

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение электроэнергетики и электротехники

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Энергоэффективный электропривод на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами</b>

УДК 62-83:621.313.323

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM88	Бухтуев Вадим Юрьевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Шилин А.А.	Д.Т.Н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Л.Ю.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Фех А.И.			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭЭ ИШЭ	Гарганеев А.Г.	Профессор Д.Т.Н.		

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП**

**13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»**

<b>Код</b>	<b>Результат обучения*</b>	<b>Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР</b>
<b>Общие по направлению подготовки</b>		
P1	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой <i>интеллектуальный</i> и <i>общекультурный</i> уровень, добиваться <i>нравственного</i> и <i>физического совершенствования</i> своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1,6; ОПК-1, 2), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками</i> как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-4,5; ОПК-3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	<i>Использовать</i> на практике <i>навыки и умения</i> в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-2,3; ОПК-1; ПК-1, 2, 3), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	<i>Иметь</i> представление о методологических основах <i>научного познания и творчества</i> , роли научной информации в развитии отрасли, навыки проведения работ с привлечением <i>современных информационных технологий</i> , синтезировать и критически резюмировать информацию.	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1,6; ОПК-1, 4), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.	Требования ФГОС ВО (УК-5, ОПК-4; ПК- 4-6), Критерий 5 АИОР (п.1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<b>По профилю подготовки</b>		
P6	Ставить и <i>решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.	Требования ФГОС ВО (ПК-1, 7,8), Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P7	Выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.	Требования ФГОС ВО (ПК-2, 9, 10, 11), Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	Проводить инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.	Требования ФГОС (ПК-3, 13, 14, 15, 24-26), Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.	Требования ФГОС (ПК-11, 12, 13, 16-21, 24, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы</i> электроэнергетического и электротехнического оборудования.	Требования ФГОС (ПК-22, 23, 25, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и

		<i>FEANI</i>
P11	Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.	Требования ФГОС (ПК-27, 28), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P12	Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.	Требования ФГОС (ПК-29, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3, 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

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

Инженерная школа энергетики  
Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
Отделение электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
Гарганеев А.Г.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
5AM88	Бухтуеву Вадиму Юрьевичу

Тема работы:

**Исследование электропривода насосной установки**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№ 58-29/с от 27.02.2020 года

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

**Исходные данные к работе**

*Объектом исследования является синхронный двигатель с постоянными магнитами.  
В качестве исходных данных представлены:  
- структурная схема электропривода  
- характеристики исследуемого электромобиля*

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- моделирование в среде MatLab системы управления синхронного двигателя с постоянными магнитами;</li> <li>- обсуждение результатов выполненной работы;</li> <li>- разработка раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»;</li> <li>- разработка раздела «Социальная ответственность»;</li> </ul>
<p><b>Перечень графического материала</b></p>	
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p><b>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b></p>	<p>Спицына Любовь Юрьевна</p>
<p><b>Социальная ответственность</b></p>	<p>Фех Алина Ильдаровна</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>Приложение А написано на иностранном языке</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Шилин А.А.	д.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM88	Бухтуев Вадим Юрьевич		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Уровень образования – Магистр  
 Отделение электроэнергетики и электротехники  
 Период выполнения \_\_\_\_\_ весенний семестр 2019/2020 учебного года \_\_\_\_\_

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы: \_\_\_\_\_

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
16.03.2020	Расчет и выбор оборудования	
05.05.2020	Моделирование системы управления электродвигателя	
12.05.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
19.05.2020	Социальная ответственность	
25.05.2020	Оформление пояснительной записки	

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Шилин А.А.	Д.Т.Н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гарганеев А.Г.	Д.Т.Н.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5AM88	Бухтуеву Вадим Юрьевичу

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	Электроэнергетика и электротехника
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	При проведении исследований используется материально-техническая база НИ ТПУ, в исследовании задействованы 2 человека: научный руководитель и инженер-дипломник Бюджет проекта не более 4000000 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность».
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды составляют 27,1

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала</i>	1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала</i>
2. <i>НТИ Анализ и оценка научно-технического уровня проекта (НТИ)</i>	НТИ Анализ и оценка научно-технического уровня проекта (НТИ)
3. <i>Разработка устава научно-технического проекта Не разрабатывается</i>	2. <i>Разработка устава научно-технического проекта Не разрабатывается</i>
4. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и</i>	3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и</i>

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

«Портрет» потребителя результатов НТИ  
 Сегментирование рынка  
 Оценка конкурентоспособности технических решений  
 Диаграмма FAST  
 Матрица SWOT  
 График проведения и бюджет НТИ  
 Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ  
 Потенциальные риски

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Любовь Юрьевна	К.э.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM88	Бухтуев Вадим Юрьевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5AM88	Бухтуев Вадим Юрьевич

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	Электроэнергетика и электротехника
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	Электроэнергетика и электротехника

Тема ВКР:

Энергоэффективный электропривод на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Описание рабочего места дежурного инженера узла связи при работе с ленточным конвейером.
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– ГОСТ 12.1.033-81 Система стандартов безопасности труда; – НПБ 105-03 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности; – ГОСТ 12.4.125-83 Система стандартов безопасности труда; – ГОСТ Р 50571.2-94 Электроустановки зданий;
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	- К вредным факторам производственной среды можно отнести повышенную или пониженную температуру воздуха рабочей зоны, подвижность воздуха, тепловое излучение, повышенные уровни шума, электромагнитные поля, освещённость; - К опасным факторам производственной среды можно отнести опасность поражения электрическим током, пожароопасность, получение механической травмы;
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	- К негативным факторам воздействия на окружающую среду можно отнести химический вред неправильно утилизированных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	- Возможных ЧС на узле связи и необходимые действия по разработке и осуществлении комплекса инженерно-технических мероприятий

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Старший преподаватель	Фех Алина Ильдаровна			

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5AM88	Бухтуев Вадим Юрьевич		

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 109 страниц, 31 рисунок, 35 таблиц, 28 источников, 4 приложения.

Ключевые слова: ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, БЕЗДАТЧИКОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ, ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, ВЕКТОРНАЯ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ, СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ,

Объектом исследования является система управления электродвигателя для электропогрузчика, управляемая электроприводом с функциональными преобразователями.

Целью работы является построение системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами, обеспечивающей необходимые динамические и энергетические показатели контроля качества.

С помощью программного продукта Matlab R2019a смоделирована модель электропривода и система управления. Рассчитаны коэффициенты регуляторов скорости и тока. Получены переходные характеристики процессов, которые позволяют сравнивать эффективность разработанных систем.

Диссертационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2016.

## Оглавление

СОКРАЩЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ .....	11
ВВЕДЕНИЕ.....	12
1. ПРИНЦИП РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ .....	14
1.1. Анализ методов управления СД .....	14
1.2. Описание математической модели СД.....	19
2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ.....	24
2.1. Система СДПМ с использованием датчика положения ротора.....	24
2.2. Система СДПМ с использованием функциональных преобразователей .....	29
2.3. Система СДПМ с использованием бездатчикового управления .....	31
2.3.1. Описание наблюдателя состояния.....	32
3. РАСЧЕТ СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ .....	34
3.1. Расчет мощности двигателя и его выбор .....	34
3.2. Расчет аккумуляторной батареи и ее выбор .....	34
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В ПРОГРАММНОМ ПРОДУКТЕ MATLAB R2019A .....	37
4.1. Моделирование синхронного двигателя .....	37
4.2. Настройка регуляторов скорости и тока .....	37
4.3. Моделирование системы с датчиком положения ротора .....	38
4.4. Моделирование системы управления с использованием функциональными преобразователями.....	40
4.5. Моделирование системы управления с использованием бездатчикового управления .....	41
5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	45
6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	90
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА .....	91
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	91
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	95
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	108
ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....	109

## **Сокращения, обозначения**

АИН – Автономный инвертор напряжения

АЭД – Асинхронный электродвигатель

ДПТ – Двигатель постоянного тока

ДПР – Датчик положения ротора

КПД – Коэффициент полезного действия

ПЧ – Преобразователь частоты

СД – Синхронный двигатель

ТАУ – Теория автоматического управления

ТЭД – Тяговый электродвигатель

ШИМ – Широтно-импульсная модуляция

IGBT – Биполярный транзистор с изолированным затвором

## Введение

Транспорт с электродвигателем по экологическим нормам существенно обгоняет иные виды автотранспорта с ДВС. В следствии этого, разработка и создание электротранспорта предугадали внедрение транспорта, в котором при соприкосновении контакторов энергия поступает к двигателю от системы электроснабжения. Отсюда следует, что маневренность данного контактного электротранспорта будет намного хуже маневренности автотранспорта. Несмотря на это, исследование разных вариантов использования топлива для двигателей необходимо, т.к. загрязнение окружающей среды от транспорта с ДВС довольно сильно влияют на последствия для окружающих, тем более в экономически развитых городах.

Переход к другим источникам 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 установкой – основное направление для снижения уровня загрязненности окружающей среды.

Электромобиль — это относительно новая концепция в мире автомобильной промышленности, главным источником энергии является аккумуляторная батарея. Требования применимые к накопителям энергии:

- взрывобезопасность и пожаробезопасность;
- наличие малых массогабаритных характеристик;
- наличие широкого спектра рабочих температур;
- малый саморазряд;

- долгий срок работы;
- простота в обслуживании;
- маленькая токсичность;
- наличие КПД зарядно-разрядной характеристики.

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 существует необходимость в повышении надежности источника энергии, для каждого конкретного набора батарей даются определенные технические характеристики.

Для достижения полной безопасности использования батареи, а также оптимальных условий ее эксплуатации необходимо строго соблюдать режимы работы и применять механизмы, с помощью которых энергия батареи перераспределяется между батареями. 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. Принцип работы системы управления синхронного двигателя

## 1.1. Анализ методов управления СД

*Общие сведения о синхронном двигателе.* Данный двигатель представляет собой электрическую машину переменного тока, у которого частота вращения ротора равна частоте вращения магнитного поля в воздушном зазоре. Статор этого двигателя, похож по конструкции статора асинхронного двигателя. На роторе находятся постоянные магниты, в отличие их расположения есть два вида СДПМ: магниты расположены на поверхности ротора; магниты расположены в стали ротора. Двигатели обычно производятся на малую мощность и используются в сервоприводах вместе с преобразователем частоты [1]. Присутствуют разработки этих двигателей мегаваттной мощности [2].

Синхронные электродвигатели всё чаще встречаются в областях, где применяются ДПТ или АД. Например, приводы циркулярных насосов; приводы компрессоров в бытовой технике, в системах вентиляции, в буровых установках. Причинами этого является текущая тенденция к уменьшению стоимости магнитных материалов, а также модернизация системы управления. Возникновение соответственной вычислительной техники помогает заменить ДПТ на СДПМ в приводе. Значительный толчок дало распространение преобразователей в качестве транзистора с изолированным затвором (IGBT) и использование принципов ШИМ [3, 4, 5].

*Классификация методов управления СД.* Направление развития принципа управления СД определяется в основном развитием системы управления приводом: параметры двигателя, тип преобразователя, наличие датчиков угла поворота и скорости.

Наличие или отсутствие датчиков магнитного состояния и координат механического движения является принципиальным для построения системы управления СД. На валу двигателя в классическом приводе, в основе которого лежит СД, установлен ДПР. Датчик Холла, резольвер и энкодер можно

применять в качестве датчика. В результате получаем довольно простую схему, но надежность системы ухудшается по причине того, что строение двигателя сложное.

Достигнутые результаты (в частности, от совершенствования наблюдателей за состоянием) в области развивающейся ТАУ привели к тому, что в наше время появились бездатчиковые приводы. Из-за того, что нет датчика положения ротора, вся информация необходимая для исполнения алгоритма, поступает от наблюдателя состояния. В системах, где нельзя установить ДПР, бездатчиковые системы играют большую роль. Компактность, невысокая стоимость и надежность – ключевые преимущества таких систем.

В отечественной зарубежной литературе описан ряд версий управления системой без датчиков, которые, в свою очередь, основываются на математических моделях двигателей переменного тока. В этих системах расчет скорости вращения равен скорости в модуле и сравним с угловым положением вектора ЭДС ротора. Эти системы отличаются друг от друга точностью и чувствительностью при изменении входных параметров в математической модели. Недостатком таких способов является невозможность работы электропривода на низких частотах, т.к. ЭДС ротора данном случае близок к нулевой отметке и не может подать требуемый сигнал.

В таком случае ухудшается энергоэффективность электропривода и увеличивается потребляемая мощность силовыми элементами ввиду того, что возникают дополнительные потери в преобразователе и двигателе. Для оценивания пассивной системы существуют два варианта – адаптивный и неадаптивный. Для расширения и функциональности адаптивные системы используют нестандартные и стандартные модели. Для электромагнитных процессов неадаптивные системы используют модели ротора и статора. Адаптивные системы используют стандартные и нестандартные модели для расширения и функциональности. Для этого используется метод Ляпунова.

Методы построения систем управления для СД также разнообразны.

Разные методы управления показаны на рисунке 1.



Рисунок 1- Варианты исполнения систем управления СД

Разберем каждый из вариантов управления СД более подробно. Метод прямого контроля крутящего момента первоначально был предложен к использованию в асинхронном двигателе, но в наше время он нашел применение и в других машинах переменного тока. Принцип работы данного метода основывается на выборе вектора напряжения в соответствии с присущей таблицей значений. Однако поле статора и момент контролируются одновременно.

Такие системы имеют ряд преимуществ: устойчивость достигается при изменении параметров, алгоритм управления упрощается из-за отсутствия токового контура управления и обеспечивается высокая производительность системы. Но способ прямого управления моментом имеет значительный недостаток: при небольших нагрузках появляются колебания вращения ротора и момента.

Метод дифференциального управления уменьшает колебания момента. Этот метод получен в следствии рассмотрении противоположных знаков производных момента и модуля вектора магнитного потока статора. Недостатком этого способа является снижение производительности при работе с максимальным напряжением.

С.Е. Рывкин написал в своей статье о скользящем режиме. Для этих систем характерно наличие переменной структуры. Вся суть заключается в том, что при прохождении скользящей поверхности, знак движущего сигнала меняется на противоположный. Все описывается уравнением, которое основано на переменном состоянии объекта. К недостаткам таких систем можно отнести несколько случаев: возможность неустойчивости в момент пересечения поверхности переключения; высокочастотное переключение, которое может привести к быстрому износу механических и электрических частей электропривода.

При построении систем управления самыми перспективными и современными инструментами являются Neuron Networks и Fuzzy Logic. Главным недочетом таких систем является необходимость в больших вычислительных мощностях.

Недавно были разработаны методы синтеза устойчивых систем управления. Изменения нагрузки, сопротивления в статоре, момента инерции крутящихся частей, напряжения сети оказывают влияние как на механические характеристики, так и на переходные процессы. Надежные системы не адаптированы, но способны дать необходимую работу при изменении характеристик эффектов и неустойчивой работы двигателя. Необходимость сокращения нужного объема информации, стремление к универсальной системе управления двигателя и снижение денежных средств на настройку – это ведет к интересу надежного управления. Сейчас, несмотря на большие достижения, варианты Н-оптимизации не получили широкого практического применения.

Разрабатываются системы управления СДПМ, основанные на синергетическом подходе. Из теории синергетического управления известно, что набор критериев управления для системы записывается в виде инвариантов. СД имеет несколько каналов управления; следовательно, для него может быть указано не более двух инвариантов. В качестве стабилизации скорости вращения двигателя используется стабилизация скорости вращения вала двигателя, а электромагнитный инвариант выбирается таким образом, чтобы уменьшить до нуля продольную составляющую тока статора  $I_d$ . Адекватный синергетический контроль синтезируется с использованием метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов. Преимущество этого метода - высокая точность, недостаток - сложность расчетов, значительное время обработки.

Принцип векторного управления двигателем основывается на создаваемом постоянными магнитами положении вектора связи потока. Именно из-за этого факта в некоторых источниках такой принцип называется «ориентированным на поле». Основная цель данного метода – управление машиной постоянного тока, в которой соотношение крутящего момента и потока проверяется в статическом и динамическом режимах. Зная положение ротора и применяя математические уравнения, вращающаяся система координат (d,q) (источник – мгновенные значения тока статора) связана с ротором. Если текущие значения идентификатора поддерживать равным нулю, то вдоль оси d поток будет постоянным. В данном случае момент является пропорциональным значению тока  $i_q$ , которое задается в системе управления.

Наиболее распространенными методами управления SDPM являются прямое управление крутящим моментом и векторное управление. Система с прямым контролем момента лучше выполняет управляющие и мешающие воздействия. Кроме того, векторное управление уступает прямому управлению крутящим моментом из-за низкого сопротивления изменениям параметров и требует использования более сложной ШИМ-системы.

Преимуществами векторного управления в статических режимах являются меньшая пульсация и меньшие вычислительные ресурсы. В электроприводах со стабильным управлением и незначительными нарушениями нагрузки предпочтительнее использовать именно такие системы. Учитывая то, что в данной статье рассматривается энергоэффективный электропривод, векторное управление выбирается в качестве метода управления СД, который дает меньше потерь в двигателе при низких значениях гармоник тока.

## 1.2. Описание математической модели СД

Синхронные двигатели с постоянными магнитами различаются тем, что на роторе есть постоянные магниты, которые создают захватывающий магнитный поток. Статор этих машин похож на АД-статор и имеет двух- или трехфазную обмотку. При составлении математической модели SDPM мы примем следующие допущения [1]:

- 1) отсутствует насыщение магнитопровода, потери в стали, влияние смещения тока;
- 2) симметричные обмотки статора;
- 3) индуктивность не изменятся при смене положения ротора.

Разберем уравнения равновесного напряжения статора СД с использованием модели двигателя, показанной на рисунке 2. Рассмотрим уравнения СД в системе координат  $(d, q)$ , ось  $d$  ориентирована вдоль магнитной оси ротора. Скорость системы в пространстве равна синхронной скорости  $p_n \omega = \omega_{0эл}$ , где  $p_n$  – число пар полюсов,  $\omega$  – скорость вращения вала двигателя. Трёхфазная обмотка статора заменяется двумя обмотками, оси которых направлены вдоль координатных осей  $(d, q)$ . Обмотки неподвижны относительно вращающейся системы координат  $(d, q)$  и характеризуются активным сопротивлением  $R_s$  и индуктивностями  $L_{sd}$  и  $L_{sq}$ . На обмотки подается напряжение  $U_{sd}$  и  $U_{sq}$ , в результате чего через них протекают токи  $I_{sd}$  и  $I_{sq}$ . Учитывая направление осей координат, связь потока статора вдоль оси  $d$   $\Psi_{sd}$  определяется током  $I_{sd}$  и магнитным потоком, генерируемым

постоянными магнитами, а вдоль оси  $q$   $\Psi_{sq}$  — только током  $I_{sq}$ . Связь потока  $\Psi_f$  может быть представлена пространственным вектором, который является стационарным относительно ротора и вращается вместе с ним, а следовательно, и с системой координат  $(d, q)$ .

