

Школа Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение Электроэнергетики и электротехники

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
<b>Асинхронный электропривод погружного насоса со скалярным управлением</b>

УДК 62-83-022.362-213.3:621.671.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г5А	Есин Даниил Мурзакметович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев А.Ю.	к.т.н., доцент		

### 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
Ассистент	Сотникова А.А.			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

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 (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

\_\_\_\_\_ Тютеева 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
5Г5А	Есин Даниил Мурзакметович

Тема работы:

Асинхронный электропривод погружного насоса со скалярным управлением

Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 1161/с от 14.02.2019
---	------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2019
--	------------

#### 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>Материалы преддипломной практики, техническая литература</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>Расчет параметров схемы замещения АД. Выбор оборудования. Расчёт статических и динамических характеристик для системы регулируемого электропривода. Разработка имитационной модели регулируемого электропривода погружного насоса.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Функциональная и структурная схемы.</li> <li>2. Имитационная модель.</li> <li>3. Диаграмма Ганта</li> </ol>
<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><b>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b></p>	<p>Мелик-Гайказян Мария Вигеновна</p>
<p><b>Социальная ответственность</b></p>	<p>Сотникова Анна Александровна</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>14.02.2019</p>
--	-------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев А.Ю.	к.т.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г5А	Есин Даниил Мурзакметович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5Г5А	Есин Даниил Мурзакметович

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение</b>	<b>ОЭЭ</b>
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

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

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Асинхронный электропривод погружного насоса со скалярным управлением
--	--

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

<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>	Право на условия труда, отвечающие требованиям безопасности и гигиены. Социальное страхование работника.
<b>2. Производственная безопасность</b>  2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов	Анализ выявленных вредных факторов 1. Повышенный уровень шума 2. Повышенный уровень вибрации 3. Работа на открытом воздухе 4. Недостаток естественного света Анализ выявленных опасных факторов 1. Поражение электрическим током
<b>3. Экологическая безопасность</b>	- воздействие на литосферу (отходы)
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях</b>	Возможное ЧС: Пожар

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент	Сотникова Анна Александровна			

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5Г5А	Есин Даниил Мурзакметович		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5Г5А	Есин Даниил Мурзакмето

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение</b>	<b>ОЭЭ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	Электроэнергетика и электротехника

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

1. Стоимость затрат технического проекта (ТП)	1. Для проекта необходимо два человека (научный руководитель, дипломник) Зарплата рассчитывается в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ
2. Продолжительность выполнения ТП	Приблизительная оценка продолжительности выполнения технического проекта определяется исходя из ожидаемой трудоёмкости работ

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

1. Планирование и формирование графика работ по реализации ТП	Для составления графика по проектированию главного электропривода дисковой пилорамы - оценить технический проект выявляя при этом сильные и слабые, а также возможности и угрозы - определить трудоемкость работ для каждого исполнителя. По полученным данным построить диаграмму Ганта, которая позволяет спланировать процесс реализации технического проекта
2. Формирование сметы ТП	В процессе формирования сметы технического проекта используется следующая группировка затрат: - полная заработная плата исполнителей - отчисления во внебюджетные фонды - накладные расходы
3. Ресурсоэффективность ТП	Оценка эффективности проекта производится с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности

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

1. *Диаграмма Ганта*
2. *Матрица SWOT*
3. *Оценка ресурсной эффективности ТП*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян Мария Вигеновна	к.э.н., Доцент		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г5А	Есин Даниил Мурзакметович		

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  
 Уровень образования Бакалавр  
 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:	06.06.2019
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
02.03.2019 г.	Общие вопросы проектирования	15
16.03.2019 г.	Выбор преобразователя частоты	10
05.04.2019 г.	Расчет параметров схемы замещения	10
20.04.2019 г.	Построение естественных и искусственных характеристик	10
04.05.2019 г.	Моделирование работы в программа Matlab	20
13.05.2019 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
17.05.2019 г.	Социальная ответственность	10
27.05.2019 г.	Оформление результатов работы и выводов по работе. Формирование файла дипломной работы	10

**СОСТАВИЛ:  
Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев А.Ю.	к.т.н, доцент		

**СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тютеева П.В.	к.т.н, доцент		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 105 с., 59 рисунков, 27 таблиц, 21 источников,

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, скалярное управление, погружной насос, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, преобразователь частоты.

Объектом исследования является частотно-регулируемый электропривод переменного тока погружного насоса для добычи нефти.

Цель работы – разработка системы автоматического регулирования электроприводом погружного насоса.

В результате исследования была разработана система автоматического регулирования электроприводом насоса добычи нефти.

