масляной ванне, в печи, на нагревательных плитах, или с помощью обдува горелкой. Кроме того традиционное нагревание подшипников, как правило, сопровождается дымом, едкими запахами и предполагает значительный расход масла. Подобные виды нагрева подшипников перед монтажом представляют опасность для здоровья обслуживающего персонала и вредны для окружающей среды, тогда как индукционное нагревание — безопасный и экологически чистый процесс. Использоваться будет индукционный нагреватель SCORPIO TMBH 1, характеристики приведены в таблице 19 (рисунок 18).

Таблица 19 — Технические характеристики нагревателя SCORPIO TMBH 1

Питание	
Напряжение	100-200 В, 50-60 Гц
Потребляемая мощность	350 Вт
Нагреваемая деталь	
внутренний диаметр	20 ... 100 мм
вес	до 5 кг



Рисунок 18 — Индукционный нагреватель

Fluke 830 — лазерный прибор для центрирования валов, является инструментом для точного выравнивания вращающихся валов. В отличие линейки или стрелочных индикаторов Fluke 830 выполняет сложные расчеты выравнивания. Усовершенствованный пользовательский интерфейс обеспечивает легкость понимания результатов, которые не требуют обширных знаний (рисунок 19). Технические характеристики приведены в таблице 20.



Рисунок 19 — Индукционный нагреватель

Стенд электромеханический СЭМ-2 от научно-производственной фирмы «Мехатроника-Про» предназначен для проведения испытаний, состоит из двух электродвигателей — нагрузочного и задающего. Стенд обеспечивает контроль следующих величин: мощность на валу двигателя, крутящий момент силы номинальный с погрешностью не более 10%, частота вращения

Таблица 20 — Технические характеристики Fluke 830

Вычислительные мощности	
ЦПУ	Intel XScale PXA270 работает на 312 МГц
Источник питания	Встроенный литий-ионный полимерный аккумулятор: 7,4 В / 2,6 Ач
Датчик	
Принцип измерения	Коаксиальный, отраженный лазерный луч
Разрешение	1 мкм; Точность (ср): > 98%
Охрана окружающей среды	IP 67

номинальная с погрешностью не более 10%. Технические данные и характеристики стенда:

- Номинальное напряжение питания СЭМ-2: 342...418 В, 50 Гц, 3-х фазное.
- Климатическое исполнение: работа при температуре от +15 С до +30 С, УХЛ4.
- Хранение – от -40 С до +50 С. Непрерывная работа при относительной влажности 5,95%.
- Стенд СЭМ-2 стабилизирует трехфазное напряжение синусоидальной формы частотой 50 Гц с действующим значением 380 вольт линейного напряжения с точностью 2%.

8.4 Расчет норм времени

Определение норм времени производится по укрупнённым нормативам (на технологические переходы) и по типовым нормам, составленным аналитическим методом для типовых технологических процессов. В нормировочном справочнике в специальных подразделах приведены различные операции с разбивкой на технологические переходы. Для каждого перехода приведены возможные варианты их выполнения в зависимости от факторов, влияющих

на процесс сборки (масса, диаметр, вид посадки, величина перемещения, способ перемещения, число точек ориентации и пр.). Для каждого перехода приведены значения штучного времени, т.е. в этих значениях учтено не только операционное время, но и время на обслуживание рабочего места и время на личные потребности и отдых. Расчёт штучного времени на операцию по сборке приведен в таблице 21.

