

Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение электроэнергетики и электротехники

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

<b>Тема работы</b>
<b>Система управления вентильного двигателя с повышенной живучестью</b>

УДК 621.313.13:681.51

#### Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г5Б	Сурженко Виктор Викторович		

#### Руководитель ВКР

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

#### Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Образцов К.В.			

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян М.В.	к.э.н., доцент		

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
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника	Тютева П.В.	к.т.н., доцент		

Результаты обучения по направлению  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Код результата	Результат обучения
Р 1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем.</i>
Р 2	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
Р 3	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты.</i>
Р 4	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния <i>электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
Р 5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
Р 6	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
Р 7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i>
Р 8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
Р 9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
Р 10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
Р 11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
Р 12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>

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 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Тютева П. В.  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:  

бакалаврской работы
---------------------

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

Студенту:
 

Группа	ФИО
5Г5Б	Сурженко Виктору Викторовичу

Тема работы:
 

<b>Система управления вентильного двигателя с повышенной живучестью</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 1161/С от 14.02.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:
 

--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объект исследования – вентильный двигатель.</p> <p>Требования – обеспечить электропривод центробежного насоса с повышенной живучестью с параметрами: производительность <math>Q_{на} = 0,065 \text{ м}^3 / \text{с}</math>; напор <math>H = 25 \text{ м}</math>; скорость вращения вала <math>n = 1450 \text{ об} / \text{мин}</math>; КПД насоса <math>\eta_{на} = 0,75</math>; КПД передачи <math>\eta_n = 1</math>; плотность перекачиваемой жидкости <math>\rho = 1000 \text{ кг} / \text{м}^3</math> коэффициент запаса <math>K_3 = 1,2</math>.</p>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Методы повышения живучести вентильного электропривода</p> <p>Описание и принцип действия центробежного насоса</p> <p>Расчёт необходимой мощности двигателя, выбор двигателя и насосного агрегата</p> <p>Расчёт естественных характеристик системы регулируемого электропривода</p> <p>Имитационное моделирование вентильного электропривода в Matlab SIMULINK</p> <p>Обоснование возможности работы трёхфазного вентильного двигателя в аварийном двухфазном режиме</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>к.э.н., доцент Мелик-Гайказян М.В.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Старший преподаватель Фех А.И.</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p> <p>нет</p>	

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

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кладиев С.Н.	к.т.н., доцент		
Старший преподаватель	Образцов К.В.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б5Г	Сурженко В.В.		

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

---

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Уровень образования бакалавриат

Отделение электроэнергетики и электротехники

Период выполнения осенний/весенний семестр 2018/2019 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

(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)
	Обзор литературы	20
	Расчёт необходимой мощности двигателя. Имитационное моделирование вентильного электропривода в Matlab SIMULINK	60
	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
	Социальная ответственность	10
		100

**СОСТАВИЛ:**

Руководитель ВКР

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

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Образцов К.В.			

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника	Тютеева П.В.	к.т.н., доцент		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5Г5Б	Сурженко Виктору Викторовичу

Школа	ИШЭ	Отделение	Электроэнергетики и Электротехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.02 Электроэнергетика и Электротехника

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

1. Стоимость затрат технического проекта (ТП): на зарплату, страховые отчисления, прочие и накладные расходы	Зарботная плата сотрудников ТП определяется на основании Положения об оплате труда в ТПУ. Страховые отчисления определяются согласно Федеральному закону от 28.11.2018 №446 – ФЗ. Накладные расходы определяются на основании Сметы расходов по проектам ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Приблизительная продолжительность выполнения ТП составит 103 рабочих дня.

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

1. Планирование и формирование графика работ по реализации ТП	Для составления графика технико-конструкторских работ используется оценка трудоемкости работ для каждого исполнителя. По полученным данным строится график инженерных работ, позволяющий лучше спланировать процесс реализации ТП
2. Формирование сметы	В процессе формирования сметы ТП используется следующая группировка затрат по статьям: <ul style="list-style-type: none"> <li>• затраты на специальное оборудование;</li> <li>• полная заработная плата исполнителей;</li> <li>• отчисления во внебюджетные фонды;</li> <li>• накладные расходы.</li> </ul>
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей) эффективности проекта.	Расчет коэффициента интегрального показателя ресурсоэффективности проекта.

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

1. Диаграмма Ганта

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	<b>15.02.19</b>
---	-----------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян М.В.	к.э.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г5Б	Сурженко Виктор Виуторович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5Г5Б	Сурженко Виктору Викторовичу

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

Тема ВКР:

Система управления вентильного двигателя с повышенной живучестью	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: математическая модель системы управления вентильного двигателя
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> 1.1. Специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; 1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 5. Требования к расположению рабочей станции и осанке оператора. ГОСТ Р ИСО 26000-2012. Руководство по социальной ответственности.
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Воздействие на работника физических факторов, связанных с: <ul style="list-style-type: none"> <li>– несоответствующими нормам микроклиматическими параметрами воздушной среды;</li> <li>– с чрезмерным загрязнением воздушной среды в зоне дыхания;</li> <li>– связанные с акустическими колебаниями в производственной среде;</li> <li>– со световой средой;</li> <li>– с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий</li> </ul>
<b>3. Экологическая безопасность:</b> 3.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду 3.2. Анализ «жизненного цикла» объекта исследования. 3.3. Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.	Описание проектируемой системы, утилизация электроустановок.

<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p> <p>4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований.</p> <p>4.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут при проведении исследований.</p> <p>4.3. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.</p>	<p>Возможные ЧС: Возможны возгорания в следствии короткого замыкания из-за ошибки оператора и нарушения целостности электрических проводов. Наиболее типичным ЧС будет пожар в помещении.</p> <p>Предупреждающие мероприятиями являются наличие плана эвакуации на месте работы оператора, знание и соблюдение мер пожарной безопасности работниками, установка заземлителей.</p>
--	---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	14.02.19
--	----------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Фех А. И.			15.02.19

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г5Б	Сурженко В. В.		



## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 83 страницы, 22 рисунка, 18 таблиц, 23 источника.

Ключевые слова: вентильный электропривод с повышенной живучестью, имитационная модель вентильного двигателя, двухфазный режим работы, обрыв фазы двигателя, центробежный насос.

Цель работы – разработка вентильного электропривода центробежного насоса с повышенной живучестью.

Расчёт и выбор необходимой для насоса мощности. Выбор преобразователя частоты для управления вентильным электроприводом.

Выбор вентильного двигателя по расчетным данным. Расчёт механических характеристик вентильного двигателя. Рассмотрение отказоустойчивого режима работы вентильного двигателя при обрыве одной из фаз.

ВКР была выполнена в редакторе текстовых документов Microsoft Office Word 2016 с использованием пакетов: Microsoft Visio 2010, Matlab Simulink

## Содержание

Введение.....	13
1. Теоретические сведения о исследуемом объекте .....	14
1.1. Описание и принцип действия центробежного насоса.....	14
1.2. Обоснование выбора типа электропривода .....	17
1.3. Методы повышения живучести вентильного электропривода.....	18
2. Расчёт и выбор элементов силовой цепи регулируемого электропривода	
21	
2.1. Расчёт необходимой мощности двигателя, выбор двигателя и насосного агрегата .....	21
2.2. Выбор преобразовательного устройства для системы регулируемого электропривода.....	24
2.3. Выбор и обоснования устройства получения информации о состоянии процесса.....	26
2.4. Расчёт естественных характеристик системы регулируемого электропривода.....	28
3. Математическое описание и имитационное моделирование вентильного электропривода.....	31
3.1. Векторное управление вентильным двигателем .....	31
3.2. Математическое описание синхронного двигателя с постоянными магнитами двигателя в неподвижной системе координат .....	34
3.3. Синтез и настройка контура тока.....	39
3.4. Синтез и настройка контура скорости.....	41

3.5. Описание и моделирование преобразователей фаз и преобразователей координат .....	43
3.6. Имитационное моделирование вентильного электропривода в Matlab SIMULINK .....	48
3.7. Обоснование возможности работы трёхфазного вентильного двигателя в аварийном двухфазном режиме .....	51
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	56
4.1. Организация работ технического проекта .....	56
4.1.1. Структура работ в рамках технического проектирования .....	56
4.1.2. Определение трудоемкости выполнения ТП.....	58
4.1.3. Разработка графика проведения технического проекта .....	60
4.2. Составление сметы затрат на разработку ТП .....	60
4.2.1. Определение стоимости материальных затрат.....	62
4.2.2. Полная заработная плата исполнителей.....	62
4.2.3. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	63
4.2.4. Накладные расходы.....	64
4.2.5. Формирование сметы проекта.....	64
4.3. Определение ресурсоэффективности проекта.....	65
5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	67
5.2. Производственная безопасность .....	69
5.2.1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды .....	70
5.2.2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды	76
5.3. Экологическая безопасность .....	78

5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	79
Заключение .....	82
Список использованных источников .....	83
Приложение А .....	86
Приложение Б .....	89

## Введение

Для производственных объектов, требующих обеспечить повышенную живучесть электропривода, развитие полупроводниковых преобразователей способствовало применению в данной области вентильного электропривода. На сегодняшний день он становится все более востребованным благодаря высоким показателям КПД, коэффициента мощности и широкому диапазону регулирования. Все это позволяет использовать данный электропривод во многих сферах промышленности таких как космическая, медицинская, ВПК и другие.

Вентильный электропривод является электромеханической системой, в состав которой входят синхронная машина, с возбуждением от постоянных магнитов, систему электрических ключей (вентилей), которая обеспечивает питание обмоток статора, и систему управления инвертором, оснащенную датчиками положения ротора и датчиками тока.

Целью данной работы является расчет и выбор приводного двигателя, математическое моделирование вентильного двигателя и изучение алгоритмов аварийного двухфазного режима работы. В данной работе вентильный двигатель применяется в системе электропривода, предназначенного для управления центробежного насоса. В работе рассматривается имитационная модель спроектированной машины в среде MatLab Simulink, которая позволяет смоделировать работу данного двигателя и изучить его работу в реальных условиях.

## 1. Теоретические сведения о исследуемом объекте

### 1.1. Описание и принцип действия центробежного насоса

Наиболее распространённым типом насосов применяемых в промышленности и в быту являются центробежные насосы. Данный тип насосов имеет возможность работы с различными жидкостями: вода любой температуры, жидкости, имеющие высокую вязкость, а также жидкости с различными примесями т.е. частицами песка, торфа, угля, грунта и т.д.

Принцип работы центробежных насосов основывается на создании центробежной силы вращением рабочего колеса. Жидкость, которая в этот момент находится в пространстве между лопастями рабочего колеса, под действием этой силы выталкивается и через выпускной патрубок подается в систему подачи жидкости. Далее новый поток жидкости под действием давления воздуха заполняет освободившееся пространство, обеспечивая тем самым непрерывную работу насоса. Схема работы центробежного насоса приведена на рисунке 1.1.

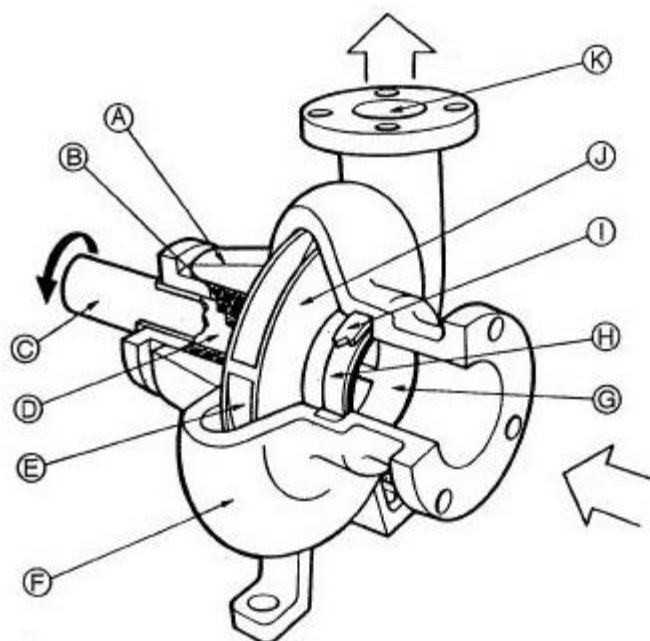


Рисунок 1.1 Схема работы центробежного насоса

На схеме приняты следующие обозначения: А – сальник; В – подшипник; С – вал; D – втулка вала; Е – лопасть; F – корпус; G – приемное пространство лопастного колеса; H – рабочее колесо; I – уплотнительное кольцо; J – рабочее колесо; K – выпускной патрубок.

Для классификации центробежных насосов используются различные характеристики. Одной из важных является коэффициент быстроходности  $n_s$ , который отображает какое количество оборотов рабочего колеса совершит насос за 1 мин. Также имеют место различные типы рабочих колес в зависимости от отношения большего диаметра рабочего колеса  $D_{вн}$  к диаметру приемного пространства  $D_{омв}$ . Классификация рабочих колёс центробежных насосов по быстроходности представлена в таблице 1.1 [2].

Таблица 1.1 - Классификация рабочих колёс центробежных насосов по коэффициенту быстроходности

Тип колеса	$n_s$ , об/мин	$D_{вн} / D_{омв}$
Тихоходное	50-80	3-2,5
Нормальной быстроходности	80-150	2
Быстроходное	150-350	1,8-1,4

Вихревые насосы имеют коэффициент  $n_s < 50$ , а диапазон  $n_s = 400 - 1500$  об/мин соответствует осевым насосам, занимающим промежуточное положение между центробежными и осевыми.

К преимуществам центробежных насосов можно отнести:

- высокое значение КПД;
- высокая надежность в ходе эксплуатации;
- высокие напорно-расходные характеристики (сохранение высокого напора при больших подачах);

- возможность использования нескольких насосов, включенных параллельного либо последовательно на один трубопровод;
- плавное протекание переходных процессов при изменении режима работы системы подачи жидкости;
- плавное регулирование мощности дает возможность пуска насоса при закрытой выходной задвижке (обратном клапане);
- «самовсасывание»;
- способность перекачивать жидкости, содержащие твердые частицы;
- подача большого объема жидкости;
- низкая в сравнении с другими типами стоимость насоса благодаря использованию в конструкции насоса недорогих материалов: стали, чугуна, полимеров;
- простота эксплуатации и тех. обслуживания.

Также центробежные насосы имеют ряд недостатков:

- перед запуском требуется заливка жидкости;
- сравнительно низкий КПД при подаче вязких жидкостей;
- значительное уменьшение значения КПД при большом значении напора или малой подаче жидкости.

Для уравнивания давления жидкости на внешних боковых поверхностях рабочего колеса в насосах может применяться двухсторонний подвод жидкости. При больших значениях необходимого напора могут применяться многоступенчатые насосы, в корпусе которых расположено несколько последовательно соединенных рабочих колёс.

Центробежные насосы обладают несколькими отличительными особенностями:



- мощность, напор, КПД и высота всасывания прямо пропорционально зависит от подачи, выражаемой соответствующими характеристиками;
- при определенных режимах работы значение КПД насоса имеет прямую зависимость от подачи, но при достижении своего максимального значения уменьшается при увеличении подачи.

## **1.2.Обоснование выбора типа электропривода**

Разрабатываемый электропривод должен иметь ряд параметров и конструктивных особенностей:

- отсутствие щеточно-коллекторного узла;
- высокий пусковой момент;
- широкий диапазон регулирования;
- длительный режим работы;

Такой параметр как «отсутствие щеточно-коллекторного узла» заметно снижает круг потенциальных типов электроприводов. Выбор сводится к двум типам двигателей: асинхронный с короткозамкнутым ротором и вентильный.

Асинхронный двигатель, в сравнении с вентильным имеет ряд недостатков, таких как:

- высокие значения пусковых токов;
- высокая кратность пусковых токов к номинальным, при высоком пусковом моменте;
- при искусственном снижении значений пускового тока значительно уменьшается пусковой момент.

Исходя из этого, удовлетворяющий требованиям технического задания, выбран вентильный электропривод.

К основным достоинствам можно отнести:

- точность позиционирования, быстродействие;
- высокий диапазон регулирования частоты вращения (1:10000 и более);
- отсутствие щеточно-коллекторного узла, требующего периодического обслуживания;
- высокие энергетические показатели;
- большая перегрузочная способность по моменту;
- сравнительно низкая теплонагруженность;
- возможность управления без использования датчика положения ротора.

Недостатки:

- сложная система управления относительно других типов электропривода;
- высокая цена, вследствие использования сложной электронной системы управления; [3]

Но, при регулировании скорости вращения вала с использованием векторного управления использование любого из существующих типов электродвигателей влечет за собой применение дорогостоящей электронной системы управления.