Для выполнения данной работы был задействован текстовый редактор Microsoft Word 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	11
1. СОСТАВ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА .....	12
1.1 Состав установки электропривода центробежного насоса .....	12
1.2 Устройство и принцип работы погружного электродвигателя.....	13
1.3 Технические параметры погружного электродвигателя .....	17
1.4 Основные технические параметры питающего оборудования .....	18
1.4.1 Основные технические данные питающих проводников.....	18
1.4.2 Основные технические данные трансформаторов .....	19
2 ПРИНЦИП РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ .....	21
2.1 Математическое описание работы двигателя.....	21
2.2 Моделирование работы двигателя .....	25
3 СКАЛЯРНОЕ И ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ .....	27
3.1 Описание приводов для ЭЦН, достоинства и недостатки .....	27
3.2 Скалярное управление асинхронным электродвигателем .....	28
3.3 Векторное управление асинхронным электродвигателем .....	31
3.4 Выбор метода управления двигателем.....	33
4 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ .....	35
4.1 Расчет параметров двигателя.....	35
4.2 Расчет и построение естественной механической и электромеханических характеристик.....	40
4.3 Расчет переходных процессов скорости и момента .....	43
4.4 Выбор типа преобразователя .....	45
4.5 Расчет и построение механических и электромеханических характеристик разомкнутой системы «Преобразователь частоты - асинхронный двигатель»	46
4.6 Моделирование системы ПЧ – АД в среде MatLab.....	51
4.7 Расчет переходных процессов скорости и момента для режима пуска сброса и наброса нагрузки на валу двигателя замкнутой системы «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель».....	55
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....	63
5.1 Введение .....	63
5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. ....	64
5.3 Производственная безопасность .....	66
5.3.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов .....	67
5.3.1.1 Работа на открытом воздухе .....	67
5.3.1.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны.....	67
5.3.1.3 Шум .....	68
5.3.1.4 Вибрация .....	69
5.3.1.5 Поражение электрическим током.....	70
5.3.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на работающего .....	72
5.3.2.1 Работа на открытом воздухе .....	72

5.3.2.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны .....	73
5.3.2.3 Шум .....	74
5.3.2.4 Вибрация .....	75
5.3.2.5 Поражение электрическим током .....	75
5.4 Экологическая безопасность .....	78
5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	79
6 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ .....	80
6.1 SWOT-анализ по разработке проекта электропривода .....	81
6.2 Организация работ технического проекта .....	83
6.2.1 Структура работ в рамках технического проектирования .....	83
6.2.2 Определение трудоемкости выполнения ТП .....	85
6.2.3 Разработка графика проведения технического проекта .....	86
6.3 Составление сметы затрат на разработку ТП .....	88
6.3.1 Расчет полной заработной платы исполнителей темы .....	88
6.3.2 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	89
6.3.3 Накладные расходы .....	90
6.4 Формирование сметы затрат технического проекта .....	90
6.5 Определение ресурсоэффективности проекта .....	91
Заключение .....	96
Список использованных источников .....	97

## **Введение**

Тема работы: «Асинхронный электропривод погружного насоса со скалярным управлением».

В работе приведены основные сведения о составе и функционирование установки электропривода центробежного насоса, а также математическая модель работы асинхронного двигателя. Далее произведено описание и анализ эффективности векторного и скалярного управления.

На данный момент происходит активное освоение месторождений нефти. Современное извлечение нефти производится посредством скважин, пробуренных в толще горных пород. Если давления в продуктивном пласте не хватает, как правило, нефть извлекается при помощи специальных механизмов, которые позволяют поднимать сырье на поверхность, а также используются для закачивания в продуктивные пласты воды, продвижения перекачиваемой продукции по промысловым трубопроводам и так далее. В связи с чем приобретают актуальность глубинные центробежные нефтяные насосы. Нефтяной насос – один из наиболее сложных типов оборудования в нефтяной промышленности в отношении эксплуатации и ремонта. Как известно, нормальное функционирование оборудования зависит не только от правильного выбора устройства, но и от выполнения правил эксплуатации и условий работы и от оптимального управления им, поэтому в данной работе особое значение отведено назначению, принципу работы и выбора метода управления оборудованием.

На данный момент в освоение месторождений нефти широкое использование приобретают глубинные центробежные насосы с электроприводом, которые надежно работают при необходимости больших отборов жидкости из скважин, а также характеризуются простотой использования и хорошими параметрами при необходимости больших отборов жидкости из скважины. Таким образом, центробежные глубинные насосы для скважин устроены так, что подача жидкости производится непрерывно [1, 2].

# 1. СОСТАВ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

## 1.1 Состав установки электропривода центробежного насоса

Установка ЭЦН состоит из наземной и погружной части и является сложной технической системой, которая позволяет осуществлять подъем жидкости или нефти из скважины на земную поверхность для дальнейшего использования [2, 3].