Таблица 21 — Нормы времени для операции сборки

№ Перехода	Содержание работы	№ карты и позиции	Время, мин
1	Протереть подшипник и индуктор. Закрепить индуктор на верстаке.	Карта 2, операция 1, строка 2	$T_v = 0,16$
2	Закрепить подшипник в индукторном нагревателе. Включить индукционный нагреватель. Нагреть подшипник до 90°C.	Карта 2, операция 1, строка 2	$T_v = 0,1;$ $T_o = 0,6$
3	Вытащить подшипник и напрессовать на индуктор.	Карта 2, операция 1, строка 3	$T_v = 0,1;$ $T_o = 0,2$
4	Повторить предыдущие операции с ведомой частью муфты. Выключить индукционный нагреватель.	Карта 2, операция 1, строка 7, 8	$T_v = 0,42;$ $T_o = 0,9$
5	Собрать корпуса с ведомой частью муфты и индуктором. Закрепить болтом с гайкой 8 раз.	Карта 2, операция 1, строка 11,12	$T_v = 0,3;$ $T_o = 0,6$
6	Одеть подшипниковые щиты. Закрепить болтом с шайбой 8 раз.	Карта 2, операция 1, строка 14, 15	$T_v = 0,17;$ $T_o = 0,6$
Итого:			$T_v = 1,51;$ $T_o = 2,6$

Тогда оперативное время является суммой вспомогательного и основного времени:

$$T_{оп} = T_o + T_v = 1,51 + 2,6 = 4,11 \text{ мин.} \quad (74)$$

Время на обслуживание рабочего места принимаем 8% от оперативного времени, на отдых и личные надобности — 2,5%:

$$T_{\text{обсл}} = 0,08 \cdot T_{\text{оп}} = 0,08 \cdot 4,11 = 0,33; \quad T_{\text{отд}} = 0,025 \cdot T_{\text{оп}} = 0,025 \cdot 4,11 = 0,1 \text{ мин.} \quad (75)$$

Норма штучного времени $T_{\text{шт}}$ рассчитывается по формуле

$$T_{\text{шт}} = T_{\text{оп}} + T_{\text{обсл}} + T_{\text{отд}} = 4,11 + 0,33 + 0,1 = 4,54 \text{ мин.} \quad (76)$$

Нормы времени контрольной и испытательной операций приведены в таблице 22.

Таблица 22 — Нормы времени для контрольной и испытательной операций

Операция	Основное время T_o , мин	Вспом-ное время T_v , мин	Опер-ное время $T_{\text{оп}}$, мин	Штучное время $T_{\text{шт}}$, мин
Контрольная	1,78	0,82	2,6	2,87
Испытательная	1,1	0,4	1,5	1,66

8.5 Расчет количества оборудования

Количество оборудования, необходимое для организации производства, и его загрузка являются исходными данными для проектирования участка цеха. Определяем составляющие на 2016 год, число дней в котором 366:

1. $V_d = 119$ — количество выходных и праздничных дней;
2. $z = 1$ — число смен работы оборудования;
3. $K_p = 0,97$, — коэффициент, учитывающий время пребывания оборудования в ремонте для мелких станков массой до 1 тонны.

Эффективный годовой фонд времени работы индукционного нагревателя равен

$$F = (366 - V_d) \cdot 8 \cdot z \cdot K_p = (366 - 119) \cdot 8 \cdot 1 \cdot 0,97 = 1917 \text{ ч} \quad (77)$$

Сумма штучно-калькуляционного времени по всем операциям для одного станка:

$$T_{\text{шт-к}} = T_{\text{шт}} + \frac{T_{\text{пз}}}{n_{\text{изд}}} = 4,54 + \frac{1,59}{625} = 4,5441 \text{ мин}, \quad (78)$$

где $T_{\text{пз}}$ — подготовительно-заключительное время, можно принять

$T_{\text{пз}} = 0,35 \cdot T_{\text{шт}} = 0,35 \cdot 4,54 = 1,59 \text{ мин}$, $n_{\text{изд}} = \frac{N}{12} = \frac{7500}{12} = 625$ — число изделий в месячной партии.

Расчетное число оборудования равно

$$C_p = \frac{T_{\text{шт-к}} \cdot N}{60F} = \frac{4,5441 \cdot 7500}{60 \cdot 1917} = 0,29. \quad (79)$$

Принимаем число станков равным $C_{\text{п}} = 1$ и определяем коэффициент загрузки оборудования:

$$K_z = (C_p / C_{\text{п}}) \cdot 100 = (0,29 / 1) \cdot 100 = 29\%. \quad (80)$$

График загрузки оборудования представлен на рисунке 20.

