

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

Инженерная школа энергетики
Отделение Электроэнергетики и электротехники
Направление подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Профиль «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений»

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

УДК 629.113-83-52

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г4Б	Бухтуев Вадим Юрьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Образцов К.В.	-		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Калмыкова Е.Ю.	к.э.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Панин В.Ф.	д.т.н., профессор		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Отделение электроэнергетики и электротехники	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭЭ ИШЭ	Дементьев Ю.Н.	Ph.D., Доцент		

Томск – 2018 г.

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

Инженерная школа энергетики
 Отделение Электроэнергетики и электротехники
 Направление подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
 Профиль «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений»

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ОЭЭ ИШЭ
 _____ Дементьев Ю.Н.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
5Г4Б	Бухтуеву Вадиму Юрьевичу

Тема работы:

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	02.02 2018г. № 645/С

Срок сдачи студентом выполненной работы:	8.06.2018
--	-----------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><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></p>	<p><i>Объектом исследования является синхронный двигатель с постоянными магнитами.</i></p> <p><i>В качестве исходных данных представлены:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - структурная схема электропривода - характеристики исследуемого электрооборудования
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - моделирование в среде MatLab системы управления синхронного двигателя с постоянными магнитами; - обсуждение результатов выполненной работы; - разработка раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»; - разработка раздела «Социальная ответственность»;

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>		
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>		
Раздел	Консультант	
Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Калмыкова Екатерина Юрьевна	
Социальная ответственность	Панин Владимир Филиппович	
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:		
Все разделы выпускной квалификационной работы написаны на русском языке.		

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Образцов	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г4Б	Бухтуев В.Ю.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ,
РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5Г4Б	Бухтуеву Вадиму Юрьевичу

Инженерная школа	ИШЭ	Отделение	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Бакалавр	Направление	Электроэнергетика и электротехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Оклад руководителя - 20800 руб. Оклад инженера - 17000руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	30 % премии 20 % надбавки 16% накладные расходы 30% районный коэффициент
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	27,1% отчисления на социальные нужды

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Анализ конкурентных технических решений
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Формирование плана и графика разработки: - определение структуры работ; - определение трудоемкости работ; - разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: -заработная плата (основная и дополнительная); - отчисления на социальные цели; - накладные расходы.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение эффективности исследования

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. График Ганта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Калмыкова Е.Ю.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г4Б	Бухтуев Вадим Юрьевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5Г4Б	Бухтуеву Вадиму Юрьевичу

Инженерная школа	ИШЭ	Отделение	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p> <p>1.1. вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</p> <p>1.2. опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</p> <p>1.3. негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</p> <p>1.4. чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</p>	<p>Главным объектом исследования – ИБП узла связи. Необходимо поддержание:</p> <p>1.1. Нормативных метеоусловий, уровней вибрации и шума;</p> <p>1.2. Нормативных мер обеспечения электро- и пожаробезопасности.</p> <p>1.3. Нормативных мер защиты окружающей среды от воздействия предприятия (механического цеха).</p> <p>1.4. Наиболее вероятные ЧС: загорания (пожары), электрический удар, например, при замыкании фазы питания на корпус электрической машины при нарушенном его заземлении.</p>
<p>2. Ознакомление и отбор законодательных и нормативных документов по теме и отбор их.</p>	<p>ГОСТ 12.0.003-74 «ОиВПФ»;</p> <p>ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»;</p> <p>ГОСТ 12.1.003-83 «Шум. Общие требования безопасности»;</p> <p>ГОСТ 12.1.01290 «Вибрационная безопасность»;</p> <p>ПУЭ, утвержденный министерством энергетики России от 08.07.2002, №204, Глава 1.7.;</p> <p>№123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008;</p> <p>ГОСТ Р 50571.3-94 «Электроустановки зданий. Часть 4. Защита от поражения эл. током».</p> <p>Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009 №1110 (с изменениями от 24.12. 2014) «Об организации сбора, вывоза, утилизации, и переработки бытовых и промышленных отходов на территории муниципального образования «Город Томск» ».</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <p>1.1. физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</p> <p>1.2. действие фактора на организм человека;</p> <p>1.3. приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</p>	<p>Наиболее значимые вредные факторы:</p> <p>1. Шум</p> <p>2. Вибрации</p> <p>3. Недостаток естественного света</p> <p>4. Возможные ненормативные метеоусловия</p>

1.4.предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)	
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности 2.1.механические опасности (источники, средства защиты); 2.2.термические опасности (источники, средства защиты); 2.3.Опасность электропоражения (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); 2.4.Опасность загораний (пожаров) (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)	Наиболее вероятно воздействие на персонал следующих опасных факторов: 1.Опасность электропоражения; 2.Пожаровзрывоопасность.
3. Охрана окружающей среды: 3.1.анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); 3.2.анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); 3.3.анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);	По п.3.1.:разработать или описать систему обращения с выбросами механического цеха. По п.3.2.: разработать или описать систему обращения со сбросами. По п.3.3. описать систему обращения с твердыми отходами цеха в соответствии с постановлениями Правительства РФ от 03.09.2010 №681 и Администрации г. Томска от 11.11 2009 №1110(с изменениями от 24.12. 2014г.).
4. Защита в чрезвычайных ситуациях: 4.1.перечень возможных ЧС на объекте; 4.2.выбор наиболее типичных ЧС; 4.3.разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;	Одни из наиболее вероятных ЧС: пожары, электропоражения. Разработать мероприятия по предотвращению пожаров, электропоражений и других ЧС и ликвидации их последствий.
Перечень графического и инструктивного материалов:	
Обязательные графические материалы к расчётам по заданию (обязательно для специалистов и магистров).	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Панин В. Ф.	д.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г4Б	Бухтуев В.Ю.		

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

Инженерная школа энергетики
Отделение Электроэнергетики и электротехники
Направление подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
Профиль «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений»
Уровень образования Бакалавр
Период выполнения весенний семестр 2017/2018 учебного года

В форме:

Бакалаврской работы

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

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ – ПЛАН
Выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом работы	15.06.2018г.
-----------------------------	--------------

Дата контроля	Название раздела (модуля)/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела модуля
16.04.2018г	Расчет и выбор оборудования	
5.05.2018г	Моделирование системы управления электродвигателя	
12.05.2018г	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
19.05.2018г	Социальная ответственность	
25.05.2018г	Оформление пояснительной записки	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Образцов К.В.	-		

Согласовано:

Отделение электроэнергетики и электротехники	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭЭ ИШЭ	Дементьев Ю.Н.	Ph.D., доцент		

РЕФЕРАТ

Ключевые слова: синхронный двигатель с постоянными магнитами, векторное управление, бездатчиковое управление, энергоэффективность, минимизация тока статора, векторная широтно-импульсная модуляция, адаптивный наблюдатель состояния, автономный инвертор напряжения.

В данной выпускной квалификационной работе рассматривается разработка и моделирование систем явнополюсным синхронным двигателем с постоянными магнитами с использованием математического пакета MATLAB версии 7.

Целью работы является построение системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами, обеспечивающей требуемые динамические и энергетические показатели качества управления. В качестве критерия энергоэффективности выбрана минимизация токов статора.

Результатом работы являются модель и разработанная система управления; настроенные коэффициенты регуляторов скорости и токов; программа расчёта характеристик функциональных преобразователей; переходные характеристики процессов, позволяющие сравнить эффективность разработанных систем.

Работа содержит 72 страницы текста, 16 рисунков, 15 таблиц, 29 источников литературы.

Оглавление

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	11
ВВЕДЕНИЕ.....	12
1. РАСЧЕТ СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	15
1.1 Расчет мощности двигателя и его выбор	15
1.2 Расчет аккумуляторной батареи и ее выбор.....	16
2. ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ	18
2.1 Обзор существующих методов управления СДПМ	18
2.2 Математическая модель СДПМ.....	24
2.3 Синтез системы управления СДПМ.....	30
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ	35
3.1 Моделирование СДПМ.....	35
3.2 Моделирование системы управления с применением аperiodического звена.....	36
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	41
4.1 Анализ конкурентных технических решений	41
4.2. Планирование научно-исследовательских работ	44
4.2.3. Разработка графика проведения научного исследования.....	46
4.2 Смета затрат научно-технического исследования (НТИ)	49
4.4 Смета затрат научно-исследовательского проекта.....	54
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	56
5.1 Анализ вредных факторов.....	56

5.2 Анализ опасных факторов.....	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	69
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.	70

Определения, обозначения и сокращения

АД – асинхронный двигатель

АИН – автономный инвертор напряжения

ГЭМ – городской электромобиль

ДПР – датчик положения ротора

ДПТ – двигатель постоянного тока

КНИ – коэффициент нелинейных искажений

КПД – коэффициент полезного действия

П – регулятор – пропорциональный регулятор

ПИ – регулятор – пропорционально-интегральный регулятор

ПИД – регулятор – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор

ПЧ – преобразователь частоты

СДПМ – синхронный двигатель с постоянными магнитами

ТЭД – тяговый электродвигатель

ШИМ – широтно-импульсная модуляция

ЭДС – электродвижущая сила

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor (биполярный транзистор с изолированным затвором)

PWM – Pulse Width Modulation (широтно-импульсная модуляция)

THD – Total Harmonic Distorsions (коэффициент нелинейных искажений)

Введение

Транспорт с электрическим двигателем по присущим ему экологическим характеристикам существенно опережает другие виды транспорта с двигателями, использующими в качестве движущей силы тепло. Но несмотря на это тенденции по разработке, созданию и развитию электрического транспорта предугадали использование такого его вида, в котором электроэнергия при помощи контактных проводов поступает к нему от системы тягового электроснабжения. Ввиду этого маневренность контактного электротранспорта (изменение пути следования транспортного средства, объезд разного рода препятствий) уступает маневренности транспорта, использующего двигатель внутреннего сгорания, поскольку является значительно ограниченной. Но несмотря на это, поиск альтернативных вариантов автотранспорта на углеводородном топливе определенно необходим, поскольку загрязнение окружающей среды от современного автотранспорта получило огромное распространение, в особенности в экономически развитых городах.

Переход на источники энергии, безопасные для окружающей среды, является одним из важнейших вариантов решения проблемы по снижению отрицательного влияния транспортных средств на природу в целом. Транспортное средство, которое может заменить современный автомобиль, использующий традиционное топливо, должно превосходить или не уступать их маневренности. Гибридные электромобили с комбинированной энергоустановкой – приоритетное направление развития экологически безопасного транспорта. Электромобили на основе комбинированной энергоустановки в данной работе не рассматриваются.

Электромобиль — это транспортное средство, основным источником энергии которого является электрохимическая аккумуляторная батарея или

молекулярный накопитель. Ряд требований применяется к накопителям энергии автомобиля (аккумуляторным батареям тягового электропривода):

- пожаробезопасность и взрывобезопасность;
- наличие минимальных массогабаритных показателей;
- наличие широкого диапазона рабочих температур;
- минимальный саморазряд;
- длительный срок работы;
- наличие механической прочности;
- простота обслуживания;
- минимум токсичности, отходов газа;
- наличие коэффициента полезного действия зарядно-разрядной характеристики.

Необходимо отметить тот факт, что современная аккумуляторная электрохимическая батарея – это не только носитель заряда. Также она содержит в своей конструкции электронное оборудование для ее управления и диагностики собственного ее состояния. Такая система управления и контроля в конструкции электрохимического накопителя повышает срок работоспособности аккумуляторных батарей:

- пожаробезопасность и взрывобезопасность;
- простота в обслуживании;
- высокий коэффициент полезного действия заряда и разряда;
- высокий срок службы батареи.

Предприятие, производящее продукцию, дает гарантию на срок службы аккумуляторной батареи, но только при соблюдении условий ее эксплуатации. Техническая документация на изделие, выпускаемая и предоставляемая предприятием, должна содержать описание режимов эксплуатации источников тока, которые, в свою очередь, должны ей соответствовать. Индивидуальные эксплуатационные характеристики присущи каждому типу электрохимических систем. Если возникает потребность в повышенной надежности источника энергии, то для каждого конкретного набора аккумуляторов предоставляются определенные технические характеристики.

Чтобы добиться полной безопасности использования аккумуляторной батареи, а также оптимальных условий ее функционирования, необходимо четко соблюдать режимы эксплуатации и применять механизмы, с помощью которых происходит перераспределение энергии батареи между аккумуляторами. Неотъемлемой частью современных накопителей энергии является система управления и контроля за состоянием электрохимического источника тока, которая отвечает за правильность режима работы рассматриваемой аккумуляторной тяговой батареи.

1. Расчет силового оборудования электропривода

1.1 Расчет мощности двигателя и его выбор

Исходные данные к работе:

Грузоподъемность, кг.....340

Масса порожнего ГЭМ, кг.....660

Масса груженого ГЭМ, кг.....1000

КПД мех. пер.0,96

Максимальная скорость ГЭМ, км/ч.....60

Мощность, расходуемая на передвижение:

$$\begin{aligned}\sum P_p &= g \cdot F_{тр} \cdot m \cdot V \cdot \cos \alpha + 0.5 C_x \cdot S \cdot \rho_{в} \cdot V^3 + g \cdot m \cdot \sin \alpha \cdot V \\ &= 9.8 \cdot 0.018 \cdot 1000 \cdot 16.67 \cdot 1 + 0.5 \cdot 0.342 \cdot 2 \cdot 1.225 \cdot 16.67^3 + 9.8 \cdot 1000 \cdot 0 = 4881 \text{ Вт.}\end{aligned}$$

Номинальная мощность ТЭД:

$$P_{д.н} = \frac{\sum P_p}{\eta} = \frac{4881}{0,96} = 5100 \text{ Вт}$$

В качестве электродвигателя был выбран вентильный электродвигатель с номинальной мощностью 7,5 кВт.