Вид установки электропривода центробежного насоса приведен на рисунке 1.1.

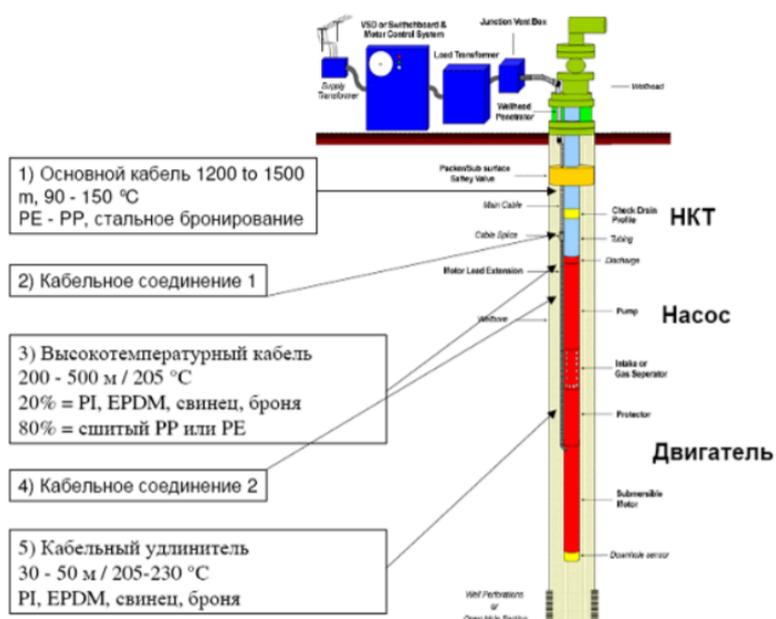


Рисунок 1.1 Установка электропривода центробежного насоса

Схема погружного насоса приведена на рисунке 1.2.

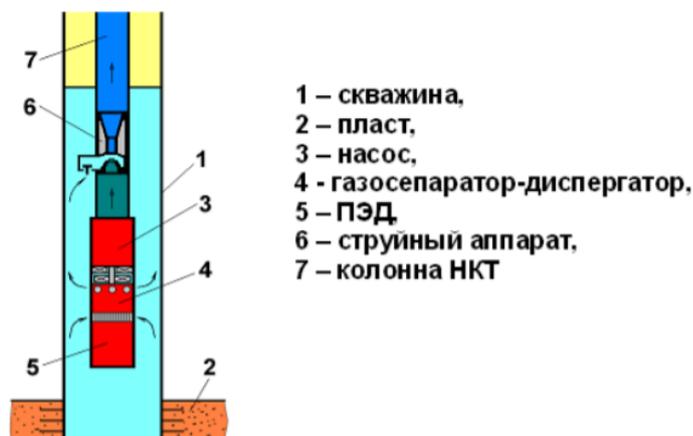


Рисунок 1.2 Схема погружного насоса

Установки УЭЦН предназначены для подъема или откачки пластовой жидкости из нефтяных скважин. При работе установки УЭЦН необходимо постоянно производить контроль следующих параметров: необходимо знать параметры рабочей среды, которая состоит из смеси различных веществ: нефти, попутной воды и газа, различные жидкости с содержанием твердых частиц не более 0,1 г/л, с максимальной предельной концентрацией сероводорода не более 0,01 г/л.

По факту при работе УЭЦН необходимо учитывать параметры скважины и самого асинхронного двигателя, к которым можно отнести: мощность, частоту вращения, частоту питающей сети, число фаз и показатели качества электроэнергии.

Применение получили погружные установки центробежных электронасосов на месторождениях при добыче нефти [3, 4].

## 1.2 Устройство и принцип работы погружного электродвигателя

На данный момент в качестве погружных электродвигателей наибольшее распространение получили асинхронные двигатели с короткозамкнутым

ротором ввиду простоты и удобства использования. На данных двигателях установлена гидрозащита, которая состоит из протектора и компенсатора.

На практике зачастую электродвигатель, гидрозащита и погружной насос соединяются между собой фланцами и шпильками. Валы насоса, валы двигателя и валы протектора по факту соединяются шлицевыми муфтами.

При эксплуатации двигатель учитываем их основные параметры: мощность, ток, КПД и напряжение, коэффициент мощности, габаритные параметры и масса, а также периодически согласно графику проводим ТО и ТР [5, 6, 7].

Данные двигатели получили широкое распространение для работы в средах пластовой жидкости с температурой до 110°. Зачастую **воды** встречаются в **пластах**-коллекторах, которыми контролируются нефтяные и газовые залежи.