### **1.3. Методы повышения живучести вентильного электропривода**

Вентильный электропривод – электропривод, в котором для электропитания двигателя и управления скоростью вращения применяется преобразователь, управляемый электрическими ключами, другими словами управляемый преобразователь частоты, питающий двигатель переменного

тока (на IGBT транзисторах), или управляемый выпрямитель, который подключается к двигателю постоянного тока (ДПТ).

Электропривод переменного тока, основной частью которого могут быть вентильные двигатели (ВД) или асинхронные двигатели (АД), применяется для управления множеством сложных технических систем и объектов, имеющих принцип действия, основанный на вращательном или поступательном движении главных подвижных частей. Кратковременное прекращение работы электропривода в некоторых областях промышленного производства может являться причиной нарушения нормального режима работы, что повлечет за собой возможные риски для здоровья и жизни обслуживающего персонала при работе с оборудованием, большие потери денежных средств на объектах с невозможностью прерывания полного цикла работы в течении продолжительного времени либо брак продукции при продолжительном цикле производства. Согласно ГОСТ 27.002–89 живучесть – это свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов. Для приведенных выше областей применения электропривода переменного тока задача обеспечения свойства живучести является определяющей [1].

Обеспечение безопасности и живучести электропривода необходимо в составе опасных агрегатов, имеющих в своем составе насосы и предназначенных для:

- транспортировки газа, нефти и продуктов их переработки;
- отвода (конденсации) отработанного низко потенциального тепла при производстве электроэнергии;
- охлаждения изделий при производстве полимеров, лакокрасочных материалов и в различных сферах металлургической промышленности.

Вентильные двигатели на рынке представлены большим диапазоном по мощности от нескольких ватт до сотен киловатт, и имеют значительную область применения в различных сферах промышленности.

Для повышения надежности ВД используются различные способы и устройства:

– Повышение надежности с помощью параллельного соединения основных блоков. Достигается путем применения трехфазных двухсекционных ВД, со смещением второй секции на угол  $\pi/6$  либо применением многофазных ( $m \geq 2$ ) двигателей с системами управления, состоящих из N-секций ( $N \geq 2$ ).

– Восстановление нормального режима работы трехфазных ВД, имеющих прямоугольную форму тока в обмотках с помощью алгоритмов. Позволяет восстанавливать работу при таких неисправностях как: обрыв фазы в цепи обмотки статора и обрыв вентиля силового преобразователя.

Электропривод, который в своем составе имеет преобразователь частоты и синхронный двигатель (СД) может обеспечивать двухфазный режим работы трехфазного двигателя при неисправности силового транзистора. При обрыве, какой-либо фазы преобразователя частоты общая точка обмотки статора СД подключится к средней точке звена постоянного тока, ПЧ при этом переводится в режим двухфазной работы с сдвигом по фазе между векторами токов статора  $\pi/2$  [4].

Обрыв транзистора в ПЧ ВД не является безусловным отказом. ВД будет сохранять рабочее состояние, ухудшая при этом электромеханические характеристики по причине отключения одной из секций обмотки статора от источника напряжения. Двигатель не может достигать пусковой момент во всех положениях ротора, положение ротора, при котором двигатель не достигает пускового называют «мёртвыми точками».

## 2. Расчёт и выбор элементов силовой цепи регулируемого электропривода

### 2.1. Расчёт необходимой мощности двигателя, выбор двигателя и насосного агрегата

Выбор электродвигателя производится по расчетной мощности насоса. Исходные данные для расчета необходимой мощности двигателя представлены в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Данные для расчета

Производительность, м <sup>3</sup> /с	Напор, м	Скорость вращения вала насоса, об/мин	КПД насоса	КПД передачи	Плотность перекачиваемой жидкости, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент запаса
0,065	25	1450	0,75	1,0	1000	1,2

Необходимая расчетная мощность для дальнейшего выбора двигателя определяется по формуле:

$$P_{дв} = K_з \cdot P_{нас} = K_з \cdot \frac{Q \cdot P_n}{\eta_{на} \cdot \eta_n} \cdot 10^{-3} = K_з \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_{на} \cdot \eta_n} \cdot 10^{-3}, \quad (2.1)$$

где

$K_з$  – коэффициент запаса;

$P_{нас}$  – гидравлическая мощность насоса, кВт;

$P_n$  – давление на напоре насоса, Па;

$Q_{на}$  – производительность насоса, м<sup>3</sup> / с;

$H$  – полный напор жидкости, м;

$\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости,  $кг / м^3$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $м / с^2$ ;

$\eta_{на}$  – КПД насоса;

$\eta_n$  – КПД передачи.

$$P_{\text{дв}} = 1,2 \cdot \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,065 \cdot 25}{0,75 \cdot 1} \cdot 10^{-3} = 19,13 \text{ кВт},$$

Условие для выбора электродвигателя:

$$P_H \geq P_{\text{расч}} \quad (2.2)$$

$$22 \geq 19,13 \text{ кВт}$$

Из каталога [5] выбран двигатель PE0R 180 M4 компании VEM motors GmbH имеющий параметры, представленные в таблице 1.2

Таблица 1.2 – Технические характеристики двигателя PE0R 180 M4

Заданные величины	Условное обозначение	Единица измерения	Численное значение
Значение выходного напряжение источника	$U_{ин}$	В	400
Частота выходного напряжения источника	$f$	Гц	50
Номинальное напряжение	$U_n$	В	355
Мощность двигателя	$P_{\text{дв}}$	кВт	22
Коэффициент полезного действия в режиме номинальной мощности	$\eta_n$	о.е.	0,954
Номинальный момент	$M_n$	Нм	140

Продолжение таблицы 2 – Технические характеристики двигателя PE0R 180 М4

Номинальная скорость вращения	$n_n$	об/мин	1500
Коэффициент мощности в режиме номинальной мощности	$\cos\varphi$	о.е.	0,98
Число пар полюсов	$p$	о.е.	2
Активное сопротивление обмотки статора	$R_l$	Ом	0,08
Реактивное сопротивление обмотки статора	$L_l$	мГн	0,94
Момент инерции двигателя	$J$	кг·м <sup>2</sup>	0,126
Коэффициент момента двигателя	$C_M$	Нм/А	2,52
Кратность максимального момента	$k_{\max}$	о.е.	1,25
Кратность минимального момента	$k_{\min}$	о.е.	2

Технические данные двигателя основного исполнения, степень защиты IP 54, класс нагревостойкости изоляции «F».

По номинальной мощности электродвигателя PE0R 180 М4 из каталога [6] выбирается насос ЦМЛ 150/310-22/4. Центробежный моноблочный линейный насос ЦМЛ 150/310-22/4 имеет характеристики, представленные в таблице 2.3:

Таблица 2.3 – Технические характеристики насоса ЦМЛ 150/310-22/4

Тип насоса	Диаметр рабочего колеса, мм	Подача, м <sup>3</sup> /ч,	Напор, м	Макс. потребляемая мощность насоса, кВт	Частота вращения, (об/мин)
ЦМЛ 150/310-22/4	310	160	30	22	1500

## 2.2. Выбор преобразовательного устройства для системы регулируемого электропривода

Так как для реализации вентильного двигателя необходим преобразователь частоты с широтно-импульсным методом управления выбираем ПЧ фирмы «ВЕСПЕР» EI-P7012-030H [7], характеристики которого представлены в приложении А в таблице А.1.

Условия для выбора ПЧ:

$$\begin{aligned} P_{н.пч.} &\geq 1,25P_{н.дв.}, \\ I_{н.пч.} &\geq 1,25I_{н.дв.} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Проверка правильности выбора ПЧ выполняется, исходя из следующих условий:

- Рассчитывается полная пусковая мощность ПЧ:

$$\left[ \frac{k \cdot n}{9550 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \cdot \left( M_{ст} + \frac{J}{9,55} \cdot \frac{n}{t_A} \right) \right] \leq 1,5 \cdot P_{н.пч.}; \quad (2.4)$$

$$\left[ \frac{0,95 \cdot 1500}{9,55 \cdot 0,954 \cdot 0,98} \cdot \left( 140 + \frac{0,126 \cdot 1500}{9,55 \cdot 1} \right) \right] = 25,502 \leq 1,5 \cdot 30$$

$$25,502 \text{ кВА} \leq 45 \text{ кВА}$$



где  $k$  – коэффициент искажения тока, который связан с алгоритмом формирования синусоиды тока с помощью ШИМ.  $k=(0,95\div 1,05)$ ;

$t_A$  – время, в течение которого требуется разогнать двигатель до частоты вращения, с;

$M_{CT}$  – статический момент нагрузки на валу двигателя, Н·м

$$M_{cm} = \frac{P_{\text{дв}} \cdot 9,55}{n_n} = \frac{22000 \cdot 9,55}{1500} = 140 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

– Рассчитывается потребляемый двигателем ток при работе от ПЧ при напряжении сети 220/380В:

$$I_{\text{ПОТР}} = \frac{k \cdot n \cdot M_{cm}}{9,55 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot \sqrt{3}}; \quad (2.5)$$

где  $U$  – действующее значение напряжения на обмотках статора двигателя, В.

$$I_{\text{ПОТР}} = \frac{0,95 \cdot 1500 \cdot 140}{9,55 \cdot 0,954 \cdot 0,98 \cdot 380 \cdot \sqrt{3}} = 33,94 \text{ А} < 48 \text{ А}.$$

– Рассчитывается потребляемый двигателем при линейном разгоне ток:

$$I_{\text{ПОТР.Р.}} = \frac{k \cdot n}{9,55 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot \sqrt{3}} \cdot (M_{cm} + M_{\text{дин}}) \quad (2.6)$$

$$I_{\text{ПОТР.Р.}} = \frac{0,95 \cdot 1500}{9,55 \cdot 0,954 \cdot 0,98 \cdot 380 \cdot \sqrt{3}} \cdot (140 + 19,79) = 38,75 \text{ А} < 48 \text{ А},$$

где  $M_{cm}$  – статический момент нагрузки на валу двигателя, Н·м,;

$M_{\text{дин}}$  – динамический момент нагрузки, возникающий при разгоне инерционной нагрузки, Н·м.

$$M_{\text{дин}} = \frac{J}{9,55} \cdot \frac{n}{t} = \frac{0,126}{9,55} \cdot \frac{1500}{1} = 19,79 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.7)$$

– Рассчитывается полная потребляемая двигателем мощность в номинальном установившемся режиме:

$$S_{\text{потр}} = \frac{k \cdot P}{\eta \cdot \cos \varphi}, \quad (2.8)$$

$$S_{\text{потр}} = \frac{0,95 \cdot 22}{0,9 \cdot 0,9} = 24,444 \text{ кВА} < 30 \text{ кВА},$$

где  $P$  – номинальная мощность двигателя, кВт.

Исходя из полученных при расчётах данных, можно сделать вывод, о правильности выбора преобразователя частоты.

### **2.3. Выбор и обоснования устройства получения информации о состоянии процесса**

Для получения необходимой информации о состоянии технологического процесса используются устройства, которые предназначены для получения информации и последующем ее преобразовании, при этом не изменяя состав контролируемых параметров ТП. На вход таких устройств поступают естественные или унифицированные сигналы, с выхода «снимается» соответствующее значение унифицированных сигналов.

Устройства для получения информации о состоянии процесса образуют канал сбора и преобразования информации. К таким устройствам относят чувствительные элементы или иными словами датчики.

Датчики физических величин принимают на входе контролируемую величину и преобразуют ее в сигнал, удобный для передачи по каналам связи либо дальнейшего его преобразования.

Основными техническими характеристиками измерительных устройств для получения информации о состоянии ТП являются: статическая и динамическая характеристики датчика; порог чувствительности; основная и дополнительные погрешности; входная величина, воспринимаемая и преобразуемая датчиком; выходная величина, используемая для передачи

информации. В данном ТП в качестве измерительного устройства используется датчик давления подачи воды (ДД).

На вход датчика ДД поступает входная величина  $Q$ , которая относится к классу входных величин датчика, характеризующих протекание процесса. Выходная величина, используемая для передачи информации, моделируется по амплитуде. Динамическая характеристика датчика определяет поведение датчика при изменении входной величины и определяется внутренней структурой датчика и его элементов.

Точность измерений давления нефти характеризуют следующие параметры:

- порог чувствительности датчика – минимальное изменение входной величины, которое вызывает изменение выходного сигнала;
- основная погрешность датчика – максимальная разность между получаемой в нормальных эксплуатационных условиях величиной выходного сигнала и его номинальным значением, определяемая по статической характеристике для данной входной величины;
- дополнительные погрешности датчика – погрешности, вызываемые изменениями внешних условий (температуры, атмосферного давления и т.д.) по сравнению с нормальными условиями.

В комплект поставки преобразователя частоты входит датчик давления ОТ-1 (МН-2) представленный на рисунке 1.1



Рисунок 1.1 Датчик давления

Технические характеристики датчика давления ОТ-1 (МН-2) представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Технические характеристики датчика давления ОТ-1 (МН-2)

Тип	Тензорезистивный
Диапазоны давления	0...6, 0...10, 0...16, 0...25 бар
Погрешность	1 %
Выходной сигнал	4-20 мА (двухпроводное подключение)
Питание	10...30 В постоянного тока
Присоединение	G1/4
T <sub>раб</sub> измеряемой среды	-40 °С...+125 °С
T <sub>раб</sub> окружающей среды	-40 °С...+100 °С
Защита от ударных нагрузок	500g (механический удар)
Защита от вибрации	20g (вибрация в условиях резонанса)
Материалы, контактирующие с измеряемой средой	Нержавеющая сталь с добавками CrNi
Пылевлагозащита	IP67
Масса	70 г

#### 2.4. Расчёт естественных характеристик системы регулируемого электропривода

Найдем синхронную угловую скорость вращения двигателя [8]:

$$\omega_c = \frac{\pi \cdot n_c}{30}; \quad (2.9)$$

$$\omega_c = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157,07 \text{ рад / с}$$

Номинальное значение момента двигателя:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}; \quad (2.10)$$

$$M_H = \frac{22000}{157,07} = 140,06 \text{ H} \cdot \text{м}$$

При номинальном напряжении питающей сети максимальный момент двигателя определяется по выражению:

$$M_{\max} = k_{\max} M_H; \quad (2.11)$$

$$M_{\max} = 1,25 \cdot 140,06 = 175,08 \text{ H} \cdot \text{м}$$

Номинальная ЭДС двигателя:

$$E_{1H} = 0,95 \cdot U_H; \quad (2.12)$$

$$E_{1H} = 0,95 \cdot 355 = 337,25 \text{ В}$$

Уравнение угловой характеристики синхронного двигателя:

$$M(\theta) = \frac{3 \cdot U_H \cdot E_{1H}}{\omega_0 \cdot X_1} \sin \theta \quad (2.13)$$

$$M(\theta) = \frac{3 \cdot 355 \cdot 337,25}{157,07 \cdot 13,04} \sin \theta = 175,36 \cdot \sin \theta \text{ H} \cdot \text{м}$$

Угловая характеристика, построенная в соответствии с полученным выражением представлена на рисунке 2.2.

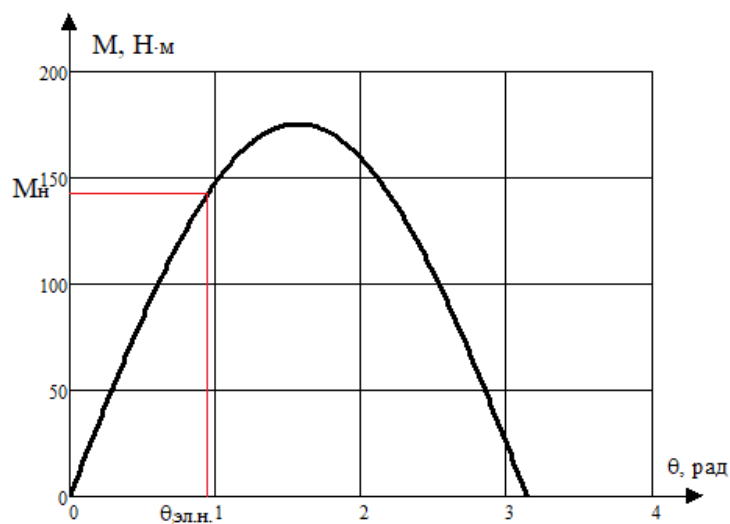


Рисунок 2.2 Угловая характеристика.

Статическая механическая характеристика синхронного двигателя имеет форму прямой линии, параллельной оси моментов, и пересекающей ось ординат в точке, соответствующей номинальной скорости вращения [8]. Механическая характеристика представлена на рисунке 2.3.