Таблица 1 – Технические данные двигателя

$P_{д.н}$ кВт	$M_{д.н}$ Нм	U , В	β	R , Ом	L_{sd} , мГн	L_{sq} , мГн	Ψ_f , Вб	J , кг · м ²	p_n
7,5	66	200	0	0,96	2,25	5,25	0,183	0,013	4

1.2 Расчет аккумуляторной батареи и ее выбор

Произведем расчет емкости батареи. Расчет будет произведен при условии, что электромобиль будет ехать со скоростью 60 км/ч.

Рассчитаем сколько потребуется времени, чтобы проехать 100 км:

$$t = \frac{S}{V} = \frac{100}{60} = 1,6 \text{ ч.}$$

Расчет затраченной энергии:

$$W = t \cdot P_{\text{дн}} = 1,6 \cdot 5100 = 8160 \text{ ВАч.}$$

Расчет требуемой емкости

$$C = \frac{W}{U} = \frac{8160}{200} = 40,8 \text{ Ач.}$$

Тогда потребуется на батарею 200В - 63 ячейки, каждая ячейка на 3,2В. Выбираем батарею технологии LiFePO4 - WB-LYP100АНА(А).



Рисунок 1- Внешний батареи WB-LYP100АНА(А)

Технические характеристики:

Напряжение: 3,2 В.

Ёмкость: 100 А*ч.

Технология: LiFePO₄.

Количество циклов зарядки: > 5000-7000 раз.

Максимальный непрерывный ток разряда: 300А (3С).

Пиковый ток разряда: 1000А (10С).

Максимальная непрерывная выдаваемая мощность: 960 Вт.

Пиковая выдаваемая мощность: 3200 Вт.

Внутреннее сопротивление ячейки: <0,45 мОм.

Максимальный ток заряда: 300А (3С).

Температура эксплуатации: от -45С до 85 °С.

Размеры АКБ: 143 × 67 × 218 (мм).

Корпус: огнеупорный пластик.

Вес нетто: 3.3 кг

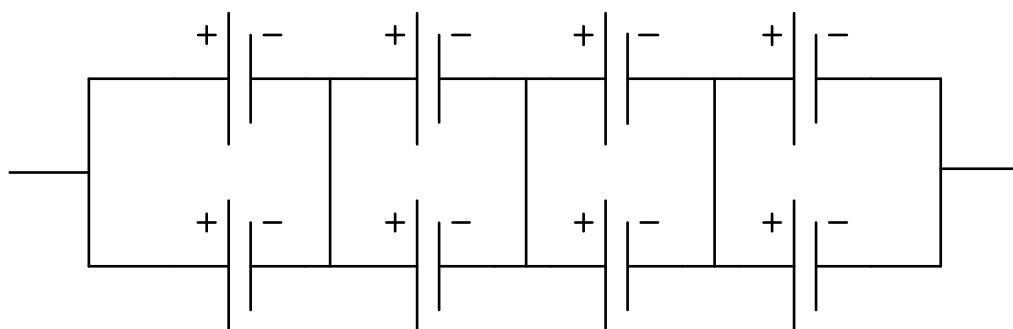


Рисунок 2 - Схема подключения аккумуляторной батареи

По данной схеме подключения (рис. 2) получается общая емкость батареи 200 Ач. Общее расстояние, которое может проехать электромобиль на данной батарее, составляет примерно 490 км.

2. Принципы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами

2.1 Обзор существующих методов управления СДПМ

Общие сведения о СДПМ. СДПМ представляет собой электрическую машину переменного тока, частота вращения ротора которой равна частоте вращения магнитного поля. Статор такого двигателя, подобный по конструкции статору асинхронного двигателя (АД), содержит трёхфазную обмотку. На его роторе расположены постоянные магниты, и в зависимости от их расположения различают два вида СДПМ, а именно: двигатели с магнитами, расположенными непосредственно на поверхности ротора, в англоязычной литературе именуемые *surface mounted permanent magnet motor*, и двигатели с магнитами, расположенными в стали ротора (*interior mounted permanent magnet motor*). СДПМ обычно выполняются на небольшую мощность (до нескольких десятков киловатт) и наиболее часто применяются в сервоприводах совместно с преобразователями частоты (ПЧ) [1]. Но также известны и разработки СДПМ для тягового электропривода мегаваттной мощности [2].

СДПМ всё больше распространяется на области, где традиционно применялись двигатели постоянного тока (ДПТ) или АД, таких, как привод циркулярных насосов, привод компрессоров в холодильной технике, системах вентиляции, буровые установки, добычи нефти. Причинами этого являются существующая тенденция к уменьшению стоимости магнитных материалов (внедрением сплавов редкоземельных металлов), а также совершенствование аппаратной базы управления. Появление соответствующей преобразовательной и цифровой вычислительной техники позволяет применять СДПМ как альтернативу ДПТ в регулируемом электроприводе. Существенный толчок дало внедрение преобразователей на транзисторах с

изолированным затвором (Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)) и использование принципов ШИМ (Pulse Width Modulation (PWM)) [3, 4, 5].

Классификация методов управления СДПМ. Направленность развития принципов управления СДПМ в основном обусловливается развитием аппаратной базы привода: параметрами самого двигателя, типом преобразователя, наличием датчиков угла поворота и (или) скорости, вычислительной мощностью контроллера.

Наличие/отсутствие датчиков магнитного состояния и координат механического движения (скорости, положения ротора) является принципиальным для построения системы управления СДПМ. По этому признаку методы управления СДПМ можно подразделить на управления с использованием ДПР и на управление без его использования, которое получило название «бездатчиковое управление».

В классическом электроприводе на основе СДПМ на валу двигателя устанавливается ДПР. В качестве датчика могут применяться датчик Холла, энкодер, резольвер, редуктосин и др. Система управления в этом случае относительно проста, но усложняется конструкция двигателя, что снижает надёжность системы.

Значительные успехи в области современной теории автоматического управления, в особенности развитие наблюдателей состояния, привели к появлению бездатчиковых электроприводов. В таких системах ДПР отсутствует, а необходимая информация для реализации алгоритма управления, поступает с наблюдателя состояния. Особенную роль бездатчиковые системы играют в тех электроприводных системах, где установка ДПР физически невозможна. Преимуществами бездатчиковых систем являются надёжность, дешевизна, компактность.

Большая часть методов бездатчикового управления, описанных как в отечественной, так и в зарубежной литературе, основана на математических

моделях электромагнитных процессов, протекающих в машине переменного тока. В таких методах вычисление оценки скорости вращения совмещается с вычислением модуля и углового положения вектора ЭДС ротора. Данные методы отличаются друг от друга точностью вычисления скорости вращения и чувствительностью к изменению входящих в математическую модель наблюдателя параметров. Недостатком таких методов является невозможность работы электропривода на малых частотах, так как величина ЭДС ротора в этом случае стремится к нулю и не может обеспечить требуемого сигнала.

В настоящее время известно множество разнообразных алгоритмов оценивания переменных состояния машин переменного тока. Они делятся на активные и пассивные алгоритмы [7]. Суть активных алгоритмов заключается во введении (инъекции) специальных высокочастотных тестовых воздействий в основной спектр напряжения или тока и анализе реакции двигателя на них. В этом случае, однако, возникают дополнительные потери в двигателе и силовом преобразователе, что ухудшает энергоэффективность электропривода и увеличивает необходимую мощность силовых элементов. Системы пассивного оценивания можно разделить на неадаптивные и адаптивные. Неадаптивные системы используют статорную или роторную модель электромагнитных процессов. Адаптивные системы, в свою очередь, используют эталонную и настраиваемую модели, что расширяет их функциональные возможности. Для построения адаптивных алгоритмов используется метод функций Ляпунова.

Методы построения самих систем управления для СДПМ также отличаются разнообразием. Различные способы управления СДПМ представлены на рисунке 3.



Рисунок 3- Способы управления СДПМ

Рассмотрим каждый из способов управления СДПМ подробнее.

Метод прямого управления моментом (Direct Torque Control (DTC)) изначально был предложен для асинхронного двигателя, но в настоящий момент применяется и для других машин переменного тока. Основным принципом данного метода – выбор вектора напряжения по заранее заданной таблице значений. При этом осуществляется одновременное управление и моментом, и полем статора. Такие системы имеют ряд преимуществ: достигается робастность по отношению к изменению параметров, упрощается алгоритм управления за счет отсутствия контура регулирования тока, обеспечивается высокое быстродействие системы. Однако метод прямого управления моментом имеет существенный недостаток: при малых углах нагрузки возникают колебания скорости ротора и пульсации момента.

Метод дифференциального управления, описанный в [6], позволяет снизить пульсации момента. Он основан на рассмотрении знаков производных

электромагнитного момента и модуля вектора потокосцепления статора. Недостатком метода является ухудшение характеристик при работе с максимальным напряжением.

Другим способом управления является применение систем со скользящими режимами (Sliding Mode Systems), которое применительно к СДПМ было описано С.Е. Рывкиным [7]. Такие системы имеют переменную структуру. Принцип управления состоит в том, что знак управляющего сигнала изменяется на противоположный при пересечении поверхности скольжения, которая описывается уравнением, составленным на основе переменных состояния объекта. Недостатками скользящего управления являются: возможность потери системой устойчивости в области достижения поверхности переключения; высокочастотные переключения, что влечет за собой быстрый износ механических и электрических частей электропривода; высокие требования к преобразователю.

Нейронные сети (Neuron Network) и нечёткая логика (Fuzzy Logic) являются современными и перспективными инструментами построения систем управления. При использовании данных методов отсутствуют ограничения на линейность системы, они эффективны в условиях шумов и после окончания обучения обеспечивают управление в реальном масштабе времени. Недостатком использования нейросетевых и нечётких регуляторов является необходимость в большой вычислительной мощности, а также сложность алгоритмов.

В последнее время получили развитие методы синтеза робастных систем управления (H_∞ -теория). Изменения момента нагрузки, активного сопротивления статора, момента инерции вращающихся частей, напряжения питания и характеристик окружающей среды влияют и на жесткость механических характеристик, и на качество переходных процессов. Робастные системы не являются адаптивными, но могут обеспечить необходимое качество работы при изменении характеристик воздействий и нестабильности параметров двигателя в широком диапазоне. Потребности в уменьшении

необходимого объема информации о двигателе, стремление к универсальности систем управления и сокращению затрат на их наладку – всё это вызывает интерес к робастному управлению. Но на данный момент, несмотря на серьезные теоретические достижения, методы H_∞ -оптимизации не получили обширного практического использования [8].

Существуют разработки систем управления СДПМ и на основе синергетического подхода. Из синергетической теории управления известно, что совокупность критериев управления системы выражаются в виде системы так называемых инвариантов. СДПМ как объект управления имеет два канала управления, поэтому для него можно задать не более двух инвариантов. В работе [9] в качестве технологического инварианта принимается стабилизация частоты вращения вала двигателя, а электромагнитный инвариант выбран таким образом, чтобы свести к нулю продольную составляющую тока статора i_d . Адекватное синергетическое управление синтезируется с помощью метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов. Достоинством данного метода является высокая точность, недостатком – сложность вычислений, значительное время обработки данных.

Принцип векторного управления СДПМ основан на ориентации вектора потокосцепления, создаваемого постоянными магнитами, поэтому в некоторых источниках его называют «полеориентированным» (Field-Oriented Control (FOC)). Цель данного метода состоит в том, чтобы управлять СДПМ, как отдельно возбужденной машиной постоянного тока, где потокосцепление и момент могут контролироваться отдельно в динамических и статических режимах работы двигателя. Мгновенные значения токов статора преобразовываются во вращающуюся систему координат (d, q) , связанную с ротором, с помощью математических уравнений и информации о положении ротора. При поддержании тока i_d равным нулю, потокосцепление по оси d будет постоянным. В этом случае электромагнитный момент будет пропорционален току i_q , который задаётся посредством системы управления. Также, чтобы добиться отдельного управления потокосцеплением и

моментом необходимо устранить связь между двумя осями с помощью вычитания из опорного напряжения по осям dq соответствующих связывающих членов, то есть выполнить компенсацию перекрёстных связей.

Самые распространённые методы для управления СДПМ – прямое управление моментом и векторное управление. Система с прямым управлением моментом лучше обрабатывает управляющие и возмущающие воздействия. Также векторное управление уступает прямому управлению моментом из-за низкой устойчивости к изменению параметров и требует использования более сложной системы ШИМ. Однако, векторное управление имеет преимущество в статических режимах: ниже затраты вычислительных ресурсов и меньше уровень пульсаций. Поэтому такие системы предпочтительны в электроприводах при малых возмущениях нагрузки и более стабильном управлении [10]. Так как в данной работе рассматривается энергоэффективный электропривод, то в качестве способа управления СДПМ выбрано векторное управление, которое обеспечивает меньшие потери в двигателе за счёт низкого уровня гармоник тока, отличных от первых.

2.2 Математическая модель СДПМ

Синхронные машины с постоянными магнитами отличаются тем, что вместо обмотки возбуждения на роторе у них расположены постоянные магниты, создающие возбуждающий магнитный поток. Статор этих машин подобен статору АД и имеет двух- или трёхфазную обмотку. При составлении математической модели СДПМ, примем следующие допущения [1]:

- 1) отсутствуют насыщение магнитной цепи, потери в стали, эффект вытеснения тока;
- 2) обмотки статора симметричны;
- 3) индуктивность рассеяния не зависит от положения ротора в пространстве.