В настоящее время на рынке существуют модели двигателей с мощностью от 5 до 1000 кВт, с различным напряжением от 300 до 3600 В, с током от 10 до 250 А. В зависимости от потребностей существуют модели с малым диаметром и большим диаметром разных мощностей.

На рисунке 1.3 приведен внешний вид погружного электродвигателя.



Рисунок 1.3 Погружной электродвигатель

Электродвигатель также состоит из неподвижного статора и вращающегося ротора. Корпус статора чаще всего изготавливается в виде стальной трубы, а основания электродвигателя и включает в себя чередующиеся магнитные (активные) и немагнитные пакеты, которые запрессованы в корпус. Данные пакеты собраны из кольцевых пластин с различными отверстиями. На заводах происходит штамповка пластин активных пакетов из электротехнической стали. На заводах происходит штамповка пластин немагнитных пакетов из латуни или немагнитной стали.

Передача момента от пакетов ротора к валу происходит через продольную шпонку, которая находится в продольных пазах вала и пакетах ротора. Зачастую число пакетов ротора равно числу активных пакетов статора. Внешний вид узла опорного подшипника приведён на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 Внешний вид узла подшипника

На данный момент в зависимости от целей, места установки и режимов эксплуатации выпускаются различные электродвигатели различных исполнений по степени защиты и по теплостойкости. Теплостойкость электродвигателя является важным параметром при его работе, на основании которого эксплуатирующий персонал делает графики ТО и ТР.

Принцип работы заключается в том, что при включении обмотки статора в сеть трехфазного тока в ней образуется магнитное поле. Данное магнитное поле пресекает стержни ротора и наводит в них электродвижущую силу ЭДС. По той причине, что стержни ротора замкнуты, в них возникнет ток под действием электродвижущей силы ЭДС. Данный ток взаимодействует с магнитным полем и, тем самым, создает вращающий момент. А уже под действием вращающего момента ротор приходит во вращение и происходит работа асинхронного двигателя.

Вообщем, электрическая энергия поступает в обмотку статора из трехфазной сети, далее преобразуется в механическую энергию вращения вала ПЭД. Принципиальное отличие ПЭД от обычных центробежных насосов заключается в том, что он состоит из различных секций. Секция насоса изготавливается в виде цилиндрического корпуса. В цилиндрическом корпусе вращается концентрично установленное колесо с

прямыми радиальными лопатками. На практике длина секции может составлять до 5,5 м [8, 9, 10, 11].

### 1.3 Технические параметры погружного электродвигателя

Приводом двигателя погружных насосов служит особенный, заполненный маслом асинхронный двигатель, который работает от трехфазного переменного тока 380 В, а выполнен с короткозамкнутым ротором, зачастую вертикального исполнения. Электродвигатели ПЭД имеют диаметры корпусов 103, 117, 123, 130, 138 мм. Диаметры электродвигателей достаточно ограничены и при необходимости возможно для больших мощностей двигатель увеличить диаметр по необходимости. Электродвигатели ПЭД имеют работают в жидкости и часто под большим гидростатическим давлением, так что требуют к себе герметичности. Электродвигатели ПЭД заполнены специальным высокой диэлектрической прочности маловязким маслом, которое служит для их охлаждения. Установки погружных насосов также выпускаются в модульном варианте. В таблице 1.1 приведены примеры моделей двигателей погружных электронасосов [18].

Таблица 1.1 Параметры двигателей погружных электронасосов

Двигатель	$P$ , кВт	$U$ , в	$I$ , А
ПЭДУ16-103В5	16	530	26
ПЭДУ22-103В5	22	700	27
ПЭДУ32-103В5	32	1000	27,5
ПЭДУ45-103В5	45	1050	37
ПЭДУС63-103В5	63	1500	36,5
ПЭДУС90-103В5	90	2100	37
ПЭДУ45-117В5	45	1000	36
ПЭДУ63-117В5	63	1400	36

Для практического использования привод УЭЦН должен удовлетворять

требованиям: обеспечение плавного пуска двигателя, продолжительный режим работы электродвигателя УЭЦН, широкий диапазон регулирования по частоте и мощности, а также экономичность.

В целом, в плане надежности электропривод должен обеспечить безотказную и стабильную работу УЭЦН во время всего срока эксплуатации во всех режимах эксплуатации.

При эксплуатации УЭЦН целесообразно внедрять частотное преобразование, которое обладает достоинствами:

- постепенный и плавный пуск;
- возможность регулирования скорости двигателя;
- плавное регулирование скорости;
- экономичность при торможении (рекуперация энергии в сеть).

Исходя из названных причин, на практике распространение получили преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока и автономным инвертором напряжения (ПЧИИ) [12, 13].