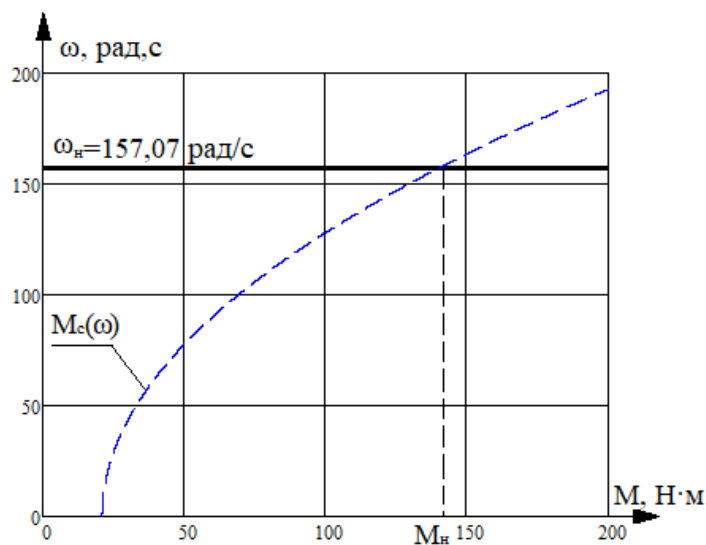


Рисунок 2.3 Механическая характеристика

Механическая характеристика приводного механизма задается выражением:

$$M_c(\omega) = 0,15 \cdot M_n + 0,85 \cdot M_n \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2. \quad (2.14)$$

### **3. Математическое описание и имитационное моделирование вентильного электропривода**

#### **3.1. Векторное управление вентильным двигателем**

Вентильный двигатель (ВД) представляет собой синхронный двигатель с постоянными магнитами с непрерывным регулированием положения результирующего вектора магнитодвижущей силы (МДС) статора относительно положения вращающегося ротора. При этом по сигналам обратной связи датчика положения ротора формируется определенная последовательность коммутации IGBT транзисторов автономного инвертора, что и обеспечивает заданное положение вектора МДС статора относительно вектора МДС ротора [9].

Для управления электрическими величинами СДПМ применяются векторные способы управления.

Система векторного управления СДПМ в своей основе имеет систему преобразований координат. Так, мгновенные значения токов в фазах А, В и С преобразуются в значения токов эквивалентной двухфазной машины в неподвижных осях ( $\alpha$ ,  $\beta$ ), затем в значения тока во вращающихся осях ( $q$ ,  $d$ ). Сформированные таким образом сигналы являются сигналами обратных связей для соответствующих регуляторов тока. Сигналы с регуляторов тока при помощи обратных преобразований преобразуются в неподвижную систему координат и используются для формирования сигналов коммутации ключей инвертора.

Поддержание составляющей тока статора по оси  $d$  равной нулю необходимо для обеспечения оптимального режима работы двигателя, при котором развивается максимальный момент. Регулятор тока по оси  $d$  и регулятор скорости образуют систему подчиненного управления, в которой сигнал с регулятора скорости является сигналом задания тока.

Функциональная схема системы векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами представлена на рисунке 3.1.

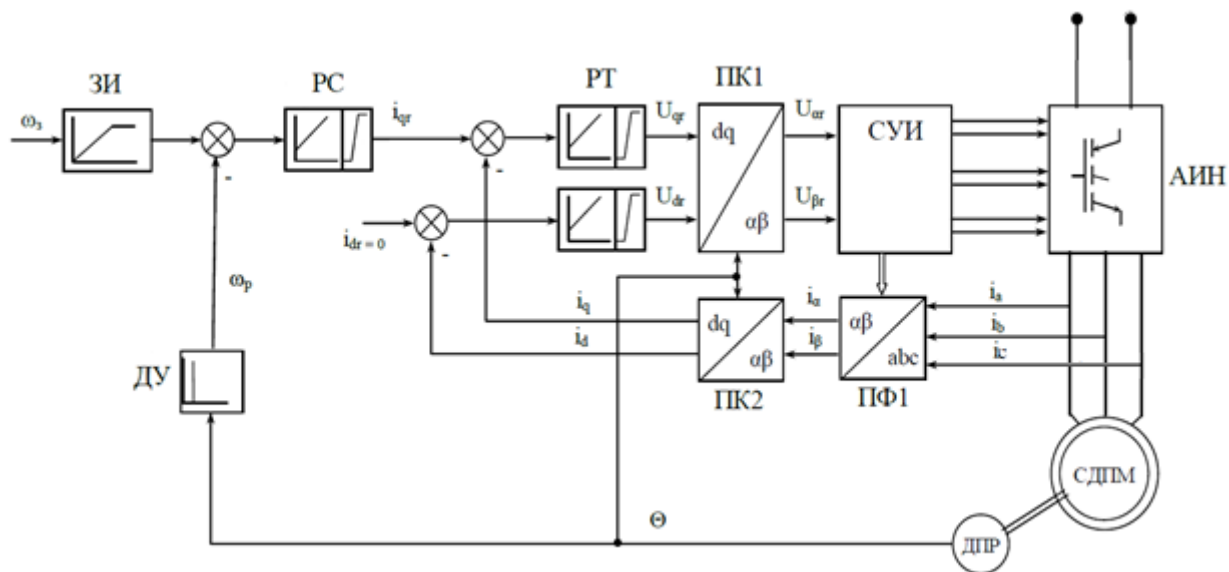


Рисунок 3.1 Функциональная схема системы векторного управления СДПМ

На схеме использованы следующие обозначения:

СДПМ – синхронным двигателем с постоянными магнитами;

АИН – автономный инвертор напряжения;

ДПР – датчик положения ротора;

СУИ – система управления инвертором;

ПФ1 – преобразователь фаз;

ПК1, ПК2 – преобразователи координат;

ДУ – дифференцирующее устройство;

ЗИ – задатчик интенсивности;

РТ – регуляторы тока;

РС – регуляторы скорости.



Система управления инвертором представляет собой преобразователь частоты, сигналы с выхода которого поступают на управляющий электрод автономного инвертора напряжения. Для формирования широтно-импульсной модуляции синусоидальное напряжение сравнивается с опорным напряжением пилообразной формы. Разность этих напряжений поступает на вход релейных элементов, на выходе которых формируются импульсы коммутации силовых IGBT транзисторов.

Структурная схема преобразователя частоты представлена на рисунке 3.2.

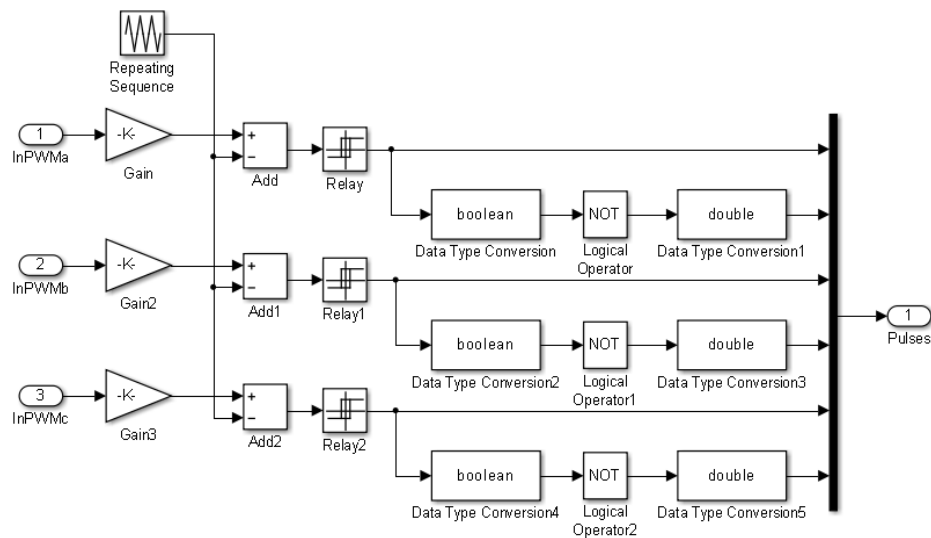


Рисунок 3.2 Структурная схема преобразователя частоты.

Для ограничения ускорения и максимального тока при пуске двигателя на входе системы управления устанавливается задатчик интенсивности. Структурная схема задатчика интенсивности представлена на рисунке 3.3

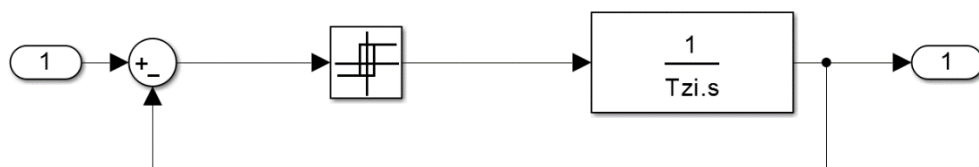


Рисунок 3.3 Структурная схема задатчика интенсивности

Постоянная времени для задатчика интенсивности определяется согласно выражению:

$$T_{ЗИ} = \frac{\omega_{ном} \cdot J_{\Sigma}}{1,5 \cdot M_{ном}}, \quad (3.1)$$

где  $J_{\Sigma} = 2,5 \cdot J_{ов}$  – суммарный момент инерции электропривода.

$$T_{ЗИ} = \frac{157,07 \cdot 0,011 \cdot 2,5}{1,5 \cdot 140} = 0,021 \text{ с},$$

На вход ЗИ поступает сигнал задания скорости, выходное значения изменяется с заданным темпом. Время нарастания выходного сигнала до уровня входного можно изменять путем увеличения либо уменьшения постоянной времени задатчика интенсивности.

### 3.2. Математическое описание синхронного двигателя с постоянными магнитами двигателя в неподвижной системе координат

Уравнения электрического равновесия для каждой из фаз СДПМ:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{1a}}{dt} + I_{1a}R = U \cdot \sin(\vartheta); \\ \frac{d\psi_{1b}}{dt} + I_{1b}R = U \cdot \sin(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}); \\ \frac{d\psi_{1c}}{dt} + I_{1c}R = U \cdot \sin(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}), \end{cases} \quad (3.2)$$

где  $\psi_{1a}, \psi_{1b}, \psi_{1c}$  – фазные потокосцепления статора А, В, С соответственно;

$I_{1a}, I_{1b}, I_{1c}$  – фазные токи обмотки статора;

$\vartheta = p_n \cdot \int_0^t \omega dt$  – угол поворота ротора;

$p_n$  – число пар полюсов;

$\omega$  – угловая скорость вращения ротора.

Потокосцепления фаз статора двигателя формируются следующим образом:

$$\begin{cases} \psi_{1a} = L_{aa}I_{1a} + L_{ab}I_{1b} + L_{ac}I_{1c} - \psi_{2a}; \\ \psi_{1b} = L_{ab}I_{1a} + L_{bb}I_{1b} + L_{bc}I_{1c} - \psi_{2b}; \\ \psi_{1c} = L_{ac}I_{1a} + L_{cb}I_{1b} + L_{cc}I_{1c} - \psi_{2c}, \end{cases} \quad (3.3)$$

где  $L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}$  – собственные индуктивности фаз обмотки статора;

$L_{ab}, L_{bc}, L_{ca}$  – взаимные индуктивности фаз обмотки статора;

$\psi_{2a}, \psi_{2b}, \psi_{2c}$  – потокосцепления ротора относительно статора, которые в неподвижной системе координат можно представить в виде:

$$\begin{cases} \psi_{2a} = \psi_2 \cdot \cos(\vartheta); \\ \psi_{2b} = \psi_2 \cdot \cos(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}); \\ \psi_{2c} = \psi_2 \cdot \cos(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}), \end{cases} \quad (3.4)$$

где  $\psi_2$  – потокосцепление постоянных магнитов на роторе.

Синхронный двигатель с постоянными магнитами, который имеет магнитную проницаемость, близкую к проницаемости вакуума, можно принять как неявнополюсную синхронную машину, взаимные индуктивности фаз обмотки статора для которой равны:

$$L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} = -\frac{L}{2}. \quad (3.5)$$

Это условие относится и к собственным индуктивностям фаз обмотки статора:

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L. \quad (3.6)$$

При соединении фаз обмотки статора в звезду, в соответствии с законом Кирхгофа имеем значения токов в фазах:

$$\begin{cases} I_{1a} + I_{1b} + I_{1c} = 0 \Rightarrow \\ \begin{cases} I_{1b} + I_{1c} = -I_{1a}; \\ I_{1a} + I_{1c} = -I_{1b}; \\ I_{1a} + I_{1b} = -I_{1c}. \end{cases} \end{cases} \quad (3.6)$$

Произведя преобразование системы уравнений для потокосцеплений фаз статора двигателя (2) с учетом (3), (4), (5) и (6) получим следующие выражения:

$$\begin{cases} \psi_{1a} = \frac{3}{2}LI_{1a} - \psi_2 \cdot \cos(\vartheta); \\ \psi_{1b} = \frac{3}{2}LI_{1b} - \psi_2 \cdot \cos(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}); \\ \psi_{1c} = \frac{3}{2}LI_{1c} - \psi_2 \cdot \cos(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}). \end{cases} \quad (3.7)$$

Подставляя полученные уравнения (7) в исходную систему уравнений (1), и производя дифференцирование по времени, получаем следующую систему уравнений равновесия напряжений фаз:

$$\begin{cases} \frac{3}{2}L \frac{dI_{1a}}{dt} + I_{1a}R + C_M \omega \cdot \sin(\vartheta) = U \cdot \sin(\vartheta); \\ \frac{3}{2}L \frac{dI_{1b}}{dt} + I_{1b}R + C_M \omega \cdot \sin(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}) = U \cdot \sin(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}); \\ \frac{3}{2}L \frac{dI_{1c}}{dt} + I_{1c}R + C_M \omega \cdot \sin(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}) = U \cdot \sin(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}), \end{cases} \quad (3.8)$$

где  $C_M = \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot \psi_2$  – коэффициент момента двигателя.

Уравнение электромагнитного момента имеет вид:

$$M_{эм} = C_M \left[ I_{1a} \sin(\vartheta) + I_{1b} \sin\left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + I_{1c} \sin\left(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right]. \quad (3.9)$$

Уравнение движения электропривода:

$$M_{эм} - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.10)$$

где  $M_c$  – момент сопротивления приводного механизма;

$J$  – момент инерции, приведенный к валу двигателя.

Тогда уравнения, описывающие СДПМ в неподвижной системе координат, могут быть представлены в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} U \cdot \sin(\vartheta) = \frac{3}{2} L \frac{dI_{1a}}{dt} + I_{1a} R + C_e \omega \cdot \sin(\vartheta); \\ U \cdot \sin\left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) = \frac{3}{2} L \frac{dI_{1b}}{dt} + I_{1b} R + C_e \omega \cdot \sin\left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right); \\ U \cdot \sin\left(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) = \frac{3}{2} L \frac{dI_{1c}}{dt} + I_{1c} R + C_e \omega \cdot \sin\left(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right); \\ M_{эм} = C_e \left[ I_{1a} \sin(\vartheta) + I_{1b} \sin\left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + I_{1c} \sin\left(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right]; \\ M_{эм} - M_c = J \frac{d\omega}{dt}; \\ \vartheta = p_n \cdot \int_0^t \omega dt. \end{array} \right. \quad (3.11)$$

К данным уравнениям необходимо применить преобразование Лапласа для дальнейшего построения математической модели СДПМ. Также решая уравнения равновесия напряжений относительно фазных токов статора  $I_{1a}, I_{1b}, I_{1c}$  и, уравнение движения электропривода относительно угловой скорости вращения ротора  $\omega$ , получаем систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{1a}(p) = \frac{R^{-1}}{T_e \cdot p + 1} [U \cdot \sin(\vartheta) - C_e \omega \cdot \sin(\vartheta)]; \\ I_{1b}(p) = \frac{R^{-1}}{T_e \cdot p + 1} \left[ U \cdot \sin\left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) - C_e \omega \cdot \sin\left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right]; \\ I_{1c}(p) = \frac{R^{-1}}{T_e \cdot p + 1} \left[ U \cdot \sin\left(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) - C_e \omega \cdot \sin\left(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right]; \\ M_{эм} = C_e \left[ I_{1a} \sin(\vartheta) + I_{1b} \sin\left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + I_{1c} \sin\left(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right]; \\ \omega(p) = \frac{M_{эм} - M_c}{J \cdot p}; \\ \vartheta = p_n \cdot \omega \cdot \frac{1}{p}, \end{array} \right. \quad (3.12)$$

где  $T_e = \frac{3 \cdot L}{2 \cdot R}$  – электромагнитная постоянная времени;

$p$  – оператор Лапласа.

Структурная схема СДПМ, построенная с использованием приведенных выше уравнений приведена на рисунке 3.4.