Рассмотрим уравнения равновесия напряжений статора СДПМ, воспользовавшись моделью двигателя, представленной на рисунке 4.

Уравнения СДПМ будем рассматривать в ортогональной синхронной системе координат (d, q) , ось d которой ориентирована по магнитной оси ротора и вращается вместе с ним. Скорость ортогональной системы в электрическом пространстве равна синхронной скорости $p_n \omega = \omega_{0эл}$, где p_n – число пар полюсов, ω – скорость вращения вала двигателя. Трёхфазная обмотка статора заменена двумя обмотками, оси которых направлены по осям координат (d, q) . Обмотки являются неподвижными относительно вращающейся системы координат (d, q) и характеризуются активным сопротивлением R_s и индуктивностями L_{sd} и L_{sq} . На обмотки подаются напряжения U_{sd} и U_{sq} , в результате чего по ним протекают токи I_{sd} и I_{sq} . При принятом направлении осей координат потокосцепление статора по оси d Ψ_{sd} определяется током I_{sd} и магнитным потоком, создаваемым постоянными магнитами, а по оси q Ψ_{sq} – только током I_{sq} . Потокосцепление Ψ_f может быть представлено пространственным вектором, неподвижным относительно ротора и вращающимся вместе с ним, а значит и с системой координат (d, q) .

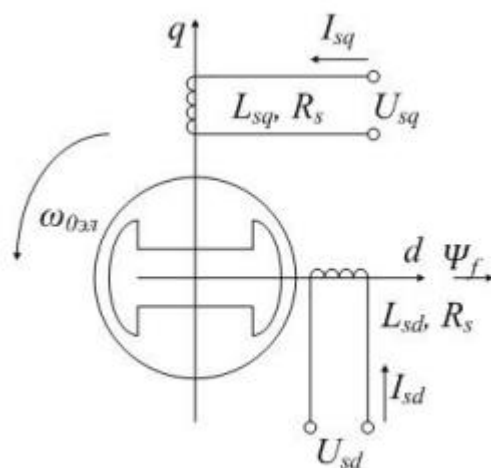


Рисунок 4- Модель СДПМ во вращающейся системе координат

Таким образом, уравнения для проекций обобщённого вектора напряжения статора и вектора потокосцепления на оси вращающейся системы координат в операторной форме выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}
U_{sd} &= R_s I_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_{0эл} \psi_{sq}; \\
U_{sq} &= R_s I_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_{0эл} \psi_{sd}; \\
\psi_{sd} &= L_{sd} I_{sd} + \psi_f; \\
\psi_{sq} &= L_{sq} I_{sq},
\end{aligned}
\tag{1.1}$$

где R_s — сопротивления фазы обмотки статора; L_{sd}, L_{sq} — индуктивности обмоток статора по осям d и q ; $I_{sd}, I_{sq}, U_{sd}, U_{sq}$ - токи и напряжения статора по осям d и q ; $\Psi_{sd}, \Psi_{sq}, \Psi_f$ - потокосцепления статора по осям d, q и создаваемое постоянным магнитом.

Уравнение для электромагнитного момента и уравнение механики:

$$\begin{aligned}
M &= \frac{3}{2} P_n (\psi_{sd} I_{sq} - \psi_{sq} I_{sd}); \\
p\omega &= \frac{1}{J} (M - M_c - \beta\omega),
\end{aligned}
\tag{1.2}$$

где J – момент инерции ротора, M, M_c – электромагнитный момент и момент сопротивления, β — коэффициент вязкого трения (коэффициент демпфирования). Предварительно подставив выражения для потокосцеплений в уравнения для проекций вектора напряжений, перепишем уравнения (1.1) и (1.2) относительно токов I_d и I_q :

$$\begin{aligned}
pI_{sd} &= \frac{1}{L_{sd}} (U_{sd} - R_s I_{sd} + \omega_{0эл} L_{sq} I_{sq}); \\
pI_{sq} &= \frac{1}{L_{sq}} (U_{sq} - R_s I_{sq} - \omega_{0эл} L_{sd} I_{sd} - \omega_{0эл} \psi_f); \\
M &= \frac{3}{2} P_n (\psi_f I_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} I_{sq}); \\
p\omega &= \frac{1}{J} (M - M_c - \beta\omega).
\end{aligned}
\tag{1.3}$$

На основании математической модели СДПМ, выраженной системой уравнений (1.3) построим структурную схему, приведённую на рисунке 5.

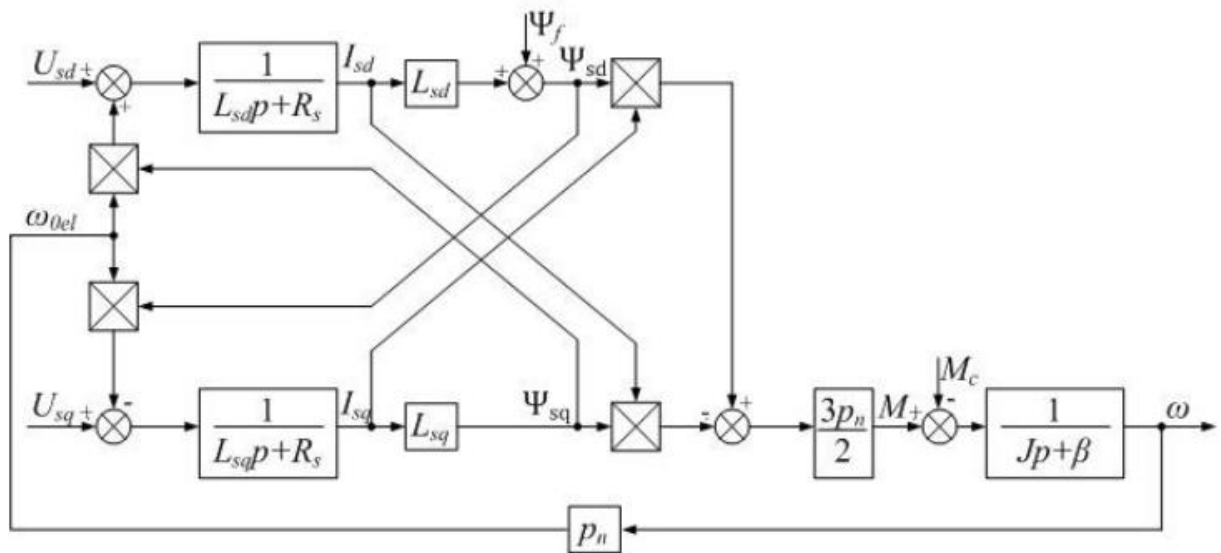


Рисунок 5- Структурная схема СДПМ во вращающейся системе координат

Как известно, при изменении нагрузки скорость синхронного двигателя остаётся постоянной. При этом изменяется угловое положение пространственного вектора потокосцепления ротора относительно вектора потокосцепления статора. В режиме идеального холостого хода указанные векторы совпадают в пространстве, но при подаче нагрузки на вал двигателя вектор потокосцепления ротора начинает отставать от вектора потокосцепления статора на некоторый угол θ , называемый углом нагрузки. Угол нагрузки, который измеряется в радианах, определяется через интеграл от разности мгновенных значений скоростей поля статора и ротора в электрическом пространстве, существовавшей в течение времени переходного процесса, связанного с изменением нагрузки.

В операторной форме уравнение для угла нагрузки выглядит следующим образом:

$$\theta = \frac{\omega_{0эл} - \omega p_n}{p}. \quad (1.4)$$

Сначала момент двигателя увеличивается с ростом угла нагрузки. Когда угол достигает 90° , момент достигает максимума. Если угол нагрузки продолжает увеличиваться, то есть двигатель перегружен, то вращающий момент уменьшается, двигатель попадает в зону неустойчивой работы и

останавливается. Данная зависимость выражена в угловой характеристике, которая приведена на рисунке 6, где обозначено: $M_{\text{макс}}$ – максимальный момент, $M_{\text{н}}$ и $\theta_{\text{н}}$ – номинальные момент и угол нагрузки.

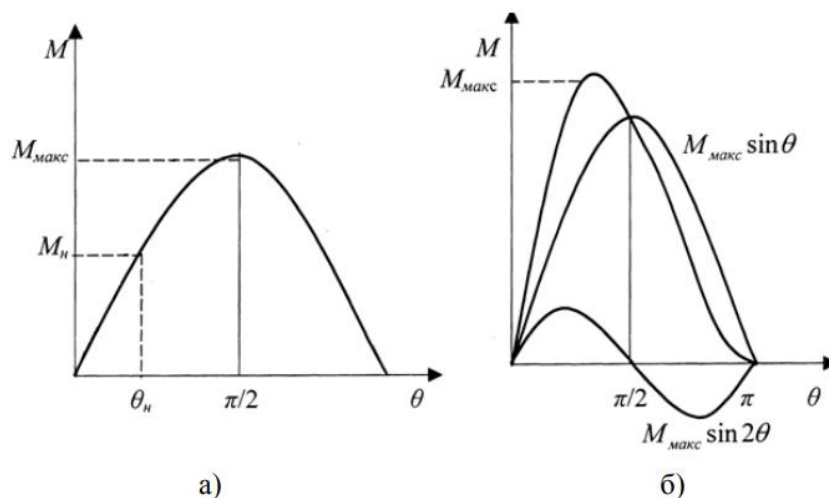


Рисунок 6- Угловая характеристика СДПМ: а) неявнополюсного СДПМ;
б) явнополюсного двигателя

Для неявнополюсного двигателя угловая характеристика выражена синусоидальной зависимостью. Если двигатель явнополюсный, кроме момента, вызванного полем ротора, возникает реактивный момент, пропорциональный $\sin 2\theta$, который искажает форму кривой.

Также момент двигателя ограничивается следующими факторами [11]:

1. Момент двигателя ограничивается допустимым значением перегрузки постоянных магнитов. Если при перегрузке ток статора увеличивается до недопустимых пределов, постоянные магниты размагничиваются, и момент двигателя сильно снижается.

2. Ограничения момента связаны с термической перегрузкой двигателя. Превышение допустимой термической нагрузки также приводит к размагничиванию магнитов.

3. Уменьшение момента в верхней части диапазона скорости в зависимости от напряжения на двигателе зависит от напряжения промежуточного звена преобразователя и падения напряжения в проводах. Уменьшение момента происходит из-за того, что при увеличении ЭДС

двигателя оказывается невозможным поддержать требуемое значение тока статора.

Выводы.

1. СДПМ является перспективным двигателем, находящим применение в промышленных системах автоматизации, роботах и манипуляторах, приводах подач и главного движения металлорежущих станков, координатных устройствах, прецизионных системах слежения и наведения, в тяговом электроприводе, приводах рулевого управления летательных и подводных аппаратов, электромеханических устройствах автомобилей, в бытовых устройствах [12]. Также СДПМ активно распространяется на области, где традиционно применялись ДПТ или АД.

2. В связи с распространением СДПМ развиваются и алгоритмы управления им. Можно выделить следующие основные приоритеты развития:

– точность отработки программного задания (скорости или положения ротора); – нечувствительность к неопределенностям параметров СДПМ и помехам; – расширение диапазона регулирования в сторону малых скоростей, что связано с влиянием пульсаций момента на низких значениях скорости;

– уменьшение количества датчиков, то есть применение бездатчиковых алгоритмов, что повышает надежность электропривода;

– простота алгоритмов в аспекте вычислительной нагрузки, так как более простые алгоритмы обеспечивают меньшее время расчёта и меньшую задержку управления, а также позволяют использовать более дешевые микропроцессоры;

– минимизация электропотребления.

3. Составлена математическая модель СДПМ во вращающейся системе координат (d, q) , ось d которой ориентирована по магнитной оси ротора и вращается вместе с ним. В соответствии с математической моделью построена структурная схема СДПМ.

2.3 Синтез системы управления СДПМ

Компенсация перекрёстных связей. Подставляя третье и четвёртое уравнения системы (1.1) в первое и второе уравнения данной системы, можно записать выражения для проекций вектора напряжения статора:

$$\begin{aligned} U_{sd} &= R_s I_{sd} + p L_{sd} I_{sd} - \omega_{0эл} L_{sq} I_{sq}; \\ U_{sq} &= R_s I_{sq} + p L_{sq} I_{sq} + \omega_{0эл} L_{sd} I_{sd} + \omega_{0эл} \psi_f. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Уравнения (1.6) показывают, что между каналами регулирования составляющих тока статора существует взаимовлияние или перекрёстные связи. Для исключения влияния каналов друг на друга перекрёстные связи необходимо скомпенсировать. Таким образом, компенсационные составляющие каналов управления описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} U_{kd} &= -\frac{1}{k_{пч}} \omega_{0эл} L_{sq} I_{sq}; \\ U_{kq} &= \frac{1}{k_{пч}} \omega_{0эл} (L_{sd} I_{sd} + \psi_f), \end{aligned} \quad (1.7)$$

где $k_{пч}$ – коэффициент передачи преобразователя частоты. Для вычисления компенсационных составляющих блоком перекрёстных связей по уравнениям (1,7) в качестве токов берутся измеренные и преобразованные в систему (d, q) сигналы с датчиков токов фаз. Для компенсации перекрёстных связей компенсационные составляющие суммируются с сигналами задания проекций вектора напряжения статора U_{dz} и U_{qz} , которые являются выходными переменными регуляторов тока.