## **1.4 Основные технические параметры питающего оборудования**

### **1.4.1 Основные технические данные питающих проводников**

В качестве параметров проводников приведем кабель в первую очередь, поскольку от его работы зависит питание УЭЦН электроэнергией.

Подключение кабеля к насосу: Подсоединение насоса к силовому кабелю проводится с помощью влагостойкой водонепроницаемой муфты термоусадочного или заливного типа. Этим исключается попадание влаги на контактную группу, которое может привести к замыканию и защищается сам электродвигатель от попадания в него воды. Провод питания электромотора глубинного погружного насоса выводится на поверхность вдоль водоподъемной трубы. Его закрепляют специальными хомутами с шагом фиксации одно крепление на два погонных метра трубы. Расположения проводки по вертикали делается свободным, без натяжения и провисания, чтобы не допустить физических повреждений. Для примера приведем

технические параметры КПБК –25 в таблице 1.2.

Таблица 1.2 Каталожные данные кабеля КПБК-3 х25

Число и сечение жил, мм <sup>2</sup>	Конструкция жилы	Толщина резиновой изоляции, мм	Толщина защитной наиритовой оболочки, мм	Наружный диаметр, мм	Вес 1км кабеля, кг
3х25	7х2,11	1,8	2,0	32,1	2140

### 1.4.2 Основные технические данные трансформаторов

Трансформаторы служат для подачи электроэнергии к погружным центробежным насосам от промышленной сети переменного тока. На практике выпускаются промышленные трансформаторы со ступенчатой регулировкой напряжения для возможности питания двигателей с различными номинальными напряжениями (от 380В до 2000В).

Зажимы напряжения НН присоединяются к промышленной сети, а вторичные (высшего напряжения) к кабельной линии. Промышленные трансформаторы выпускаются по ТУ16–517.685– 77 «Промышленные трансформаторы серии ТМПН».

В качестве примера приведем технические параметры нескольких моделей промышленных трансформаторов.

Таблица 1.3 Параметры трансформаторов промышленных

Параметры	ТМПН 40/463	ТМПН 63/611	ТМПН 63/856	ТМПН 100/736	ТМПН 100/844
Номинальная мощность, кВА					
Напряжение х. х. вторичной обмотки	370 – 495	391 – 675	657 – 1023	475 – 736	633 – 958
Степень регулирования, В				27 – 32	35 – 38
Потери х. х., кВт	0,19	0,265	0,265	0,365	0,365
Потери к. з., кВт	0,88	1,28	1,28	1,97	1,97
Ток х. х., %		2,8	2,8	2,6	2,6
Напряжение к.з.,%	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5

Окончание таблицы 1.3.

Параметры	ТМПН 100/1170	ТМПН 100/1160	ТМПНГ 100/2400
Номинальная мощность, кВА			
Напряжение х. х. вторичной обмотки	920 – 1170	1270 – 1610	1750 – 2210
Степень регулирования, В			
Потери х. х., кВт	0,365	0,365	0,54
Потери к. з., кВт	1,97	1,97	1,97
Ток х. х., %	2,6	2,6	2,6
Напряжение к. з., %	5,5	5,5	5,5

Укажем наиболее популярный закон управления – пропорциональный:

$$\frac{U}{f} = \mathit{const}$$

При регулировании с постоянной мощностью

$$\frac{U}{U_H} = \frac{\sqrt{f}}{\sqrt{f_{1H}}} \cdot \sqrt{\frac{M \cdot f}{M_H \cdot f_H}} = \sqrt{\frac{f}{f_{1H}}}$$

и закон управления получается в виде зависимости

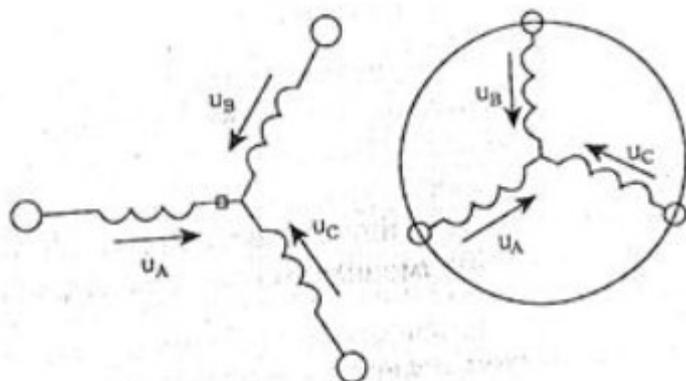
$$\frac{U}{\sqrt{f}} = \mathit{const}$$

Эти законы управления являются наиболее распространенными и часто используемыми на практике [14, 17].