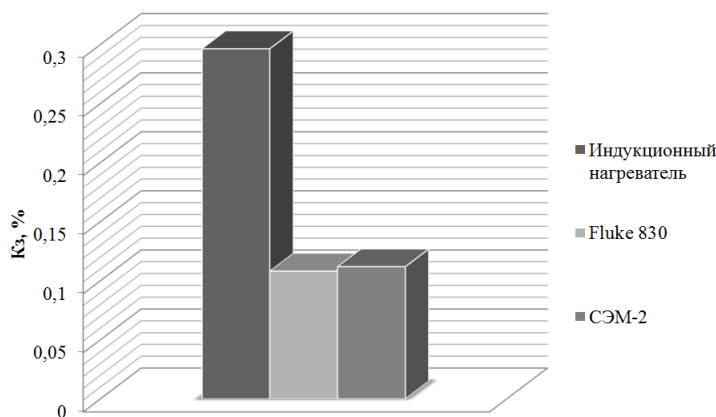


Рисунок 20 — График загрузки оборудования

Магнитно-гистерезисная муфта является технологичной и достаточно простой в сборке, низкие показатели загрузки оборудования показывают, что возможно увеличить количество выпускаемых изделий в несколько раз.

9 Заключение

В результате проведенных теоретических исследований электропривода запорной арматуры был выявлен необходимый рабочий диапазон электродвигателей, в рамках которого рассмотрено применение магнитно-гистерезисных муфт в качестве ограничителя максимального момента.

Произведен обзор типов магнитно-гистерезисных муфт, обоснован выбор типа индуктора. Установлено, что наиболее простым в технологическом изготовлении является индуктор в форме «звездочка». Отмечена перспективность применения муфты в электромеханической системе электропривода.

Разработана автоматизированная методика расчета параметров магнитно-гистерезисной муфты, с помощью которой проанализированы технические характеристики, что говорит о применимости данного способа работы. Рассчитан ряд муфт и их основные габариты для различных серий электродвигателей, применяемых в электроприводе запорной арматуры. При анализе технических характеристик была получена зависимость размеров муфты от перегрузочного момента. Определено, что муфты лучше всего соответствуют сериям двигателей до 7,5 кВт. Применение муфт такого типа с остальными сериями двигателей может быть нецелесообразно из-за возможно большой стоимости изделия. Рассмотрено влияние принимаемых параметров при расчете на диаметр индуктора, только изменение числа пар полюсов приводит к увеличению диаметра, остальные параметры — к уменьшению. В результате исследований, по энергетическим показателям и конструктивным параметрам магнитно-гистерезисную муфту возможно использовать в качестве ограничителя момента в электроприводе запорной арматуры, но изменение типа материала и конструкции может улучшить полученные результаты.

По результатам анализа с различных позиций — ресурсоэффективности, финансовой и экономической у реализации производства магнитно-гистерезисных муфт есть большой коммерческий потенциал и возможности для реали-

зации, но не хватает нескольких существенных разработок в виде отсутствия прототипа и испытательного стенда, что говорит о дальнейшей необходимости проведения исследований, которые позволят более точно определить критерии оценок и их результаты о конкурентоспособности технического решения.

Муфта не является источником шума, для предотвращения вибраций необходимо производить сборку в соответствии с документацией. Влияние электромагнитного поля слабое, средств защиты не требуется. Муфта механически безопасна, необходим периодический осмотр системы. Электрическая безопасность обеспечивается заземлением кожуха, так как в конструкции нет электрических обмоток. Исполнение кожуха с высокой степенью защиты отвечает требованиям пожаро- и взрывобезопасности. При эксплуатации не требуется селитебной зоны, так как выбросы в атмосферу, сбросы в гидросферу, отходы в литосферу отсутствуют. Чрезвычайной ситуацией является возможность пробоя нефте- или газопровода или отказ работы задвижки. Мерами предупреждения являются контрольные испытания при производстве арматуры, своевременный осмотр, плано-предупредительные ремонты.