Регуляторы токов и скорости. Синтез регуляторов осуществим на основании принципов подчиненного регулирования с использованием метода компенсации нелинейных связей.

Системы подчиненного регулирования имеют два основных достоинства:

1. Простота расчёта и настройки. Настройка контуров начинается с внутреннего контура. Каждый контур содержит регулятор, чья структура и

коэффициенты придают контуру стандартную динамику. Также в каждом контуре компенсируется наибольшая постоянная времени.

2. Удобство ограничения предельных значений промежуточных координат системы, которое достигается за счёт ограничения определённым значением выходного сигнала регулятора внешнего контура.

Для выполнения синтеза регулятора тока по оси d , воспользуемся структурной схемой контура данной составляющей тока статора, которая приведена на рисунке 7. На рисунке обозначено: $\frac{k_d}{T_d p + 1}$ - передаточная функция статорной цепи по оси d , где $k_d = \frac{1}{R_s}$, $T_d = \frac{L_{sd}}{R_s}$, R_s — сопротивления фазы обмотки статора; L_{sd} — индуктивность обмоток статора по оси d ;

$U_{kd} = -\frac{1}{k_{пч}} \omega_{0эл} L_{sq} I_{sq}$ — сигнал компенсации влияния перекрёстной связи, $\frac{k_{пч}}{T_{пч} p + 1}$ — передаточная функция преобразователя частоты, который представлен апериодическим звеном, $k_{дт}$ — коэффициент передачи датчика тока, $W_{рт}$ — передаточная функция регулятора тока.

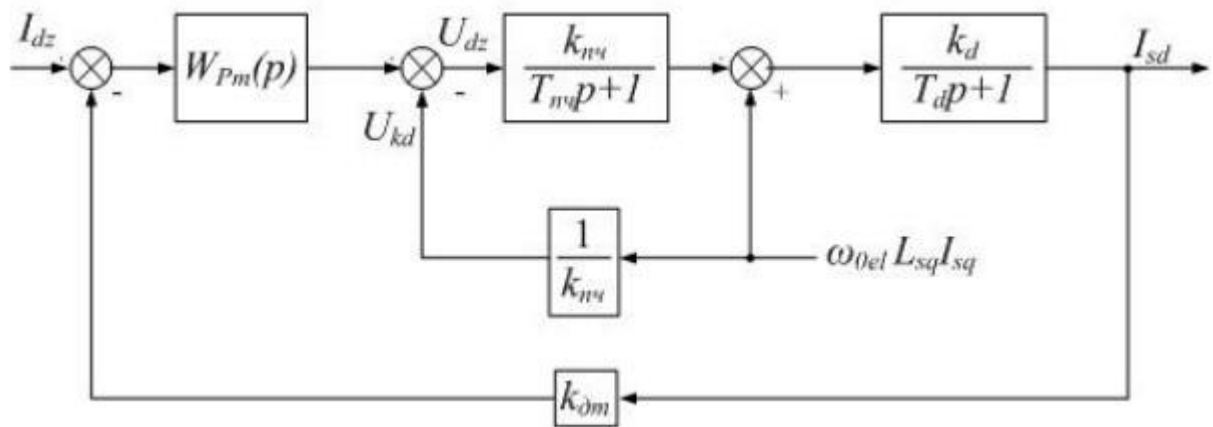


Рисунок 7- Структурная схема контура тока по оси d

Считая влияние перекрёстной связи полностью скомпенсированным, выполним настройку контура тока на оптимум по модулю с малой некомпенсируемой постоянной времени контура тока $T_{кт}$, равной $T_{пч}$. В результате получим передаточную функцию разомкнутой системы:

$$W(p) = W_{pm}(p) \frac{k_{n\psi} k_{\partial m} k_d}{(T_{n\psi} p + 1) + (T_d p + 1)} = \frac{1}{2T_{км} p (T_{км} p + 1)}; \quad (1.8)$$

$$W_{pm}(p) = \frac{T_d p + 1}{2k_{n\psi} k_{\partial m} k_d T_{км} p} = \frac{L_{sd}}{2k_{n\psi} k_{\partial m} T_{км}} + \frac{R_s}{2k_{n\psi} k_{\partial m} T_{км}} \frac{1}{p}.$$

Таким образом, коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих ПИ-регулятора тока по оси d определяются выражениями:

$$k_{pd} = \frac{L_{sd}}{2k_{n\psi} k_{\partial m} T_{км}}; \quad (1.9)$$

$$k_{id} = \frac{R_s}{2k_{n\psi} k_{\partial m} T_{км}}.$$

Передаточная функция замкнутого контура тока:

$$W(p) = \frac{1/k_{\partial m}}{2T_{км}^2 p^2 + 2T_{км} p + 1}. \quad (2)$$

Синтез регулятора тока по оси q выполняется аналогично, с учётом следующих условий:

1) $\frac{k_q}{T_q p + 1}$ - передаточная функция статорной цепи по оси q, где $k_q = \frac{1}{R_s}$, s
 $T_q = \frac{L_{sq}}{R_s}$, R_s — сопротивления фазы обмотки статора; L_{sq} — индуктивность обмоток статора по оси q.

2) Сигнал возмущающей перекрёстной связи, подлежащей компенсации, имеет вид $U_{kq} = \frac{1}{k_{пч}} \omega_{0эл} (L_{sd} I_{sd} + \psi_f)$.

Таким образом, запись коэффициентов ПИ-регулятор тока по оси q будет схожа с формулами коэффициентов (1.9):

$$k_{pq} = \frac{L_{sq}}{2k_{n\psi} k_{\partial m} T_{км}}; \quad (2.1)$$

$$k_{iq} = \frac{R_s}{2k_{n\psi} k_{\partial m} T_{км}}.$$

Синтез регулятора скорости выполним, опираясь на структурную схему контура скорости, которая изображена на рисунке 8. На рисунке обозначено: k_{dc} – коэффициент передачи датчика скорости, W_{pc} – передаточная функция регулятора скорости.

Второй (реактивной) составляющей момента в соответствии с уравнением (1.3) можно пренебречь в следующих случаях:

- 1) для неявнополусных машин ($L_{sd} = L_{sq}$);
- 2) при управлении по закону $I_{sd} = 0$ для любых типов СДПМ.

В таких случаях, $M = \frac{3}{2}P_n \psi_f I_{sq}$, где $\psi_f = const$

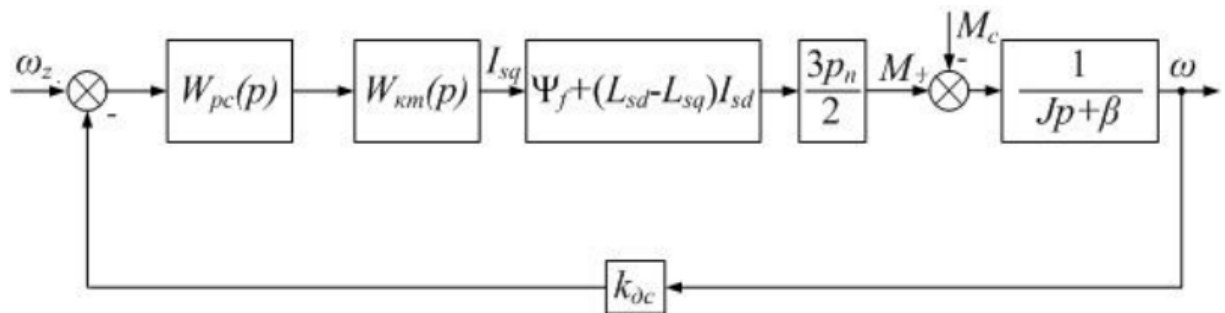


Рисунок 8- Структурная схема контура скорости

Для случая $\beta = 0$ настройка контура скорости выполняется на симметричный оптимум. Запишем передаточную функцию разомкнутой системы:

$$W(p) = W_{pc}(p)W_{pm}(p)\psi_f \frac{3}{2}P_n \frac{1}{Jp} k_{dc} = \frac{4T_{kc}}{8T_{pc}^2 p^2 (T_{pc}p + 1)} \quad (2.2)$$

В результате получим ПИ-регулятор скорости с коэффициентами:

$$k_{p\omega} = \frac{k_{\partial m} J}{3T_{kc}\psi_f P_n k_{dc}}; \quad (2.3)$$

$$k_{i\omega} = \frac{k_{\partial m} J}{12T_{kc}^2 \psi_f P_n k_{dc}}.$$

где $T_{kc} = 2T_{кт}$.

Для общего случая $\beta \neq 0$ настройка контура скорости выполняется на оптимум по модулю.

3. Моделирование системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами

3.1 Моделирование СДПМ

Моделирование СДПМ во вращающейся ортогональной системе координат (d, q) осуществляется на основе системы (1.3). В качестве исходных данных для модели СДПМ принимаются данные явнополюсного двигателя, приведённые в таблице 1.

Модель СДПМ в системе координат (d, q) , выполненная в математическом пакете MATLAB/Simulink версии 7, приведена на рисунке 9.

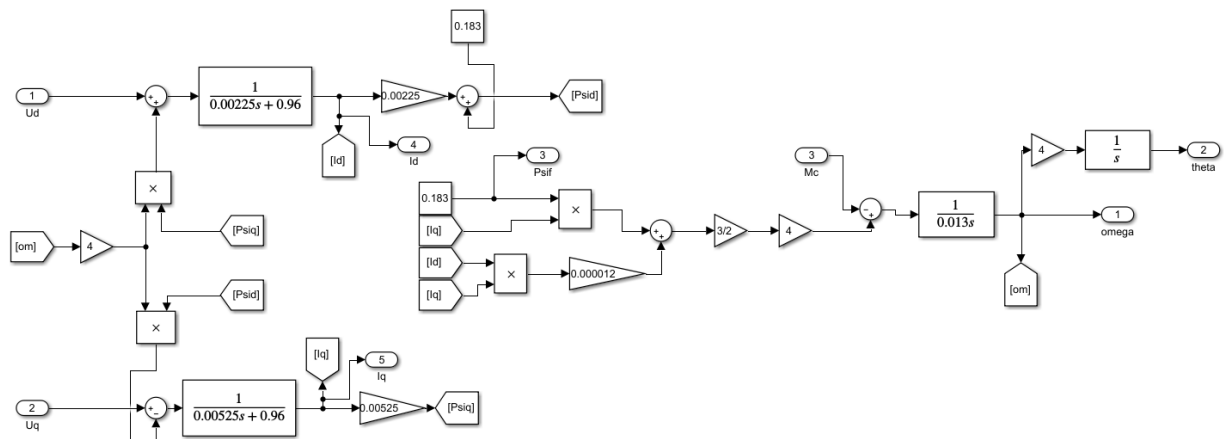


Рисунок 9- Модель СДПМ в математическом пакете MATLAB/Simulink

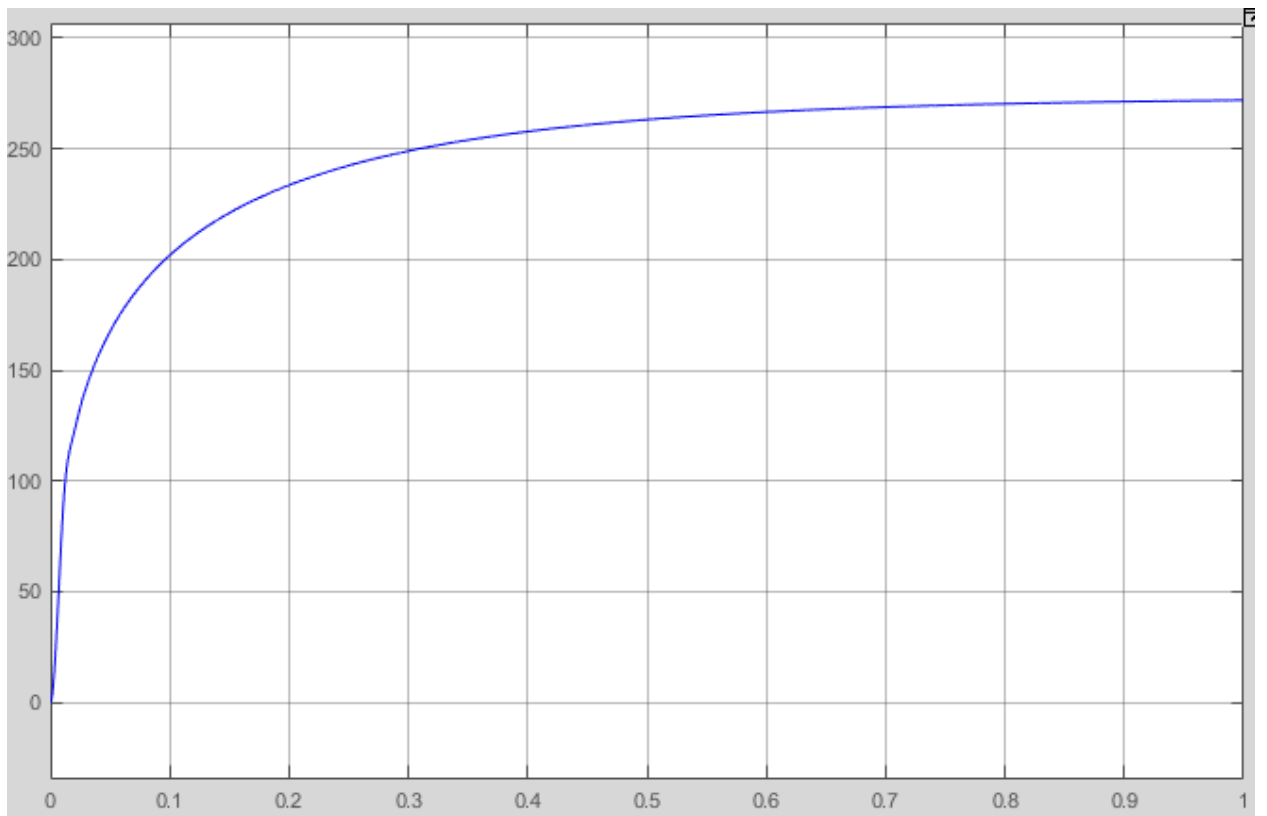


Рисунок 10- График скорости СДПМ

3.2 Моделирование системы управления с применением апериодического звена.