## 2 ПРИНЦИП РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ

### 2.1 Математическое описание работы двигателя

В данном разделе приведено математическое описание работы асинхронного двигателя, а также уравнения для нахождения равновесия ЭДС для асинхронного двигателя, используемого в качестве погружного электродвигателя. Обобщенная асинхронная машина приведена на рисунке 2.1.



## Рисунок 2.1 Обобщенная асинхронная машина

Далее приведем математическое описание асинхронного двигателя.

Для статора система уравнений имеет вид [13, 14]:

$$\begin{aligned}u_A &= R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\u_B &= R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \\u_C &= R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt}\end{aligned}\tag{2.1}$$

Для ротора система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned}u_A &= R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\u_B &= R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \\u_C &= R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt}\end{aligned}\tag{2.2}$$

Основные параметры, определяющие математическое описание асинхронного двигателя: значения мгновенных токов, значения мгновенных напряжений, а также потокосцеплений статора и ротора и активные сопротивления обмоток.

При рассмотрении обычно принимают допущение, что обмотки симметричны. Для симметричных обмоток получаем:  $R_A=R_B=R_C=R_s$ -активное сопротивление статорной обмотки и  $R_a=R_b=R_c=R_r$  - активное сопротивление роторной обмотки.

Основным является закон Ампера, который связывает потокосцепления обмоток с токами, которые протекают по обмоткам:

Для статора:

$$\begin{aligned}\psi_A &= L_{AA}i_A + L_{AB}i_B + L_{AC}i_C + L_{Aa}i_a + L_{Ab}i_b + L_{Ac}i_c \\ \psi_B &= L_{BA}i_A + L_{BB}i_B + L_{BC}i_C + L_{Ba}i_a + L_{Bb}i_b + L_{Bc}i_c \\ \psi_C &= L_{CA}i_A + L_{CB}i_B + L_{CC}i_C + L_{Ca}i_a + L_{Cb}i_b + L_{Cc}i_c\end{aligned}\tag{2.3}$$

Для ротора:

$$\begin{aligned}\psi_a &= L_{aA}i_A + L_{aB}i_B + L_{aC}i_C + L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c \\ \psi_b &= L_{bA}i_A + L_{bB}i_B + L_{bC}i_C + L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c \\ \psi_c &= L_{cA}i_A + L_{cB}i_B + L_{cC}i_C + L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c\end{aligned}\quad (2.4)$$

Из уравнения 2.3 и 2.4 видно, что потокосцепление каждой обмотки зависит от токов во всех обмотках. Указанные зависимости проявляются через взаимоиндукцию.

$$\text{ю. } J_\Sigma \cdot \frac{d\vec{\omega}_m}{dt} = \vec{M} - \vec{M}_H, \quad (3.6.3)$$

$$\vec{M} = k \cdot (\vec{\psi} \times \vec{i}) \quad (3.6.4)$$

$$\vec{i} = \frac{2}{3} \cdot (i_A + \vec{a} \cdot i_B + \vec{a}^2 \cdot i_C) \quad (3.6.5)$$

Где  $\vec{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ ,  $\vec{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$  – это векторы, учитывающие пространственное смещение обмоток..

$i_A = I_m \cdot \cos(\omega \cdot t)$ ,  $i_B = I_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right)$ ,  $i_C = I_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right)$  – трех фазная симметричная система токов статора.

Далее определяем описание пространственного вектора статорного тока:

$$\vec{i}_s = \frac{2}{3} \cdot \left( \cos \omega t + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + e^{j\frac{4\pi}{3}} \cdot \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right) = I_m \cdot e^{j\omega t}$$

Современная теория асинхронных машин построена на основе представления электромагнитных величин векторами.

Таким образом, на рисунке 2.2 указан пространственный вектор тока, который вращается с угловой скоростью  $\omega$  в положительном направлении.

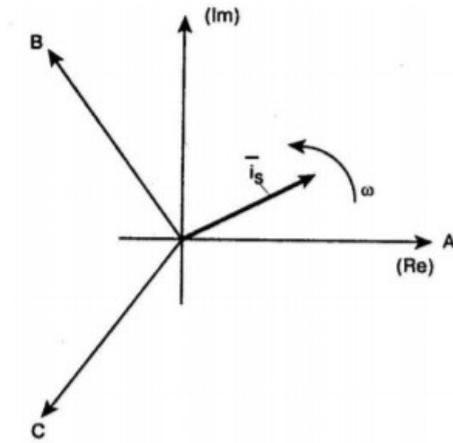


Рисунок 2.2 Пространственный вектор тока

Далее приведем запись уравнений момента через некоторые пары переменных состояния асинхронной машины:

$$\begin{cases} M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_m \cdot \text{Mod}(\vec{i}_s \times \vec{i}_r) \\ M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_m \cdot \text{Mod}(\vec{\psi}_s \times \vec{i}_s) \\ M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_m \cdot \text{Mod}(\vec{\psi}_r \times \vec{i}_s) \end{cases}$$