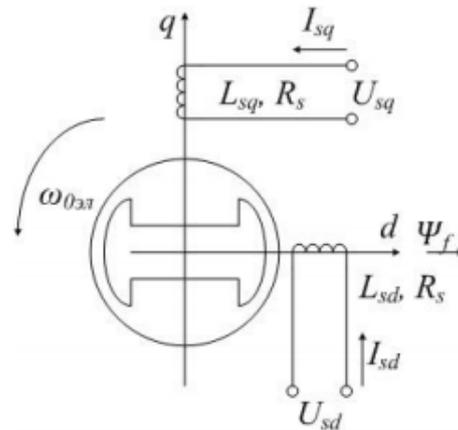


Рисунок 2- Модель СД

Таким образом, уравнения для обобщённого вектора напряжения статора и вектора магнитного потока на ось вращающейся системы координат в форме оператора имеет следующий вид:

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

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 осей  $d$ ,  $q$ , которые создаются постоянными магнитами.

Уравнение момента:

$$M = \frac{3}{2} P_n (\psi_{sd} I_{sq} - \psi_{sq} I_{sd});$$

$$p\omega = \frac{1}{J} (M - M_c - \beta\omega),$$
(1.2)

где  $J$  – момент инерции, создаваемый в роторе,  $M$ ,  $M_c$  – моменты электромагнита и сопротивления,  $\beta$  – коэффициент демпфирования. Подставив уравнения для потокосцеплений в уравнения вектора напряжений, запишем уравнения (1.1) и (1.2) относительно токов  $I_d$  и  $I_q$ :

$$pI_{sd} = \frac{1}{L_{sd}} (U_{sd} - R_s I_{sd} + \omega_{0эл} L_{sq} I_{sq});$$

$$pI_{sq} = \frac{1}{L_{sq}} (U_{sq} - R_s I_{sq} - \omega_{0эл} L_{sd} I_{sd} - \omega_{0эл} \psi_f);$$

$$M = \frac{3}{2} P_n (\psi_f I_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} I_{sq});$$

$$p\omega = \frac{1}{J} (M - M_c - \beta\omega).$$
(1.3)

На основании математической модели СД, выраженной системой уравнений (1.3) строим структурную схему, показанную на рисунке 3.

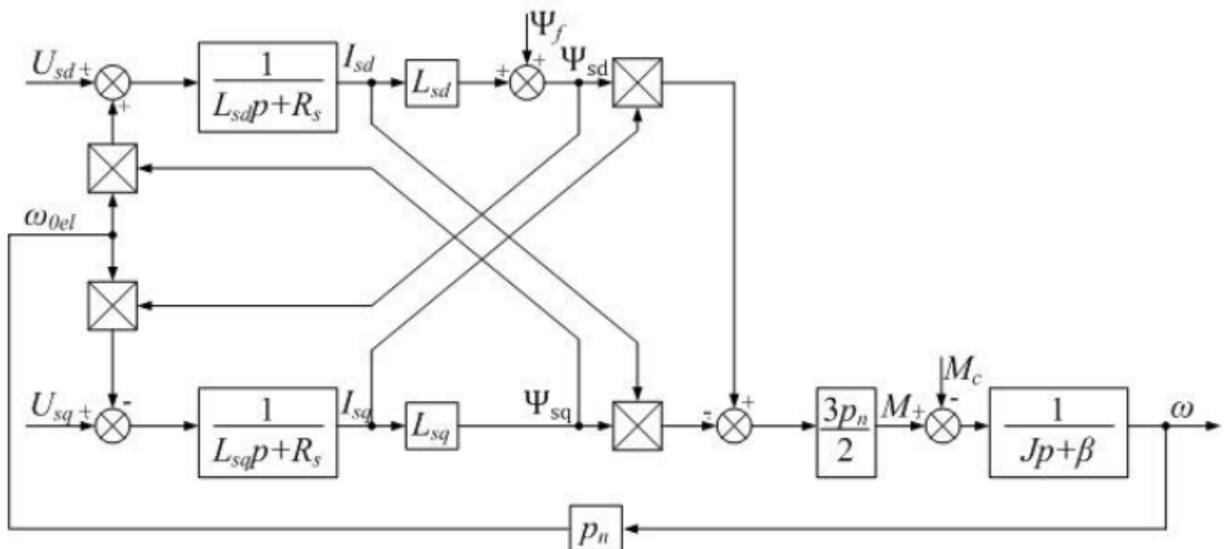


Рисунок 3- Структурная схема СД

Известно, что при увеличении или уменьшении нагрузки СД скорость остается неизменной. В этом случае угловое положение пространственного

вектора связи потока ротора относительно вектора связи потока статора изменяется. В идеальном режиме холостого хода эти векторы совпадают в пространстве, но, когда нагрузка прикладывается к валу двигателя, вектор магнитного потока ротора отстает от вектора магнитного потока статора на определенный угол нагрузки  $\theta$ . Этот угол измеряется в радианах, и вычисляется через интеграл разности между мгновенными значениями скоростей поля статора и ротора в электрическом пространстве, которые существовали в переходном процессе, связанного с изменением нагрузки. Уравнение выглядит следующим образом:

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

Во-первых, крутящий момент двигателя увеличивается с увеличением угла нагрузки. В тот момент, когда угол достигает  $90^\circ$ , момент достигает своего максимума. С увеличением угла нагрузки, то есть двигателя перегружается, соответствующий момент уменьшается и двигатель входит в зону нестабильной работы, что приводит к остановке двигателя. Это выражено в угловой характеристике, которая показана на рисунке 4, где:  $M_{\text{макс}}$  – максимальный момент,  $M_n$  и  $\theta_n$  – номинальные момент и угол нагрузки.

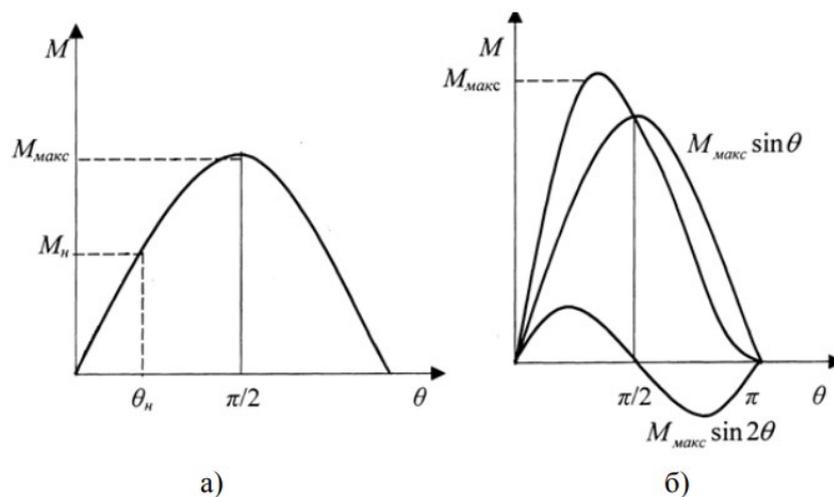


Рисунок 4- Угловая характеристика СД: а) неявнополюсного СДПМ;  
 б) явнополюсного двигателя

Для неявно полюсного двигателя угловой отклик выражается в виде синусоидальной зависимости. Если двигатель явно полюсный, то момент

вызванный полем ротора, приводит к появлению реактивного момента, который пропорционален  $\sin 2\theta$  и искажает форму кривой.

Выводы.

1. СД - перспективный двигатель, который используется в системах промышленной автоматизации, роботах и манипуляторах, приводах подачи и основных движениях металлорежущих станков, координатных устройствах, точных системах слежения и наведения, в тяговых электроприводах, рулевом управлении летательных аппаратов и подводных аппаратов. приводы, электромеханические устройства автомобилей, в бытовой технике. СД также активно распространяется в районах, где традиционно использовались ДПТ или АД.

2. В связи с распространением СДПМ также разрабатываются его алгоритмы управления. Можно выделить основные направления :

- точность разработки программного задания;
- отсутствие чувствительности к неопределенным параметрам СД;
- увеличение диапазона управления в направлении к низким скоростям;
- использование бездатчиковых алгоритмов, что приводит к повышению надежности привода;
- легкость алгоритмов с точки зрения вычислительной нагрузки, поскольку более простые алгоритмы обеспечивают более короткое время вычисления и более короткую задержку в управлении, что позволяет использовать еще более дешевые микропроцессоры;
- минимизировать энергопотребление.

## 2. Проектирование системы управления синхронным электродвигателем

### 2.1. Система СДПМ с использованием датчика положения ротора

Комбинирование системы управления, в которой устанавливается составляющая тока статора  $I_{sd} = 0$ , сделаем на основе модели СД описанной уравнением (1.3) в системе координат  $(d, q)$ .

Функциональная схема системы управления с начальными параметрами составляющей тока  $I_{sd} = 0$  показана на рисунке 5.

где  $\omega$ ,  $I_{dz}$ ,  $I_{qz}$ ,  $U_{dz}$ ,  $U_{qz}$  – задание скорости, токов и напряжений,  $I_{sa}$ ,  $I_{sb}$ ,  $I_{sc}$  – токи фаз статора,  $U_{kd}$ ,  $U_{kq}$  – компенсационные составляющие,  $g$  – ШИМ сигнал.

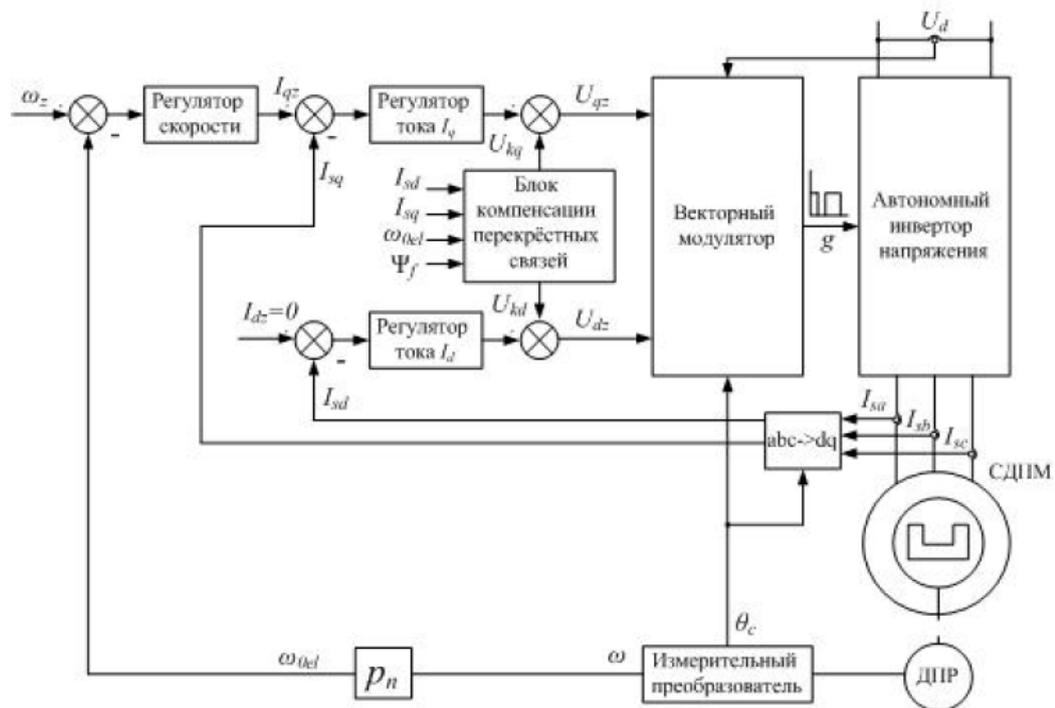


Рисунок 5 - Функциональная схема системы управления

Нулевое значение тока по оси  $d$  делает направление тока статора перпендикулярным относительно магнитной оси ротора.

Разберем каждый из основных элементов системы управления СД с ДПР.

*Датчик положения ротора.* Он определяет угол поворота в диапазоне

от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ . В качестве простого измерения угла используют резольвер или энкодер. Эти показания отправляются в преобразователь, который показывает мгновенное значение угла поворота в цифровом формате. Вместе с углом измеряется мгновенное значение частоты вращения двигателя и сразу сравнивается с заданным значением скорости. Исходя из этих показаний, ошибка в значениях отправляется в регулятор скорости.

*Преобразователь координат.* Преобразователь изменяет фазные токи трёхфазной системы  $(a, b, c)$ , и преобразовывает их в двухфазную систему  $(d, q)$

$$\begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\theta_c) & \sin(\theta_c - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_c + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_c) & \cos(\theta_c - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_c + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

где  $\theta_c$  — угловое положение ротора.

*Векторный модулятор.* Он конвертирует напряжения статора в импульсы управления ключами инвертора напряжения на основе ШИМ. Модулятор делает операции:

- определяет модуль и фазу в заданном векторе напряжения;
- выбирает сектор, где находится вектор напряжения;
- определяет угол поворота вектора напряжения относительно сектора, в котором он находится;
- расчёт времени включения базовых векторов напряжения;
- распределяет сигналы управления ключами инвертора.

*Автономный инвертор напряжения.* Инвертор входит в состав двухзвенного преобразователя частоты, схема показана на рисунке 5.

где НВ – неуправляемый выпрямитель, С – ёмкость конденсатора,  $R_T$  и  $K_T$  – сопротивление сети и ключ.

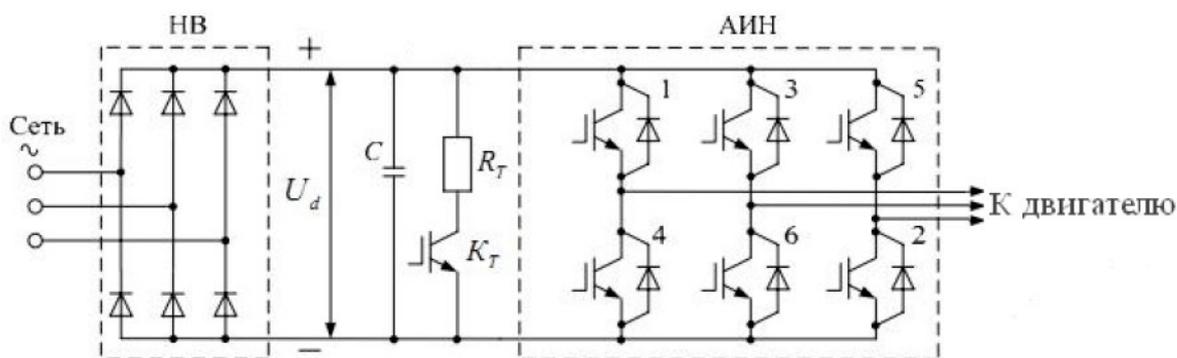


Рисунок 5 – Двухзвенный преобразователь частоты

Инвертор выполнен на IGBT-транзисторах с обратными диодами. С помощью ШИМ сигнала, инвертор преобразует входное напряжение  $U_d$  в трёхфазное напряжение, которое подаётся на двигатель.

*Компенсация перекрёстных связей.* Подставляя третье и четвёртое уравнения системы (1.1), запишем уравнения векторов напряжения:

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

Система уравнений (1.6) показывает, что между двумя этими каналами регулирования есть перекрёстные связи. Для того чтобы не было плохого влияния каналов друг на друга необходимо скомпенсировать перекрестные связи. Это можно скомпенсировать 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 частоты.

При вычислении компенсационных значений по уравнениям (1,7) берутся значения токов, взятые из системы  $(d, q)$ . Для компенсации эти значения суммируются с сигналом задания вектора напряжения  $U_{dz}$  и  $U_{qz}$ , которые являются выходными значениями регуляторов тока.

*Регуляторы токов и скорости.* Расчет регуляторов произведем на основании регулирования компенсации нелинейных связей.

Системы регулирования имеют свои хорошие качества:

1. Легкость расчёта и настройки системы. Каждый контур системы содержит регулятор, что придает контуру динамику, также компенсируется наивысшая постоянная времени.

2. Ограничения максимальных значений координат системы, которые достигаются за счёт ограничения выходного сигнала внешнего контура.

Для того чтобы сделать синтез регулятора тока по оси  $d$ , используем структурную схему контура, которая показана на рисунке 7. На схеме обозначено:  $\frac{k_d}{T_d p + 1}$  - передаточная функция по оси  $d$ , где  $k_d = \frac{1}{R_s}$ ,  $T_d = \frac{L_{sd}}{R_s}$ ,  $R_s$  - сопротивление фазы;  $L_{sd}$  - индуктивность обмоток;

$U_{kd} = -\frac{1}{k_{пч}} \omega_{0эл} L_{sq} I_{sq}$  - сигнал компенсации перекрёстной связи,  $\frac{k_{пч}}{T_{пч} p + 1}$  - передаточная функция ПЧ, который записан как апериодическое звено,  $k_{дт}$  - датчик тока,  $W_{рТ}$  - передаточная функция регулятора тока.

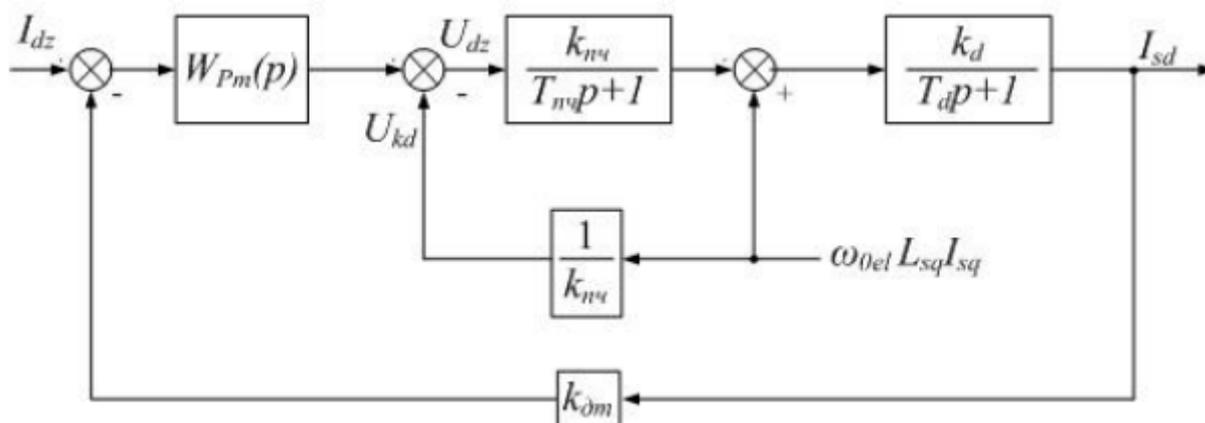


Рисунок 6- Структурная схема регулятор тока по оси  $d$

Исходя из того что перекрёстные связи скомпенсированы, можем провести настройку оптимума малой некомпенсированной постоянной времени  $T_{кт}$ , равной  $T_{пч}$ . В итоге получится передаточная функция разомкнутой системы:

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

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

В итоге, коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих определяются уравнениями:

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

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

Передаточная функция замкнутого контура тока:

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

Регулятор тока по оси  $q$  выполняется аналогично, но 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;  $L_{sq}$  — индуктивность обмоток.

2) Возмущающий сигнал компенсации имеет вид  $U_{kq} = \frac{1}{k_{пч}} \omega_{0эл} (L_{sd} I_{sd} + \psi_f)$ .