Настроим на оптимум по модулю контуры продольной и поперечной составляющих тока. Для этого рассчитаем коэффициенты ПИ-регуляторов тока по формулам (1.9) и (2.1). При этом ПЧ представим апериодическим звеном $\frac{k_{пч}}{T_{пч}p+1}$. Выберем коэффициент передачи $k_{пч} = 2$. Постоянную времени $T_{пч} = T_{кт}$ выберем равной периодомодуляции, то есть при частоте ШИМ 2 кГц $T_{пч} = 0.0005$ [25]. Коэффициент передачи датчика тока $k_{дт} = 1$.

$$k_{pd} = \frac{L_{sd}}{2k_{nc}k_{\partial m}T_{km}} = \frac{0.00255}{2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0.0005} = 0.78$$

$$k_{pq} = \frac{L_{sq}}{2k_{nc}k_{\partial m}T_{km}} = \frac{0.00525}{2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0.0005} = 0.66$$

$$k_{id} = k_{iq} = \frac{R_s}{2k_{nc}k_{\partial m}T_{km}} = \frac{0.96}{2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0.0005} = 479.97$$

Рассчитаем коэффициенты ПИ-регулятор скорости при настройке контура на симметричный оптимум в соответствии с (2.3) с условием $T_{kc} = 2T_{кт} = 0.001$. Коэффициент передачи датчика скорости $k_{dc} = 1$. Параметры двигателя взяты из таблицы 1.

$$k_{p\omega} = \frac{k_{\partial m}^J}{3T_{kc}\psi_f p_n k_{dc}} = \frac{1 \cdot 0.013}{3 \cdot 0.001 \cdot 0.0183 \cdot 4 \cdot 1} = 0.85$$

$$k_{i\omega} = \frac{k_{\partial m}^J}{12T_{kc}^2 \psi_f p_n k_{dc}} = \frac{1 \cdot 0.013}{12 \cdot 0.001^2 \cdot 0.0183 \cdot 4 \cdot 1} = 57$$

Составим модель системы векторного управления СДПМ с поддержанием I_{sd} и заменой ПЧ на апериодическое звено в MATLAB/Simulink. Модель СДПМ, которая подробно рассмотрена в параграфе 3.1, представим в виде подсистемы SDPM. Блок перекрёстных связей, составленный по уравнениям (1.7), также представим в виде подсистемы Compensation. Так как напряжение, подаваемое на АИН, ограничено значением $\frac{U_d}{\sqrt{3}}$, вводятся элементы ограничения Saturation. Задание на скорость равно 314.16 рад/с. Составляющая тока по оси d задаётся нулевой. Полученная система представлена на рисунке 11.

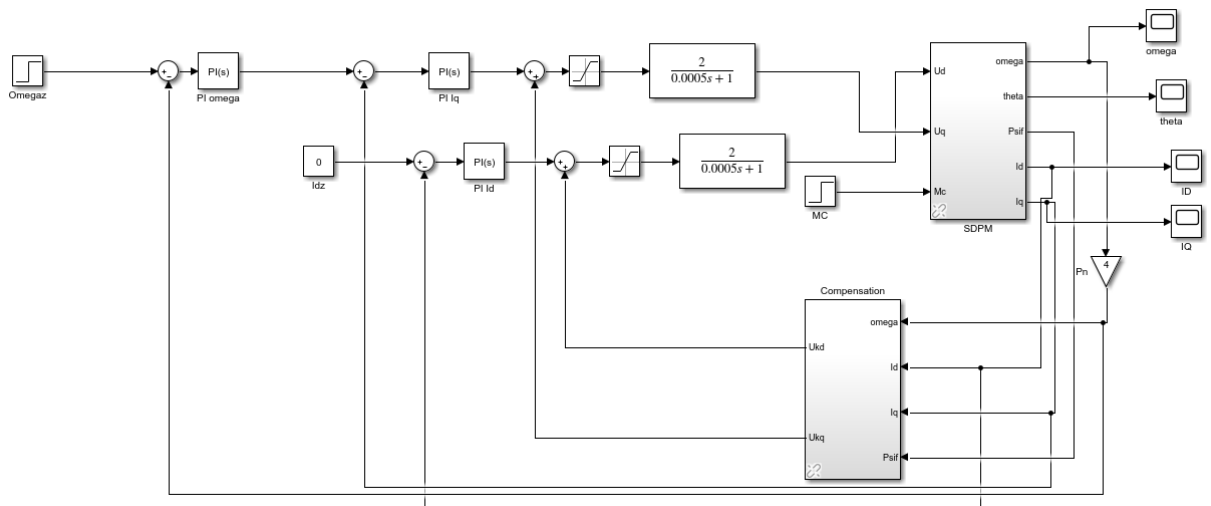


Рисунок 11- Модель системы управления СДПМ с аperiodическим звеном

Произведём моделирование полученной системы. В момент 0.5 секунд подаётся момент сопротивления, равный 60 Н*м. График скорости СДПМ представлен на рисунке 12.

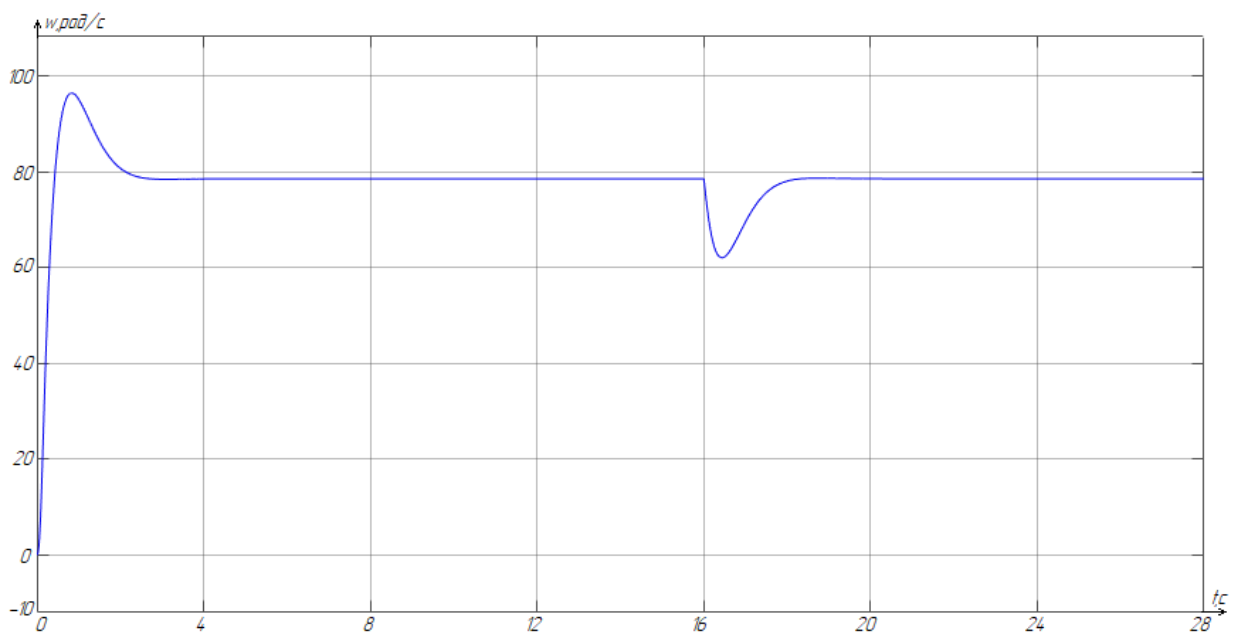


Рисунок 12- График скорости

Как видно из рисунка 12, переходный процесс скорости сопровождается скачками. Для избавления от таких скачков скорости введем дополнительный блок задатчик интенсивности, который сделает более плавное нарастание скорости. Полученная система представлена на рисунке 13.

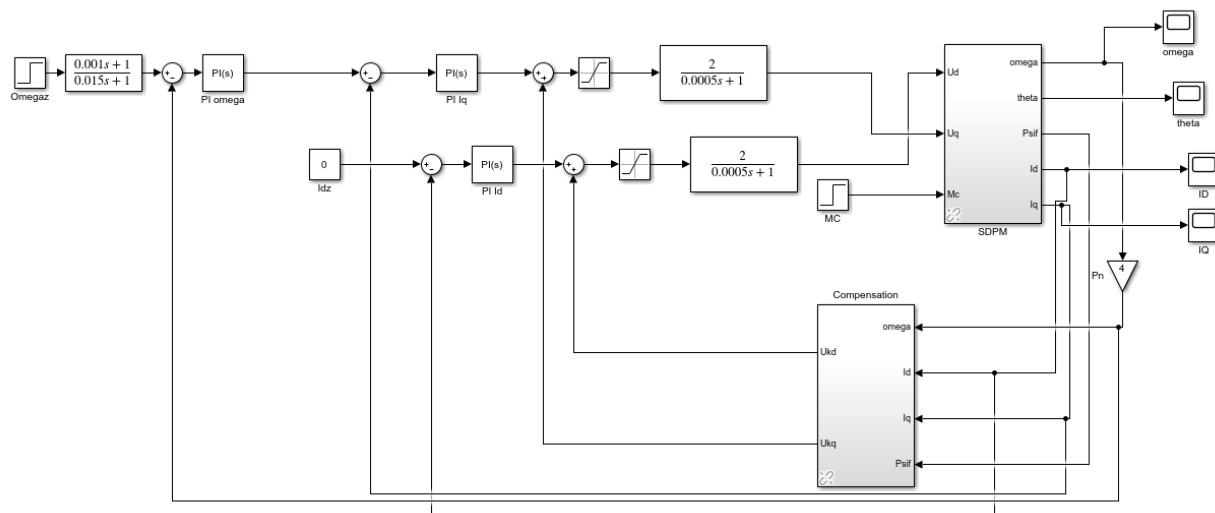


Рисунок 13- Модель СДПМ с датчиком интенсивности

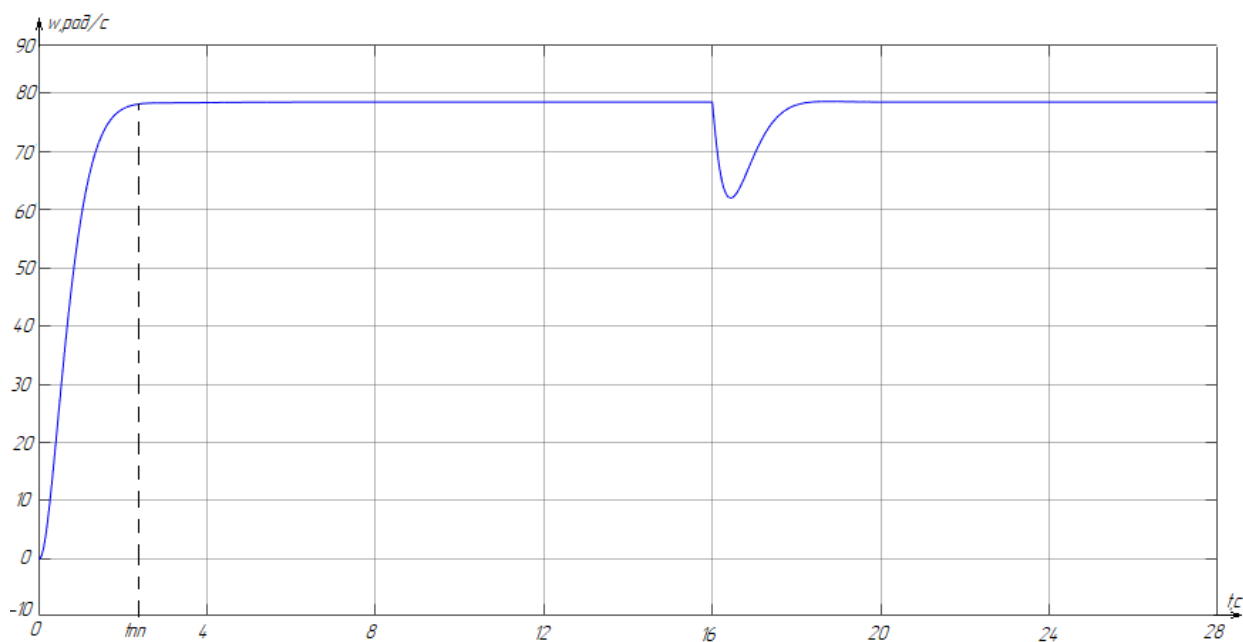


Рисунок 14- Перенастроенный график скорости

Из рисунка 14 видно, что при использовании датчика интенсивности устраняются броски скорости и обеспечиваются желаемые показатели качества переходного процесса.