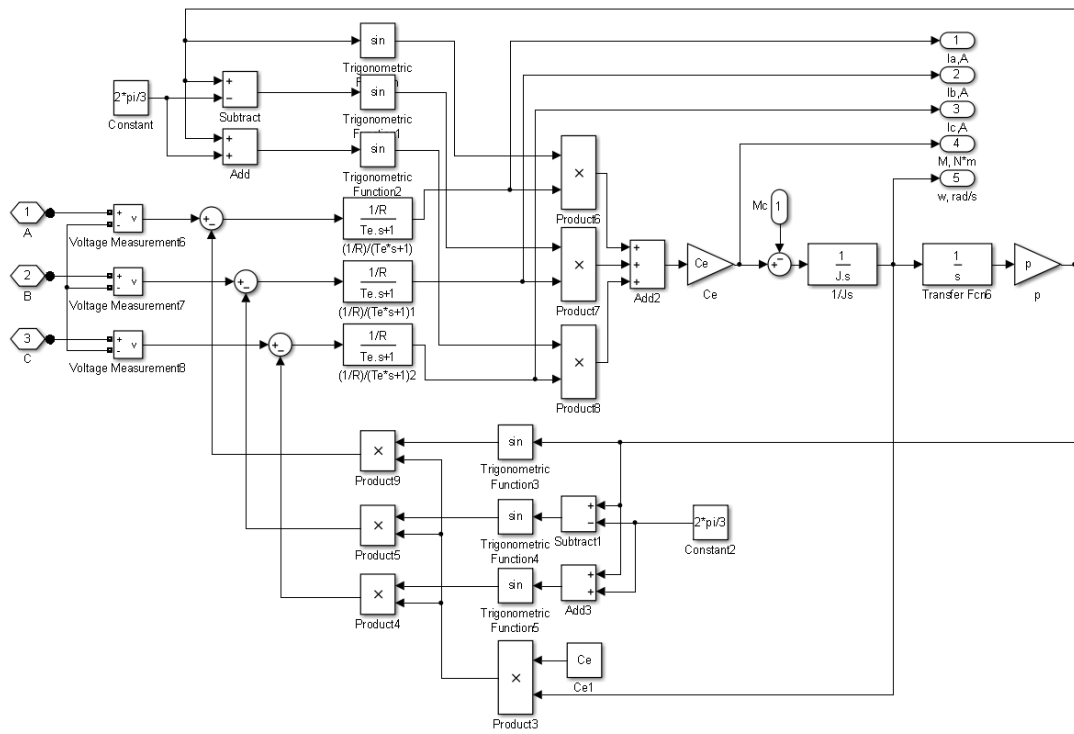


Рисунок 3.4 Структурная схема СДПМ.

### 3.3. Синтез и настройка контура тока

Регуляторы тока представляют собой детализированные структурные схемы ПИ-регуляторов. На вход регулятора тока по оси  $q$  поступает разность сигналов задания тока с выхода регулятора скорости и обратной связи по току по оси  $q$ , на регулятор тока по оси  $d$  – сигнал обратной связи по току по оси  $d$ .

Исследуемый двигатель является неявнополюсной машиной, поэтому индуктивности по продольной и поперечной осям одинаковы  $L_d=L_q$ . По этой же причине контуры токов  $I_{ld}$  и  $I_{lq}$  являются идентичными [10].

Структурная схема контура тока с ПИ регулятором по току, приведена на рисунке 3.5.

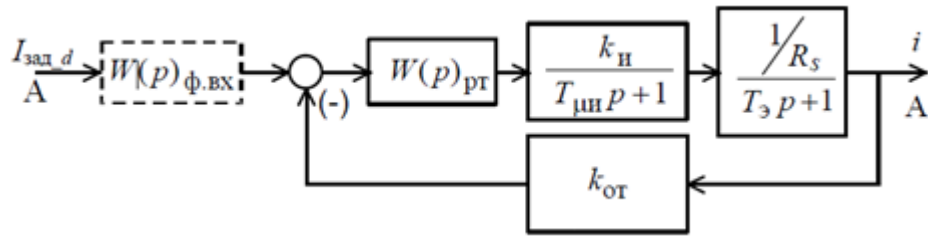


Рисунок 3.5 Структурная схема контура тока

Параметры контура тока:

–  $W_{TFI(s)} = \frac{k_u}{T_{инв} \cdot p + 1}$  – передаточная функция инвертора,

где  $k_u = \frac{U_{\phi m}}{U_{y \max}} = \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{1} = 311,1$ , – коэффициент усиления инвертора;

$U_{\phi m} = U_{\phi} \cdot \sqrt{2}$  – модуль пространственного вектора фазного напряжения статора;

$U_{y \max} = 1 \text{ В}$  – максимальное значение сигнала задания тока.

–  $T_{инв} = 0,5 \frac{1}{f_i} = 0,5 \frac{1}{4000} = 0,000125 \text{ с}$  – постоянная времени инвертора,

где  $f_i = 4000 \text{ Гц}$  – частота коммутации инвертора.

Тогда передаточная функция инвертора:

$$W_{TFI(s)} = \frac{K_u}{T_{инв} \cdot p + 1} = \frac{311,1}{0,000125s + 1} \quad (3.13)$$

Нагрузка инвертора представлена эквивалентным сопротивлением статорной обмотки  $R_s = 0,1 \text{ Ом}$  и эквивалентной постоянной времени:

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} = \frac{0,000635}{0,05} = 0,0127 \text{ с} . \quad (3.14)$$

Передаточная функция цепи обмотки статора:



$$W_{TFC(s)} = \frac{1/R_s}{T_s \cdot p + 1} = \frac{1/0,1}{0,0127p + 1}. \quad (3.15)$$

Коэффициент обратной связи по току равен:

$$K_{oc1} = \frac{1}{50}. \quad (3.16)$$

Расчёт параметров регулятора тока производится по модульному оптимуму. При одной большой постоянной времени рекомендуется применение пропорционально-интегрального регулятора с передаточной функцией вида [10]:

$$W_{pez(s)} = K_{pez} \frac{T'_s \cdot p + 1}{p}, \quad (3.17)$$

$$\text{где } K_{pez} = \frac{T'_s \cdot R}{T_{\mu 1} \cdot a_k \cdot K_I \cdot K_{oc1}} = \frac{0,0127 \cdot 0,1}{0,000125 \cdot 2 \cdot 311,1 \cdot 0,02} = 0,816;$$

$T'_s = T_s = 0,0127 \text{ с}$  – большая постоянная времени, равная постоянной времени статорной обмотки;

$T_{\mu 1} = T_I = 0,000125 \text{ с}$  – эквивалентная малая постоянная времени контура тока, равная постоянной времени инвертора.

### 3.4. Синтез и настройка контура скорости

Регулятор скорости представляет собой детализированную структурную схему ПИ-регуляторов. На вход регулятора скорости поступает разность сигналов задания скорости и обратной связи по скорости. С выхода регулятора скорости на вход регулятора тока по оси  $q$  поступает разность сигналов задания тока. Структурная схема контура скорости представлена на рисунке 3.6.

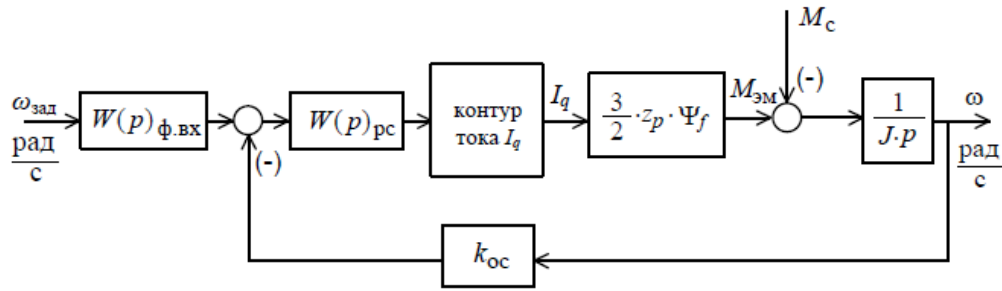


Рисунок 3.6 Структурная схема контура скорости.

Контур содержит эквивалентный контур тока с передаточной функцией:

$$W_{C(s)} = \frac{1 / K_{oc1}}{T_C \cdot s + 1} = \frac{1 / 0,02}{0,00044 \cdot s + 1}, \quad (3.18)$$

где  $T_C = a_k \cdot T_{\mu 1} = 0,00025$  с - эквивалентная постоянная контура тока.

Коэффициент усиления блока момента:

$$K_{Te} = \Psi_f \cdot p \cdot 1,5 = 0,192 \cdot 2 \cdot 1,5 = 0,576. \quad (3.19)$$

Двигатель представлен интегрирующим звеном с постоянной времени  $T_{Int} = 1$  с и коэффициентом усиления

$$K_{Int} = 1 / J = 1 / 0,011 = 90,9. \quad (3.20)$$

Коэффициент обратной связи по скорости равен:

$$K_{oc2} = 1 / 157,07. \quad (3.21)$$

Расчёт параметров регулятора скорости произведём по симметричному оптимуму. Применяется пропорционально-интегральный регулятор с передаточной функцией вида:

$$W_{pez(s)} = \kappa_{pez} \frac{T_{уз} \cdot p + 1}{p} = 119,36 \frac{0,001 \cdot p + 1}{p}, \quad (3.22)$$

$$\text{где } \kappa_{pez} = \frac{T_{Int} \cdot K_{oc1} \cdot J}{T_{\mu 3} \cdot a_k \cdot K_{Te} \cdot K_{oc3}} = \frac{1 \cdot 0,02 \cdot 0,011}{0,00025 \cdot 2 \cdot 0,576 \cdot 0,0064} = 119,36;$$

$T_{\mu 3} = T_C = 0,00025$  с – малая постоянная времени контура скорости;

$$T_{из} = a_k \cdot b_k \cdot T_{\mu 3} = 2 \cdot 2 \cdot 0,00025 = 0,001 \text{ с} - \text{эквивалентная постоянная}$$

времени контура скорости;

$$a_k = b_k = 2 - \text{коэффициенты оптимизации.}$$

### 3.5. Описание и моделирование преобразователей фаз и преобразователей координат

Для преобразования токов и напряжений из трехфазной системы координат в двухфазную, а также для преобразования из неподвижной системы координат во вращающуюся используются преобразователи фаз и координат (рисунок 3.1).

Преобразование из трехфазной системы координат А, В, С в неподвижную декартовую систему координат  $\alpha$ ,  $\beta$  носит название «преобразование Парка» и производится в соответствии с выражениями:

$$\begin{cases} I_{1\alpha} = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot I_{1a} - I_{1b} - I_{1c}); \\ I_{1\beta} = \frac{I_{1a} + I_{1b}}{\sqrt{3}}. \end{cases} \quad (3.23)$$

Графическое представление последовательности данного преобразования приведено на рисунке 3.7.

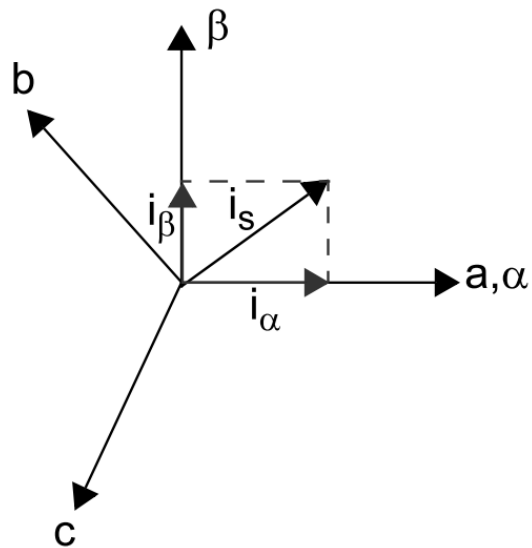


Рисунок 3.7 Графическое представление преобразования Кларка

Последовательность преобразования токов из неподвижной системы координат  $\alpha, \beta$  к вращающейся системе координат  $d, q$  (преобразование Парка-Горева) производится в соответствии с уравнениями:

$$\begin{cases} I_{1d} = I_{1\alpha} \cdot \cos \theta_0 + I_{1\beta} \cdot \sin \theta_0; \\ I_{1q} = -I_{1\alpha} \cdot \sin \theta_0 + I_{1\beta} \cdot \cos \theta_0, \end{cases} \quad (3.23)$$

где  $\theta_0$  – угол положения вектора потокосцепления, он же угол между координатными осями неподвижной и вращающейся систем. Графическое представление последовательности преобразования Парка-Горева приведено на рисунке 3.8.

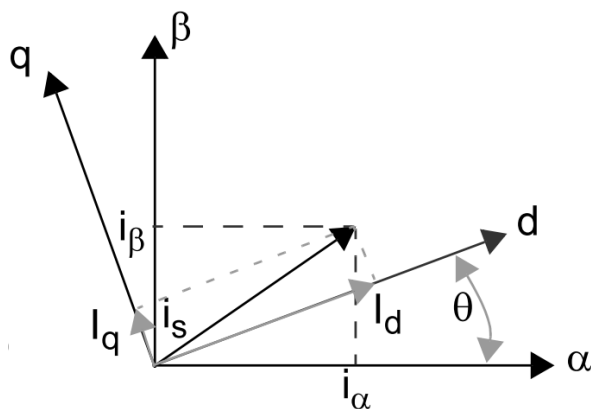


Рисунок 3.8 Графическое представление преобразования Парка-Горева

Для реализации прямых преобразований Кларка и Парка-Горева в среде MATLAB Simulink создается структурная схема, соответствующая выражениям, представленным выше. Прямые преобразователи фаз и координат в данном случае соединяются последовательно и в дальнейшем будут представлены одним блоком «ПКПФ» (рисунок 3.13). Структурная схема прямых преобразований Кларка и Парка-Горева, соединенных последовательно представлена на рисунке 3.9.

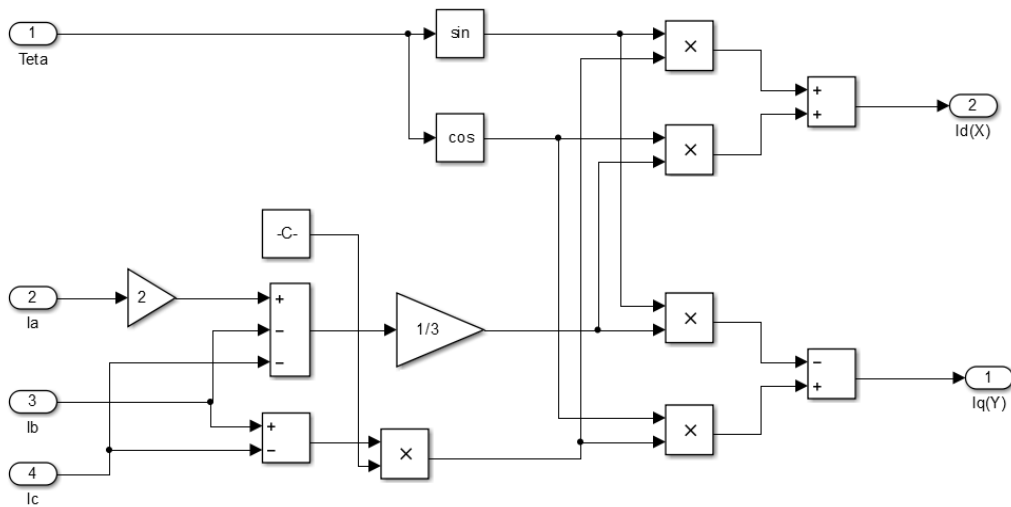


Рисунок 3.9 Структурная схема прямого преобразований Кларка и Парка-Горева, соединенных последовательно

Последовательность приведения напряжений из вращающейся системы координат  $d, q$  к неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  (обратное преобразование Парка-Горева) производится в соответствии с соотношениями:

$$\begin{cases} U_{1\alpha} = U_{1d} \cdot \cos \varphi_0 - U_{1q} \cdot \sin \varphi_0; \\ U_{1\beta} = U_{1d} \cdot \sin \varphi_0 + U_{1q} \cdot \cos \varphi_0. \end{cases} \quad (3.24)$$

Графическое представление последовательности данного преобразования приведено на рисунке 3.10

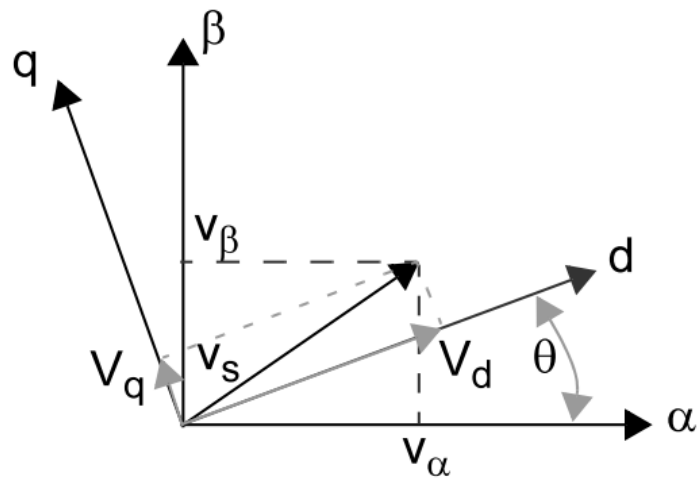


Рисунок 3.10 Графическое представление обратного преобразования Парка-Горева

Преобразование из неподвижной декартовой системы координат  $\alpha, \beta$  в систему координат  $a, b, c$  (обратное преобразование Кларка) производится в соответствии с выражениями:

$$\begin{cases} U_{1a} = U_{1\alpha}; \\ U_{1b} = -\frac{1}{2}U_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}U_{1\beta}; \\ U_{1c} = -\frac{1}{2}U_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{1\beta}. \end{cases} \quad (3.25)$$

Графическое представление последовательности данного преобразования приведена на рисунке 3.11.