Уравнения регулятора тока по оси  $q$  будет похожи на формулы регулятора по си  $d$  (1.9):

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

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

Регулятор скорости сделаем, опираясь на структурную схему, которая представлена на рисунке 7.

Реактивной составляющей момента в уравнении (1.3) можно пренебречь в нескольких случаях:

- 1) для неявнополюсных двигателей ( $L_{sd} = L_{sq}$ );
- 2) когда  $I_{sd} = 0$ .

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

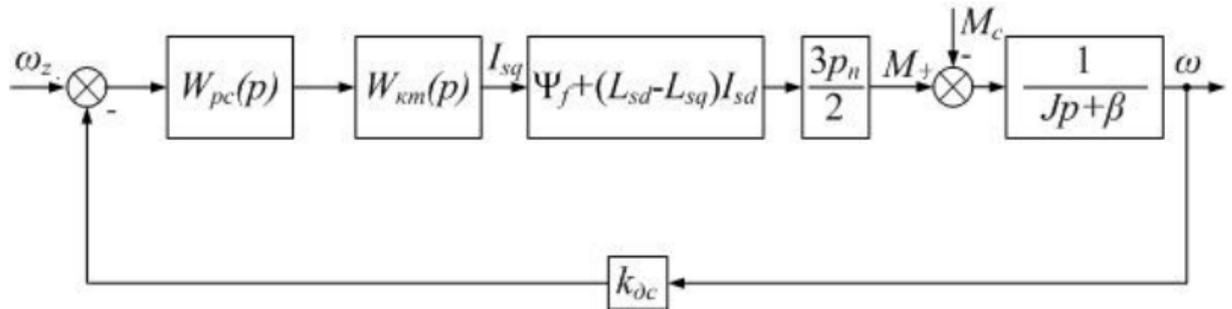


Рисунок 7- Структурная схема скорости

Когда  $\beta = 0$  настройка выполняется по симметричному оптимуму. Можно записать 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:

$$\begin{aligned} k_{p\omega} &= \frac{k_{\partial m} J}{3T_{kc}\psi_f p_n k_{dc}}; \\ k_{i\omega} &= \frac{k_{\partial m} J}{12T_{kc}^2 \psi_f p_n k_{dc}}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

где  $T_{kc} = 2T_{кт}$ .

## 2.2. Система СДПМ с использованием функциональных преобразователей

Как описывалось до этого, чтобы получить определённый момент СД при маленьком токе не является оптимальным вариантом. Управление осуществляется обеспечением определённого соотношения между

составляющими значениями тока статора, которое задаётся с помощью функциональных преобразователей (ФП). Схема системы управления СД с ФП приведена на рисунке 8.

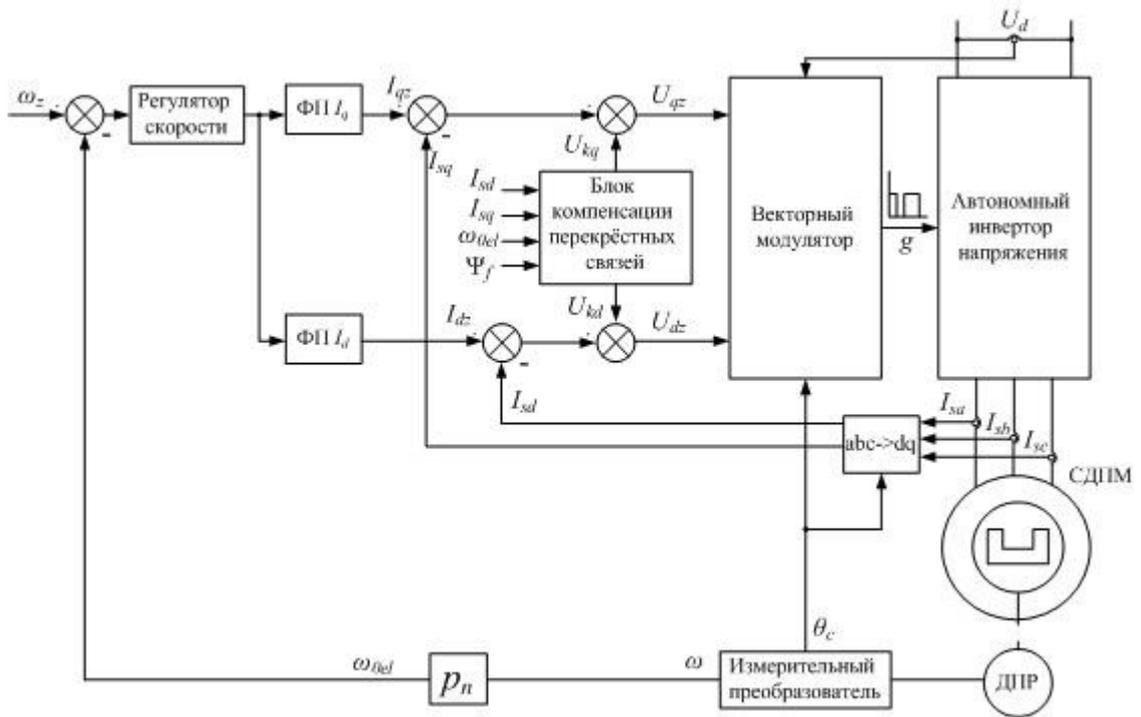
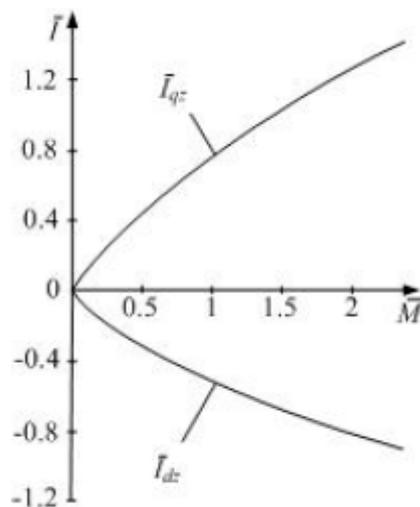


Рисунок 8 - Функциональная схема системы управления СД с ФП

Так как в СД момент  $M$  определяется значением тока статора,  $I_{sd}$  и  $I_{sq}$  подключены к выходу регулятора скорости. ФП представляют собой зависимости сигналов задания составляющих тока статора от момента, выраженные в относительных единицах. Характеристики строятся на основе расчёта, поясняемого формулами и рисунком 9.



### 2.3. Система СДПМ с использованием бездатчикового управления

При проектировании систем управления всё чаще ставится условие удаления ДПР для повышения надежности, уменьшения затрат и простоты обслуживания электропривода. В некоторых системах использование ДПР для определения угла положения ротора и мгновенной скорости просто недопустимо.

В этом случае используются бездатчиковые системы управления, в которых ставится задача косвенного определения угла положения ротора и скорости двигателя. Это можно решить при помощи наблюдателя состояния.

Функциональная схема системы бездатчикового управления СД представлена на рисунке 10. На схеме показаны  $\hat{\omega}$ ,  $\hat{\omega}_{0el}$ ,  $\hat{\theta}_c$  – оценки скорости вращения ротора, синхронной скорости и угла положения ротора.

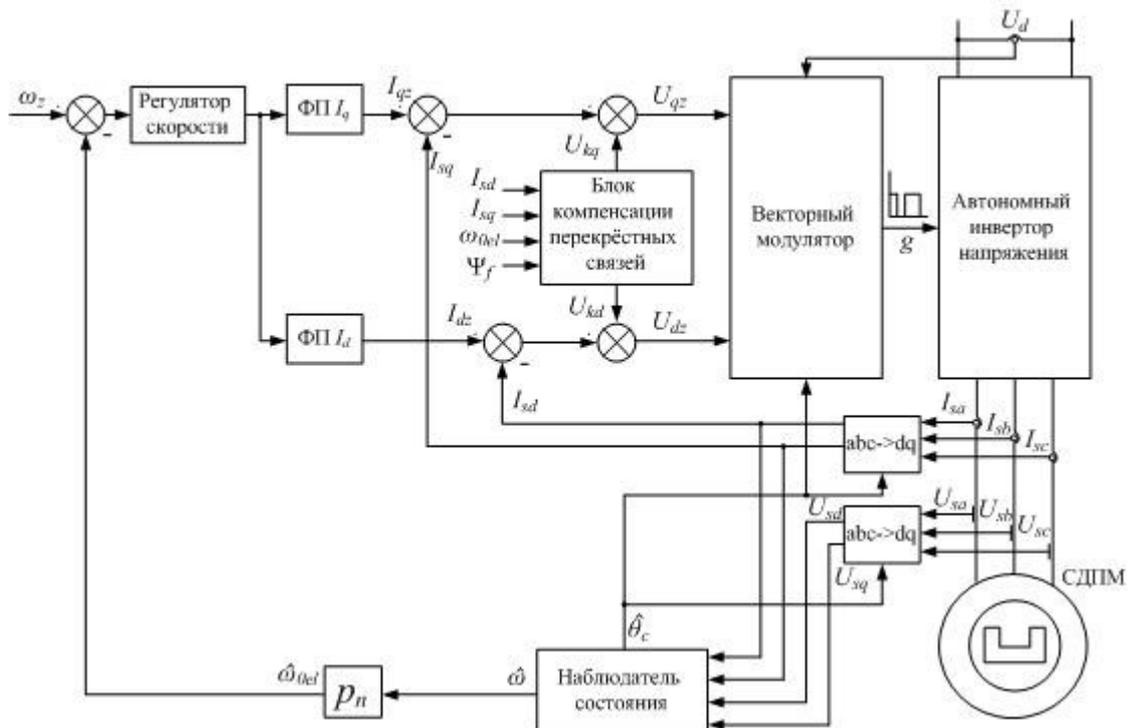


Рисунок 10 – Функциональная схема системы бездатчикового управления СД

Данная система является улучшением системы управления с ФП (см.

рисунок 8). Кроме наблюдателя состояния, вводятся датчики напряжений и преобразователь координат, который выполняется на основании уравнениям (1.5). Преобразованные в систему координат напряжения  $U_{sd}$  и  $U_{sq}$  и токи  $I_{sd}$  и  $I_{sq}$  являются начальными переменными для наблюдателя состояния. На основании этих данных наблюдатель оценивает значения скорости и угла положения.

### 2.3.1. Описание наблюдателя состояния

Сейчас существует большое количество алгоритмов для оценивания данных двигателя для создания наблюдателей. Варианты наблюдателей приведены на рисунке 11.

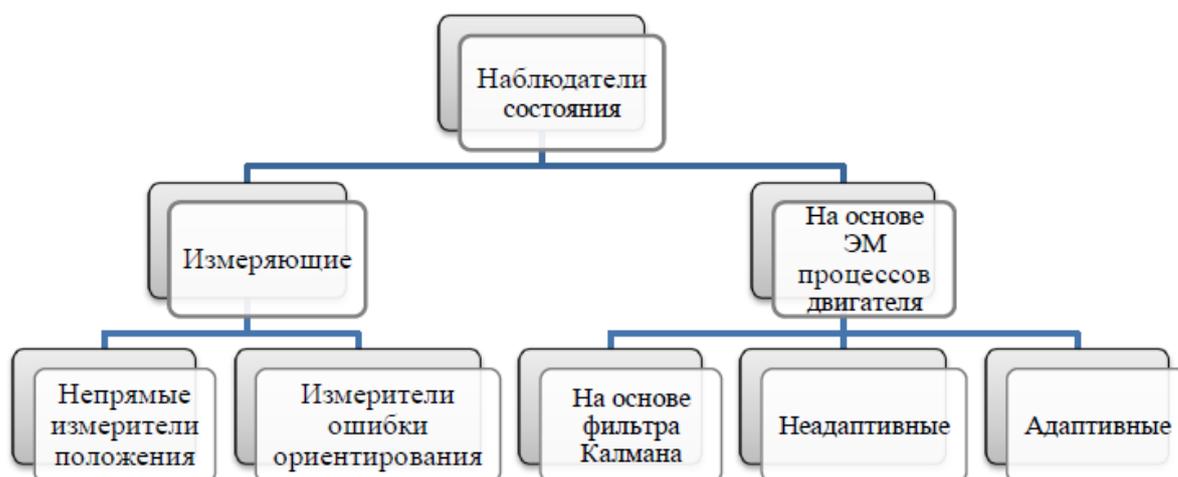


Рисунок 11 – наблюдатели состояния

Непрямые позиционные измерители для измерения положения ротора используют магнитную неоднородность свойств двигателя, например, асимметрию обмоток или неоднородность магнитной проницаемости. Известны измерительные наблюдатели с использованием метода высокочастотной инжекции, заключающегося в генерировании инвертором высокочастотных тестовых сигналов и поиске по реакции на эти сигналы реального положения ротора. Скорость вращения ротора в этом случае оценивается путем нахождения производной от угла положения. К недостаткам этого метода можно отнести повышенный уровень шума и

дополнительные потери.

Измерители погрешности ориентации определяют положение вращающейся системы координат с помощью сигналов внутренней системы управления в зависимости от ее погрешности ориентации. Скорость вращения ротора в этом методе оценивается по положению вращающейся системы координат. Недостатками метода являются недостаточная скорость и невозможность работы на низких скоростях.

Наблюдатели на основе фильтра Калмана представляют собой своего рода цифровой фильтр, алгоритм работы которого построен с учетом законов математической статистики. Она позволяет восстановить неизвестный параметр, при этом минимизируя влияние интерференционных измерений известных величин.

Недостатком таких наблюдателей является сложность вычислений и настроек наблюдателя.

Адаптивные наблюдатели также основаны на моделях магнитных процессов, происходящих в двигателе. Эти наблюдатели построены как сервосистемы и также содержат дополнительный регулятор, который адаптирует модель к реальным процессам, происходящим в двигателе.

Выводы по главе.

1. В качестве критерия о энергоэффективности СД принимается минимизация тока при заданном моменте нагрузки.
2. Для управления ключами инвертора применяется метод векторной ШИМ.
3. Внедрение бездатчикового управления требует информацию о скорости вращения и угла положения ротора. Для решения этой задачи может применяться наблюдатель состояния, который оценивает неизвестные переменные машины переменного тока с помощью известных. Адаптивный наблюдатель состояния содержит регулирующий адаптер, который адаптирует модель электромагнитных процессов двигателя к реальным процессам.

### 3. Расчет силового оборудования

#### 3.1. Расчет мощности двигателя и его выбор

Исходные данные к работе:

Грузоподъемность, кг.....1600

Масса порожнего погрузчика, кг.....3200

Масса груженого погрузчика, кг.....4800

КПД мех. пер. ....0,96

Максимальная скорость ГЭМ, км/ч.....15

Мощность, расходуемая на передвижение:

$$\begin{aligned}\sum P_p &= g \cdot F_{тр} \cdot m \cdot V \cdot \cos \alpha + 0,5 C_x \cdot S \cdot \rho_{в} \cdot V^3 + g \cdot m \cdot \sin \alpha \cdot V \\ &= 9,8 \cdot 0,018 \cdot 4800 \cdot 4,2 \cdot 1 + 0,5 \cdot 0,342 \cdot 2 \cdot 1,225 \cdot 4,2^3 + 9,8 \cdot 4800 \cdot 0 = 4881 \text{ Вт.}\end{aligned}$$

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	$\beta$	$R$ , Ом	$L_{sd}$ , мГн	$L_{sq}$ , мГн	$\Psi_f$ , Вб	$J$ , кг · м <sup>2</sup>	$p_n$
7,5	66	200	0	0,96	2,25	5,25	0,183	0,013	4

#### 3.2. Расчет аккумуляторной батареи и ее выбор

Произведем расчет емкости батареи. Расчет будет произведен при условии, что электропогрузчик будет ехать со скоростью 15 км/ч.

Рассчитаем сколько потребуется времени, чтобы проехать 150 км:

$$t = \frac{S}{V} = \frac{150}{15} = 10 \text{ ч.}$$

Расчет затраченной энергии:

$$W = t \cdot P_{д.н} = 10 \cdot 5100 = 51000 \text{ ВАч.}$$

### Расчет требуемой емкости

$$C = \frac{W}{U} = \frac{51000}{200} = 255 \text{ Ач.}$$

Тогда потребуется на батарею 200В – 9 ячеек, каждая ячейка на 24В.  
Выбираем батарею технологии Yale MSW030-F M1801210007D2



Рисунок 12- Тяговая аккумуляторная батарея Yale MSW030-F M1801210007D2  
Таблица 2 – технические характеристики аккумулятора

Напряжение, V	24
Емкость, Ah	300
Тип аккумулятора	Кислотный
Длина, мм	762
Ширина, мм	219
Высота, мм	591
Вес, кг	274

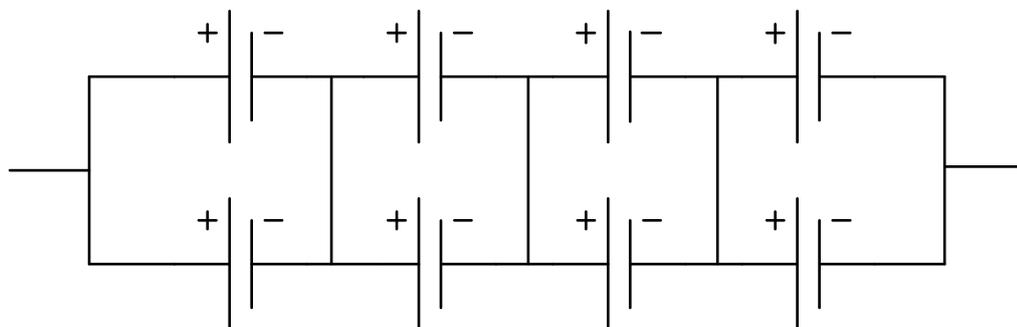


Рисунок 13 - Схема подключения аккумуляторной батареи

По данной схеме подключения получается общая емкость батареи 600

Ah. Общее расстояние, которое может пройти составляет примерно 300 км или 20 часов непрерывной работы электропогрузчика.

## 4. Моделирование системы управления в программном продукте Matlab R2019a

### 4.1. Моделирование синхронного двигателя

Моделирование СД системе координат  $(d, q)$  делается на основе системы уравнений (1.3). В качестве исходных значений для модели принимаются данные, приведённые в таблице 1.

Собранная модель двигателя в математическом пакете MATLAB/Simulink, представлена на рисунке 14.