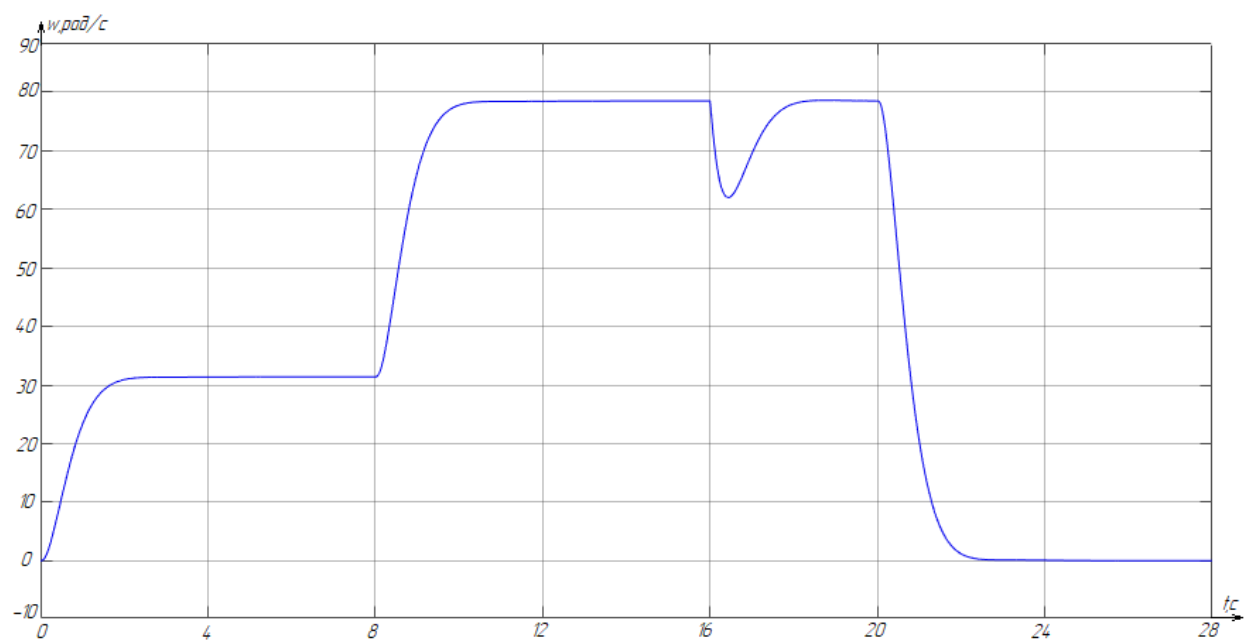


Рисунок 15- Цикл работы под разной нагрузкой

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела является определение экономических показателей проектирования системы управления электропривода электромобиля. Для этого необходимо провести анализ конкурентных технических решений, определить трудоемкость проводимых работ, создать график проведения работ, а также сформировать бюджет затрат.

4.1 Анализ конкурентных технических решений

Объектом анализа будет являться система управления электропривода электромобиля. Для того, чтобы наиболее точно провести анализ нужно использовать всю информацию, которая доступна о конкурентных разработках.

Для сравнения берется два типа исполнения электропривода: преобразователь частоты и импульсный регулятор напряжения. Для сравнения выбраны следующие технические критерии: энергопотребление, помехоустойчивость, диапазон регулирования скорости, удобство в эксплуатации, надежность и такие экономические критерии как: цена, послегарантийное обслуживание, заявленный срок эксплуатации.

Сравнение характеристик выбранных электродвигателей представлено в оценочной карте. Оценочная карта представлена в Таблице 2.

Таблица 2 – Показатели оценки качества проекта

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		ПЧ	ИР	$K_{ПЧ}$	$K_{ИР}$
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки					
Энергопотребление (А)	0,22	7	5	1,54	1,1
Помехоустойчивость(Б)	0,16	5	4	0,8	0,64
Диапазон регулирования скорости (В)	0,25	8	5	2	1,25
Удобство в эксплуатации (Г)	0,16	5	4	0,8	0,64
Надежность(Д)	0,19	6	6	1,14	1,14

Существует формула, при помощи которой мы сможем провести анализ конкурентных технических решений:

$$K = \sum V_i \cdot B_i$$

где K –конкурентоспособность научной разработки или конкурента; V_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Таблица 3 – Определение коэффициента весомости по методу парного сравнения

Оцениваемые параметры	Оцениваемые параметры					Σ, расчет веса критерия
	А	Б	В	Г	Д	
А	-	1	2	2	2	7/20=0,35
Б	1	-	1	1	2	5/20=0,25
В	0	1	-	2	2	5/20=0,25
Г	0	1	0	-	2	3/20=0,15
Д	0	0	0	0	-	0/20=0
ИТОГО:	1	3	3	5	8	20

Пояснения к таблице:

А – Энергопотребление;

Б – Помехоустойчивость;

В – Диапазон регулирования скорости;

Г – Удобство в эксплуатации;

Д – Надёжность.

Пример расчета конкурентоспособности:

$$K = 0,15 \times 7 = 1,05$$

Расчет конкурентоспособности по всем техническим критериям оценки:

$$K(\text{ИР}) = 1,54 + 0,8 + 2 + 0,8 + 1,14 = 6,28$$

$$K(\text{ПЧ}) = 1,1 + 0,64 + 1,25 + 0,64 + 1,14 = 4,77$$

По результатам, приведенным в таблице 1, следует вывод, что лучше применять электропривод на базе импульсный регулятор напряжения потому,

что он лучше по таким критериям как: энергопотребление, диапазон регулирования скорости, удобство в эксплуатации и помехоустойчивость

4.2. Планирование научно-исследовательских работ

В данном разделе необходимо определить основные виды работ, назначить участников для каждой работы, рассчитать время, требуемое для выполнения каждой работы и в конце построить график проведения научного исследования.

Структура работ в рамках научного исследования

В таблице 4 представлены основные виды работ с указанием содержания, а также распределены исполнители. В качестве исполнителей выступают инженер и руководитель темы.

Таблица 4 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Описание объекта проектирования	Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Расчет и выбор силового оборудования	Инженер
	6	Выбор преобразовательного устройства	Инженер
	7	Выбор аппаратуры управления и защиты	Инженер
	8	Расчет статических и динамических характеристик	Инженер

Обобщение и оценка результатов	9	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
Разработка технической документации и проектированию	10	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Инженер

Определение трудоёмкости работ

Определение трудоёмкости выполняемых работ зависит от множества факторов. Учет всех факторов практически невозможен, поэтому используется ожидаемая трудоёмкость, рассчитываемая по формуле (2.4).

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{мин}i} + 2t_{\text{макс}i}}{5}, \quad (2.4)$$

где $t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоёмкость выполнения какой-либо работы;

$t_{\text{мин}i}$ – минимальная трудоёмкость при выполнении какой-либо работы.

$t_{\text{макс}i}$ – максимальная трудоёмкость при выполнении какой-либо работы.

После этого определяем продолжительность какой-либо работы в рабочих днях T_p .

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i}, \quad (2.5)$$

где T_{pi} – продолжительность работы в рабочих днях;

$t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоёмкость выполнения какой-либо работы;

$Ч_i$ – количество исполнителей, которые выполняют одну и ту же работу на данном этапе.

4.2.3. Разработка графика проведения научного исследования

Для построения графика Ганта будем использовать не рабочие дни, а календарные. Перевод из рабочих дней в календарные осуществляем по формуле (2.6).

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (2.6)$$

где T_{ki} – продолжительность работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность работы в рабочих днях;

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

Коэффициент календарности учитывает количество выходных и праздничных дней и рассчитывается по формуле (2.7):

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (2.7)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году ($T_{\text{кал}} = 365$);

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году ($T_{\text{вд}} = 52$);

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году ($T_{\text{пд}} = 14$).

Значения для каждой работы представлены в таблице 5.

Пример расчета для инженера (подбор и изучение материалов по теме):

$$t_{\text{ож}} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4 \approx 2 \text{ чел} - \text{дней};$$

$$T_p = \frac{2}{1} = 2 \text{ дня};$$

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22; \quad T_k = 2 \cdot 1,22 = 2,44 \approx 3 \text{ дня}.$$

Таблица 6 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительн ость		Длительно сть	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожі}$, чел-дни		работ в рабочих днях		работ в календарн ых днях	
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление и утверждение технического задания	1		2		2		2		3	
Подбор и изучение материалов по теме		3		6		5		5		6
Описание объекта проектирования		4		6		5		5		6
Календарное планирование работ по теме	3		4		4		4		5	
Расчет и выбор силового оборудования		5		8		7		7		9
Выбор преобразовательного устройства		6		9		8		8		10
Выбор аппаратуры управления и защиты		3		6		5		5		6

Расчет статических и динамических характеристик		7		9		8		8		10
Оценка эффективности полученных результатов	1		2		2		2		3	
Составление пояснительной записки		2		3		3		3		4

На основании таблицы 6 строим график Ганта.

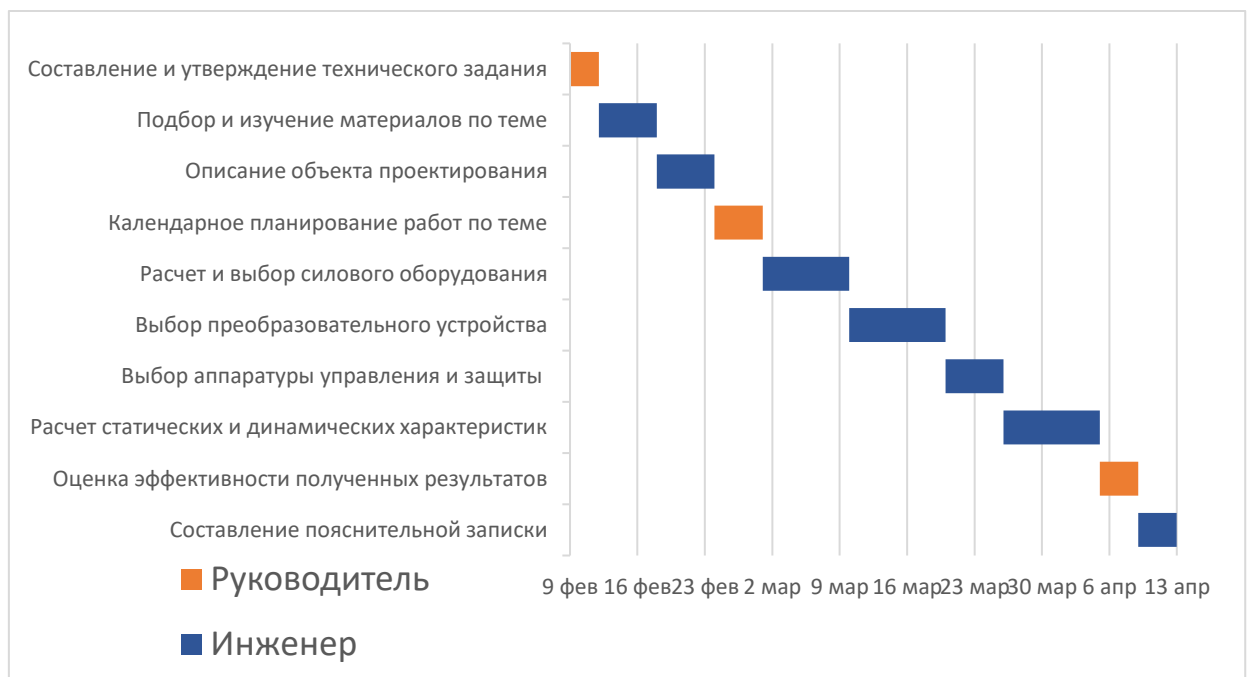


Рисунок 16– Календарный план-график поведения НТИ

Итого длительность работ в календарных днях руководителя проекта равняется 11 дней, а инженера 51 день.

4.2 Смета затрат научно-технического исследования (НТИ)

Бюджет научно-технического исследования складывается из следующих статей расходов:

- материальные расходы;
- амортизация;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.
-

Материальные расходы

Стоимость материалов, используемых при разработке данного проекта, приведена в таблице 7.

Таблица 7 – Материальные затраты на выполнение научного исследования

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
				(З _м), руб.
Бумага для принтера	упаковка	1	240	240
Ручки, карандаши	штук	3	30	90
Степлер	штук	1	100	100
Скоросшиватели	штук	1	60	60
Распечатка	лист	60	2	120
Итого:				610

Таким образом материальные затраты на выполнение данного научно-технического исследования составляют 610 рублей.

Амортизация

Расчет амортизационных отчислений для полного восстановления основных фондов производится по нормам амортизации, утвержденным в порядке, установленном действующим законодательством, и определяется в зависимости от стоимости оборудования. Для проектирования требуется следующее оборудование:

Компьютер - 40000 рублей.

$$I_{ам} = \frac{T_{исп}}{T_{г}} \cdot \frac{1}{T_{сл}} \cdot C_{обор}$$

где $T_{исп}$ - время использования оборудования = 49 дней;

$T_{г}$ - количество использования в год = 365 дней;

$C_{обор}$ - стоимость оборудования = 40000;

$T_{сл}$ - срок службы оборудования = 3 лет

Пример расчета:

$$I(ам) = \frac{49}{365} \times \frac{1}{3} \times 40000 = 1789,9$$

Основная заработная плата

Расчет месячного должностного оклада работника производится по формуле (2.8):

$$Z_{м} = Z_{мс} \cdot (1 + k_{пр} + k_{д}) \cdot k_{р} \quad (2.8)$$

где $Z_{мс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (30% от $Z_{мс}$);

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в научном исследовательском институте за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от Z_{mc});

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле (2.9):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m}{26} \quad (2.9)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.