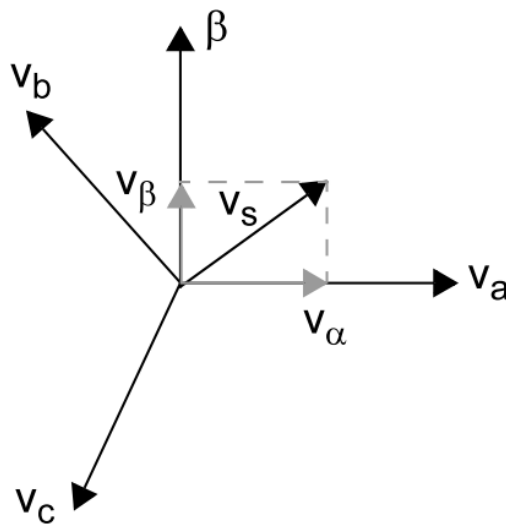


Рисунок 3.11 Графическая иллюстрация обратного преобразования Кларка

Для реализации обратного преобразования Кларка и Парка-Горева в среде MATLAB Simulink создается структурная схема, соответствующая выражениям, представленным выше. Обратные преобразователи фаз и координат в данном случае соединяются последовательно и в дальнейшем будут представлены одним блоком «ПКПФ1» (рисунок 3.13). Структурная схема прямых преобразований Кларка и Парка-Горева, соединенных последовательно представлена на рисунке 3.12.

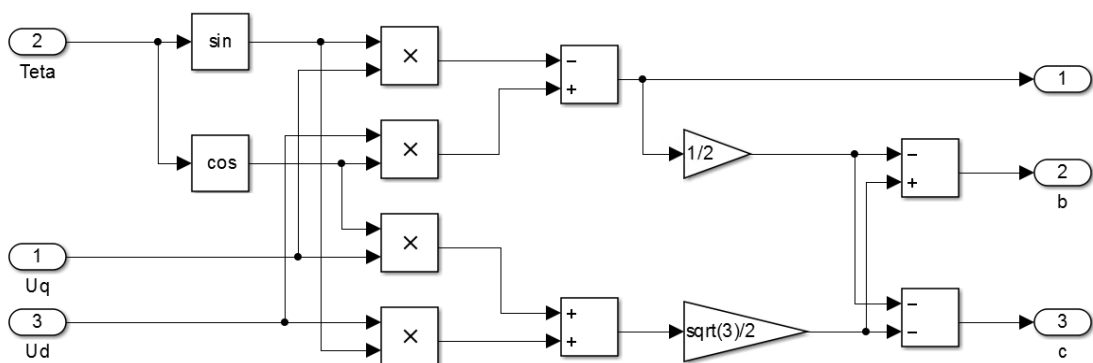


Рисунок 3.12 Структурная схема обратного преобразований Кларка и Парка-Горева, соединенных последовательно

### **3.6.Имитационное моделирование вентильного электропривода в Matlab SIMULINK**

Главным пунктом при проектировании систем управления или сложных электромеханических систем является моделирование. Модель привода с одной стороны должна быть достаточно подробной, чтобы соответствующее ей математическое описание было достоверно, с другой стороны она должна быть максимально простой, чтобы изучение динамических свойств механизма с ее помощью было реально осуществимым.

Имитационное моделирование позволяет заменить реальные наблюдения, которые необходимы для получения конкретных результатов, создание и анализ которых несут за собой значительные материальные и трудовые затраты. Так же имеют место случаи, когда проводить реальные эксперименты запрещается ввиду тех или иных причин. В некоторых случаях имитационное моделирование используется, когда построить аналитическую модель нельзя из-за ряда случайных факторов, последствий и причинных связей. Еще данный метод исследования применяется в тех случаях, когда необходимо эмулировать поведение какого-либо объекта на протяжении данного отрезка времени. Для этих целей создаются эмуляторы, которые позволяют максимально точно повторить качества реальной системы.

Имитационная модель вентильного электропривода собрана в соответствии с функциональной схемой (рисунок 3.1). Состав блоков соответствует структурным схемам, представленным в пунктах 3.1–3.5 Имитационная модель вентильного двигателя в среде MatLab Simulink представлена на рисунке 3.13

Вентиляторная нагрузка собрана из стандартных блоков библиотеки Simulink и описывается выражением 2.14.



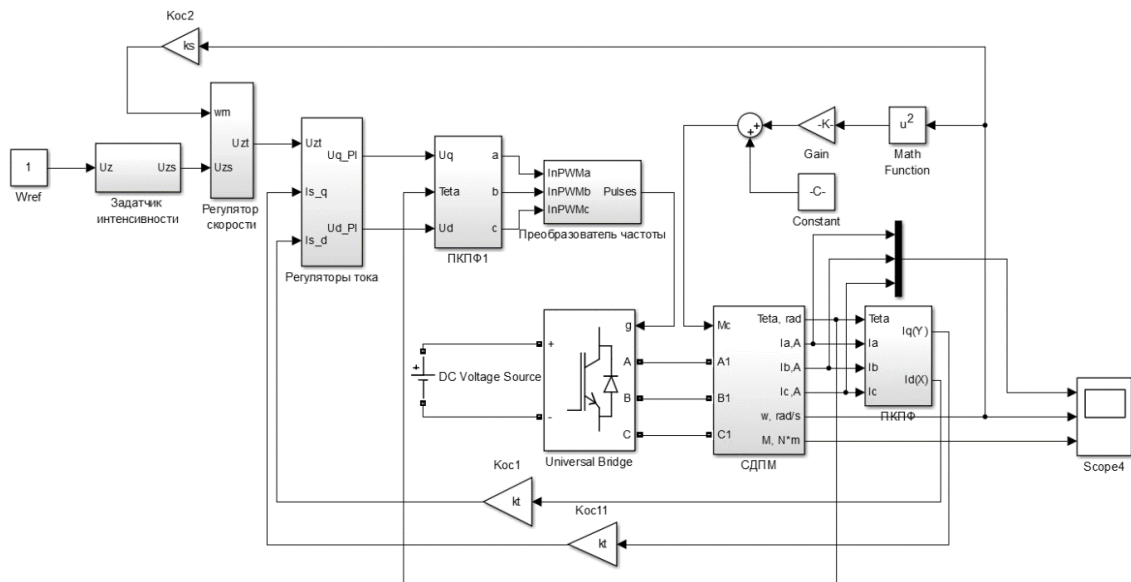


Рисунок 3.13 Имитационная модель ВД.

На рисунке 3.14 представлены графики переходных процессов скорости, момента и тока вентильного двигателя при пуске и последующем набросе нагрузки.

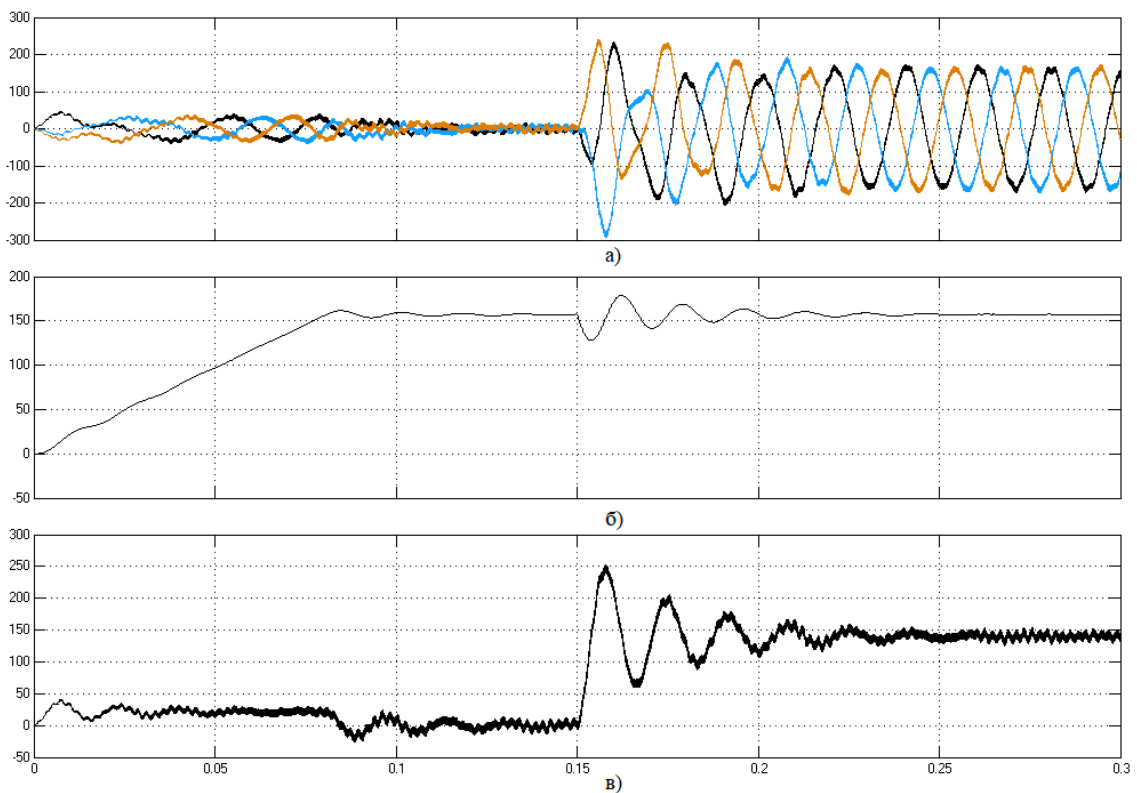


Рисунок 3.14 Графики переходных процессов а) тока; б) частоты вращения и в) момента вентильного электропривода при пуске и набросе.

Наброса нагрузки в реальном электроприводе не происходит. Данное исследование необходимо для проверки адекватности собранной в MATLAB имитационной модели вентиляционного электропривода. Номинальный момент набрасывается в момент времени  $t=0.15\text{с}$  и соответствует номинальной скорости электропривода. Скорость холостого хода соответствует синхронной скорости вращения за вычетом потерь, что означает соответствие нормальному режиму работы модели и позволяет сделать вывод о верности собранной модели.

Самый тяжелый режим работы асинхронного двигателя – пуск, но использование задатчика интенсивности позволяет избежать броски тока и пускового момента. Другим наиболее тяжелым режимом является наброс номинальной нагрузки, который сопровождается броском тока до 250 А и большими колебаниями момента.

Пуск под номинальной нагрузкой будет происходить еще с более большим пусковым током, но в реальной установке этого не происходит. Нагрузка будет возрастать по мере увеличения скорости вращения, т.е. является вентиляторной. Поэтому пуск под номинальной нагрузкой в данной работе не рассматривается. Торможение выбегом занимает сравнительно долгое время и сопровождается броском момента. Поэтому было принято решение осуществлять торможение плавным уменьшением частоты и напряжения. Переходные процессы момента, скорости и тока за цикл работы (пуск, работа в номинальном режиме, торможение) представлены на рисунке 3.14.

Вначале разгона переходный процесс качественно совпадает с процессом при пуске и последующем набросе нагрузки. Далее по мере разгона двигатель выходит на номинальный режим работы с моментом сопротивления на валу 140 Н·м.

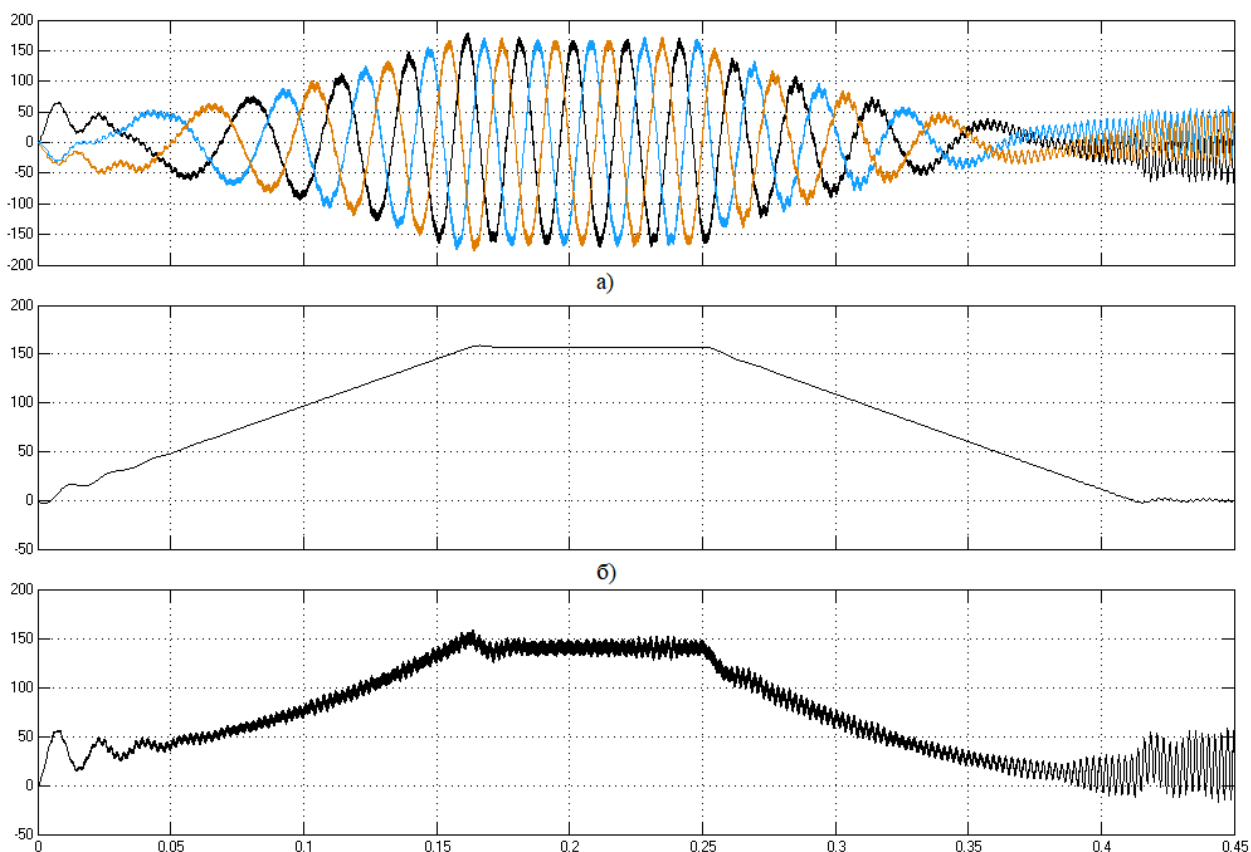


Рисунок 3.14 Графики переходных процессов а) тока; б) частоты вращения; в) момента вентильного электропривода при пуске и торможении под вентиляторной нагрузкой.

### 3.7.Обоснование возможности работы трёхфазного вентильного двигателя в аварийном двухфазном режиме

В качестве примера рассмотрен способ реализации двухфазного режима работы вентильного двигателя на основании диссертации «Микроконтроллерное управление вентильным двигателем в аварийном режиме» автора Однокопылова Г.И. Рассмотрение данной работы необходимо для реализации работы вентильного электропривода при обрыве одной из фаз двигателя [11].

Наиболее интересным представляется для рассмотрения процесс алгоритмического восстановления работоспособности трёхфазного ВД на

основе микроконтроллерной системы управления. Чтобы решить данную задачу необходимо обеспечивать выбор и обоснование угла нагрузки в аварийном двухфазном режиме работы [11].

На рисунке 3.15 приводится схема замещения синхронного двигателя при обрыве фазы «В», которой в установившемся режиме соответствуют уравнения в комплексной форме (3.26) на основе которых была разработана расчётная модель (3.28) в тригонометрической форме [11]:

$$\begin{cases} \dot{U}_A = \dot{I}_A \cdot r + j \cdot \dot{I}_A \cdot X_S + j \cdot \dot{I}_A \cdot X_A - j \cdot \dot{I}_C \cdot X_M - \dot{E}_A \\ \dot{U}_C = \dot{I}_C \cdot r + j \cdot \dot{I}_C \cdot X_S + j \cdot \dot{I}_C \cdot X_C - j \cdot \dot{I}_A \cdot X_M - \dot{E}_C \end{cases} \quad (3.26)$$

где  $-\dot{E}_A, -\dot{E}_C$  – обратные вектора ЭДС фаз А и С соответственно;

$\dot{U}_A, \dot{U}_C$  – вектора фазных напряжений;

$\dot{I}_A, \dot{I}_C$  – вектора фазных токов;

$X_S$  – индуктивное сопротивление рассеяния;

$X_M$  – сопротивление взаимной индукции.