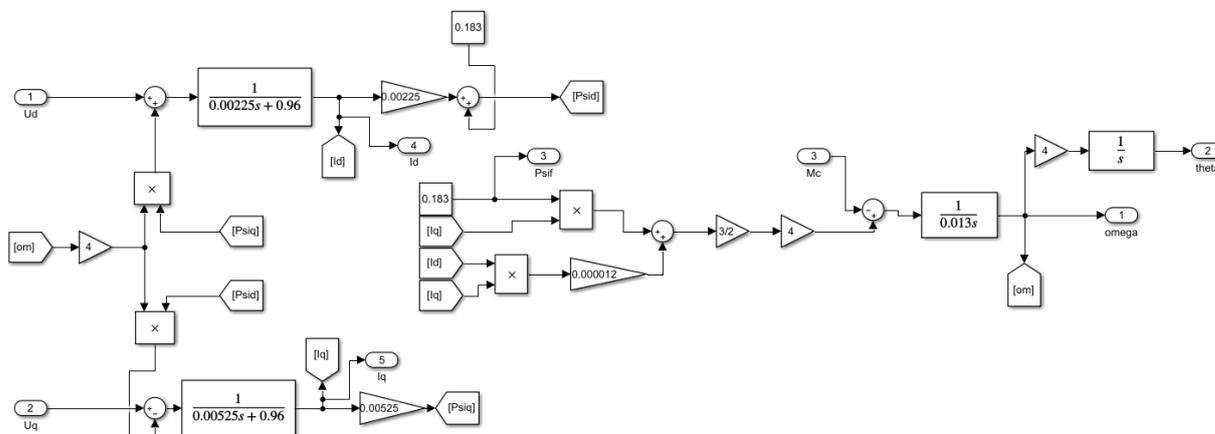


Рисунок 14- Модель СД

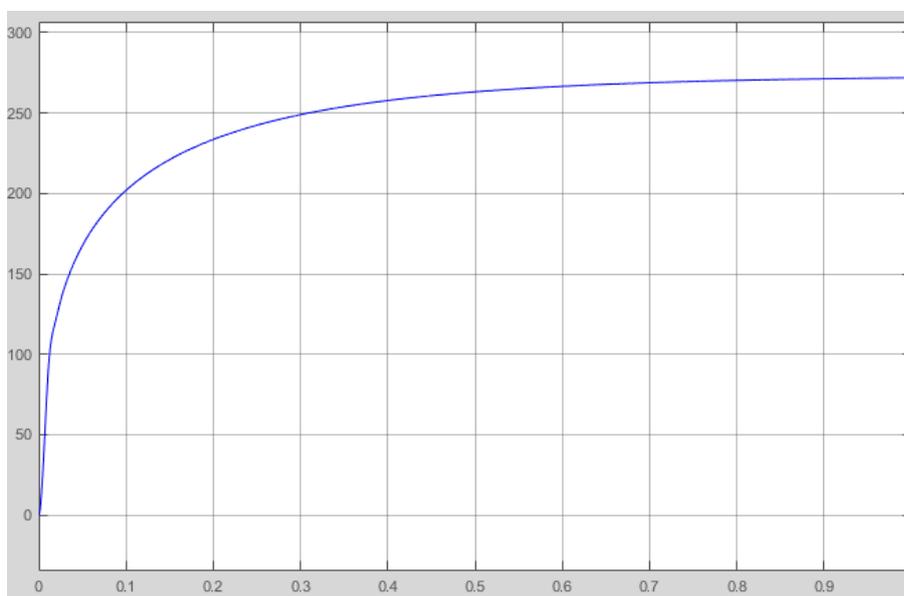


Рисунок 15- График скорости СД

### 4.2. Настройка регуляторов скорости и тока

Произведем настройку оптимума по модулю продольной и поперечной составляющих тока. Нужно рассчитать коэффициенты регуляторов тока по

формулам (1.9) и (2.1). Преобразователь частоты будет представлен в качестве апериодического звена  $\frac{k_{пч}}{T_{пч}p+1}$ . Коэффициент передачи  $k_{пч} = 2$ . Постоянную времени  $T_{пч} = T_{кт}$  выберем равной периоду модуляции, то есть при частоте ШИМ 2 кГц  $T_{пч} = 0.0005$  [25]. Коэффициент передачи датчика тока  $k_{дт} = 1$ .

$$k_{pd} = \frac{L_{sd}}{2k_{пч}k_{дт}T_{кт}} = \frac{0.00255}{2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0.0005} = 0.78$$

$$k_{pq} = \frac{L_{sq}}{2k_{пч}k_{дт}T_{кт}} = \frac{0.00525}{2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0.0005} = 0.66$$

$$k_{id} = k_{iq} = \frac{R_s}{2k_{пч}k_{дт}T_{кт}} = \frac{0.96}{2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0.0005} = 479.97$$

Рассчитаем коэффициенты регулятора скорости в соответствии с (2.3) с условием  $T_{кс} = 2T_{кт} = 0.001$ . Коэффициент передачи датчика скорости  $k_{дс} = 1$ . Параметры двигателя взяты из таблицы 1.

$$k_{p\omega} = \frac{k_{дт}J}{3T_{кс}\psi_f p n k_{дс}} = \frac{1 \cdot 0.013}{3 \cdot 0.001 \cdot 0.0183 \cdot 4 \cdot 1} = 0.85$$

$$k_{i\omega} = \frac{k_{дт}J}{12T_{кс}^2\psi_f p n k_{дс}} = \frac{1 \cdot 0.013}{12 \cdot 0.001^2 \cdot 0.0183 \cdot 4 \cdot 1} = 57$$

Составим модель системы векторного управления СДПМ с использованием датчика положения ротора в MATLAB/Simulink. Перекрёстные связи, составленные уравнениями (1.7), представим в виде подсистемы Compensation.

### 4.3. Моделирование системы с датчиком положения ротора

На основании пункта 2.1 и функциональной схемы (см. рисунок 5) составим модель системы управления СД с ДПР.

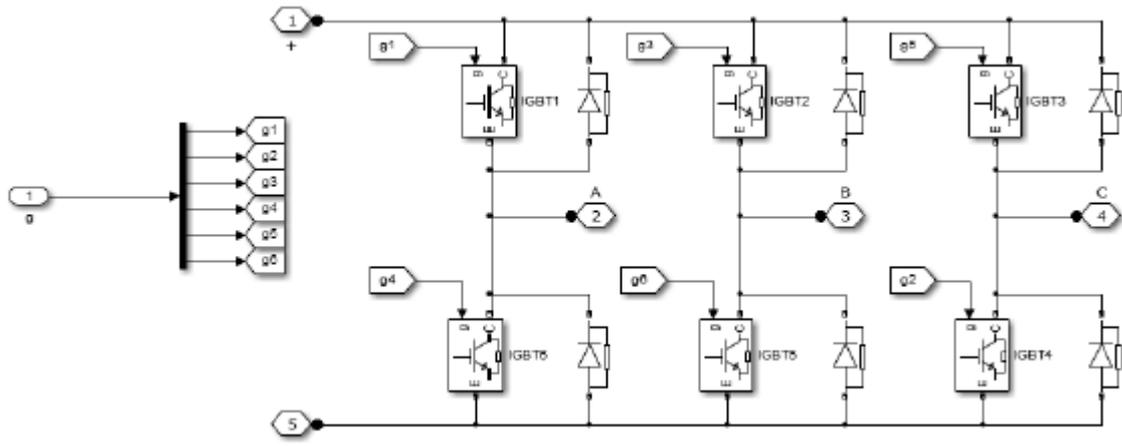


Рисунок 16 – Модель АИН

В этой системе управления продольная составляющая тока задаётся нулевым значением. Сигналы скорости и угла положения ротора измеряются ДПР. Векторный модулятор, реализующий алгоритм на основе векторной ШИМ с частотой, равной 2 кГц, представлен подсистемой PWM. АИН представлен подсистемой IGBT-Invertor, которая представлена выше на рисунке 16. Ограничение максимального напряжения, которое подается на инвертор учтено в векторном модуляторе. Полученная система представлена в приложении Б.

Смоделируем полученную систему. В момент 60 секунд нагрузка прикладывается к двигателю. График скорости с модулятором и ДПР представлены на рисунке 17.

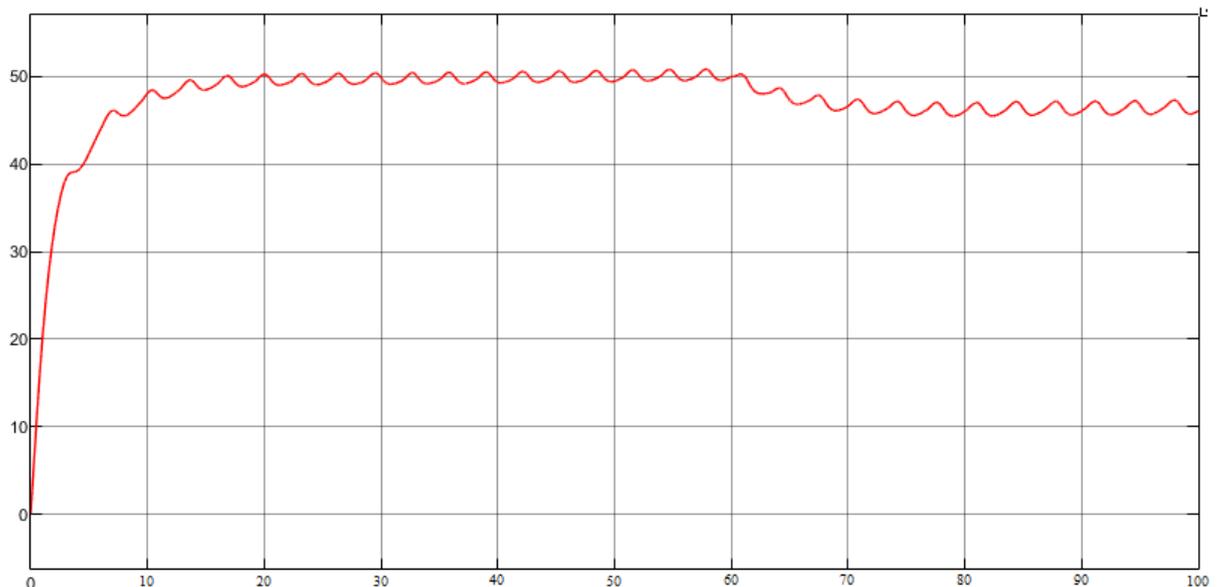


Рисунок 17 – Графиков скорости СД

На рис. 17 показано, что при добавлении в модель векторного модулятора и АИН в скоростных характеристиках появляется шум. Как было описано ранее, для получения заданного момента при минимальном токе статора уменьшение составляющей тока статора вдоль оси  $d$  до нуля не является оптимальным вариантом. В этом случае управление осуществляется путем обеспечения определенного соотношения между составляющими тока статора, которое устанавливается с помощью функциональных преобразователей (ФП).

#### **4.4. Моделирование системы управления с использованием функциональными преобразователями**

На основе пункта 2.2 и функциональной схемы (см. рис. 8) составлена модель векторной системы управления светодиодами с ФП в среде MATLAB / Sim-ulink. Для этого мы исключаем действующие регуляторы из модели, рассмотренной в пункте 4.3 (см. добавление в). Задача составляющих токов в этом случае будет исходить от ФП, подключенного после регулятора скорости. Характеристики  $\phi$  задаются таблицей с использованием блока одномерной таблицы 1-D таблицы подстановки. Полученная система управления представлена в приложении В.

Отрегулируем регулятор скорости для получения приемлемых показателей качества системы. Полученные коэффициенты регулятора:  $k_{p\omega} = 1,84$ ,  $k_{i\omega} = 50,2$ . Сделаем имитацию системы. Через 60 секунд к двигателю прикладывается нагрузка. График скорости работы СДПМ при установке токов с помощью ФП показан на рис.18.

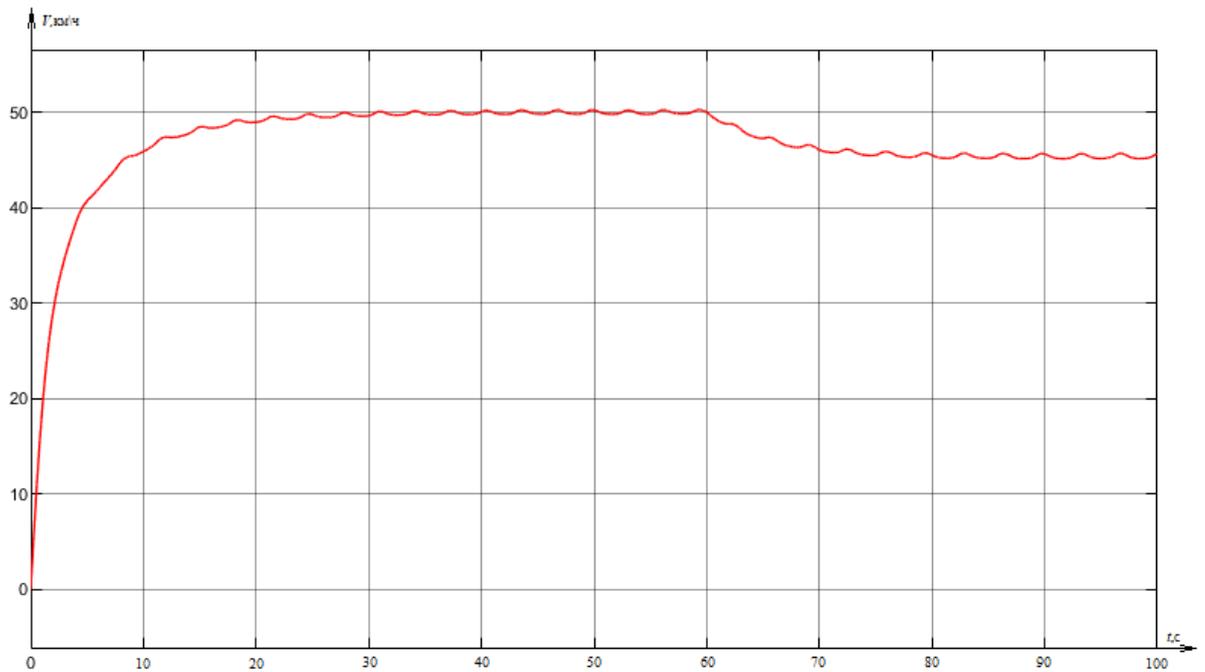


Рисунок 18 – График скорости СД в системе с ФП

Сравнивая рисунки 17 и 18, можно заметить, что в системе с ФП наблюдается меньшее превышение скорости в процессе перехода (6% против 12%). Кроме того, в системе с автофокусировкой после приложения нагрузки наблюдается меньшее колебание скорости. Из этого следует, что ФП работает должным образом.

#### 4.5. Моделирование системы управления с использованием бездатчикового управления

Для того чтобы сделать модель бессенсорной системой управления, необходимо получить модель наблюдателя состояния. Мы составляем адаптивный наблюдатель в соответствии со структурой, где модель статора описывается системой уравнений, а также существует функция мастера закона адаптации наблюдателя. Контроллер адаптера содержит интегральную составляющую с коэффициентом  $\lambda = 45$ . Модель адаптивного наблюдателя скорости показана на рис. 19.

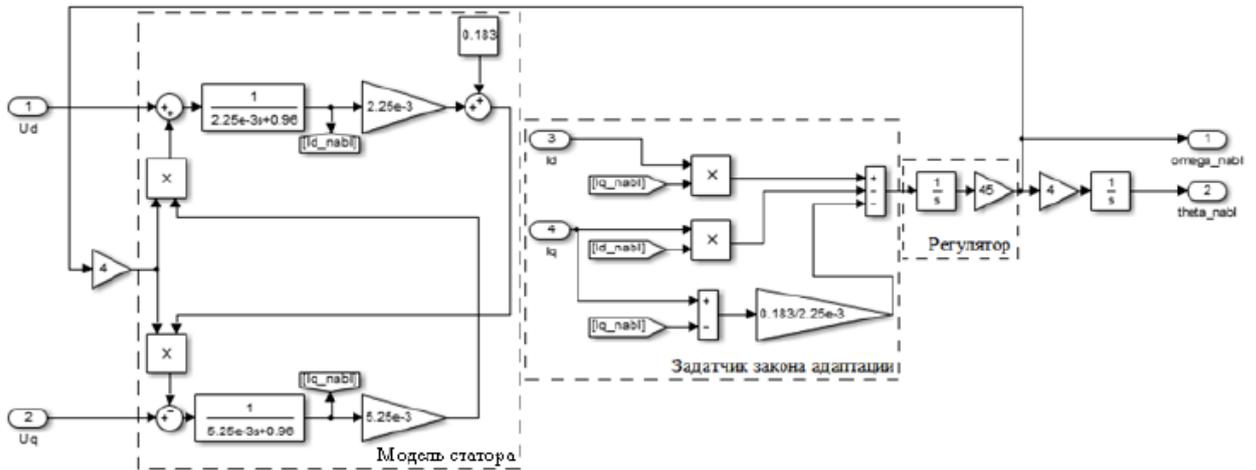


Рисунок 19 - Модель адаптивного наблюдателя скорости

Мы составляем модель бессенсорной системы управления в соответствии с функциональной схемой (см. рис.10). Для этого мы добавим блок наблюдателя скорости наблюдателя к модели векторной системы управления с ФП (см. Приложение в), который оценивает скорость и угловое положение ротора. Полученные оценки используются в качестве сигналов обратной связи и в преобразователях координат. Полученная система представлена в приложении Д.

Смоделируем полученную систему. В течение 60 секунд применяется нагрузка. График скорости СД в системе с наблюдателем показан на рис. 20.

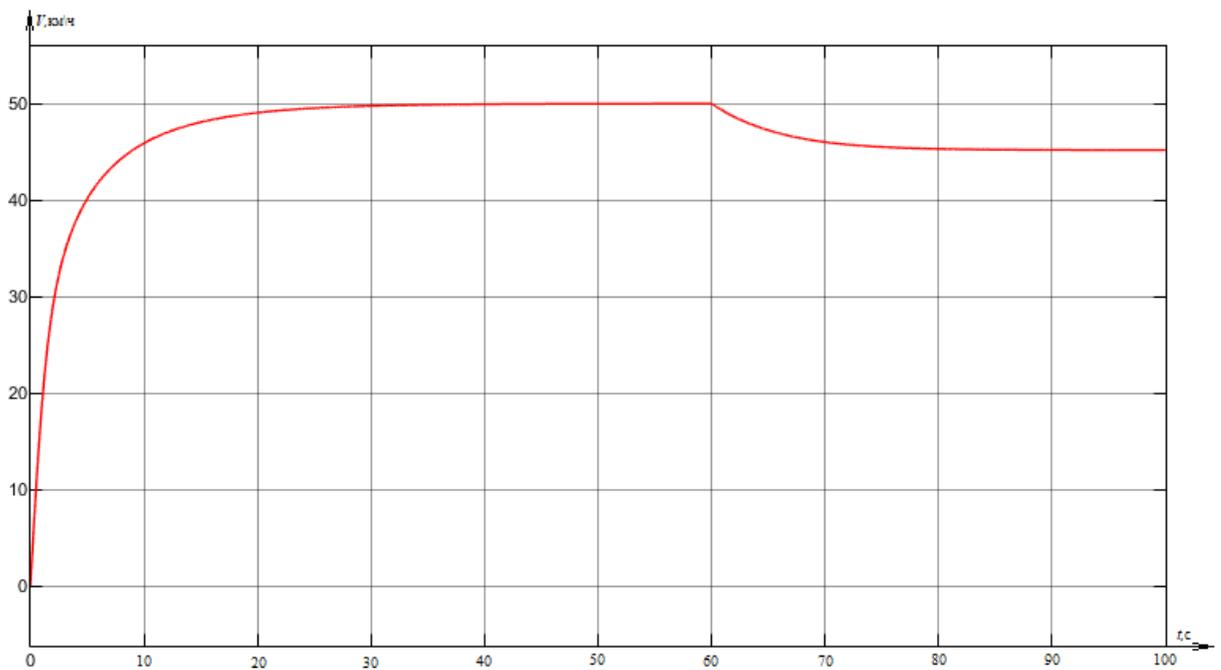


Рисунок 20 – График скорости СДПМ с бездатчиковой системой управления

Результаты моделирования, представленные на рис. 20, показывают, что адаптивный наблюдатель, используемый в рассматриваемой бессенсорной системе управления, обладает устойчивостью при относительно небольших изменениях сопротивления статора СД. Также из графиков видно, что качество переходных процессов при изменении сопротивления статора двигателя улучшается, отсутствуют колебания, что можно объяснить адаптивностью регулятора скорости.