Список литературы

- [1] Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 280 с.
- [2] Борьба с потерями нефти и нефтепродуктов при их транспортировке и хранении/ Абузова Ф.Ф. Бронштейн И.С., Новоселов В.Ф. и др. — М.: Недра, 1981. — 243 с.
- [3] Magtrol. Гистерезисные тормоза/Сцепления [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.magtrol.ru/catalog/cohesions&brakes/cohesions&brakes.html>.- (Дата обращения: 11.05.2015).
- [4] Гистерезисные тормоза, муфты фирмы Automation and Gears [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.nordtechno.com/products/gisterezisnye-tormoza-i-mufty/a-g.html>.- (Дата обращения: 11.05.2015).
- [5] ГОСТ 25639-83. Магниты литые постоянные. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3).
- [6] ГОСТ Р 53672-2009. Арматура трубопроводная. Общие требования безопасности.
- [7] ГОСТ 12.4.011-87. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.
- [8] ГОСТ 12.4.125-83. Система стандартов безопасности труда. Средства коллективной защиты работающих от воздействий механических факторов. Классификация.
- [9] Правила устройства электроустановок (ПУЭ). М., Энергоиздат, 1986.
- [10] ГОСТ 12.2.021-76. ССБТ. Электрооборудование взрывозащищенное. Порядок согласования технической документации, проведения испытаний, выдачи заключений и свидетельств.

- [11] ГОСТ 12.2.020-76. ССБТ. Электрооборудование взрывозащищенное. Классификация. Маркировка.
- [12] Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях.
- [13] Гуревич Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры, Л.: Машиностроение, 1968г. — 888с.
- [14] Дроздов П.А. Разработка новых алгоритмов управления вентильно-индукторных электроприводов: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.техн.наук: 05.09.03 — Москва, 2002. — 20 с.
- [15] Завод электромагнитных муфт. Каталог продукции [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://emufta.ru/catalog/>.- (Дата обращения: 11.05.2015).
- [16] Ланграф, С. В. Асинхронный моментный электропривод с векторным управлением для имитации усилий запорной арматуры магистральных нефтепроводов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.техн.наук; — Томск: Б.и., 2007. — 20 с.
- [17] Каракулов, А. С. Микроконтроллерное управление асинхронным электроприводом запорной арматуры : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук; Томский политехнический университет; — Защищена 28.12.2005 г. — Томск: Б.и., 2005. — 136 л.: ил. — Библиогр.: с. 122-129 (54 назв.).
- [18] Мизюрин С.Р., Ермилов М.А. Проектирование магнитно-гистерезисных муфт. — Ротапринт МАИ. — 123 с.
- [19] Мишин Д. Д. Магнитные материалы: Учеб. пособие. — М.:Высш. школа, 1981 — 335 с.
- [20] Молоканов Ю.К., Харас З.Б. Монтаж аппаратов и оборудования для нефтяной и газовой промышленности. М: Недра, 1982. — 391 с.