В трёхфазном режиме ВД угол нагрузки задаётся углом  $\theta$  и электромагнитный момент имеет максимум при максимуме активной мощности для углов  $\theta_A = \theta_B = \theta_C = \pi / 2$ . В двухфазном режиме ВД углы  $\theta_A$  и  $\theta_C$  будут разными, т.к. отличаются в общем случае вектора фазных напряжений  $\dot{U}_A$  и  $\dot{U}_C$  по амплитуде, а их фазовые сдвиги  $\varphi_A$  и  $\varphi_C$  относительно векторов тока могут иметь разные знаки [11].

Схема замещения СДПМ в двухфазном режиме работы представлена на рисунке 3.15.

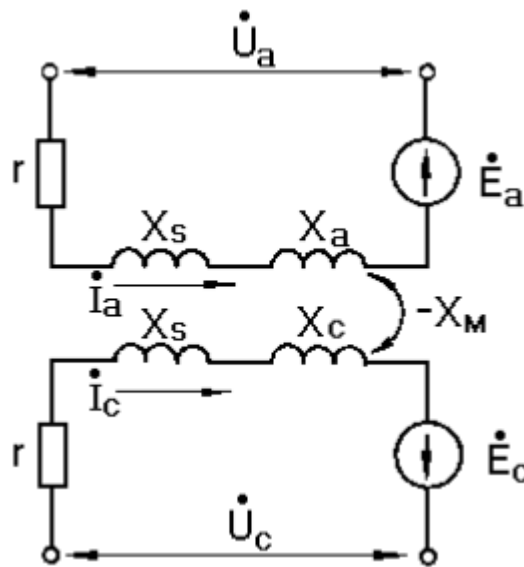


Рисунок 3.15 Схема замещения СДПМ в двухфазном режиме работы.

Поэтому построение системы управления ВД в двухфазном режиме с использованием углов  $\theta_A$  и  $\theta_C$  в качестве параметров, определяющих максимум момента нецелесообразно, так как это приведет к неоправданному усложнению системы управления электроприводом. Что доказывает скоростная характеристика ВД в аварийном двухфазном режиме аварийном, полученная из соотношений, вытекающих из уравнений (3.26) имеющая вид [11]:

$$n = - \frac{60 \left[ U_C \cdot \cos \theta_C - U_A \cdot \cos \theta_A + I \cdot r \cdot (\cos \psi_A - \cos(\pi / 6 - \psi_A)) \right]}{p \cdot I \left[ (L_A + L_C) (\cos(\pi / 6 + \psi_A) + \sin \psi_A) - 2 \cdot M \cdot \cos(\psi_A - \pi / 6) \right]}. \quad (3.27)$$

Выбор и оптимизация значения угла нагрузки в аварийном двухфазном режиме могут быть выполнены на основе модели расчёта суммарных активной и реактивной мощностей ВД:

$$\left\{ \begin{array}{l}
U_A = I_{AM} \cdot \sin(\omega t + \pi + \psi_A) \cdot r + I_{AM} \cdot \sin(\omega t + \frac{3\pi}{2} + \psi_A) \cdot (L_A + L_S) \cdot \omega + \\
+ \text{sign}(\varphi_C) \cdot I_{CM} \cdot \sin(\omega t + \frac{5\pi}{6} + \psi_A) \cdot \omega \cdot L_M + E_{AM} \cdot \sin(\omega t + \pi); \\
U_C = I_{CM} \cdot \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \psi_A) \cdot r + I_{CM} \cdot \sin(\omega t + \frac{11\pi}{6} + \psi_A) \cdot (L_A + L_S) \cdot \omega + \\
+ \text{sign}(\varphi_A) \cdot I_{AM} \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} + \psi_A) \cdot \omega \cdot L_M + E_{CM} \cdot \sin(\omega t + \frac{5\pi}{3}); \\
P_\Sigma = \frac{1}{2} (U_{AM} \cdot I_{AM} \cdot \cos \varphi_A + U_{CM} \cdot I_{CM} \cdot \cos \varphi_C); \\
Q_\Sigma = \frac{1}{2} (U_{AM} \cdot I_{AM} \cdot \sin \varphi_A + U_{CM} \cdot I_{CM} \cdot \sin \varphi_C),
\end{array} \right. \quad (3.28)$$

где  $I_{AM}, I_{CM}$  – амплитудные значения векторов токов;

$E_{AM}, E_{CM}$  – амплитудные значения векторов фазных ЭДС;

$\varphi_A, \varphi_C$  – углы между векторами токов фаз А и С соответственно;

$\text{sign}(\varphi)$  – функция, принимающая значения (-1;0;1) в зависимости от знака угла  $\varphi$ .

В результате расчетов были получены следующие функциональные зависимости для СД ДСТ–0,18:  $P_\Sigma = f(I, \psi)$ ,  $P_\Sigma = f(n, \psi)$ ,  $Q_\Sigma = f(I, \psi)$ ,  $Q_\Sigma = f(n, \psi)$ . Зависимости  $Q_\Sigma = f(I, \psi)$ ,  $Q_\Sigma = f(n, \psi)$  представлены в приложении Б на рисунке Б.1.

Двигатель СД ДСТ–0,18 в данной работе используется для демонстрации режима работы, он имеет сравнительно малую мощность (по сравнению с двигателем необходимым для электропривода, используемого в данной работе). Двигатель СД ДСТ–0,18 можно исследовать, так как и любой другой синхронный двигатель любой мощности.

На рисунке 3.16 видно, что при аварийной ситуации момент двигателя с номинальной нагрузкой стремится к нулю как и скорость вращения ротора,

при активизации алгоритма восстановления, включающего угол нагрузки  $\psi_A = \pi / 6$ , двигатель имеет провал электромагнитного момента, что видно по суммарному току  $I_\Sigma$ , двигатель продолжает работу с повышенной живучестью при обрыве фазы.

На рисунке 3.16 приведены временные диаграммы графики переходных процессов в аварийном двухфазном режиме трёхфазного ВД выполненного по схеме с развязанными фазами [12, 13] и полученные на основе экспериментальной испытательной установки [14] с алгоритмами восстановления работоспособности вентильного двигателя.

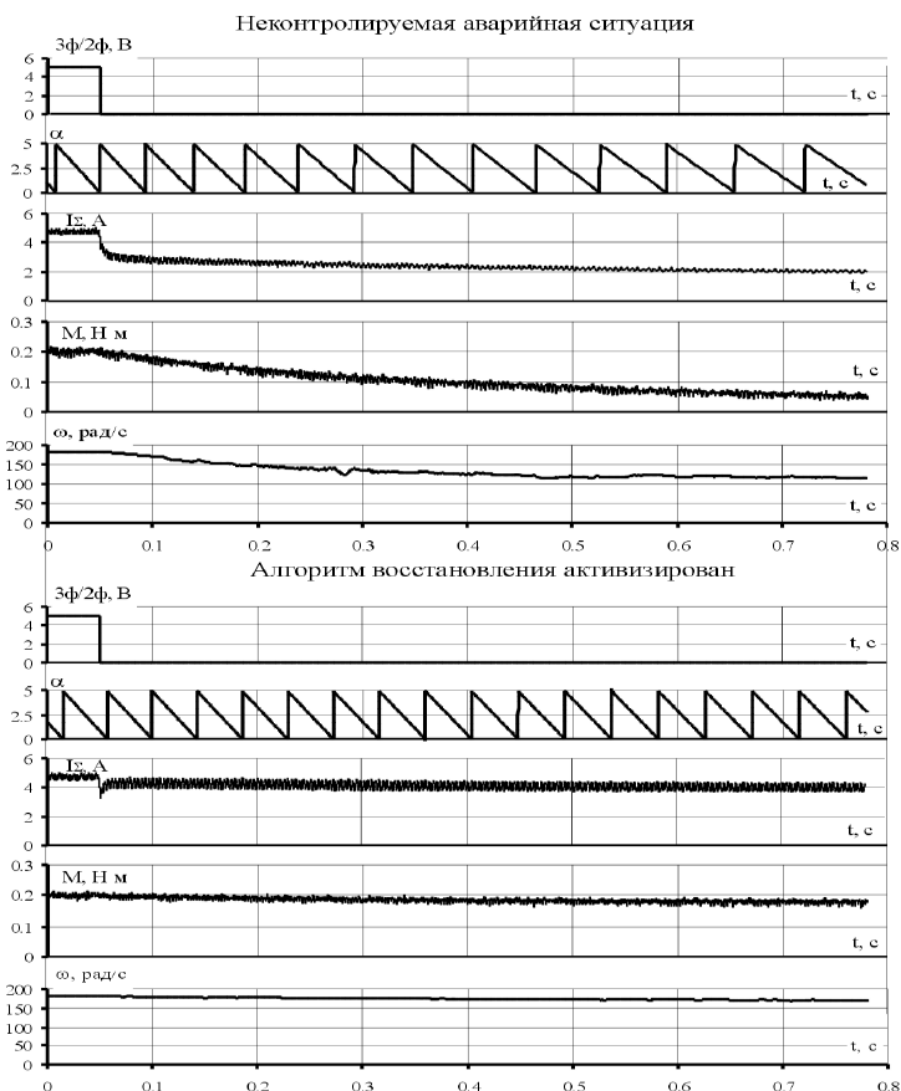


Рисунок 3.16 Временные диаграммы переходных процессов в двухфазном режиме работы.

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

Данный раздел выпускной квалификационной работы предназначен для определения ресурсоэффективности технического проекта, с рассмотрением планово-временных и материальных показателей процесса проектирования. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- составление перечня работ и оценка времени их выполнения;
- составление сметы затрат на реализацию проекта;
- расчет интегрального показателя ресурсной эффективности проекта.

### **4.1. Организация работ технического проекта**

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках технического проектирования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения проектирования изделия.

#### **4.1.1. Структура работ в рамках технического проектирования**

Для выполнения технического проекта образуется рабочая группа, в составе которой могут быть научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты. Численность групп может быть разной. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность действующих лиц.

В данном разделе составлен список этапов и работ в рамках проведения проекта и произведено разделение действующих лиц по видам работ.

Каждому номеру этапа соответствуют нижеследующие виды выполняемых работ, представленные в таблице 4.1:



№1 – составление и утверждение технического задания – включает в себя изучение первичной информации об объекте, формулировку требований к техническому проекту, составление задания и плана на работу;

№2 – подбор и изучение материалов по теме – ознакомление с предметом работы, изучение различных источников, касающихся различных сторон технического проекта;

№3 – проведение расчётов параметров вентильного двигателя и системы его управления – расчёт и выбор двигателя, подбор необходимых технических средств системы автоматизации;

№4 – моделирование системы электропривода – построение имитационной модели электропривода и настройка проекта в программной среде Matlab;

№5 – моделирование процессов работы электропривода – получение экспериментальных данных работы и поведения электропривода при номинальных параметрах и аварийных режимах работы;

№6 – анализ полученных данных – анализ и исследование полученных при помощи моделирования результатов режимов работы электропривода.

№7 – оценка эффективности полученных результатов – обоснование целесообразного использования технических решений, рассмотренных в рамках исследовательской работы с учетом ресурса и энергоэффективности;

№8 – составление пояснительной записки – включает в себя ознакомление руководителя с выполненными работами, возможные корректировки и исправления, составление пояснительной записки;

№9 – проверка выпускной квалификационной работы руководителем – включает в себя окончательную проверку руководителем, устранение недочетов дипломником;

№10 – подготовка к защите ВКР – подготовка и согласование презентации с преподавателем, предварительная защита ВКР.

Таблица 4.1 – Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления технического проекта	2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник
Расчет и выбор оборудования, моделирование проекта и испытание рабочей модели	3	Проведение расчетов параметров вентильного двигателя и системы его управления	Дипломник, научный руководитель
	4	Моделирование системы электропривода	Дипломник, научный руководитель
	5	Моделирование процессов работы электропривод	
	6	Анализ полученных данных	Дипломник, научный руководитель
	7	Оценка эффективности полученных результатов	Дипломник, научный руководитель
Оформление отчета по техническому проектированию	8	Составление пояснительной записки	Дипломник, научный руководитель
	9	Проверка выпускной квалификационной работы руководителем	Дипломник, научный руководитель
Сдача выпускной квалификационной работы	10	Подготовка к защите ВКР	Дипломник, Научный руководитель

#### 4.1.2. Определение трудоемкости выполнения ТП

Трудовые затраты часто составляют основную часть стоимости разработки, поэтому ключевым моментом служит определение трудоемкости работ каждого исполнителя.

Трудоемкость выполнения выпускной работы оценивается экспертным путем в рабочих днях и носит случайный характер, т.к. зависит от изобилия трудно рассматриваемых факторов. Для выявления ожидаемого значения трудоемкости используется следующая формула [15]:

$$t_{OЖi} = \frac{3t_{\min.i} + 2t_{\max.i}}{5}, \quad (4.1)$$

где  $t_{OЖi}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$  – ой работы раб. дн.;

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

$t_{\max.i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), раб. дн. В таблице 4.2 приведены ожидаемая трудоемкость и время выполнения работ.

Таблица 4.2 – Оценка продолжительности работ

№	Название работы	Трудоёмкость работ, раб. дн.						Длительность работ, раб. дн.	
		Мин. трудоемкость		Макс. трудоемкость		Ожидаемая трудоемкость			
		Науч. рук-ль	Дипломник	Науч. рук-ль	Дипломник	Науч. рук-ль	Дипломник	Науч. рук-ль	Дипломник
1	Составление и утверждение технического задания	1	-	1	-	1	-	1	-
2	Подбор и изучение материалов по теме	-	12	-	15	-	13,2	-	13
3	Проведение расчетов параметров вентильного двигателя и системы его управления	1	10	1	12	1	10,8	1	11
4	Моделирование системы электропривода	1	20	1	22	1	20,8	1	21
5	Моделирование процессов работы электропривод	-	19	-	21	-	19,8	-	20
6	Анализ полученных данных	1	6	1	8	1	6,8	1	7
7	Оценка эффективности полученных результатов	1	5	1	7	1	5,8	1	6
8	Составление пояснительной записки	1	13	1	16	1	14,2	1	14
9	Проверка выпускной квалификационной работы руководителем	1	2	1	4	1	2,8	1	3
10	Подготовка к защите ВКР	1	6	3	9	1,8	7,2	2	7

Примечание: минимально и максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы получены на основе экспертных оценок.

### **4.1.3. Разработка графика проведения технического проекта**

Наиболее удобным и наглядным в данном случае является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ [15].

График строится для ожидаемого по длительности исполнения работ в рамках технического проекта, с разбивкой по месяцам и декадам за период времени подготовки ВКР. На основе таблицы 4.2 строим план-график проведения работ (таблица 4.3).

Исходя из составленной диаграммы, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает примерно 12 декад, начиная со второй декады февраля, заканчивая второй декадой июня. Продолжительность выполнения выпускной работы займет 103 рабочих дня. Из них:

- 102 дней – продолжительность выполнения работ инженера;
- 9 дней – продолжительность выполнения работ руководителя.

### **4.2. Составление сметы затрат на разработку ТП**

Смета затрат включает в себя следующие статьи:

- расчет полной заработной платы исполнителей;
- расчет отчислений во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

Таблица 4.3 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп-ли	$T_{Pi}$ , раб. дн.	Продолжительность выполнения работ												
				Февр.		Март			Апрель			Май			Июнь	
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1	■												
2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник	13	■												
3	Проведение расчетов параметров вентильного двигателя и системы его управления	Руководитель	1			■										
		Дипломник	11			■										
4	Моделирование системы электропривода	Руководитель	1													
		Дипломник	21				■									
5	Моделирование процессов работы электропривода	Дипломник	20							■						
6	Анализ полученных данных	Руководитель	1													
		Дипломник	7								■					
7	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	1													
		Дипломник	6									■				
8	Составление пояснительной записки	Руководитель	1													
		Дипломник	14									■				
9	Проверка ВКР руководителем	Руководитель	1													
		Дипломник	3													■
10	Подготовка к защите ВКР	Руководитель	2													■
		Дипломник	7													■

### 4.2.1. Определение стоимости материальных затрат

Производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

### 4.2.2. Полная заработная плата исполнителей

Включается основная и дополнительная заработная плата всех исполнителей, непосредственно участвующих в выполнении данной работы. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Расчет полной заработной платы осуществляется следующим образом:

$$Z_{ЗП} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.2)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата исполнителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot F_{дн}, \quad (4.3)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$F_{дн}$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.  
(табл. 4.3);

$Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_{окл} + Z_{р.к.}}{F_{\delta}}, \quad (4.4)$$

где  $F_{\delta}$  – количество рабочих дней в месяце;

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

$Z_{р.к.}$  – районная доплата, руб.