Проведем сравнительный анализ динамических и энергетических характеристик разработанных систем управления СДПМ. Сравним графики переходных процессов скорости СДПМ с векторной системой управления с нулевым заданием продольной составляющей тока статора и ДПР (Система 1), с векторной системой управления с ФП (система 2) и с бессенсорной системой управления (Система 3). В таблице 3 приведены следующие показатели качества: превышение при отработке сигнала скорости  $\vartheta_{\text{км}\backslash\text{ч}}$ , процентное соотношение сигнала скорости  $\vartheta, \%$ , контрольное время при отработке сигнала возмущения  $t_{pf}$ .

Таблица 3 – Сравнение динамических показателей качества систем

	$\vartheta_{\text{км}\backslash\text{ч}}$	$\vartheta, \%$	$t_{pf}, \text{с}$
Система управления 1	$\pm 6$	12	25
Система управления 2	$\pm 3$	6	20
Система управления 3	50	0	15

Значения, приведённые в таблице 3, свидетельствуют о том, что система 3, т.е. система с бездатчиковым управлением обладает лучшими динамическими показателями по сравнению с системой 1 (система с ДПР) и системой 2 (функциональный преобразователь).

Итак, подводя итог, необходимо отметить, что, основываясь на результатах моделирования систем, а также их сравнительного анализа, можно сказать, что полученная в данной работе система бездатчикового управления

с ФП для СД обеспечивает наименьшее значение тока статора двигателя среди проанализированных систем, имеет высокие динамические показатели. Таким образом, можем сказать, что поставленная цель работы достигнута.

Выводы:

1. В рассмотренной главе было проведено и описано моделирование систем векторного управления СДПМ, а также их составляющих. Средой моделирования была выбрана среда имитационного моделирования Simulink, входящая в состав математического пакета MATLAB R2019a. Данная программа включает в себя огромные возможности для изучения динамических процессов и удобный графический интерфейс. Используя широкий потенциал Simulink, можно выполнять различные виды анализа устройств во временной области, а также имитировать их работу.

2. В процессе разработки методики поэтапного формирования итоговой модели, были добавлены новые элементы, которые собой усложнили систему, но они позволили задать определенное соотношение между составляющими тока статора, а также отказаться от использования ДПР. Система бездатчикового управления с ФП – итоговая модель.

3. Анализ переходных характеристик каждой из систем говорит о том, что каждый этап моделирования решает определенные поставленные задачи (рис. 17,18,20). Правильность выбора методики подтверждается улучшением динамических характеристик системы.

4. В ходе работы был разработан адаптивный наблюдатель состояния, позволяющий угол и скорость положения ротора СДПМ. Наблюдатель правильно осуществляет наложенные на него функции даже при незначительных изменениях активного сопротивления статора двигателя, что можно наглядно увидеть на графике переходного процесса (рис.20).

## **5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **5.1. Предпроектный анализ**

Выпускная квалификационная работа посвящена проектированию синхронного электропривода с постоянными магнитами для использования в электропогрузчике.

Целью написания данного раздела работы является расчёт экономической эффективности результатов проектирования синхронного электропривода электропогрузчика.

Задачи раздела: сегментирование рынка, оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ; разработка устава научно-технического проекта; планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок; определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности; оценка конкурентоспособности технических решений.

Область возможного применения: горнорудная промышленность, где электропогрузчик используется для транспортировки руды.

### **5.2. Потенциальные потребители результатов исследования**

Потенциальными потребителями данного исследования являются заводы, производящие горно-шахтное оборудование, которые заинтересованы в увеличении энергоэффективности и производительности при работе на горных выработках и на рудниках.

Для коммерческих организаций критерии сегментации могут быть: место нахождения; промышленность; промышленные товары; размер и другие.

Сегментирование рынка будем проводить по следующим критериям:

1) Размер компании, которые производят эти двигатели. Например, следующие предприятия: «Липсия ЗАО»; «ЛТК-ИНЖИНИРИНГ» ООО; «АсГард» ООО.

2) Тип привода с разными системами управления. Например, с преобразователем частоты, с бездатчиковым управлением, с импульсным регулятором напряжения.

Таблица 4 – Карта сегментирования рынка

		Вид электропривода (ЭП)		
		Электропривод с преобразователем частоты	Электропривод с бездатчиковым управлением	Электропривод с импульсным регулятором напряжения
Размер компании	Крупные «Липсия ЗАО»			
	Средние «ЛТК-ИНЖИНИРИНГ» ООО			
	Мелкие «АсГарД» ООО			

В результате сегментации можно сделать вывод, что бездатчиковое управление, на данный момент пользуются большим спросом у производителей электродвигателей.

### 5.3. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Объектом анализа будет являться система управления синхронного двигателя электропогрузчика. Для того, чтобы наиболее точно провести анализ нужно использовать всю информацию, которая доступна о конкурентных разработках. Для сравнения берется два вида систем управления: бездатчиковое управление (Бу) и с преобразователем частоты (Пч). 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. Оценочная карта приведена в таблице 5.

Таблица 5 – Показатели оценки качества проекта

Пункты оценки	Значение критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б <sub>Бу</sub>	Б <sub>Пч</sub>	К <sub>Бу</sub>	К <sub>Пч</sub>
1	2	3	4	5	6
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>					
1. КПД	0,09	5	4	0,45	0,36
2. Плавность регулирования	0,1	4	2	0,4	0,2
3. Помехоустойчивость	0,17	2	3	0,34	0,51
4. Энергоэкономичность	0,15	5	1	0,75	0,15
5. Надежность	0,09	4	3	0,36	0,27
6. Уровень шума	0,08	5	3	0,40	0,24
7. Безопасность	0,12	4	4	0,48	0,48
<b>Экономические показатели оценки эффективности</b>					
1. Сервис	0,05	4	3	0,2	0,15
2. Цена	0,09	2	4	0,16	0,36
3. Конкурентоспособность продукта	0,04	4	2	0,18	0,08
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>39</b>	<b>29</b>	<b>3,72</b>	<b>2,8</b>

Анализ конкурентных технических решений определяется следующим образом:

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

Где: K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Пример расчета:

$$K_{\phi} = \sum B_i \cdot B_{\phi} = 0,09 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + \dots + 0,04 \cdot 4 = 3.72$$

Результаты показывают, что конкурентоспособность проекта составила 3.72, в то время как у преобразователя частоты 2.8 соответственно.

#### 5.4. FAST-анализ

FAST-анализ выступает как синоним функционально-стоимостного анализа. Суть этого метода базируется на том, что затраты, связанные с созданием и использованием любого объекта, выполняющего заданные

функции, состоят из необходимых для его изготовления и эксплуатации и дополнительных, функционально неоправданных, излишних затрат, которые возникают из-за введения ненужных функций, не имеющих прямого отношения к назначению объекта, или связаны с несовершенством конструкции, технологических процессов, применяемых материалов, методов организации труда и т.д.

Проведение FAST-анализа предполагает шесть стадий:

1. Выбор объекта FAST-анализа;
2. Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом;
3. Определение значимости выполняемых функций объектом;
4. Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования;
5. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ;
6. Оптимизация функций, выполняемых объектом.

**Стадия 1. Выбор объекта FAST-анализа.**

В рамках магистерской диссертации в качестве объекта FAST-анализа выступает электропривод на основе двигателя с постоянными магнитами для ленточного конвейера.

**Стадия 2. Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом.**

Таблица 6 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Статор	1	Выполняет функцию корпусной детали для размещения рабочей обмотки	X		

Ротор	1	Создание электромагнитного момента, приводящего во вращение сам ротор и исполнительный механизм	X		
Вал	1	Передача крутящего момента от двигателя на механическую нагрузку		X	
Подшипник	2	Поддержка вращающегося вала			X
Вентилятор	1	Создание охлаждения двигателя			X
Коробка выводов	1	Подключение электропитания двигателя		X	

### Стадия 3. Определение значимости выполняемых функций объектом.

Таблица 7 – Матрица смежности

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6
Функция 1	=	=	>	>	>	>
Функция 2	=	=	>	>	>	>
Функция 3	<	<	=	>	>	<
Функция 4	<	<	<	=	<	<
Функция 5	<	<	<	>	=	<
Функция 6	<	<	>	>	>	=

Таблица 8 – Матрица количественных соотношений функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6	ИТОГО
Функция 1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	8
Функция 2	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	8
Функция 3	0,5	0,5	1	1,5	1,5	0,5	5,5
Функция 4	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	3,5

Функция 5	0,5	0,5	0,5	1,5	1	0,5	4,5
Функция 6	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1	6,5
							$\Sigma = 36$

**Стадия 4.** Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования.

Таблица 9 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Норма расхода, кг	Трудоемкость детали, нормо-ч	Стоимость материала, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.
Статор	1	Выполняет функцию корпусной детали для размещения рабочей обмотки	-	1,4	198,7	108,6	307,3
Ротор	1	Создание электромагнитного момента, приводящего во вращение сам ротор и исполнительный механизм	-	0,9	150,1	91,3	241,4
Вал	1	Передача крутящего момента от двигателя на механическую нагрузку	-	0,1	98,6	11,5	110,1
Подшипник	2	Поддержка вращающегося вала	-	0,08	20,7	8,6	29,3
Вентилятор	1	Создание охлаждения двигателя	11000	2,1	305,4	180,4	485,8

Коробка выводов	1	Подключение электропитания двигателя	-	0,04	12,4	4,4	16,8
-----------------	---	--------------------------------------	---	------	------	-----	------

**Стадия 5.** Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ.

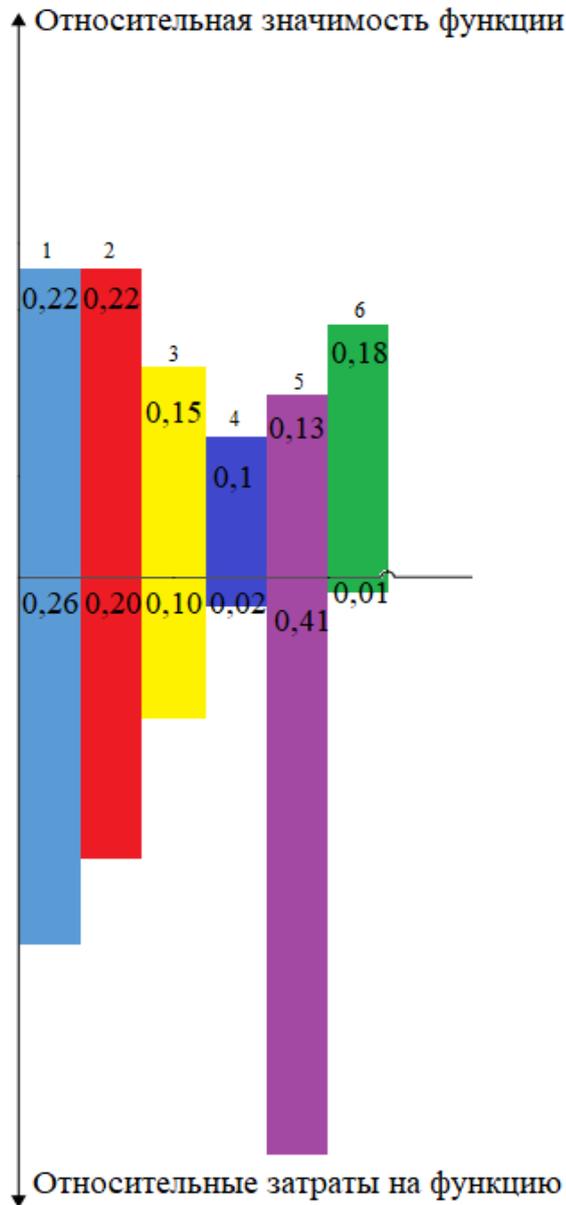


Рисунок 21 – Функционально-стоимостная диаграмма

Построенная функционально-стоимостная диаграмма позволяет выявить диспропорции между важностью (полезностью) функций и затратами на них. Анализ приведенной выше ФСД показывает явное наличие рассогласования по функциям 1, 5. Необходимо провести работы по ликвидации данных диспропорций.

## Стадия 6. Оптимизация функций, выполняемых объектом.

Список мероприятий для снижения затрат на единицу полезного эффекта:

- применение принципиально новых конструкторских решений;
- оптимизация технических параметров;
- оптимизация параметров надежности;
- повышение ремонтпригодности;
- применение новых техпроцессов, заготовок, материалов и т.д.

### 5.5. Диаграмма Исикава

Диаграмма причины-следствия Исикавы – это графический метод анализа и формирования причинно-следственных связей, инструментальное средство для систематического определения причин проблемы и последующего графического представления.

Причинно-следственная диаграмма представлена на рисунке 22.

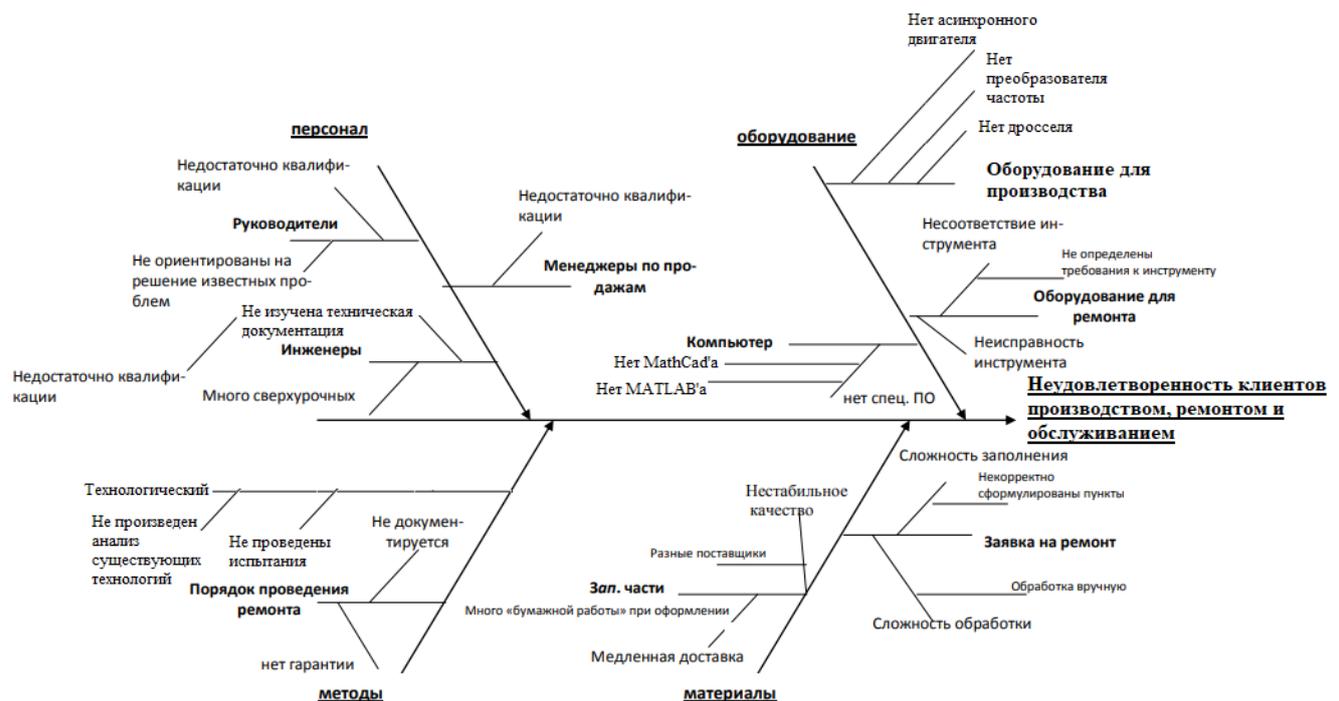


Рисунок 22 – Причинно-следственная диаграмма

### 5.6. SWOT – анализ

SWOT - анализ является инструментом стратегического менеджмента. Представляет собой комплексное исследование технического проекта. SWOT

- анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

**Первый этап** описывает сильные и слабые стороны проекта, находит возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

**Второй этап** выявляет соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие помогает определить степень необходимости проведения стратегических изменений. В пределах данного этапа следует построить интерактивную матрицу проекта. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 10 – Матрица SWOT

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b> С1. Высокая энергоэффективность технологии. С2. Повышение безопасности производства С3. Уменьшение затрат на ремонт оборудования	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b> Сл1. Сложность ремонта некоторых частей оборудования Сл2. Дороговизна оборудования Сл3. Сложность эксплуатации электрооборудования Сл4. Отсутствие прототипа научной разработки
<b>Возможности:</b> В1. Увеличение производительности электрооборудования В2. Появление дополнительной автоматизированной системы управления электрооборудованием В3. Улучшение технологии производства В4. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ	В1С1С2; В2С1С2; В3С1С2С3; В4С1С2С3;	В1Сл1Сл2Сл3Сл4; В2Сл1Сл2Сл3Сл4; В3Сл1Сл2Сл3Сл4; В4Сл1Сл2Сл3Сл4;

<b>Угрозы:</b> У1. Отсутствие спроса У2. Импорт отдельных частей для конструкций У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции У4. Угрозы выхода из строя оборудования	У1С1; У2С3;	У1Сл2; У2Сл1Сл2Сл3;
	У3С3;	У3Сл2;
	У4С1С2С3;	У4Сл1Сл2Сл3Сл4;

Таблица 11 – Интерактивная матрица проекта «Сильные стороны – возможности»

		Сильные стороны проекта		
		С1	С2	С3
Возможности	В1	+	+	-
	В2	+	+	-
	В3	+	+	+
	В4	+	+	+

Таблица 12 – Интерактивная матрица проекта «Сильные стороны – угрозы»

		Сильные стороны проекта		
		С1	С2	С3
Угрозы	У1	+	-	-
	У2	-	-	+
	У3	-	-	+
	У4	+	+	+

Таблица 13 – Интерактивная матрица проекта «Слабые стороны – возможности»

		Слабые стороны проекта			
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
Возможности	В1	+	+	+	+
	В2	+	+	+	+
	В3	+	+	+	+
	В4	+	+	+	+

Таблица 14 – Интерактивная матрица проекта «Слабые стороны – угрозы»

		Слабые стороны проекта			
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
Угрозы	У1	-	+	-	-
	У2	+	+	+	-
	У3	-	+	-	-
	У4	+	+	+	+

В рамках **третьего этапа** должен быть подведен итог SWOT-анализа, в котором будут отражены стратегические планы на реализацию проекта и долгосрочное развитие. По результатам второго этапа выделим основные задачи:

-Внедрение автоматической системы сигнализации повреждения оборудования;

- Внедрение новых технологий обнаружения неисправностей;

- Внедрение нескольких источников поставки частей и материалов;

-Обеспечение подготовки квалифицированных кадров, и благоприятные условия труда для них.