- [21] Электропривод запорной арматуры: монография / А.Г. Гарганеев, А.С. Каракулов, С.В. Ланграф; Томский политехнический университет. - Изд-во Томского политехнического университета, 2012. — 157 с.
- [22] Котелевский Ю.М., Мамонтов Г.В. и др. Современные конструкции трубопроводной арматуры для нефти и газа. Изд. 2-е и доп.,— М: Недра, 1976.— 496с.
- [23] Плано̀во-финансовый отдел. Регламентирующие документы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://portal.tpu.ru/departments/otdel/peo/documents.->(Дата обращения: 11.05.2015).
- [24] Постоянные магниты: Справочник/ Альтман А.Б., Герберг А.Н., Гладышев П.А. и др.; Под ред. Ю.М. Пятина. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. Энергия, 1980. — 488с.
- [25] ПОТ РО 112-002-98. Правила труда при эксплуатации магистральных нефтепродуктопроводов.
- [26] СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
- [27] СН 2.2.4/2.1.8.566. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. М.: Минздрав России, 1997.
- [28] Техмаркет. Запорно-регулирующая арматура. Электроприводы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.techmarcet.ru/catalog/2/18/29.html>-(Дата обращения: 15.03.2015).
- [29] «Уфимское приборостроительное производственное объединение». Продукция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.uppo.ru/production/nefteprod/evimta/>.- (Дата обращения: 15.03.2015).

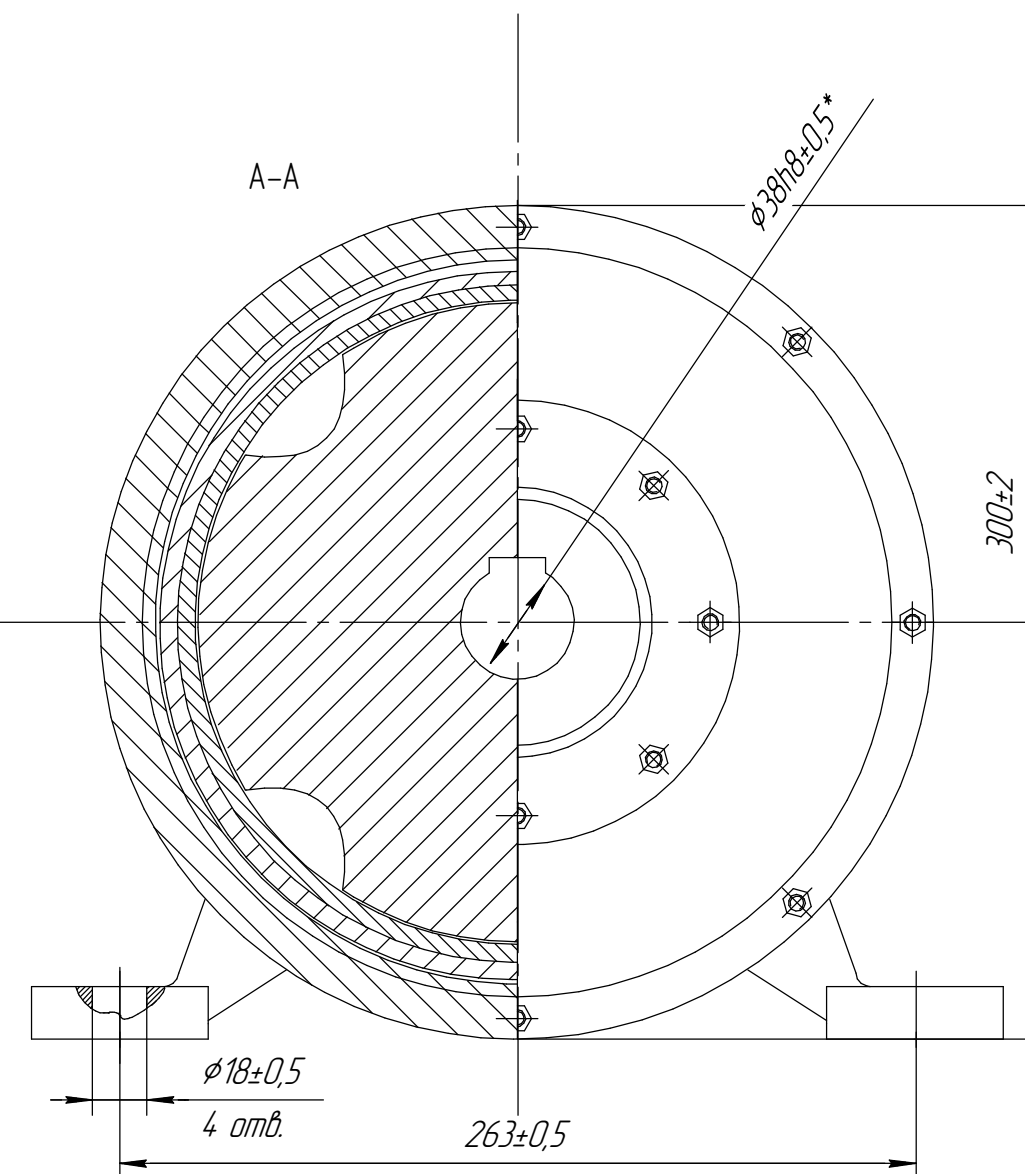
- [30] Формирование высококоэрцитивного состояния и магнитные свойства сплавов системы Fe-Cr-Co-Mo.
- [31] Магнитные гистерезисные свойства Fe-26Cr-16Co порошковых магнитотвердых сплавов Устюхин А.С., Алымов М.И., Миляев И.М.
- [32] Шабуров, П.О. Интеллектуальный электропривод на основе вентильного двигателя для запорной арматуры. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.техн.наук; — Челябинск ЮУрГУ, 2009. — 18 с.
- [33] Максимов, Андрей Александрович. Разработка и исследование микропроцессорных систем управления электроприводами собственных нужд с индукторными двигателями.
- [34] Harmonic Drive. Servo Mount Gearheads [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.harmonicdrive.net/products/servo-mount-gearheads>.- (Дата обращения: 11.05.2015).
- [35] StS Coupling GmbH. Magnetic Couplings [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.stscoupling.de/index.php?p=content&id=11&name=magnetkupplungen&area=1>.- (Дата обращения: 11.05.2015).