Далее перейдем к описанию в системе координат  $\alpha, \beta$ :

$$\begin{cases} U_{1\alpha} = R_3 \cdot (T_3 p + 1) \cdot I_{1\alpha} - \frac{R_2' \cdot L_\mu}{L_2^2} \cdot \psi_{2\alpha} - \frac{L_\mu}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}; \\ U_{1\beta} = R_3 \cdot (T_3 p + 1) \cdot I_{1\beta} - \frac{R_2' \cdot L_\mu}{L_2^2} \cdot \psi_{2\beta} - \frac{L_\mu}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}; \\ 0 = (T_2 p + 1) \cdot \psi_{2\alpha} - L_\mu \cdot I_{1\alpha} + \frac{L_2}{R_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}; \\ 0 = (T_2 p + 1) \cdot \psi_{2\beta} - L_\mu \cdot I_{1\beta} + \frac{L_2}{R_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}; \\ M_{эм} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_\mu}{L_2} \cdot z_p \cdot (\psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}); \\ \omega = \frac{1}{Jp} \cdot (M_{эм} - M_c) \end{cases} \quad (2.4)$$

## 2.2 Моделирование работы двигателя

На основании приведенной системы уравнений 2.4 была составлена структурная схема на рисунке 2.3.

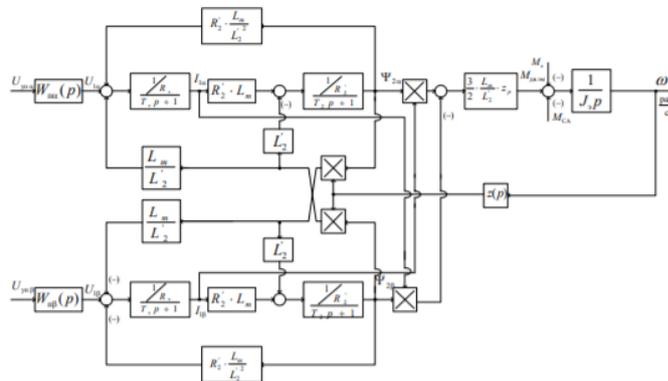


Рисунок 2.3 Структурная схема силового канала системы преобразователь асинхронный электродвигатель в неподвижной двухфазной системе координат

На рисунке 2.4 приведена имитационная модель силового канала системы преобразователь - асинхронный электродвигатель, которая была разработана в среде MATLAB.

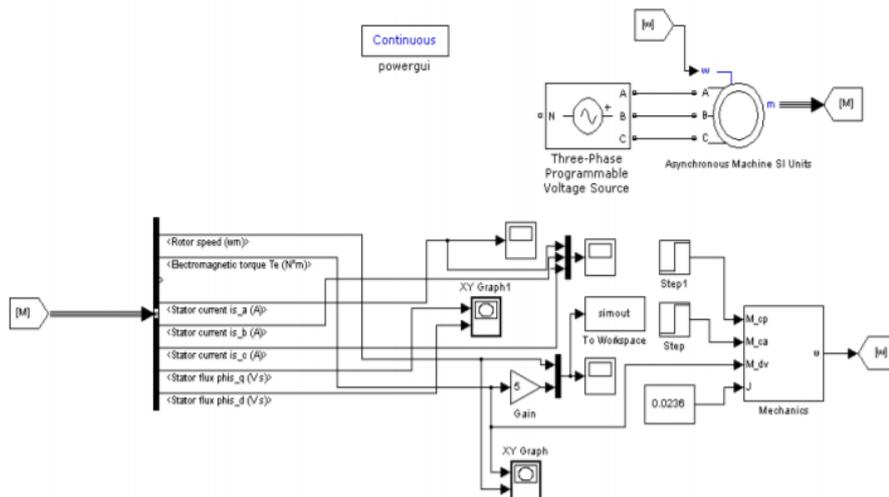


Рисунок 2.4 Имитационная модель силового канала системы преобразователь - асинхронный электродвигатель

Далее выполнено моделирование работы асинхронного электродвигателя с

построением характеристик. Данные характеристики скорости ротора и электромагнитного момента АД приведены на рисунке 2.5.