В результате анализа было установлено, что технический проект имеет такие важные преимущества как высокая энергоэффективность, повышенная безопасность производства, которые обеспечивают высокую производительность и экономичность технологического процесса. Несмотря на это, имеет место быть сложность ремонта отдельных частей оборудования, которая приводит к большим затрат на поставку этих частей с заводов, что в свою очередь сопровождается большими затратами в целом.

Главными факторами, влияющими на функциональную и бесперебойную работу оборудования, являются поставка материалов и обнаружение повреждений оборудования на начальных стадиях, когда замена частей агрегатов или ремонт не составляет значительных затрат.

### **5.7. Оценка готовности проекта к коммерциализации**

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого заполняется специальная форма, содержащая показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта.

Таблица 15 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	2	2

3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	4
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	1
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	1	1
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	1	1
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	1	1
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	1	1
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
	<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	31	31

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i$$

где  $B_{\text{сум}}$  – суммарное количество баллов по каждому направлению;

$B_i$  – балл по  $i$ -му показателю.

В результате проведенной оценки готовности проекта к коммерциализации можно сделать вывод, что на данный момент научная разработка имеет среднюю перспективность. Нужно провести работу над теми сферами проекта, которые еще не были затронуты, по возможности привлечь требуемых специалистов в команду проекта.

## **5.8. Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования**

При коммерциализации научно-технических разработок продавец (а это, как правило, владелец соответствующих объектов интеллектуальной собственности), преследует вполне определенную цель, которая во многом зависит от того, куда в последующем он намерен направить (использовать, вложить) полученный коммерческий эффект. Это может быть получение средств для продолжения своих научных исследований и разработок (получение финансирования, оборудования, уникальных материалов, других научно-технических разработок и т.д.), одноразовое получение финансовых ресурсов для каких-либо целей или для накопления, обеспечение постоянного притока финансовых средств, а также их различные сочетания.

Для коммерциализации объекта исследования и обоснования его целесообразности, были выбраны следующие методы коммерциализации:

1. Инжиниринг как самостоятельный вид коммерческих операций предполагает предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг, связанных с проектированием, строительством и вводом объекта в эксплуатацию, с разработкой новых технологических процессов на предприятии заказчика, усовершенствованием имеющихся производственных процессов вплоть до внедрения изделия в производство и даже сбыта продукции.

2. Организация собственного предприятия.

3. Организация совместного предприятия, т.е. объединение двух и более лиц для организации предприятия.

4. Организация совместных предприятий, работающих по схеме «российское производство – зарубежное распространение».

Выбранные методы коммерциализации считаются наиболее перспективными, т.к. они позволят получить финансовые ресурсы для дальнейших исследований и разработок, могут позволить выйти на более

широкий рынок предоставления услуг, а также могут стать источником постоянного притока финансовых ресурсов.

### 5.9. Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

**Цели и результат проекта.** В данном разделе приведена информация о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей. Эта информация представлена в табличной форме (таблицы 16 и 17).

Таблица 16 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Предприятия производящие данное оборудование	Получение энергоэффективного оборудования
Горнодобывающие выработки и шахты	Получение эффективного оборудования для транспортировки угля

Таблица 17 – Цели и результаты проекта

Цели проекта	Разработка синхронного электропривода с постоянными магнитами для ленточного конвейера, который будет эффективнее, экономичнее и выгоднее конкурентов
Ожидаемые результаты проекта	Получение синхронного электропривода с постоянными магнитами для ленточного конвейера, который будет эффективнее, экономичнее и выгоднее конкурентов

Критерии приёмки результата проекта	Работоспособность разработки, ее эффективность, безопасность, экономичность
Требования к результату проекта	Работоспособность
	Эффективность
	Безопасность
	Экономичность

**Организационная структура проекта.** На данном этапе работы решаются следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определяются роли каждого из участников и их трудозатраты в проекте. Эта информация представлена в табличной форме (таблица 18).

Таблица 18 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1	Шилин А.А. ТПУ, профессор	Руководитель проекта	Отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта	660
2	Бухтуев В.Ю. ТПУ, студент	Исполнитель по проекту	Специалист, выполняющий отдельные работы по проекту	3060
3	Спицына Л.Ю. ТПУ, доцент	Эксперт проекта	Отвечает за реализацию раздела «Финансовый менеджмент» в проекте	330
4	Фех А.И. ТПУ, старший преподаватель	Эксперт проекта	Отвечает за реализацию раздела «Социальная ответственность» в проекте	330
ИТОГО:				4380

**Ограничения проекта** – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованы в рамках данного проекта.

Таблица 19 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
Бюджет проекта	Не более 4 млн.руб.
Источник финансирования	Тендер
Сроки проекта	1.09.2019-1.06.2020
Дата утверждения плана управления проектом	06.10.2019
Дата завершения проекта	29.05.2020
Прочие ограничения и допущения	-

### 5.10. Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнение целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

### 5.11. Иерархическая структура работ проекта

*Иерархическая структура работ (ИСР)* – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта.

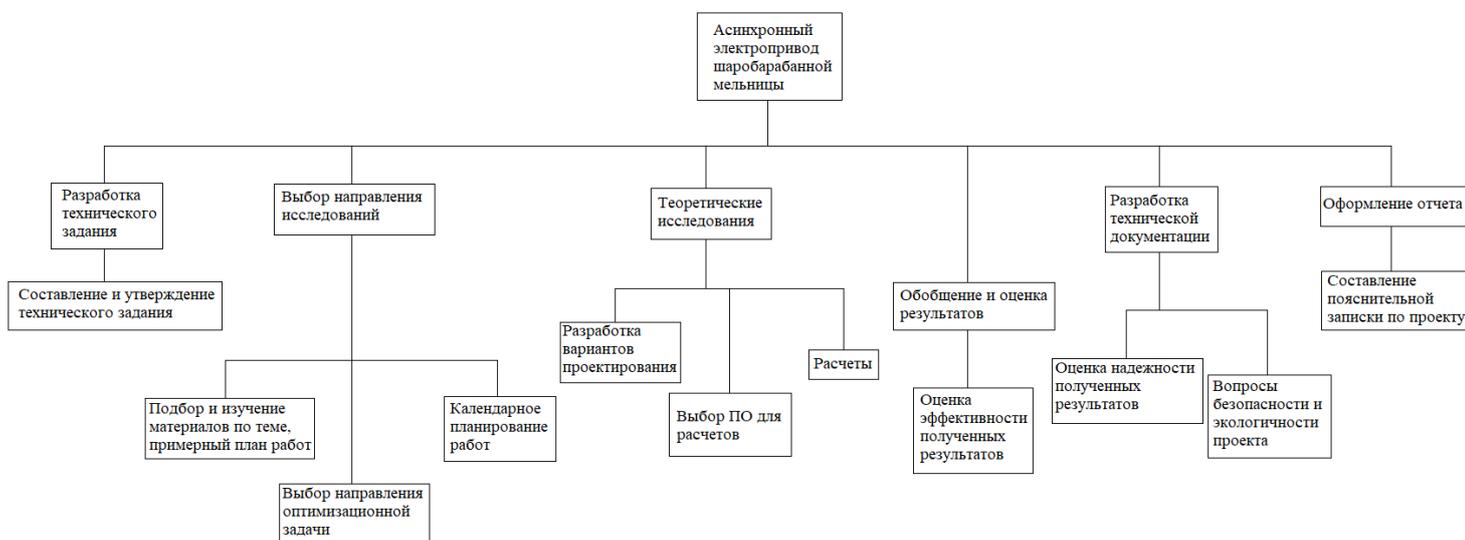


Рисунок 23 – Иерархическая структура работ по проекту

### 5.12. Контрольные события проекта

В рамках данного раздела необходимо определить ключевые события проекта, определить их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты. Эта информация приведена в таблице 20.

Таблица 20 – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат
1	Составление и утверждение технического задания	9.02.2020	Документ в формате Word
2	Подбор и изучение материалов по теме	12.02.2020	Различная документация
3	Описание объекта проектирования	18.02.2020	Документ в формате Word
4	Календарное планирование работ по теме	24.02.2020	Документ в формате Word
5	Расчет и выбор силового оборудования	29.02.2020	Документ в формате Word и Mathcad
6	Выбор преобразовательного устройства	10.03.2020	Документ в формате Word
7	Выбор аппаратуры управления и защиты	18.03.2020	Документ в формате Word
8	Расчет статических и динамических характеристик	26.03.2020	Документ в формате Word и Mathcad
9	Оценка эффективности полученных результатов	05.04.2020	Документ в формате Word
10	Составление пояснительной записки	08.04.2020	Документ в формате Word

### 5.13. План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики проекта.

Таблица 21 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление и утверждение технического задания	3	09.02.20	12.02.20	Шилин А.А.
2	Подбор и изучение материалов по теме	6	12.02.20	18.02.20	Бухтуев В.Ю.
3	Описание объекта проектирования	6	18.02.20	24.02.20	Бухтуев В.Ю.
4	Календарное планирование работ по теме	5	24.02.20	29.02.20	Шилин А.А.
5	Расчет и выбор силового оборудования	10	29.02.20	10.03.20	Бухтуев В.Ю.
6	Выбор преобразовательного устройства	8	10.03.20	18.03.20	Бухтуев В.Ю.

7	Выбор аппаратуры управления и защиты	8	18.03.20	26.03.20	Бухтуев В.Ю.
8	Расчет статических и динамических характеристик	10	26.03.20	05.04.20	Бухтуев В.Ю.
9	Оценка эффективности полученных результатов	3	05.04.20	08.04.20	Шилин А.А.
10	Составление пояснительной записки	5	08.04.20	13.04.20	Бухтуев В.Ю.
<b>Итого:</b>		64			

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.



Рисунок 24 – Диаграмма Ганта

#### 5.14. Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения.

***Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за  
вычетом отходов)***

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Таблица 22 – Группировка затрат по статьям

Вид работ	Статьи						
	Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Накладные расходы	Итого плановая себестоимость
1.	1058	3542000	62475	9371,25	21554	15306,6	3651764,85

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включает транспортно-заготовительные расходы (3-5% от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье приведены в таблице 23.

Таблица 23 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Бумага для принтера	SvetoCopy, A4	1	250	250
Ручка	Pilot	1	65	65
Степлер	Attache	1	210	210
Скоросшиватель	Attache Economy A4	1	83	83
Распечатка	Лист A4	200	2	400
Всего за материалы				1 008
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				50
Итого по статье С <sub>м</sub>				1 058

### ***Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ***

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стенов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Таблица 24 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Общая стоимость оборудования, тыс.руб.
1.	Синхронный двигатель	1	430 000	494 500
2.	Преобразователь частоты	1	2 600 000	2 990 000
3.	Дроссель	2	5 000	11 500
4.	Компьютер	1	40 000	46 000

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

### ***Основная заработная плата***

В настоящую статью включается основная заработная плата научных инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ. Величины расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда).

Расчет месячного должностного оклада работника производится по формуле:

$$Z_m = Z_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_d) \cdot k_p$$

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

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

$k_d$  – 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:

$$Z_{он} = \frac{Z_m}{26}$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.

Основная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{он} \cdot T_p$$

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:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}$$

Пример расчета для руководителя:

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

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

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

$$Z_{зп} = 10200 + 1530 = 11730$$

Таблица 25 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{мс}$ , руб.	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}$ , 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
<b>Итого</b>									62475

### *Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала*

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12% от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата – это оплата за непроработанное время.

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

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}$$

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

Расчет:

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

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

Таблица 26 – Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата	52275	10200
Дополнительная зарплата	7841,25	1530
Зарплата исполнителя	60116,25	11730
Итого по статье С <sub>зп</sub>	71846,25	

### **Отчисления на социальные нужды**

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:

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

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

Расчет:

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

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

### **Накладные расходы**

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70 – 90% от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала.

Накладные расходы составляют 80-100% от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих

в выполнение темы.

Величина накладных расходов определяется с учетом коэффициента  $k_{нр}$  по формуле:

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

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

Расчет:

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

### 5.15. Организационная структура проекта

В практике используется несколько базовых вариантов организационных структур: функциональная, проектная, матричная.

Проектная организационная структура научного проекта приведена на рисунке 4.

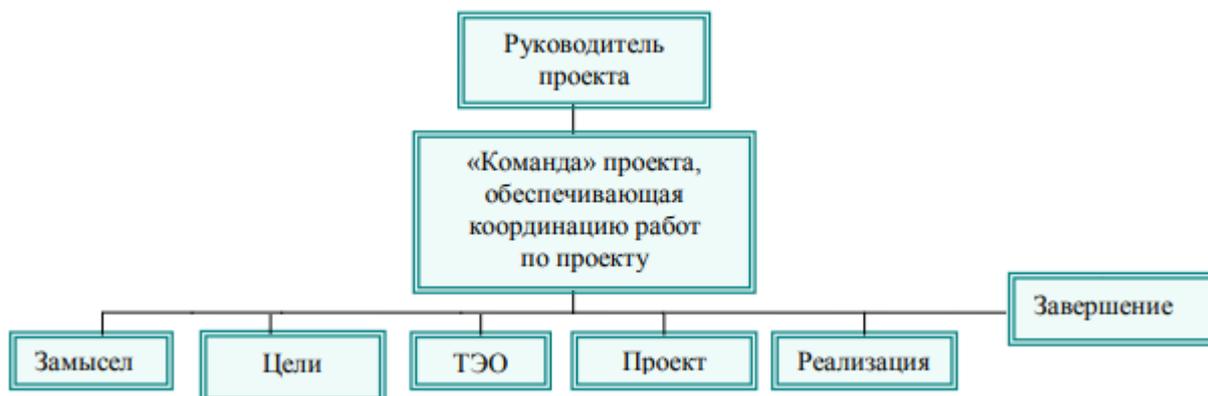


Рисунок 25 – Проектная структура проекта

### 5.16. Матрица ответственности

Для распределения ответственности между участниками проекта формируется матрица ответственности.

Таблица 27 – Матрица ответственности

Этапы проекта	Ответственный	Исполнитель
Составление и утверждение технического задания	+	
Подбор и изучение материалов по теме		+
Описание объекта проектирования		+
Календарное планирование работ по теме	+	

Расчет и выбор силового оборудования		+
Выбор преобразовательного устройства		+
Выбор аппаратуры управления и защиты		+
Расчет статических и динамических характеристик		+
Оценка эффективности полученных результатов	+	
Составление пояснительной записки		+

### 5.17. Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информация по данному разделу приведена в таблице 26.

Таблица 28 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Требования	Прямое	2	5	Высокий	Проверка на соответствие во время разработки проекта	Проект не соответствует требованиям
2	Эффективность и надежность	Прямое	2	5	Высокий	Использование современного оборудования и современных технологий	Неправильное использование оборудования, некачественное оборудование
3	Качество	Прямое	2	5	Высокий	Использование современного	Плохое исполнение проекта,

						о оборудован ия	некачестве нное оборудова ние
4	Планировани е	Прямое	1	3	Средний	Контроль планирован ия руководител ем проекта	Неправиль но спланиров анные действия по выполнени ю проекта

### **5.17. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования**

Эффективность научного ресурсосберегающего проекта включает в себя социальную эффективность, экономическую и бюджетную эффективность. Показатели общественной эффективности учитывают социально-экономические последствия осуществления инвестиционного проекта как для общества в целом, в том числе непосредственные результаты и затраты проекта, так и затраты, и результаты в смежных секторах экономики, экологические, социальные и иные внеэкономические эффекты.

Показатели экономической эффективности проекта учитывая финансовые последствия его осуществления для предприятия, реализующего данный проект. В этом случае показатели эффективности проекта в целом характеризуют с экономической точки зрения технические, технологические и организационные проекты решения.

Бюджетная эффективность характеризуется участием государства в проекте с точки зрения расходов и доходов бюджетов всех уровней.

Кроме выше перечисленных видов эффективности можно выделить ресурсный эффект (характеризуется показателями, отражающими влияние инновации на объем производства и потребления того или иного вида ресурса), научно-технический (оценивается показателями новизны и полезности) и др.

## Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования (таблица 29). Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}}$$

где  $I_{\phi}^p$  - интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  - стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\max}$  - максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше 0).

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

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p$$

где  $I_m$  - интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

$a_i$  - весовой коэффициент  $i$ -го параметра;

$b_i^a$ ,  $b_i^p$  - бальная оценка i-го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проведен в форме таблицы 29.

Таблица 29 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО Критерии	Весовой коэффициент параметра	Синхронный электродвигатель	Параметрический электродвигатель
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	4	3
2. Удобство в эксплуатации	0,15	4	2
3. Помехоустойчивость	0,15	5	3
4. Энергосбережение	0,20	4	3
5. Надежность	0,25	5	4
6. Материалоемкость	0,15	4	4
ИТОГО	1		

$$I_{\text{син.}} = 4*0,1+4*0,15+5*0,15+4*0,20+5*0,25+4*0,15=4,4$$

$$I_{\text{парам.}} = 3*0,1+2*0,15+3*0,15+3*0,20+4*0,25+4*0,15=3,25$$

### ***Интегральный показатель эффективности разработки***

( $I_{\text{финр}}^p$ ) и аналога ( $I_{\text{финр}}^a$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p} \quad I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a} \dots$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{мэ}}^p}{I_{\text{мэ}}^a}$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ср}}$  – сравнительная эффективность проекта;

$I_{тэ}^p$  - интегральный показатель разработки;

$I_{тэ}^a$  - интегральный технико-экономический показатель аналога.

Таблица 30 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог (Параметрический двигатель)	Разработка (Синхронный двигатель)
1	Интегральный финансовый показатель разработки	2,05	2,2
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,25	4,4
3	Интегральный показатель эффективности	1,59	2
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,26	

Таким образом, интегральный показатель ресурсоэффективности для проекта равен:

$$I_{pi} = 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 = 4,4$$

В данном пункте проведена оценка ресурсоэффективности исследуемого проекта, в результате получили оценку (4,4 из 5), что говорит об эффективности его реализации.

**Вывод:**

Таким образом, цель раздела достигнута, поставленные задачи выполнены:

С помощью карты сегментирования была проанализирована перспективность применения синхронного двигателя для использования в ленточных конвейерах;

Анализа конкурентных технических решений показал правильность выбора типа исполнения двигателей для погрузчика;

Оценив факторы, влияющие на проект, с помощью SWOT- анализа был сделан вывод о целесообразности осуществления проекта;

Исходя из критериев и параметров для синхронного электропривода погрузчика было выбрано целесообразное с экономической и практической точки

зрения оборудование, используемая в реализации проекта, в соответствии с необходимыми требованиями, для дальнейшей коммерциализации проекта.