Основная заработная плата рассчитывается по следующей формуле (2.9):

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p \quad (2.9)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, рабочих дней;

В состав заработной платы входит основная заработная плата всех участников научного исследования, а также дополнительная заработная плата, которая составляет 12 – 20 % от основной заработной платы (2.10):

$$Z_{\text{зн}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} \quad (2.10)$$

Пример расчета для руководителя:

$$Z_m = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.},$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{33150}{26} = 1275 \text{ руб.},$$

$$Z_{\text{осн}} = 1275 \cdot 8 = 10200 \text{ руб.},$$

$$Z_{\text{зн}} = 10200 + 1530 = 11730$$

Таблица 8 – Расчёт заработной платы

Исполнители	$Z_{мс}$, руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{доп}$, руб.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1275	41	7841,25	52275
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1275	8	1530	10200
Итого									62475

Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительная заработная плата – это оплата за непроработанное время.

Дополнительная заработная плата рассчитывается с помощью коэффициента $k_{доп}$ по формуле (2.11):

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} \quad (2.11)$$

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

Расчет:

$$Z_{доп} = 0,15 \cdot 10200 = 1530 \text{ руб (для руководителя),}$$

$$Z_{доп} = 0,15 \cdot 52275 = 7841,25 \text{ руб (для инженера)}$$

Отчисления во внебюджетные фонды

Данная статья расходов включает в себя обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам во внебюджетные фонды. К внебюджетным фондам относятся: фонд социального страхования (ФСС), пенсионный фонд (ПФ), федеральный фонд обязательного медицинского страхования (ФФОМС).

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы (2.12):

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) \quad (2.12):$$

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

Расчет:

$$Z_{внеб} = 0,3 \cdot (10200 + 1530) = 3519 \text{ руб (руковод.)}$$

$$Z_{внеб} = 0,3 \cdot (52275 + 7841,25) = 18035 \text{ руб (инж.)}$$

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

На 2017 г. установлен размер страховых взносов равный 30%.

Таблица 9 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель проекта	52275	7841,25
Инженер	10200	1530
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,3	
Итого		
Руководитель	18035	
Инженер	3519	

Накладные расходы

Накладные расходы – это затраты, которые не попали в предыдущие статьи расходов. К ним относят: оплата электроэнергии, услуги связи, печать и ксерокопирование материалов и т.д. Величина накладных расходов определяется с учетом коэффициента $k_{нр}$ по формуле (2.13):

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{нр} = (Z_{м} + Z_{осн} + Z_{доп} + Z_{внеб} + A) \cdot k_{нр} \quad (2.13)$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы (16%).

Расчет:

$$Z_{накл} = (610 + 62475 + 9371,25 + 21554 + 1655,7) \cdot 0,16 = 15306,6 \text{ руб.}$$

4.4 Смета затрат научно-исследовательского проекта

После того как рассчитаны все статьи затрат научно-исследовательского проекта, можно сформировать окончательный бюджет затрат НТИ.

Структура бюджета затрат научного исследования представлена в таблице 10.

Таблица 10 – Бюджет затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	%
1. Материальные расходы	610	0,5
2. Амортизация	1655,7	1,5
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	62475	56,3
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	9371,25	8,5
5. Отчисления во внебюджетные фонды	21554	19,5
6. Накладные расходы	15306,6	13,7
7. Бюджет затрат НТИ	110973	100

Заключение

В результате выполнения задания данного раздела был проведен анализ конкурентных технических решений и был выбран тип исполнения электропривода.

Также было осуществлено планирование работ, находящихся в рамках данного научного исследования, определены временные рамки и трудоемкость работ каждого из участников и составлен ленточный график проведения их работ в форме диаграммы Ганта. По результатам расчетов было установлено, что длительность работ для руководителя составляет 8 рабочих дней, а для инженера 41 рабочий день. Общий бюджет проекта НТИ составил 110973 рубля, который складывается из расходов на заработную плату работников (71846,25 руб.), отчисления во внебюджетные фонды (21554 руб.), материальные расходы (610 руб.), амортизацию (1655,7 руб.) и накладные расходы (15306,6 руб.).

При использовании выбранного типа исполнения двигателя повышается эффективность работы за счет уменьшения общего расхода на оборудование, повышения надежности и обеспечения безотказной, длительной работы.

5 Социальная ответственность

Целью разработки настоящего раздела является принятие проектных решений, исключающих несчастные случаи и профессиональные заболевания в производстве, обеспечивающих снижение вредных воздействий на окружающую среду, безопасность в чрезвычайных ситуациях, экономное расходование ресурсов.

Рассмотрение данных вопросов отвечает требованиям международного стандарта ICCSR-26000:2011 к деятельности организаций в области социальной ответственности по тем разделам его модулей, по которым должны быть приняты указанные проектные решения.

Объектом проектирования является система управления электропривода электромобиля.

5.1 Анализ вредных факторов

Часть технологического процесса исследования и проверки электропривода насосной установки основана на работе с двигателем, который в свою очередь является источником повышенного уровня шума, что является вредным фактором производственной среды [13]. Чтобы уменьшить влияние шума, можно применять различные меры такие как: замена подшипников качения на подшипники-скольжения, проверка и своевременная замена смазочных материалов у подшипников. Но такие меры слишком затратные и трудоемкие. Поэтому также возможно использовать различные ограждения из звукопоглощающих материалов и отдельных частей установки для снижения уровня шума.

Опасность может представлять повышенный уровень вибрации, который возникает во время работы исследуемого двигателя при нагрузках выше номинальной. Для избегания влияния вибраций на человека необходимо провести мероприятия на основании [14], а именно, жесткая фиксация рабочих механизмов на своих местах с использованием виброгасящих материалов.

Следующий вредный фактор – недостаток естественного света [1], при работе в условиях недостаточной освещённости, связанным с временем суток и погодными условиями. Пониженная контрастность в взаимодействии с плохой освещённостью является наиболее опасным для зрительных органов работника и может привести к травмам, при работе с движущимися частями установки [1]. Простым решением для снижения риска является покраска отдельных частей установки в различные отчетливо видные цвета.

Шум

Шум — один из наиболее распространенных неблагоприятных факторов производственной среды. Основные производственные процессы, сопровождающиеся шумом — это работа насосов, вентиляторов и др. Говоря о действии шума на организм, следует иметь в виду, что он оказывает как местное, так и общее воздействие. При этом учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, изменяются двигательная и секреторная функции желудка и других органов. Неблагоприятно отражается шум на нервной системе, вызывая головные боли, бессонницу, ослабление внимания, замедление психических реакций, что в конечном счете приводит к понижению работоспособности.

Для защиты от шума по СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96 и вибрации по СанПиН 2.2.4/2.1.8.566 – 96 предусматриваются:

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты;
- установка звукоизолирующих кабин;
- звукоизолирующие кожухи и экраны;
- виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы).

Предельно допустимые уровни шума представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Предельно допустимые уровни шума

Рабочее место	Уровни звукового давления, дБ									По шкале
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Цех	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80
Щит управления	96	83	74	68	63	60	57	55	54	65

Средства индивидуальной защиты (СИЗ) применяются в том случае, если другими способами обеспечить допустимый уровень шума на рабочем месте не удастся. Принцип действия СИЗ – защитить наиболее чувствительный канал воздействия шума на организм человека – ухо. Применение СИЗ позволяет предупредить расстройство не только органов слуха, но и нервной системы от действия чрезмерного раздражителя. Наиболее эффективны СИЗ, как правило, в области высоких частот. СИЗ включают в себя противозумные вкладыши (беруши), наушники, шлемы и каски, специальные костюмы.

Вибрация

Одним из наиболее опасных для человеческого организма производственных факторов является вибрация. Под вибрацией понимается колебание твёрдых тел.

Большое негативное воздействие этот фактор оказывает на отделы центральной нервной системы, желудочно-кишечного тракта и вестибулярного аппарата человека. Длительное воздействие вибрации на организм приводит к развитию профессиональных заболеваний, основным из которых является – виброболезнь, сопровождающаяся головокружением, онемением нижних конечностей и потерей ориентации в пространстве.

Большую опасность для организма представляют вибрации частотой 6-9 Гц, так как эти частоты наиболее близки к собственным частотам внутренних органов человека. Совпадение частоты вибрации и внутреннего органа приведёт к резонансному явлению, в результате чего начнётся процесс разрушения.

Сангигиенические нормы вибрации представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Сангигиенические нормы вибрации

Вид вибрации	Среднеквадратичная частота, Гц									
	Логарифмический уровень виброскорости									
	1	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500
Цех	-	103	100	101	106	112	118	-	-	-

Для виброзащиты применяются средства индивидуальной защиты для рук, ног и тела оператора. В качестве средства защиты для рук применяются

рукавицы и перчатки, вкладыши и прокладки по ГОСТ 12.4.002 "Система стандартов безопасности труда. Средства защиты рук от вибрации. Технические требования и методы испытаний".

Виброзащитная обувь изготавливается в виде сапог, полусапог, в конструкции низа которых используется упругодемпфирующий материал (ГОСТ 12.4.024 "Система стандартов безопасности труда. Обувь специальная виброзащитная. Общие технические требования").

Недостаток естественного света

Согласно научным исследованиям, отсутствие или недостаток естественного освещения на рабочем месте может вызвать ухудшение самочувствия, привести к потере сна и ослаблению здоровья. Специалисты полагают, что причина отрицательного воздействия может заключаться в изменении циркадных ритмов из-за недостатка естественного света. Поэтому следует уделять большее внимание достаточному дневному освещению для укрепления здоровья и морального состояния работников.

На рабочих местах, где трудовая деятельность ведется в условиях отсутствия естественного освещения, необходимо проводить мероприятия, направленные на уменьшение уровня вредности условий труда. В их число входят следующие:

- улучшение условий путем использования искусственного освещения;
- защита временем, то есть сокращение продолжительности пребывания работников в помещении без естественного освещения;
- профилактическое ультрафиолетовое облучение работников. В этом случае источники ультрафиолетового излучения устанавливаются рядом с обычными осветительными лампами, за счет чего достигается обогащение обычного искусственного освещения ультрафиолетовым излучением.

При недостатке естественного освещения в помещениях также возможно принятие следующих мер:

- анализ степени загрязненности стекол в светопроемах, их очистка и дальнейшие контрольные измерения коэффициента естественной

освещенности, который показывает, какая часть наружного освещения попадает на рабочие места производственного помещения;

- при наличии в помещении зон с недостаточным и достаточным уровнем естественного освещения изменение размещения рабочих мест с их переносом в зону с достаточным уровнем естественного освещения;
- косметический ремонт помещения с применением светлых отделочных материалов.

В зависимости от напряжения зрительного аппарата при выполнении работы освещенность на предприятиях делят на восемь разрядов - от наивысшей точности до общего наблюдения за ходом производственного процесса.

В таблице 13 приведены нормируемые значения КЕО.

Таблица 13 – Нормируемые значения КЕО

Характеристика выполняемой зрительной работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Значение КЕО в при естественном освещении, %	
			верхнем и комбинированном	боковом
Наивысшей точности	Менее 0,15	I	10	3,5
Очень высокой точности	0,15 ... 0,30	II	7	2,5
Высокой точности	0,3 ... 0,5	III	5	2,0
Средней точности	от 0,5 до 1,0	IV	4	1,5
Малой точности	от 1 до 5	V	3	1,0
«Грубая работа»	Более 5	VI	2	0,5
Работа с самосветящимися материалами и изделиями в горячих цехах		VII		
Общие наблюдения за ходом производственного процесса:		VIII		
постоянное наблюдение	-	VIIIa	1	0,3
периодическое при постоянном пребывании людей в помещении		VIIIб	0,7	0,2

периодическое при периодическом пребывании людей в помещении		VIIIв	0,5	0,1
--	--	-------	-----	-----

К числу источников света массового применения относятся лампы накаливания, лампы ДРЛ, люминесцентные лампы.

Лампы накаливания применяются там, где проводятся грубые работы, или осуществляется общий надзор за эксплуатацией оборудования. Кроме того, предпочтение лампам накаливания отдается во взрыво- и пожароопасных помещениях, в сырых помещениях, в помещениях с химически активной средой.

Характеристика выполняемой зрительной работы для проекта относится к классу средней точности, где наименьший объект различия от (0,5 до 1,0 мм) в связи с этим значение КЕО при естественном освещении 1,5 %.

Микроклимат

Помещение цеха характеризуется:

- наличием большого количества металлического оборудования;
- повышенной температурой.

Оптимальные и допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений представлены в таблице 14.

Таблица 14 - Оптимальные и допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений

Сезон года	Категория работ	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
		По ГОСТ 12.1.005 – 88	По ГОСТ 12.1.005 – 88	По ГОСТ 12.1.005 – 88
Холодный	Средней тяжести	17 – 19	40 – 60	0,3
Тёплый со значительным избытком тепла	Средней тяжести	20 – 22	40 – 60	0,2 – 0,5

Для обеспечения нормального микроклимата предусматривается, в соответствии с Сан ПиН 2.2.4.548 – 96(1), следующее:

- вентиляция приточно-вытяжная по СНиП 2.04.05 – 91* (28.11.91) установка центробежных вентиляторов. Кратность воздухообмена 1;
- установка систем воздушного отопления, совмещённых с вентиляцией;

Предусмотренные мероприятия обеспечивают параметры микроклимата в соответствии с нормами, представленными в таблице 14.