Список публикаций.

1. Савельева М.В., Колтунова Е.А. Перспективы развития гистерезисных муфт//Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: материалы III Российской молодежной научной школы-конференции, Томск, 21-23 Октября 2015. - Томск: Скан, 2015 - С. 28-31

Перв. примен.		Справ. №		ФЮРА.303580.003												
Подп. и дата		Инв. № дудл.		Взам. инв. №		<table border="1"> <caption>Данные для графика загрузки оборудования</caption> <thead> <tr> <th>Оборудование</th> <th>Kz, %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Индукционный нагреватель</td> <td>0,32</td> </tr> <tr> <td>Fluke 830</td> <td>0,12</td> </tr> <tr> <td>СЭМ-2</td> <td>0,13</td> </tr> </tbody> </table>			Оборудование	Kz, %	Индукционный нагреватель	0,32	Fluke 830	0,12	СЭМ-2	0,13
Оборудование	Kz, %															
Индукционный нагреватель	0,32															
Fluke 830	0,12															
СЭМ-2	0,13															
Подп. и дата		Инв. № дудл.		Взам. инв. №		ФЮРА.303580.003 График загрузки оборудования Лит. Масса Масштаб Лист Листов										
Инв. № подл.	Изм. Лист	№ докум.	Подп.	Дата												
	Разраб.	Колтунова Е.А.														
	Пров.	Сипайлова Н.Ю.														
	Т.контр.															
	Н.контр.															
Утв.					ЭНИН НИТПУ Группа 5Г2Г											

Справ. №		Перв. примен.		ФЮРА.303580.004									
Подп. и дата		Взам. инв. №		Инв. № дубл.		Подп. и дата		ФЮРА.303580.004 Схема замещения магнитной цепи					
Инв. № подл.		Т.контр.		Н.контр.		Утв.		Лист		Листов		1	
Изм.		Лист		№ докум.		Подп.		Дата		Масса		Масштаб	
Разраб.		Колтунова Е.А.										1:1	
Пров.		Сипайлова Н.Ю.											
Копировал										ЭНИН НИТПУ		Группа 5Г2Г	
										Формат		А4	