Длительность работ в календарных днях руководителя составляет 11 дня, а инженера 53. Общая продолжительность выполнения проекта - 64 дня. Расчет бюджета затрат научно-исследовательского проекта составил 3651764,85 рублей. В результате расчет рисков дает общую оценку в 31. Эта цифра говорит, что проект имеет право на «жизнь», хотя и не лишен вероятных препятствий. Оценка отдельных групп риска (с наиболее высокими показателями) будет учтена на подготовительном этапе, для того чтобы по возможности снизить их отрицательное влияние на проект в целом.

Интегральный показатель ресурсоэффективности, равен 4,4 по 5 – бальной шкале. Такой результат говорит о том, что данный проект будет эффективным. Таким образом, установлено, что проект отвечает необходимым требованиям в области ресурсоэффективности. Является конкурентоспособным и привлекательным с экономической точки зрения.

## **6. Социальная ответственность**

Целью данного 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 в производственном цехе, где используется электропривод ленточного конвейера. В процессе проведения исследования происходит следующее: изучение теоретических материалов по дисциплинам электропривод и электрические машины, разработка и создание математической модели электропривода в компьютерной среде «Matlab», обработка и анализ результатов, полученных в процессе моделирования. Производственный цех площадью 400 м<sup>2</sup>, 10 рабочих мест связанных с ленточным конвейером. В цеху работает главный инженер и инженер-конструкторы.

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.

### **6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Правовые нормы трудового законодательства изложены в документе «Трудовой кодекс Российской Федерации». Согласно данному документу, виды специальных норм трудового права представляют собой следующее:

- Нормы-льготы, предоставляют дополнительные гарантии трудовых прав;
- Нормы-приспособления, подстраивают общие нормы к данным условиям труда;
- Нормы-изъятия, ограничивают общие права.

Особенности трудового законодательства, применительные к условиям выполнения исследовательской деятельности, изложенного в данной работе, дифференцируются в соответствии с условиями труда: тяжесть и вредность

труда, климатические условия, прочие особенности труда.

Согласно «ГОСТ 12.2.032-78. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования», место для работы за ПК и взаиморасположение всех его элементов должно соответствовать антропометрическим, физическим и психологическим требованиям. При компоновки рабочей зоны инженера следует учитывать следующие организационные мероприятия:

- Обеспечить высоту рабочей поверхности в пределах 680-760 мм, высоту поверхности с клавиатурой примерно 650 мм.
- Рабочее место с ПЭВМ, при работе, вызывающей значительное умственное напряжение, рекомендуется изолировать перегородками от других работников в помещении.
- Конструкция рабочего стола должна позволять осуществить оптимальное расположение необходимых предметов труда и оборудования, согласно требованиям, предъявляемым к рабочему процессу.
- Конструкция рабочего стула должна обеспечивать удобное положение тела человека в момент осуществления работ на рабочем месте. Рекомендуемая высота сиденья над уровнем пола расположена в пределах 420-550 мм. При выполнении длительных работ с ПЭВМ рабочий стул должен обеспечивать возможность изменения позы с целью минимизации статического напряжения в позвоночном отделе опорно-двигательного аппарата.

Ведомственный контроль за охраной труда проводят министерства и ведомства, которые контролируют внутриведомственное соблюдение законодательства о труде. Для этого создают специальные службы охраны труда в виде отделов с аппаратом инженеров по охране труда, санитарных врачей и других специалистов.

Федеральный государственный надзор за соблюдением трудового законодательства и иных нормативных правовых актов, содержащих нормы трудового права, осуществляется федеральной инспекцией труда в порядке, установленном Правительством Российской Федерации.

Государственный контроль (надзор) за соблюдением требований по безопасному ведению работ в отдельных сферах деятельности 78 осуществляется в соответствии с законодательством Российской Федерации уполномоченными федеральными органами исполнительной власти.

Персонал допускается к работе только в спецодежде и средствах индивидуальной защиты. На рабочем месте должны быть запасы сырья и материалов, не превышающие сменную потребность. Необходимо знать специфические свойства применяемых веществ и соблюдать установленные правила работы с ними. Производственный процесс должен быть организован так, чтобы не допускать выделения в воздух рабочей зоны пыли и вредных веществ. Все эксплуатируемые электроустановки должны соответствовать требованиям «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей», и др. нормативных документов. Эксплуатация электрооборудования без заземления не допускается. Помещения опытно-производственной лаборатории обеспечиваются первичными средствами пожаротушения согласно действующим нормам. Все работники должны уметь пользоваться средствами пожаротушения и уметь оказывать первую помощь при несчастном случае. Не допускается загромождения рабочих мест, проходов, выходов из помещений и здания, доступа к противопожарному оборудованию.

## 6.2. Производственная безопасность

В данном пункте анализируются вредные и опасные факторы, которые могут возникать при проведении исследований в лаборатории, при эксплуатации частотно-регулируемого электропривода.

Таблица 31 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработ ка	Изготовл ение	Эксплуат ация	
1. Высокие уровни шума		+	+	- Требования к параметрам шума устанавливает СП 51.13330.2011. - Производственная вибрация устанавливается СН 2.2.4/2.1.8.566–96.
2. Сильные вибрации	+	+	+	
3. Отклонение показателей микроклимата			+	

4. Недостаточная освещенность рабочей зоны			+	- Параметры микроклимата устанавливаются СанПиН 2.2.4.548-96. -СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение.
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	- ПУЭ, утвержденный министром энергетики России от 08.07.2002, №204, Глава 1.7.

### **Анализ вредных и опасных факторов**

Часть технологического процесса исследования и проверки электропривода ленточного конвейера основана на работе с двигателем, который в свою очередь являются источником повышенного уровня шума, что является вредным фактором производственной среды [8]. 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 освещенность 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.

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 устанавливаются кожухи или защитные экраны в местах открытых движущихся механических частей.

### **Высокие уровни шума и сильные вибрации**

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 2.

Таблица 32 – Предельно допустимые уровни шума

Рабочее место	Уровни звукового давления, дБ									По шкале
Цех										
Щит управления										

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 3.

Таблица 33 – Сангигиенические нормы вибрации

Вид вибрации	Среднеквадратичная частота, Гц									
	Логарифмический уровень виброскорости									
Цех										

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").

### **Недостаточная освещенность рабочей зоны**

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 устанавливают 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 34 приведены нормируемые значения КЕО.

Таблица 34 – Нормируемые значения КЕО

Характеристика выполняемой зрительной работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Значение КЕО в естественном освещении, % при	
			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	-	VIIIа	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 %.

### **Отклонение показателей микроклимата**

Помещение цеха характеризуется:

- наличием большого количества металлического оборудования;
- повышенной температурой.

Оптимальные и допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений представлены в таблице 5.

Таблица 35 - 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 –	По ГОСТ 12.1.005 –	По ГОСТ 12.1.005 –
Холодный	Средней тяжести	17 – 19	40 – 60	
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;

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.

## 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 м<sup>3</sup>.

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.

Вывод:

В результате выполнения раздела ВКР «Социальная ответственность» были проанализированы вредные и опасные факторы, воздействующие на инженера, в момент выполнения его работы (повышенный уровень шума, несоответствующий уровень освещения, загрязненность воздуха и др.). Были приведены необходимые нормированные документы обеспечивающие безопасную работу персонала. Описано действие факторов на организм человека, рассмотрены средства коллективной и индивидуальной защиты от данных факторов.

Рассмотрены вопросы защиты окружающей среды от воздействия регулируемого электропривода, в частности, влияние на атмосферу (загрязнение воздуха пылью), на литосферу (отходы от эксплуатации и утилизации) и на гидросферу (сброс отходов в городскую канализацию).

Также были рассмотрены вопросы по наиболее вероятной ЧС – пожару, а именно – требования по противопожарной безопасности, меры профилактики, а также действия персонала в случае ЧС.

Были предложены основные меры по профилактики и ликвидации воздействий пагубных факторов на организм человека. Отталкиваясь от всего вышесказанного в данном разделе, можно прийти к выводу, что, с точки зрения эффективности трудовой деятельности работника, правильная организация рабочего места играет колоссальную роль. Правильные условия труда способствуют повышению эффективности и производительности работ инженера, в то же время обеспечивая его безопасность.

## **Заключение**

В ходе выполнения работы были поставлены и достигнуты такие задачи, как:

- построение математической модели СДПМ;
- разработка модели векторного модулятора;
- разработка модели наблюдателя состояния;
- проведение синтеза системы бездатчикового векторного управления СДПМ;
- исследование эффективности и результативности полученных систем векторного управления.

Проводя сравнение переходных процессов скорости, можно сказать, что полученная система бездатчикового управления по динамическим характеристикам не уступает системам с ДПР. Итак, подводим итог. Полученные в ходе работы результаты подтверждают эффективность рассмотренной методики построения бездатчиковой системы векторного управления СДПМ, следовательно, требования на задания к магистерской диссертации выполнены.

### Список публикаций студента

1. Бухтуев В.Ю. Энергоэффективный электропривод на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами // Наука. Исследования. Практика: сборник статей международной научной конференции (Санкт-Петербург, Апрель 2020). – СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2020. С.106–108

### Список использованных источников

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](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-lektrodvigatelem.pdf](http://dropdoc.ru/doc/453471/vektornoe-upravlenie-sinhronnym-e-lektrodvigatelem.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. \уИсследование 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» Правила устройства электроустановок, ПУЭ, утвержденные Министерством энергетики России от 08.07.2002, №204, Глава 1.7.
- 18.ГОСТ 12.1.004-91, СС5Т «Пожарная безопасность. Общие требования»
- 19.СП 9.13130.2009 «Техника Пожарная. Огнетушители. Требования к эксплуатации»
- 20.Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – 6е изд., переработанное и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 824 с.
21. СНиП 2.04. 05-91. «Отопление, вентиляция и кондиционирование»
22. ГОСТ 12.1.019 -79 (с изм. №1) ССБТ. «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты»
- 23.ГОСТ 12.0.004–90 ССБТ. «Обучение работающих безопасности труда»
- 24.ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. «Защитное заземление, зануление»
25. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов»
- 26.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»
- 27.Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681 «Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части

осветительных устройств»

28.ГОСТ Р 50571.3-94 «Электроустановки зданий. Часть 4. Защита от поражения электрическим током».

## Приложение А

### Energy-efficient electric drive on the basis of a synchronous motor with permanent magnets

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM88	Бухтуев Вадим Юрьевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Шилин Александр Анатольевич	д.т.н		

Консультант-лингвист Отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ	Пташкин Александр Сергеевич	к.ф.н		

## Introduction

Transport with an electric motor by environmental standards significantly outperforms other types of vehicles with internal combustion engines. As a result of it, the development and creation of electric vehicles predicted the introduction of transport. The energy is supplied to the engine from the power supply system. It follows that the maneuverability of this contact electric transport will be much worse than the maneuverability of vehicles. Despite this, the study of different options for using fuel for engines is necessary, because environmental pollution from vehicles with internal combustion engines pretty much affect the consequences for others, especially in economically developed cities.

The transition to other sources of energy that are safe for the environment is one of the most important solutions to the problem of reducing the negative impact of vehicles on nature as a whole. A vehicle that can replace a modern car using traditional fuels should be superior or not inferior to their maneuverability. Hybrid electric vehicles with combined installation – the main direction for reducing environmental pollution.

The electric car is a relatively new concept in the world of the automotive industry, the main source of energy is the battery. The requirements that are applicable to energy storage:

- explosion safety and fire safety;
- the presence of small weight and size characteristics;
- the presence of a wide range of operating temperatures;
- small self-discharge;
- long term of work;
- ease of maintenance;
- small toxicity;
- the presence of efficiency charge-discharge characteristics.

The company that manufactures products provides a guarantee for the life of the battery, but only subject to the conditions of its operation. The technical documentation for the product produced and provided by the enterprise should contain a description of the operating modes of the current sources, which, in turn, must correspond to it.

Individual operational characteristics are inherent in each type of electrochemical systems. If there is a need for increased reliability of the energy source, certain technical characteristics are given for each specific set of batteries.

To achieve complete safety of the use of the battery, as well as optimal conditions for its operation, it is necessary to strictly observe the operating modes and apply the mechanisms by which the energy of the battery is redistributed between the batteries. An integral part of modern energy storage systems is the control and monitoring system for the state of the electrochemical current source, which is responsible for the correct operation mode of the traction battery in question.

## **Permanent Magnet Synchronous Motor Control Principles**

### **Overview of existing PSA management practices**

General information about the synchronous motor. This engine is an electric alternating current machine, in which the rotor speed is equal to the frequency of rotation of the magnetic field in the air gap. The stator of this motor is similar in design to the stator of an induction motor. Permanent magnets are located on the rotor; in contrast to their location, there are two types of SDPMs: magnets are located on the surface of the rotor; magnets are located in the rotor steel. Motors are usually run at low power and are most used in servo drives in conjunction with frequency converters [2]. There are also developments of these megawatt engines [3].

SDPM is spreading more and more to areas where DC motors or motor drives have traditionally been used, such as circular pump drives, compressor drives in refrigeration, ventilation systems, drilling rigs, and oil production. The reasons for this are the current tendency to reduce the cost of magnetic materials (the introduction of rare-earth metal alloys), as well as the improvement of the hardware control base. The advent of appropriate converting and digital computing technology allows the use of SDPM as an alternative to DPT in a controlled electric drive. A significant impetus was given to the introduction of insulated gate bipolar transistors (IGBTs) and the use of Pulse Width Modulation (PWM) principles [2].

Classification of SDPM management methods. The direction of development of the SDPM control principles is mainly determined by the development of the hardware

base of the drive: the parameters of the motor itself, the type of converter, the presence of rotation angle and (or) speed sensors, and the processing power of the controller.

The presence / absence of sensors for the magnetic state and coordinates of mechanical motion (speed, rotor position) is crucial for the construction of the SDPM control system. According to this criterion, the SDPM management methods can be subdivided into management using the DPR and management without using it. In a classic electric drive based on SDPM, an DPR is installed on the motor shaft. As a sensor, a Hall sensor, encoder, resolver, gear reducer, etc. can be used. The control system in this case is relatively simple, but the engine design is complicated, which reduces the reliability of the system.

Significant successes in the field of modern theory of automatic control, in particular the development of state observers, have led to the appearance of sensorless electric drives. In such systems, the DPR is absent, and the necessary information for the implementation of the control algorithm comes from the state observer. The sensorless systems play a special role in those electric drive systems where the installation of the DPR is physically impossible. The advantages of sensorless systems are reliability, low cost, compactness.

Different versions of sensorless control, which are described in domestic and foreign literature, are based on mathematical models of AC motors. In these systems, the calculation of the rotation speed is equal to the speed in the module and it is comparable with the angular position of the rotor EMF vector. These systems differ from each other in accuracy and sensitivity when changing the input parameters in the mathematical model. The disadvantage of such methods is the inability to operate the electric drive at low frequencies, since the rotor EMF in this case tends to zero and cannot provide the required signal.

Currently, there are many diverse algorithms for assessing the state variables of AC machines. They are divided into active and passive algorithms [1]. The work of the active algorithm is based on the introduction of special high-frequency influences into the main spectrum of voltage or current, and, accordingly, the analysis of the motor reaction to them. In this case, additional losses occur in the motor and power converter,

which impairs the energy efficiency of the electric drive and increases the required power of the power elements. To evaluate the passive system, you can choose two options: non-adaptive and adaptive. Non-adaptive systems use stator and rotor models for electromagnetic processes. Adaptive systems use standard and custom models for expansion and functionality. For this, the Lyapunov method is used.

The methods for constructing the control systems themselves for the SDPM are also diverse. The various ways to manage PSA are shown in Figure 26.

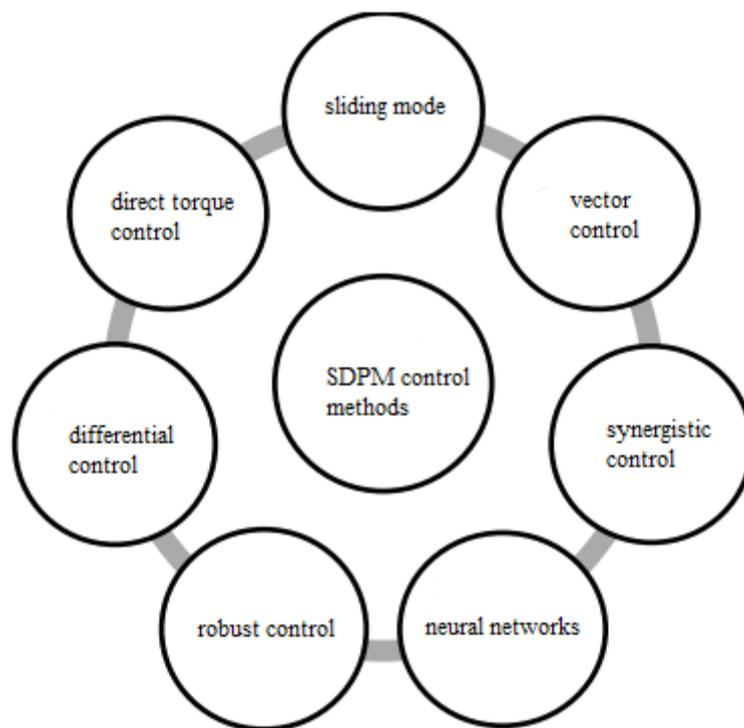


Figure 26- Ways to manage SDPM

Consider each of the ways to manage the SDPM in more detail.

The Direct Torque Control (DTC) method was originally proposed for an induction motor, but is currently being applied to other AC machines. The main principle of this method is the selection of the voltage vector according to a predefined table of values. At the same time, both the moment and the stator field are simultaneously controlled. Such systems have a number of advantages: robustness is achieved with respect to parameter changes, the control algorithm is simplified due to the absence of a current control loop, and high system performance is ensured. However, the direct torque control method has a significant drawback: at small load

angles, rotor speed fluctuations and moment pulsations occur.

The differential control method described in reduces the ripple of the moment. It is based on the consideration of the signs of derivatives of the electromagnetic moment and the stator flux linkage vector module. The disadvantage of this method is the degradation of performance when working with maximum voltage.

S.E. Ryvkin wrote in his article about the sliding mode. These systems may have a variable structure. The bottom line is that the sign of the driving signal is reversed when passing the sliding surface, which is described by the equation, based on the variable state of the object. The disadvantages of such systems include several cases: the possibility of instability at the moment of crossing the switching surface; high-frequency switching, which can lead to rapid wear of the mechanical and electrical parts of the electric drive.

Neuron Networks and Fuzzy Logic are modern and promising tools for building control systems. When using these methods, there are no restrictions on the linearity of the system, they are effective in noise conditions and, after training, provide real-time control. The disadvantage of using neural network and fuzzy regulators is the need for great computing power, as well as the complexity of the algorithms.

Recently, methods for the synthesis of robust control systems ( $H_\infty$ -theory) have been developed. Changes in the load moment, the stator resistance, the moment of inertia of the rotating parts, the supply voltage and environmental characteristics affect both the rigidity of the mechanical characteristics and the quality of the transient processes. Robust systems are not adaptive, but can provide the necessary quality of work when changing the characteristics of the effects and instability of the engine parameters in a wide range. The need to reduce the required amount of information about the engine, the desire for the versatility of control systems and reduce the cost of setting them up - all this causes interest in robust control. But at the moment, despite serious theoretical achievements, the methods of  $H_\infty$ -optimization have not received extensive practical use.