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 4.4.

Дополнительная заработная плата составляет 12 – 15% от основной, расчет дополнительной и полной заработной платы приведен в таблице 4.5.

Таблица 4.4 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	Районная доплата, руб.	Месячная зарплата, руб.	Среднедневная заработная плата, руб.	Кол-во, раб. дн.	Основная заработная плата руб.
Руководитель	24 960	7 488	32 448	1 248	9	11200
Дипломник	12 300	3 690	15 990	615	102	62700
Итого						739900

Таблица 4.5 – Расчет дополнительной и полной заработной платы

Исполнители	Коэф. доплаты	Основная заработная плата руб	Дополнительная заработная плата руб	Полной заработная плата, руб.
Руководитель	0,15	11200	1700	12900
Дипломник	0,12	62700	7500	70200
Итого:		73900	9200	83100

#### 4.2.3. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot Z_{ЗП}, \quad (4.5)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

На 2019 г. в соответствии с Федеральным законом от 28.11.2018 №446 – ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2%.

Отчисления во внебюджетные фонды составят:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot Z_{ЗП} = 30,2\% \cdot 83,1 = 25,1 \text{ тыс.руб.}$$

#### 4.2.4. Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов проекта, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Величина накладных расходов принимается в размере 16% от общей суммы затрат.

#### 4.2.5. Формирование сметы проекта

Рассчитанная величина затрат технического проекта является основой для формирования сметы проекта, которая при заключении договора с заказчиком защищается организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку технической продукции [15].

Определение суммы затрат на технический проект приведено в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Смета технического проекта

Наименование	Сумма, тыс. руб.	Удельный вес, %
Затраты по полной заработной плате исполнителей	83,1	64,5
Отчисления во внебюджетные фонды	25,1	19,5
Накладные расходы	20,8	16,0
Сумма затрат ТП	129,0	100,0

Была рассчитана продолжительность выполнения технического проекта, которая составляет 126 календарных или 103 рабочих дня. Составлен календарный график выполнения работ. Смета затрат на разработку технического проекта составляет 129 тыс.руб, из которых более половины (64 %) составляют затраты на оплату труда.



### 4.3. Определение ресурсоэффективности проекта

Определение ресурсоэффективности проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности по формуле [15]:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.6)$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  – весовой коэффициент разработки;

$b_i$  – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Оценку характеристик проекта проведем на основе критериев, соответствующих требованиям к системе электроснабжения промышленных предприятий:

- гибкость: возможность частых перестроек технического процесса, расширение системы за счет введения новых технологических модулей;
- безопасность: обеспечение безопасности работ при эксплуатации и ремонте оборудования;
- помехоустойчивость: максимальное значение электромагнитных помех, воздействующих на установку, при котором она может продолжать работу с требуемыми рабочими характеристиками;
- энергосбережение – малое потребление электроэнергии оборудованием;
- надежность – способность объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах;
- материалоемкость – расход запасов, который приходится на денежную единицу готовой продукции.

Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки
1. Гибкость	0,1	4,0
2. Безопасность	0,15	4,0
3. Помехоустойчивость	0,10	4,0
4. Энергосбережение	0,25	5,0
5. Надежность	0,30	5,0
6. Материалоемкость	0,10	4,0
Итого	1,00	

Интегральный показатель ресурсоэффективности [15]:

$$I_{pi} = 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 = 4,55.$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение (по 5 – балльной шкале), что говорит об эффективности использования технического проекта. Высокие баллы безопасности, надёжности и энергосбережения позволяют судить о надёжности системы.

В результате выполнения поставленных задач по данному разделу, можно сделать следующие выводы:

- при планировании технических работ был разработан график занятости для научного руководителя и инженера, составлена ленточная диаграмма Ганта, позволяющая оптимально скоординировать работу исполнителей;
- составление сметы технического проекта позволило оценить первоначальную сумму затрат на реализацию технического проекта;
- оценка ресурсоэффективности проекта, проведенная по интегральному показателю, дала высокий результат (4,55 по 5 – балльной шкале), что говорит об эффективности реализации технического проекта.

## **5. Социальная ответственность**

Цель данного раздела – анализ вопросов, посвященных организации рабочего места, производственной санитарии, техникой производственной безопасности, охране окружающей среды и обеспечению безопасности при ЧС. Основная задача – соответствие допустимым нормам условий труда для улучшения последних, повышения производительности труда, сохранения работоспособности, а также охраны окружающей среды.

В ходе работы производится сбор информации об исследуемом объекте, её обработка, проведение математических расчетов. Итогом является представление имитационных моделей объектов исследования, составление рекомендаций касательно их работы, а также дополнительные комментарии к результатам исследования. Объект исследования широко применяется в различных сферах промышленного производства, в данной работе рассматривался как электропривод центробежного насоса.

Работа выполняется в закрытом помещении (127 аудитория 8 корпуса НИ ТПУ), оборудованном компьютерной техникой, которая необходима для выполнения аналитических исследований, связанных с использованием стандартного и специального программного компьютерного обеспечения, также помещение оборудовано программно-аппаратными комплексами (ПАК РВ), офисной техникой – двумя многофункциональными устройствами (МФУ).

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

При размещении рабочих мест с ПЭВМ, согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, расстояние между рабочими столами с видеомониторами (в направлении тыла поверхности одного видеомонитора и экрана другого

видеомонитора) должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов - не менее 1,2 м [16].

Рабочие места с ПЭВМ при выполнении работы, требующей значительного умственного напряжения или высокой концентрации внимания, рекомендуется изолировать друг от друга перегородками высотой 1,5 - 2,0 м.

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 - 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы. При этом допускается использование рабочих столов различных конструкций, отвечающих современным требованиям эргономики. Поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения 0,5 - 0,7.

Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ.

Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию.

## 5.2. Производственная безопасность

При выполнении работ в аудитории на работника возможно негативное воздействие вредных и опасных производственных факторов, представленных в таблице 5.1 [17]:

Таблица 5.1 – Опасные и вредные производственные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
1. Отклонение показателей микроклимата	ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
2. Превышение уровня шума	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
3. Повышенный уровень электромагнитных излучений.	ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.
4. Недостаточная освещенность рабочей зоны	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
6. Повышенный уровень статического электричества.	ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.
7. Опасность поражения электрическим током.	ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

Далее более подробно рассмотрены ОПФ и ВПФ, воздействующие на работника, возникшие в связи с разработкой данной системы.

### 5.2.1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды

#### Производственный микроклимат

Микроклимат – это климат внутренней среды производственных помещений, который в производственных условиях определяется следующими параметрами [18]:

- температурой воздуха  $t$  °С;
- относительной влажностью воздуха  $\varphi$ , %;
- скоростью движения воздуха  $v$ , м/с;
- интенсивностью теплового излучения  $I$ , Вт/м<sup>2</sup>.

Лаборатория является помещением категории Ia (с энергозатратами до 120 ккал/ч, производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением), поэтому должны соблюдаться следующие требования, приведенные в таблице 5.2:

Таблица 5.2 – Оптимальные параметры микроклимата во всех типах учебных помещений с использованием ПЭВМ

Период года	Категория работ	Температура воздуха, °С	Относ.влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia	22-24	40-60	0,1
Теплый	Ia	23-25	40-60	0,1

Интенсивность теплового облучения работающих от нагретых поверхностей технологического оборудования не должна превышать 100 Вт/м<sup>2</sup> при облучении не более 25% поверхности тела. Мероприятия по

созданию условий для нормальной терморегуляции организма, согласно ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ [18]:

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

Для создания и поддержания в лаборатории оптимальных значений температуры, влажности, чистоты и скорости движения воздуха, в холодное время года используется водяное отопление, в теплое время года – кондиционирование воздуха. Устройства систем вентиляции используются круглогодично, т.к. воздух загрязнен вредными парами и пылью. Теплозащитные экраны применяются по необходимости, в основном в теплый период.

В помещениях, оборудованных ПЭВМ, проводится ежедневная влажная уборка и периодическое проветривание после каждого часа работы на ЭВМ.

### **Освещение**

Рабочее освещение необходимо предусматривать для всех помещений зданий, а также участков открытых пространств, предназначенных для работы, прохода людей и движения транспорта. Для помещений, имеющих зоны с разными условиями естественного освещения и различными режимами работы, необходимо наличие отдельного управления освещением данных зон [19].

Требования к освещенности в помещениях, где установлены ПЭВМ, следующие: при выполнении зрительных работ высокой точности (наименьший размер объекта различения 0,3...0,5мм) общая освещенность должна составлять 300 лк, а комбинированная – 750 лк; при выполнении работ

средней точности (наименьший размер объекта различения 0,5...1,0 мм) – 200 и 300 лк для общей и комбинированной освещенности соответственно. Также, все поле зрения должно быть освещено равномерно, степень освещения помещения и яркость экрана компьютера должны быть примерно на одном уровне, т.к. яркий свет в районе периферийного зрения значительно увеличивает напряженность глаз и, как следствие, приводит к их быстрой утомляемости. Оценка освещенности рабочей зоны необходима для обеспечения нормативных условий работы в помещениях.

При выполнении работ категории высокой зрительной точности величина коэффициента естественного освещения (КЕО) должна быть не ниже 1,5%, а при зрительной работе средней точности КЕО должен быть не ниже 1,0%. Для освещения помещений применяются, как правило, газоразрядные лампы низкого и высокого давления – люминесцентные, металлогенные, натриевые, ксеноновые и дуговые ртутные лампы, которые объединяются в светильники.

Кроме этого, нормируются светотехнические параметры дисплея, размеры монитора и символов, цветовые параметры, яркость дисплея, частота обновления кадров, которые влияют на состояние зрения. Слишком высокая освещенность дисплея приводит к уменьшению контраста изображения монитора, а низкая ухудшает восприятие информации, что вызывает усталость глаз. Основными осложнениями при длительной работе на компьютере являются утомление глаз и возникновение головной боли. Существенным фактором, влияющим на утомление глаз, является частота перевода взгляда с дисплея на клавиатуру. Нормируемые параметры монитора компьютера представлены в таблице 5.3.



Таблица 5.3 – Допустимые визуальные параметры устройств отображения информации

Параметры	Допустимые значения
Яркость белого поля	Не менее 35 кд/кв.м
Неравномерность яркости рабочего поля	Не более $\pm 20\%$
Контрастность (для монохромного режима)	Не менее 3:1
Временная нестабильность изображения	Не должна фиксироваться
Пространственная нестабильность изображения	Не более $2 \times 10^{-4L}$ , где L – расстояние наблюдения, мм

### Уровень шума

В помещениях с низким уровнем общего шума, каким является лаборатория, источниками шумовых помех могут стать вентиляционные установки, кондиционеры или периферийное оборудование для ЭВМ (плоттеры, принтеры и др). Кроме этого шум может проникать извне через открытые проемы форточек, окон и дверей.

Воздействие этих шумов отрицательно сказывается на эмоциональном состоянии персонала, что уменьшает производительность труда и качество выполняемой работы. Длительное воздействие шума может привести к ухудшению слуха, а в отдельных случаях – к глухоте.

Эквивалентный уровень звука не должен превышать 50 дБА [20]. Для выполнения этих условий рекомендуется применять звукопоглощающее покрытие стен. Также, для снижения уровня шума можно производить:

- облицовку потолка и стен звукопоглощающим материалом (снижает шум на 6-8 дБ);
- экранирование рабочего места (постановкой перегородок, диафрагм);

- установку в компьютерных помещениях оборудования, производящего минимальный шум;
- рациональную планировку помещения.

Допускаемые уровни звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах пользователей персональных компьютеров приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Допускаемые уровни звукового давления на рабочих местах

Уровни звукового давления, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами									Уровни звука, дБА
32 Гц	63 Гц	125 Гц	250 Гц	500 Гц	1 кГц	2 кГц	4 кГц	8 кГц	
86 дБ	71 дБ	61 дБ	54 дБ	49 дБ	45 дБ	42 дБ	40 дБ	38 дБ	50

### Уровень электромагнитных излучений

Оценка и нормирование электростатического поля (ЭСП) осуществляется по уровню электрического поля дифференцированно в зависимости от времени его воздействия на работника за смену [21].

Предельно допустимый уровень напряженности ЭСП ( $E_{пду}$ ) при воздействии менее одного часа за смену устанавливается равным 60 кВ/м.

При воздействии ЭСП более одного часа за смену  $E_{пду}$  определяются по формуле:

$$E_{пду} = \frac{60}{\sqrt{t}}, \quad (5.1)$$

где  $t$  – время воздействия, ч.

При напряженностях менее 20 кВ/м время пребывания в электростатических полях не регламентируется. При напряженностях, превышающих 60 кВ/м, работа без применения средств защиты не допускается.

Предельно допустимые уровни электромагнитного поля для ПК приведены в таблице 5.5 [21].

Таблица 5.5 – Предельно допустимые уровни электромагнитного поля

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

Основными источниками электромагнитных полей в помещении являются системы потребления электроэнергии, мониторы, оборудование, потребляющее электроэнергию. Однако основным источником электромагнитного излучения является персональный компьютер (ПК), частоты излучения приведены в таблице 5.6 [21].

Таблица 5.6 – ПК как источник электромагнитных полей

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

Монитор создает вокруг себя ЭМП как низкой, так и высокой частоты, что способствует появлению электростатического поля и ведет к деионизации

воздуха вокруг, а это влияет на развитие клеток тканей организма. В целях предосторожности следует обязательно использовать защитные экраны, а также рекомендуется ограничивать продолжительность работы с экраном ВДТ, не размещать их концентрированно в рабочей зоне и выключать их, если их не используют. Наряду с этим нужно устанавливать в помещении с ВДТ ионизаторы воздуха, чаще проветривать помещение и, хотя бы один раз в течение рабочей смены очищать экран от пыли.

## **5.2.2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды**

### **Электробезопасность**

Электробезопасность – система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих вредное и опасное воздействие на работающих электрического тока и электрической дуги. Любое производство характеризуется широким применением различных электроустановок. В связи с этим в общей системе инженерно-экологических мероприятий имеют важную роль вопросы обеспечения электробезопасности.

В данном помещении присутствуют только электроустановки напряжением до 1кВ. Помещение по классу электробезопасности можно отнести к помещениям без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с изолированными полами, с температурой 18-20°, с влажностью 40-50%). Опасное воздействие электрического тока, электрической дуги проявляется в виде термических, электролитических, механических, биологических поарездений, которые производит электрический ток, проходя через организм человека [22].

Основными техническими средствами защиты являются автоматическое отключение питания (зануление), защитное заземление, устройства защитного

отключения. Наличие данных средств защиты предусмотрено в рабочей зоне помещения. Также периодически проводится инструктаж работников по технике безопасности в целях профилактики [22].

Согласно требованиям ПУЭ, сопротивление защитного заземления не должно превышать:

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

Заземление корпуса ЭВМ обеспечено подведением заземляющей жилы к питающим розеткам. Сопротивление заземления 4 Ом, согласно ПУЭ для электроустановок с напряжением до 1000 В.

Организационные мероприятия, обеспечивающие безопасность использования электроустановок, включают в себя:

- правильный подбор персонала, обслуживающего электроустановки (запрещение использования труда лиц моложе 18 лет, а также необученных и непрошедших медицинское освидетельствование для выполнения работ данного вида);
- обучение правилам безопасности при обслуживании электроустановок, т. е. проведение специального обучения для выполнения работ с повышенной опасностью, аттестации, инструктажей по безопасности труда, разработка и издание инструкций по охране труда, применение средств пропаганды правил электробезопасности (плакатов, видеофильмов и пр.);
- назначение ответственных за электрохозяйство лиц;
- контроль за правильностью устройства электропроводок и установкой электрооборудования в соответствии с ПУЭ;

– проведение периодических осмотров, измерений и испытаний электрооборудования (в сухих помещениях — 1 раз в два года, в сырых — ежегодно, при этом сопротивление рабочей изоляции проводов, кабелей и электрооборудования в процессе эксплуатации не должно быть менее 0,5 и 2 МОм для двойной или усиленной изоляции), а в случае несоответствия предъявляемым требованиям – его ремонта.

### **5.3. Экологическая безопасность**

Технологический процесс исследования системы управления вентильного двигателя, а также её использование не представляет угрозы для окружающей среды. Это связано с тем, что процесс является безотходным, и в течении работы нет выделения опасных для экологического состояния элементов. Показатели выделяемого тепла, электромагнитных излучений также не превышают допустимых значений. Данная система может применяться на любых предприятиях, которые нуждаются в ней.