				3	1
		НИТПУ, ЭНИН	ФЮРА.303580.001		
		Гистерезисная муфта			0

Комплект документов
на технологических процесс сборки
гистерезисной муфты с индуктором типа "звездочка"
ФЮРА.303580.001

																				4		2
Разраб.		Колтунова Е.А.							НИТЛУ, ЭНИН			ФЮРА.303580.001										
									Группа 5Г2Г													
Н. контр.									Гистерезисная муфта										0			
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции					Обозначение документа												
Б					Код, наименование оборудования					СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт.	Тпз	Тшт.		
А 01					001 8864, слесарно-сборочная					КЭ 1												
Б 02					344203, индукционный нагреватель SCORPIO TIBH 1					2	18466	3										
К 03	Индуктор; подшипник 46220 ГОСТ 831-75																					
О 04	Протереть подшипник и индуктор. Индуктор закрепить на верстаке. Закрепить подшипник в индукционном нагревателе. Нагреть до 90 °С,																					
О 05	вытащить подшипник и напрессовать на индуктор.																					
К 06	Ведомая часть муфты; подшипник 46220 ГОСТ 831-75																					
О 07	Протереть подшипник и ведомую часть муфты. Закрепить на верстаке. ведомую часть муфты. Закрепить подшипник в индукционном нагревателе.																					
О 08	Нагреть до 90 °С, вытащить подшипник и напрессовать. Снять с верстака сборку. Выключить индукционный нагреватель.																					
Т 09	392640, клещи; халат мужской ГОСТ 12.4.132-83; перчатки ГОСТ 28846-90; 392880 тиски верстачные.																					
К 10	Корпус ведомой части муфты, корпус ведущей части муфты, болт 2М6х18 ГОСТ 15590-70 (8); гайка М6 ГОСТ 5915-70(8), шайба С.8.37 ГОСТ 11371-78(8).																					
О 11	Собрать корпус с ведомой частью муфты, закрепить на верстаке. Индуктор поместить внутрь, закрепить. Одеть корпус ведущей части. Взять																					
О 12	болт, одеть шайбу на болт, вставить в отверстие, ввернуть от руки. Одеть гайку с другой стороны, взять ключ, завернуть болт. Повторить 8 раз.																					
К 13	Подшипниковый щит (2) ;Болт 4М6х28 ГОСТ 15590-70 (8); шайба С.8.37 ГОСТ 11371-78(8).																					
О 14	Одеть подшипниковые щиты. Взять болт, одеть шайбу на болт, вставить в отверстие, ввернуть от руки.																					
О 15	Взять ключ, завернуть болт. Повторить закрепление болтом 8 раз.																					
Т 16	392650, ключ на М6; 392880 тиски верстачные.																			Тшт=4,11		
КТП		Карта технологического процесса																				

																				4		3			
A	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименование операции					Обозначение документа															
Б					Код, наименование оборудования					СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт.	Тпз	Тшт.					
A 17					002 0220, контрольная					ФЮРА.303580.001															
Б 18										2	13055	4													
О 19	Проверить линейные размеры, внешний диаметр 358, длину от вала до вала 438, диаметр внутренней части муфты $\phi 38$.																								
Т 20	393120, калибры гладкие, скобы.																								
Б 21					419500, контрольное устройство					2	13055	4													
О 22	Закрепить муфту в оправке, проверить Проверить соосность поверхностей Б и В относительно оси В.																								
О 23	393550, контрольные оправки.																		Тшт=2,87						
A 24					003 0220, испытательная																				
Б 25					419500, нагрузочный испытательный стенд					2	19776	4													
О 26	Установить муфту между валами нагрузочных двигателей, включить стенд, проверить на датчике момент, передаваемый муфтой, $M=25 \text{ Н*м}$.																								
О 27	Проверить перегрузочную способность муфты – 27,5 Н м.																		Тшт=1,66						
КТП		Карта технологического процесса																							