There are developments of SDPM management systems based on a synergistic approach. It is known from the synergetic control theory that the set of control criteria

for a system is expressed as a system of so-called invariants. SDPM as a control object has two control channels; therefore, no more than two invariants can be specified for it. In, stabilization of the rotational speed of the motor shaft is adopted as a technological invariant, and the electromagnetic invariant is chosen in such a way as to reduce to zero the longitudinal component of the stator current  $i_d$ . Adequate synergistic control is synthesized using the method of analytical design of aggregated regulators. The advantage of this method is high accuracy, the disadvantage is the complexity of the calculations, significant processing time.

The principle of vector control of the engine is based on the position of the flux linkage vector created by permanent magnets, therefore it is called "field-oriented" in some sources. The purpose of this method is to control a direct current machine, where the flow and torque relationships are controlled in dynamic and static modes. The instantaneous values of the stator current pass into a rotating coordinate system  $(d, q)$ , which is connected with the rotor, using mathematical equations and the position of the rotor. When maintaining the current value of the current  $i_d$  equal to zero, the flow along the  $d$  axis will be constant. In this case, the moment will be proportional to the value of the current  $i_q$ , which is set in the control system system. In order to achieve separate control of the flow and moment, it is necessary to remove the connection between the two axes by removing the corresponding connecting members from the reference voltage, i.e. cross-compensate.

The most common methods for controlling SDPM are direct torque control and vector control. A system with direct control of the moment better fulfills control and disturbing influences. Also, vector control is inferior to direct torque control due to the low resistance to parameter changes and requires the use of a more complex PWM system. However, vector control has an advantage in static modes: lower computational resources and lower ripple. Therefore, such systems are preferable in electric drives with small load disturbances and more stable control. Since the energy-efficient electric drive is considered in this paper, vector control is chosen as an SDPM control method, which provides lower losses in the motor due to the low level of current harmonics that are different from the first ones.

## The mathematical model of the SDPM

Permanent magnet synchronous machines are distinguished by the fact that instead of the field winding on the rotor, they have permanent magnets that create an exciting magnetic flux. The stator of these machines is similar to the HF stator and has a two- or three-phase winding. In compiling the mathematical model of the SDPM, we will accept the following assumptions [1]:

- 1) there is no saturation of the magnetic circuit, loss in steel, the effect of current displacement;
- 2) the stator windings are symmetrical;
- 3) the scattering inductance does not depend on the position of the rotor in space.

We consider the equilibrium stress equations of the SDPM stator using the motor model shown in Figure 4. We will consider the SDPM equations in an orthogonal synchronous coordinate system (d, q), the d axis of which is oriented along the magnetic axis of the rotor and rotates with it. The speed of the orthogonal system in electric space is equal to the synchronous speed  $p_n\omega = \omega_{0\text{эп}}$ , where  $p_n$  is the number of pole pairs,  $\omega$  is the speed of rotation of the motor shaft. The three-phase stator winding is replaced by two windings whose axes are directed along the coordinate axes (d, q). The windings are motionless relative to the rotating coordinate system (d, q) and are characterized by active resistance  $R_s$  and inductances  $L_{sd}$  and  $L_{sq}$ . The windings are supplied with voltage  $U_{sd}$  and  $U_{sq}$ , as a result of which currents  $I_{sd}$  and  $I_{sq}$  flow through them. Given the direction of the coordinate axes, the stator flux linkage along the d  $\psi_{sd}$  axis is determined by the current  $I_{sd}$  and the magnetic flux generated by the permanent magnets, and along the q  $\psi_{sq}$  axis, only by the current  $I_{sq}$ . The flux linkage  $\psi_f$  can be represented by a spatial vector that is stationary relative to the rotor and rotates with it, and hence with the coordinate system (d, q).

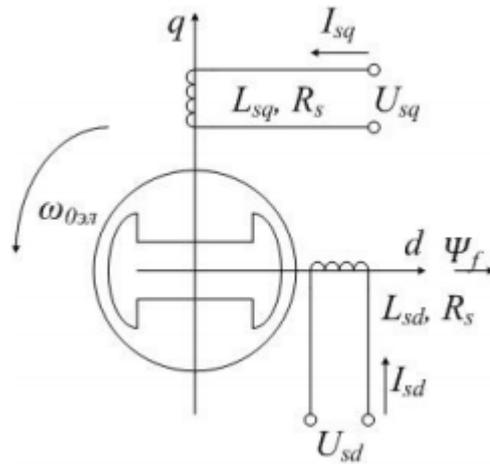


Figure 27- SDPM model in a rotating coordinate system

Thus, the equations for the projections of the generalized stator voltage vector and flux linkage vector on the axis of a rotating coordinate system in operator form are as follows:

$$\begin{aligned}
 U_{sd} &= R_s I_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_{0\text{эп}}\psi_{sq}; \\
 U_{sq} &= R_s I_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_{0\text{эп}}\psi_{sd}; \\
 \psi_{sd} &= L_{sd} I_{sd} + \psi_f; \\
 \psi_{sq} &= L_{sq} I_{sq},
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

where  $R_s$  – phase resistance of the stator winding;  $L_{sd}$ ,  $L_{sq}$  – inductance of the stator windings along the axes d and q;  $I_{sd}$ ,  $I_{sq}$ ,  $U_{sd}$ ,  $U_{sq}$  are the stator currents and voltages along the d and q axes;  $\psi_{sd}$ ,  $\psi_{sq}$ ,  $\psi_f$  are the stator flux links along the d, q axes and created by a permanent magnet.

The equation for the electromagnetic moment and the equation of mechanics:

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{3}{2} P_n (\psi_{sd} I_{sq} - \psi_{sq} I_{sd}); \\
 p\omega &= \frac{1}{J} (M - M_c - \beta\omega),
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

where  $J$  is the moment of inertia of the rotor,  $M$ ,  $M_c$  is the electromagnetic moment and moment of resistance,  $\beta$  is the viscous friction coefficient (damping coefficient). Having previously substituted the expressions for flux linkages into the equations for the projections of the stress vector, we rewrite equations (2.4) and (2.5) with respect to the currents  $I_d$  and  $I_q$ :

$$\begin{aligned}
pI_{sd} &= \frac{1}{L_{sd}}(U_{sd} - R_s I_{sd} + \omega_{0\Omega l} L_{sq} I_{sq}); \\
pI_{sq} &= \frac{1}{L_{sq}}(U_{sq} - R_s I_{sq} - \omega_{0\Omega l} L_{sd} I_{sd} - \omega_{0\Omega l} \psi_f); \\
M &= \frac{3}{2} P_n (\psi_f I_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} I_{sq}); \\
p\omega &= \frac{1}{J} (M - M_c - \beta \omega).
\end{aligned}
\tag{2.6}$$

Based on the mathematical model of the SDPM, expressed by the system of equations (2.6), we construct the structural diagram shown in Figure 23.

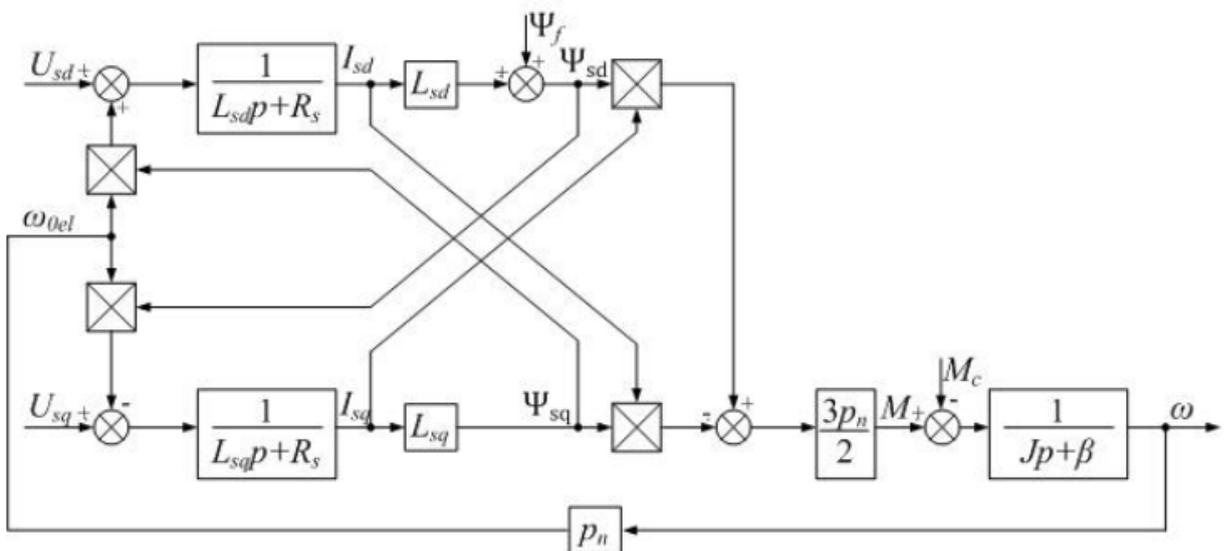


Figure 23 - Block diagram of the SDPM in a rotating coordinate system

As you know, when the load changes, the speed of the synchronous motor remains constant. In this case, the angular position of the spatial vector of the rotor flux linkage relative to the stator flux link vector changes. In the ideal idle mode, these vectors coincide in space, but when the load is applied to the motor shaft, the rotor flux linkage vector begins to lag behind the stator flux link vector by some angle  $\theta$ , called the load angle. The load angle, which is measured in radians, is determined through the integral of the difference between the instantaneous values of the stator and rotor field velocities in the electric space that existed during the time of the transition process associated with the change in load.

In operator form, the equation for the load angle is as follows:

$$\theta = \frac{\omega_{0эл} - \omega p n}{p}. \quad (2.7)$$

First, the engine torque increases with increasing load angle. At that moment, when the angle reaches  $90^\circ$ , the moment reaches its maximum. With increasing load angle, i.e. the engine is overloaded, the corresponding torque decreases, the engine falls into the zone of unstable operation and stops.

This dependence is expressed in the angular characteristic, which is shown in Figure 6, where it is indicated:  $M_{\text{макс}}$  is the maximum moment,  $M_n$  and  $\theta_n$  are the nominal moment and angle of the load.

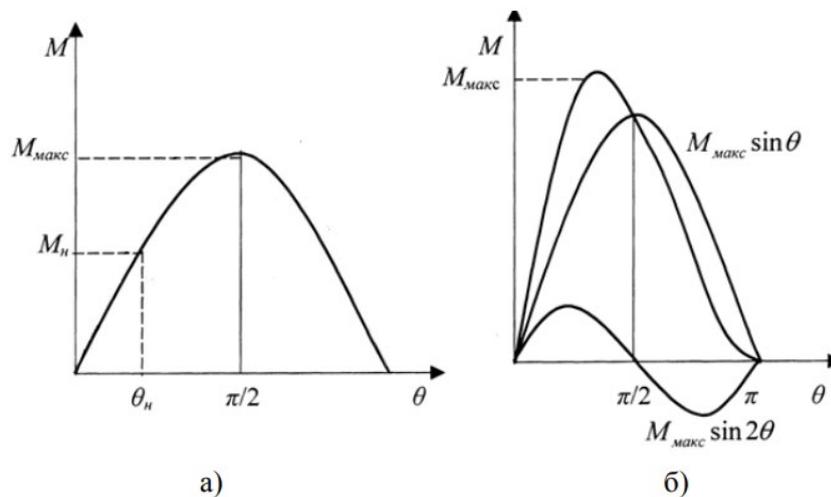


Figure 28 - Angular characteristic of the SDPM: a) the implicit pole SDPM; b) explicit pole motor

For an implicit pole motor, the angular response is expressed as a sinusoidal relationship. If the motor is clearly polar, in addition to the moment caused by the rotor field, a reactive moment proportional to  $\sin 2\theta$  arises, which distorts the shape of the curve.

#### Findings.

1. SDPM is a promising engine that is used in industrial automation systems, robots and manipulators, feed drives and the main movement of metal-cutting machines, coordinate devices, precision tracking and guidance systems, in traction electric drives, aircraft and underwater vehicles steering drives, electromechanical devices of cars, in household appliances. SDPM is also actively spreading to areas where DPT or blood pressure have traditionally been used.

2. In connection with the spread of the SDPM, its control algorithms are also developing. The following main development priorities can be distinguished:

- accuracy of working out the program task (speed or rotor position);
- insensitivity to SDM parameters uncertainties and interference;
- expansion of the control range in the direction of low speeds, which is associated with the influence of pulsations of the moment at low speeds;
- reducing the number of sensors, that is, the use of sensorless algorithms, which increases the reliability of the electric drive;
- simplicity of algorithms in terms of computational load, since simpler algorithms provide shorter calculation time and shorter control delay, and also allow the use of cheaper microprocessors;
- minimize power consumption.

### **References**

1. Firago, B. I. Properties, characteristics and parameters of permanent magnet synchronous motors with vector and scalar frequency control / B. I. Firago, S. V. Alexandrovsky // News of higher educational institutions and energy associations of the CIS. Energy. – 2019. – No. 3. – Pp. 205-218.
2. Lin F.J., Wai R.J. Robust recurrent fuzzy neural network control for linear synchronous motor drive system. Neurocomputing. – 2003. – T. 50. Pp. 365-390.
3. Nandam P.K., Sen P.C. A comparative study of a luenberger observer and adaptive observer-based variable structure speed control system using a self-controlled synchronous motor. IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1990. – T. 37. – №2. Pp. 127-132.

## Приложение Б

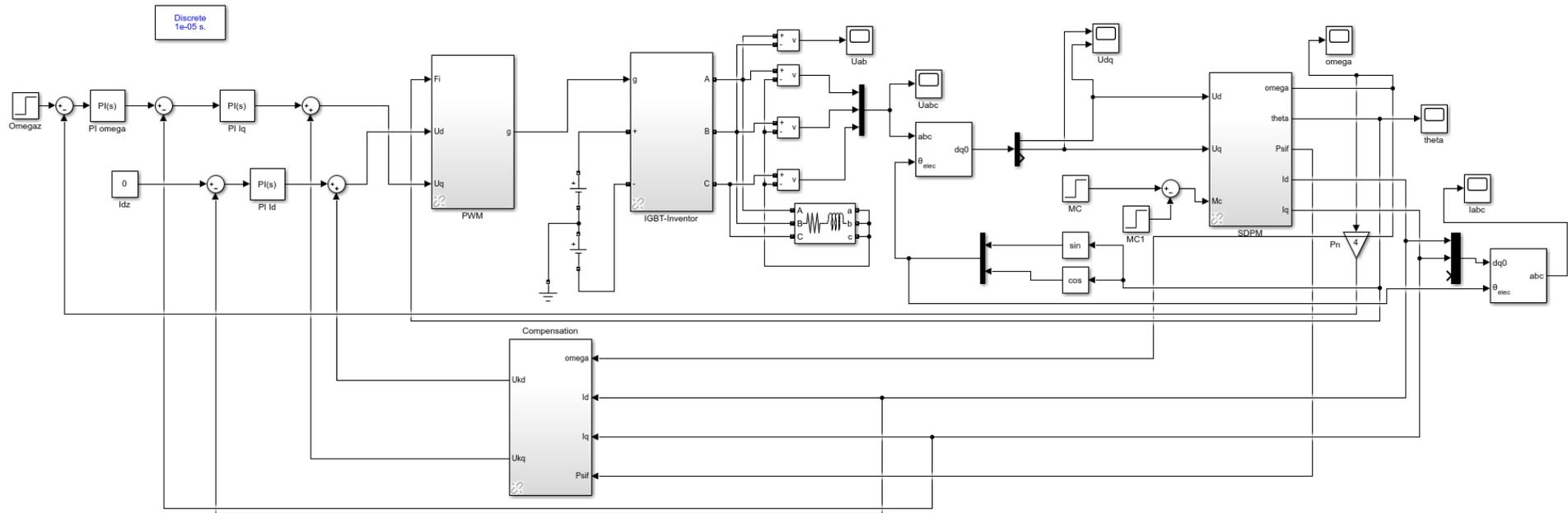


Рисунок 29 - Модель системы векторного управления с ДПР, поддержанием  $I_{sd} = 0$ , АИН и векторным модулятором

## Приложение В

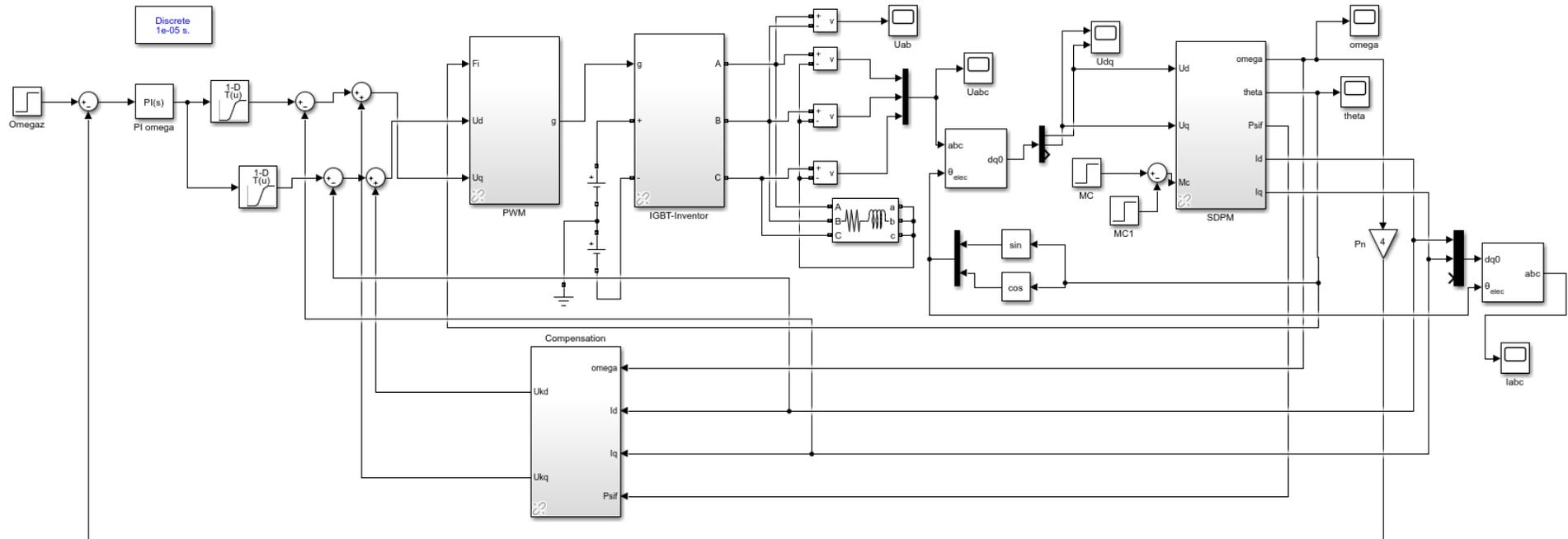


Рисунок 30 - Модель системы векторного управления ФП