При обращении с твердыми отходами – бытовой мусор (отходы бумаги, отработанные специальные ткани для протирки офисного оборудования и экранов мониторов, пищевые отходы); отработанные люминесцентные лампы; офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства – надлежит руководствоваться [19]: бытовой мусор после предварительной сортировки складировать в специальные контейнеры для бытового мусора (затем специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку); утратившие 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 СНиП 23-05-95. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1

классу опасности. Интоксикация ртутью возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является сохранность целостности отработанных ртутьсодержащих ламп. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки.

#### **5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Наиболее вероятная чрезвычайная ситуация, которая может возникнуть во время разработки системы управления вентильного двигателя – пожар.

Причинами возникновения пожара могут быть:

- неисправности электропроводки, розеток и выключателей, которые могут привести к короткому замыканию или пробое изоляции;
- использование поврежденных (неисправных) электроприборов;
- использование в помещении электронагревательных приборов с открытыми нагревательными элементами;
- возгорание здания вследствие внешних воздействий;
- неаккуратное обращение с огнем и несоблюдение мер пожарной безопасности.

Для снижения вероятности возникновения пожароопасных ситуаций необходимо производить пожарную профилактику (комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращении пожара, ограничение его распространения, а также создание условий для успешного тушения пожара). Для профилактики пожара чрезвычайно важна правильная оценка пожароопасности здания, определение опасных факторов и обоснование способов и средств оповещения и защиты.

Одно из условий обеспечения пожаробезопасности – ликвидация возможных источников воспламенения.

Порядок действий персонала при возникновении пожара в электроустановке [23]:

1. При появлении признаков возгорания в электроустановке первое, что следует сделать – это оценить ситуацию, составить общее представление о происходящем;
2. Без промедления необходимо сообщить о случившемся вышестоящему персоналу – научному руководителю, заведующему лабораторией и т.д.;
3. Оценив масштаб возгораний, определяется дальнейший порядок действий. Если возгорание не удастся ликвидировать самостоятельно, то необходимо вызвать пожарную охрану по мобильному или стационарному телефону, или внутренней телефонной связи;
4. При прибытии пожарной бригады необходимо встретить ее, предварительно приняв требуемые меры электробезопасности. Также необходимо показать возможные подъездные пути, места заземления техники, место расположения пожарного гидранта и других элементов водоснабжения.

К основным видам техники, предназначенной для защиты различных объектов от пожаров, относятся средства сигнализации и пожаротушения.

Помещения с электрооборудованием должны быть оснащены огнетушителями типа ОУ-2, ОУ-5 или ОП-5 (предназначены для тушения любых материалов, предметов и веществ, а также электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В, применяется для тушения ПК и оргтехники).

Важную роль при возникновении ЧС играет успешная эвакуация людей. Для того чтобы чётко обозначить пути эвакуации, эвакуационные выходы, обеспечивающие безопасность процесса организованного самостоятельного



движения людей из помещений, а также указать расположение пожарного оборудования и средств оповещения о пожаре и напомнить о первоочередных действиях при пожаре применяется план эвакуации.

В разделе «Социальная ответственность» были выявлены и проанализированы вредные и опасные факторы производственной среды, влияющие на жизнь и здоровье людей. Изучен перечень возможных чрезвычайных ситуаций, рассмотрены действия в результате возникновения ЧС и меры по ликвидации её последствий.

Полученные результаты в данном разделе полностью отражают все возможные вредные и опасные факторы, возникающие в процессе работы.

В разделе приведены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, производственная безопасность и документация, регламентирующая действия рабочих, которые её обеспечивают, вопросы, связанные с экологической безопасностью и безопасностью в чрезвычайных ситуациях. Все рассмотренные вопросы имеют определенные правила для рабочих и имеют возможность их внедрения непосредственно на производственном участке.

## Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы были исследованы методы обеспечения надежности вентильного электропривода. Был проведен анализ литературы по тематике исследования. На основании технического задания был выполнен выбор электродвигателя, насосного агрегата и преобразователя частоты. Были рассчитаны и построены механические характеристики вентильного двигателя.

На основе дифференциальных уравнений, описывающих работу трехфазного синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов, была синтезирована математическая модель, позволяющая исследовать рабочие и переходные режимы двигателя.

Разработана имитационная модель, позволяющая исследовать переходные режимы в вентильном электроприводе. В модели применялись ПИ регуляторы тока и скорости, которые подверглись настройке на модульный оптимум. Рассмотрен и изучен алгоритм восстановления работы вентильного двигателя в аварийном двухфазном режиме работы.

Рассчитаны различные виды затрат, проанализирован бюджет затрат на технический проект. Рассмотрены различные вредные и опасные факторы, влияющие на работу проектировщика.

## Список использованных источников

1. Принципы обеспечения живучести синхронного двигателя на основе резервных элементов
2. [Электронный ресурс] Изобретение насоса URL:  
<http://referatsai.nugaspb.ru/istoriya-izobreteniya>(дата обращения 02.04.2019)
3. И.А Розаев, Однокопылов Г.И, «Моделирование вентильно-индукторного электроприво-да в аварийных режимах работы» // Известия Томского политехнического университета. - 2013 - Т. 323 - №. 4. - С. 138-143
4. А.с. № 1262678 (СССР), МКИЗ Н 02 Р 6/02, Н 02 К 29/00. Вентильный электродвигатель / А.А. Иванов, В.К. Лозенко, О.Н. Рублева. – Опубл. в Б.И., 1986, № 37.
5. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о СДПМ URL: <http://> [https://www.vem-group.com/fileadmin/content/pdf/Download/Kataloge/Kataloge/pm\\_en.pdf](https://www.vem-group.com/fileadmin/content/pdf/Download/Kataloge/Kataloge/pm_en.pdf)
6. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о насосах URL: <https://www.ampika.ru/opisanie/NK.pdf>
7. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о преобразователе частоты URL:  
<http://www.vesper.ru/catalog/invertors/ei-p7012/spec-7012>
8. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электрический электропривод привод: учебное пособие. –Томск: пусковой Изд-во ТПУ, 2008. – 244 с.
9. Мигдаленок А.А. Моделирование электропривода на ЭВМ: учебно-методическое пособие / Мигдаленок А.А.; – Минск: БНТУ, 2010. – Ч2. – 94 с.
10. Терёхин В.Б. Разработка моделей элементов и систем автоматизированного электропривода в среде Matlab: учебное пособие / В.Б. Терёхин; – Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2017. – 511 с.

- 11.Однокопылов Г.И. [Автореферат диссертации]//Микроконтроллерное управление вентильным двигателем в аварийном режиме.
- 12.Патент на ПМ №59905 (RU), H02K 29/06, H02P 6/00. Вентильный электропривод со свойством живучести/ Г.И. Однокопылов, К.В.Образцов. -№2006128881; Заявл.08.08.2006; Оpubл.27.12.2006 г. Бюл.№36.
- 13.Патент РФ на изобретение № 2447561(RU), H02P 7/09. Вентильный электропривод с обеспечением свойства живучести/ Г.И.Однокопылов, Ю.Н.Дементьев, И.Г.Однокопылов, К.В.Образцов -№2011112102; Заявл. 30.03.2011; Оpubл10.04.2012 Бюл. № 10.
- 14.Патент РФ на ПМ № 136184(RU), G01R 31/02. Установка для исследований аварийных режимов работы вентильного двигателя/ Г.И.Однокопылов, И.А.Розаев, А.Д.Брагин. -№2013138092; Заявл.14.08.2013; Оpubл.27.12.2013 Бюл. № 36.
- 15.И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие. -Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 36 с.
- 16.СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
- 17.ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
- 18.ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
- 19.СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95
- 20.ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
- 21.ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.
- 22.ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

23. Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

## Приложение А

Таблица А.1 Спецификация преобразователя частоты EI-P7012-030H

Модель EI – P7012 -		030H
Номинальная выходная мощность (мощность применяемого электродвигателя), кВт		22
Выходные характеристики	Полная мощность преобразователя, кВА	30
	Номинальный выходной ток, А	42
	Максимальное выходное напряжение	Трехфазное 380...460 В (пропорционально входному напряжению)
	Максимальная выходная частота	400 Гц
Источник питания	Номинальное входное напряжение (частота)	Трехфазное 380...460 В (50/60 Гц)
	Допустимые колебания входного напряжения (частоты)	+ 10%, - 15% ( $\pm 5\%$ )
Характеристики цепи управления	Метод управления	Синусоидальная широтно-импульсная модуляция
	Диапазон управления по частоте	от 0,1 до 400 Гц
	Точность частотных режимов	Цифровая команда: $\pm 0,01\%$ (от -10°С до +40°С)
		Аналоговая команда: $\pm 0,1\%$ (при 25°С $\pm 10^\circ\text{C}$ )
	Разрешающая способность по частоте	Устанавливается уставкой константы в цифровой форме: 0,1 Гц
		Устанавливается в аналоговой форме: 0,1 Гц
	Разрешение по выходной частоте	0,1 Гц
	Запас по перегрузке	120% от номинального выходного тока в течение 1 мин
	Аналоговый вход задания частоты	0 ... + 10 В ( 20 кОм ), 4 ... 20 мА ( 250 Ом )

Продолжение таблицы А.1

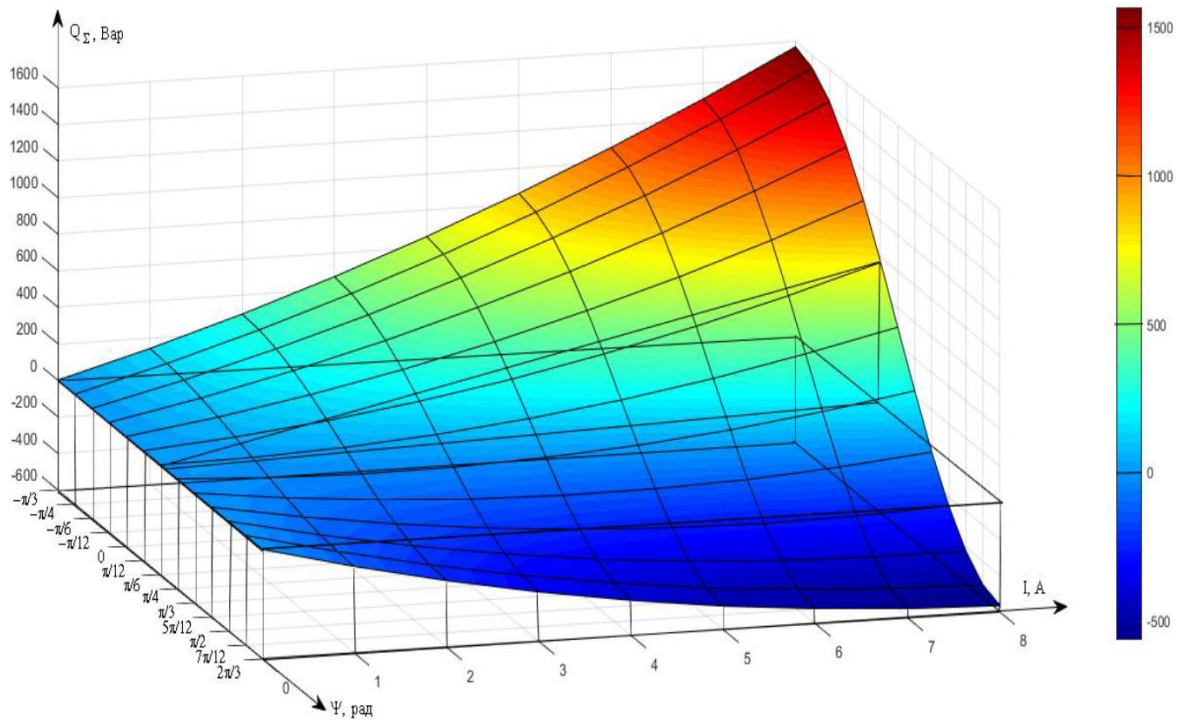
	Время разгона/торможения	от 0,0 до 3600 с (по два значения)
	Тормозящий крутящий момент	до 20% без тормозного резистора; до 100 % - с внешним тормозным резистором
	Тормозной прерыватель	Встроенный (для моделей 010Н – 025Н). Внешний (для моделей 030Н – 450Н)
	Соотношение U/f	Пятнадцать фиксированных соотношений U/f; одно - программируемое
Защитные функции	Защита двигателя от перегрузки	Электронное тепловое реле
	Мгновенная перегрузка по току	Немедленное отключение при токе 180 % от номинального тока преобразователя
	Перегрузка	Отключение через 1 минуту работы при токе 120% от номинального тока преобразователя
	Перегрузка по напряжению	Отключение при напряжении на шине постоянного тока преобразователя более 820 В
	Недостаточное напряжение	Отключение при напряжении на шине постоянного тока преобразователя менее 380 В
	Кратковременное отключение питания	Немедленное отключение при прекращении подачи питания на 15 мс и более. Возможно возобновление управления после восстановления подачи питания при длительности провала не более 2 с (для моделей 010Н – 125Н).
	Перегрев радиатора-теплоотвода	Защищен термистором
	Предотвращение срыва при вращения	Предотвращение срыва во время разгона/торможения и вращения с постоянной скоростью

Продолжение таблицы А.1

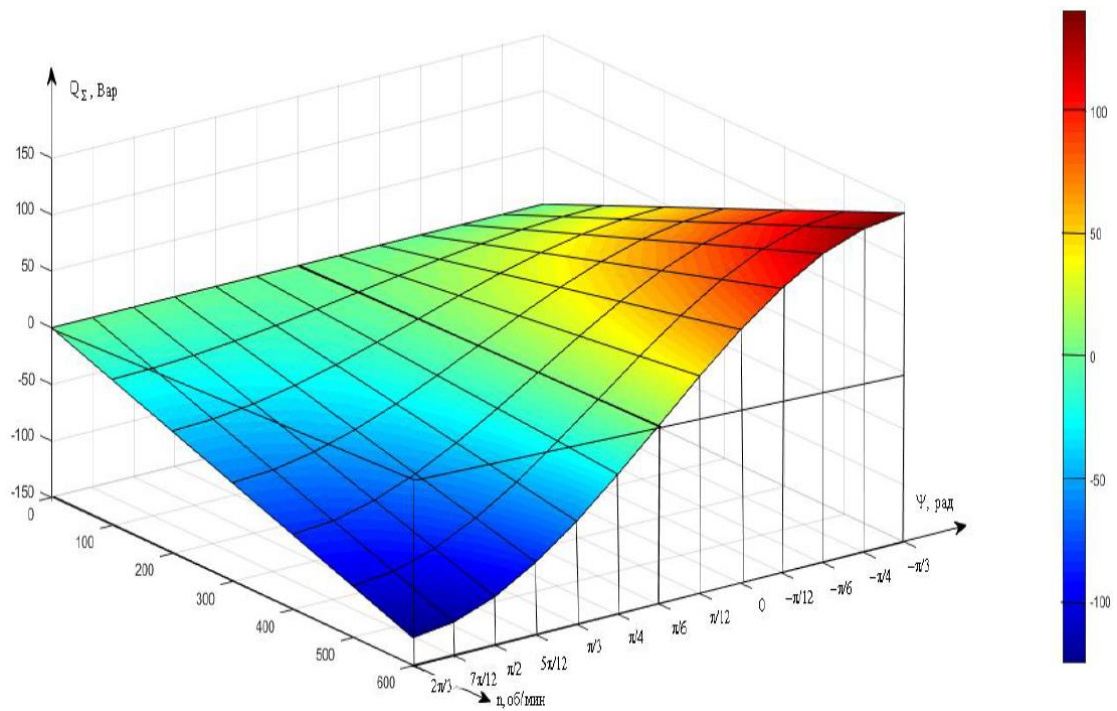
	Индикация заряда шины	Световой индикатор "Заряд" горит, пока напряжение шины не упадет ниже 50 В
Условия эксплуатации	Температура окружающей среды	от - 10°С до + 40°С (для моделей 010Н – 050Н) от - 10°С до + 45°С (для моделей 060Н – 450Н)
	Влажность	Относительная влажность не более 90%
	Температура хранения	от - 20°С до + 60°С
	Размещение	Внутри помещения, защищенного от коррозионных газов и пыли
	Высотность	Не более 1000 м
	Вибрация	от 9,81 м/с <sup>2</sup> (1g) при менее, чем 20 Гц , до 1,96 м/с <sup>2</sup> (0,2g) от 20 до 50 Гц
	Степень защиты оболочки	IP54 (по отдельному заказу для моделей 060Н – 450Н)



## Приложение Б



а)



б)

Рисунок Б.1 Зависимости суммарной реактивной мощности ВД в двухфазном режиме а)  $Q_{\Sigma} = f(I, \psi)$ , б)  $Q_{\Sigma} = f(n, \psi)$ .