В соответствии с Сан ПиН 2.2.4.548 – 96(1) значения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха устанавливаются, для рабочей зоны производственных помещений, в зависимости от категории тяжести выполняемой работы, величины явного избытка тепла, выделяемого в помещении и периода года.

5.2 Анализ опасных факторов

Проведем анализ опасных производственных факторов в вышеописанном технологическом процессе исследования и проверки двухзонного электропривода постоянного тока. Основным опасным фактором является возможность поражения человека электрическим током, так как работа производится с рабочими электрическими установками, в частности двигателями. Для снижения уровня опасности проводится заземление электроустановок и полное или частичное ограждение токоведущих частей. Данные операции должны производиться на основании [10 - 13].

Следующая опасность заключается в том, что работа проводится с рабочим двигателем, соответственно вал двигателя находится в движении, что может привести к механическим повреждениям частей тела человека. Однако, благодаря конструкции двигателей, опасность представляют лишь выходные концы валов и места соединений. Для снижения риска устанавливают кожухи или защитные экраны в местах открытых движущихся механических частей.

Электропоражение

Электропоражение персонала, работающего с электроустановками, является опасным для жизни человека и наступает при соприкосновении его с сетью не менее чем в двух точках. При разработке коллективных и индивидуальных средств защиты от электропоражения необходимо, согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ), рассмотреть следующие вопросы:

- а) обоснование категории помещения по степени опасности поражения электрическим током;
- б) требования к электрооборудованию;
- в) анализ соответствия реального положения на производстве перечисленным требованиям;
- г) мероприятия по устранению обнаруженных несоответствий;
- д) обоснование мероприятий и средств защиты, работающих от поражения электрическим током.

Рассматриваемая лаборатория не имеет характеристик, свойственных особо опасным помещениям в части поражения электрическим током. Необходимо применение основных коллективных способов и средств электрозащиты: изоляция проводов и её непрерывный контроль; предупредительная сигнализация и блокировка; использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов; защитное заземление и защитное отключение.

Также, используются индивидуальные электрозащитные средства. В установках до 1000 В используются диэлектрические перчатки, указатели напряжения, диэлектрические коврики и боты, изолирующие подставки, а также инструмент с изолированными рукоятками.

Загорание (пожар)

Пожары – неконтролируемый процесс горения, которые чреваты большими материальными издержками, а часто и человеческими жертвами.

Обеспечение пожаробезопасности начинается с определения класса взрывоопасной зоны или класса пожароопасной зоны данного производственного помещения. Согласно классификации производств по пожарной опасности (ППБ-03) рассматриваемая лаборатория относится к классу В (обработка или применение твердых сгораемых веществ и материалов, а также жидкостей с температурой выше 120 градусов): электроизоляция, бумага, мебель. Т.е. технологический процесс в лаборатории исключает взрывоопасную зону, имеющиеся вещества могут только гореть. Лаборатория имеет пожароопасную зону класса П-2а. Минимальная допустимая степень защиты оболочек электрических машин для данной пожароопасной зоны обозначается IP44. Использование данной степени защиты – одно из направлений профилактики, оно должно быть установлено на объектах, где воздействие опасных факторов пожара может привести к травматизму или гибели людей, этого требует «технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

Лаборатория оснащена такой системой с дымовыми извещателями. Сигналы извещателей включают систему протоколирования информации, формируют управляющую систему тревоги и систему оповещения о пожаре, для своевременной эвакуации людей. Это другое направление профилактики загораний.

Выбор типа и расчет необходимого числа огнетушителей производится в зависимости от их огнетушащей способности. Из пяти таких классов, лаборатории подходит класс А (пожар твердых веществ) и класс Е (горение электроустановок). Согласно [6] на 800 м² защищаемой площади рекомендуется использовать восемь двухкилограммовых порошковых огнетушителей. Для лаборатории достаточно одного двухкилограммового огнетушителя ОП.

Защита окружающей среды

Работа в лаборатории сопряжена с образованием и выделением газообразных, жидких и твердых отходов.

Газообразные отходы, загрязняющие воздух помещения: естественные выделения - углекислый газ, пары воды, летучие органические соединения - ЛОС (альдегиды, кетоны), азотистые соединения; бытовая пыль; ЛОС, выделяющиеся в процессе эксплуатации отделочных материалов, лакокрасочных покрытий мебели и др. Перед выбросом воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения. Жидкие отходы - бытовые отходы, образующиеся в процессах влажной уборки помещений, при пользовании водопроводом, туалетом и т.п., сбрасываются в городскую канализацию и далее поступают в системы централизованной очистки на городских очистных сооружениях.

При обращении с твердыми отходами: бытовой мусор (отходы бумаги, отработанные специальные ткани для протирки офисного оборудования и экранов мониторов, пищевые отходы); отработанные люминесцентные лампы; офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства – надлежит руководствоваться Постановлением Администрации г. Томска от 11.11.2009 г. №1110 (с изменениями от 24.12.2014) [15]: бытовой мусор после предварительной сортировки складировать в специальные контейнеры для бытового мусора (затем специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку); утратившее потребительские свойства офисное оборудование передают специальным службам (предприятиям) для сортировки, вторичного использования или складирования на городских мусорных полигонах. Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681 [16]. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Ртуть люминесцентных ламп способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является сохранность

целостности отработанных ртутьсодержащих ламп. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки. В случае боя ртутьсодержащих ламп осколки собирают щеткой или скребком в герметичный металлический контейнер с плотно закрывающейся крышкой, заполненный раствором марганцевокислого калия. Поверхности, загрязненные боем лампы, необходимо обработать раствором марганцевокислого калия и смыть водой. Контейнер и его внутренняя поверхность должны быть изготовлены из неадсорбирующего ртуть материала (винипласта).

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

Предотвращение ЧС и устранение их последствий

Наиболее вероятные чрезвычайные ситуации на рассматриваемом рабочем месте в механическом цехе: возникновение пожара и электропоражение.

Пожар (загорание) – как источник ЧС

Основными причинами пожара могут быть: перегрузка проводов, короткое замыкание, большие переходные сопротивления в электрических цепях, электрическая дуга, искрение и неисправности оборудования.

Согласно [5], пожарная профилактика обеспечивается: системой предотвращения пожара; системой противопожарной защиты; организационно-техническими мероприятиями. К мерам предотвращения пожара относятся: применение средств защитного отключения возможных источников загорания (защитного зануления); применение искробезопасного оборудования; применение устройства молниезащиты здания; выполнение правил (инструкций) по пожарной безопасности.

К мерам противопожарной защиты относятся: применение пожарных извещателей; средств коллективной и индивидуальной защиты от факторов пожара; системы автоматической пожарной сигнализации; порошковых или углекислотных огнетушителей, два ящика с песком 0,5 м³.

Организационно-технические мероприятия: наглядная агитация и инструктаж работающих по пожарной безопасности; разработка схемы действия администрации и работающих в случае пожара и организация эвакуации людей; организация внештатной пожарной дружины.

При обнаружении загорания рабочий немедленно сообщает по телефону 01 в пожарную охрану, сообщает руководителю, приступают к эвакуации людей и материальных ценностей. Тушение пожара организуется первичными средствами с момента обнаружения пожара. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь.

Электропоражение как источник ЧС

Современная система электробезопасности обеспечивает защиту от поражения в двух наиболее вероятных и опасных случаях:

- при прямом прикосновении к токоведущим частям электрооборудования;
- при косвенном прикосновении.

Под косвенным прикосновением понимается прикосновение человека к открытым проводящим частям оборудования, на которых в нормальном режиме (исправном состоянии) электроустановки отсутствует электрический потенциал, но при каких-либо неисправностях, вызвавших нарушение

изоляции или ее пробой на корпус, на этих частях возможно появление опасного для жизни человека потенциала.

Для защиты от прямого прикосновения к токоведущим частям, согласно [17] п.412. служат изоляция токоведущих частей, применение ограждений и оболочек, установка барьеров, размещение вне зоны досягаемости, устройства защитного отключения (УЗО).

Для защиты от косвенного прикосновения применяются: защитное заземление и защитное зануление [17] п.413.

Даже если при электропоражении работающий внешне сохранил формат нормального самочувствия, он должен быть осмотрен врачом с заключением о состоянии здоровья. Предварительно пострадавший должен быть освобожден от действия электрического тока. Если при этом отключить напряжение быстро невозможно, освобождение от электричества пострадавшего необходимо производить, изолировав себя диэлектрическими перчатками или галошами. При необходимости перерезать провода (каждый в отдельности) инструментом с изолированными ручками. Если есть необходимость (при потере сознания, остановке сердца и т.п.) оказания первой помощи, то до прибытия медработника необходимо начать делать: наружный массаж сердца, искусственное дыхание.

Для предотвращения от поражения электрическим током при прикосновении к корпусам электроустановок, находящихся под напряжением при пробое изоляции или в других случаях, необходимо рассчитать и установить защитное заземление.

Заключение

В данной работе произведено моделирование системы управления СДПМ. В качестве среды моделирования выбрана среда имитационного моделирования Simulink математического пакета MATLAB, которая совмещает в себе удобный графический интерфейс и широкие возможности исследования динамических процессов. Комбинируя возможности Simulink и библиотеки для моделирования электротехнических устройств SimPowerSystem, можно не только имитировать работу устройств во временной области, но и выполнять различные виды анализа таких устройств.

Рассмотрение переходных характеристик системы (см. рисунки 10,12,14) показывает, что на каждом этапе моделирования решаются конкретные задачи. Постепенное улучшение динамических и энергетических характеристик подтверждает правильность выбранной методики.

Список используемой литературы.

1. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2008. – 298 с.
2. Полфунтиков Е.Ю. Тяговый двигатель с постоянными магнитами. / Сборник научных трудов НГТУ. – 2009, № 2(56). – С. 141–146.
3. Нургалеев А.Р., Павлова З.Х., Шабанов В.А. Перспективы использования вентильного электропривода в нефтяной и газовой промышленности. / Уфимский государственный нефтяной технический университет. – [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: http://www.rusnauka.com/13_EISN_2013/Tecnic/5_137070.doc.htm (дата обращения: 17.05.2018).
4. Корельский В., Потапенко Е.М., Васильева Е.В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами. / Научный журнал «Радиоэлектроника. Информатика. Управление», 2001. - С. 155-159
5. Ковальчук Д.А., Мазур А.В. Векторное управление синхронным электродвигателем. // «Автоматизация технологических и бизнес-процессов». [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Одесса: Одесская национальная академия пищевых технологий. – 2014, №17 - С. 71-75. – Режим доступа: <http://dropdoc.ru/doc/453471/vektornoe-upravlenie-sinhronnym-e-lektrodivigatelem.pdf> (дата обращения: 18.05.2018).
6. Завьялов В.М, Абд Эль Вхаб А. Р. Дифференциальное управление моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами. // «Современный электропривод». – 2012, № 1 – С. 8-15.
7. Ryvkin Sergey. Sliding mode for synchronouselectric drive / Eduardo Palomar Lever–CRC Press–2011, – 208 с.

8. Ворошилова О.Н. \Исследование робастной системы управления вентильным электроприводом. // Автоматика и Электроника. Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных. [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Николаев: Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова – Режим доступа: conference.nuos.edu.ua (дата обращения: 20.05.2018).
9. Глазунов В.Ф., Пикунов В.В., Репин А.А. Методика синтеза системы управления синхронным двигателем на основе синергетического подхода. // «Вестник ИГЭУ» – 2005, № 3.
10. Абд Эль Вхаб А. Р., Каракулов А.С., Дементьев Ю.Н., Кладиев С.Н. Сравнительный анализ векторного управления и прямого управления моментом синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. // «Известия Томского политехнического университета» – 2011, Т. 319, №4. С–93–99.
11. Горобец Н.М. Исследование современных сервоприводов на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами. [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Донецк: ДонТУ – Режим доступа: <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2009/eltf/gorobets/report/index.htm> (дата обращения: 21.05.2018).
12. Панкратов В.В. Вентильный электропривод: от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза. // «Электронные компоненты». – 2007, №2.
13. СНиП П-12-77. «Защита от шума»
14. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. «Вибрационная безопасность. Общие требования»
15. ГОСТ 12.0.003-74 (СТ СЭВ 790-77). «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация»

16. ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»
17. ГОСТ 12.1.003-83 «Шум. Общие требования безопасности»
18. Правила устройства электроустановок, ПУЭ, утвержденные Министерством энергетики России от 08.07.2002, №204, Глава 1.7.
19. ГОСТ 12.1.004-91, СС5Т «Пожарная безопасность. Общие требования»
20. СП 9.13130.2009 «Техника Пожарная. Огнетушители. Требования к эксплуатации»
21. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – 6е изд., переработанное и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 824 с.
22. СНиП 2.04. 05-91. «Отопление, вентиляция и кондиционирование»
23. ГОСТ 12.1.019 -79 (с изм. №1) ССБТ. «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты»
24. ГОСТ 12.0.004–90 ССБТ. «Обучение работающих безопасности труда»
25. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. «Защитное заземление, зануление»
26. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов»
27. Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009 №1110 (с изменениями от 24.12. 2014) «Об организации сбора, вывоза, утилизации, и переработки бытовых и промышленных»
28. Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681 «Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств»
29. ГОСТ Р 50571.3-94 «Электроустановки зданий. Часть 4. Защита от поражения электрическим током».