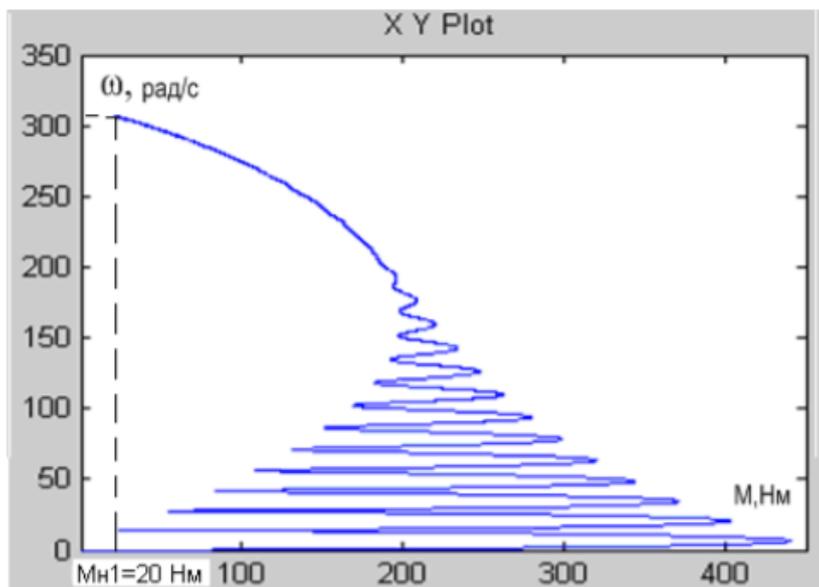


Рисунок 2.5 Динамическая механическая характеристика ПЭД

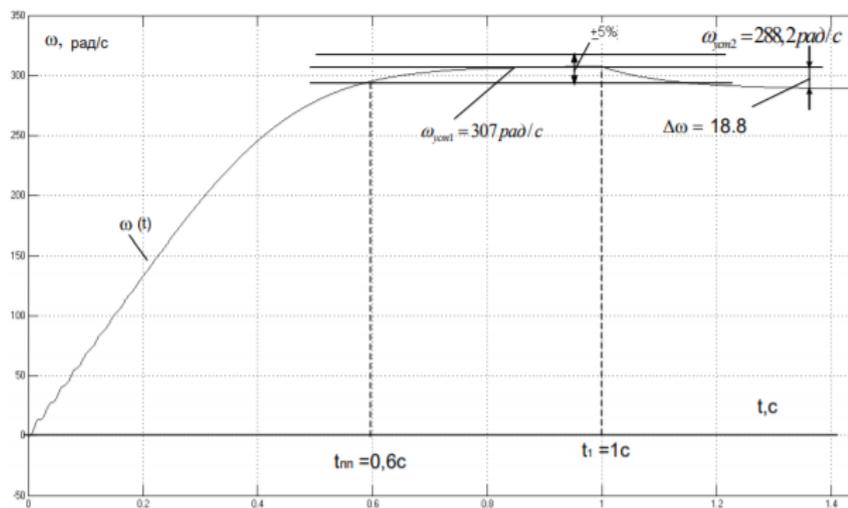


Рисунок 2.6 График переходного процесса скорости ПЭД при набросе нагрузки  $M_{н2} = 70 \text{ Нм}$

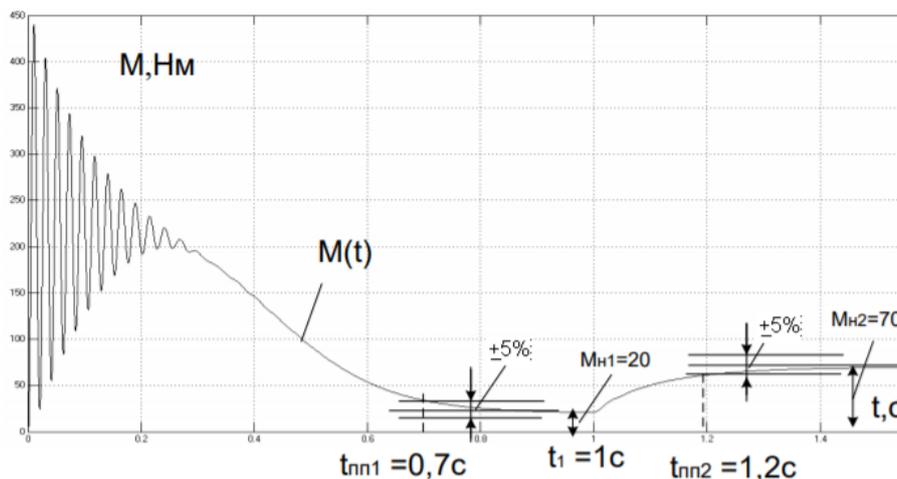


Рисунок 2.7 График переходного процесса момента ПЭД при набросе нагрузки  $M_{н2} = 70 \text{ Нм}$

На основании анализа видно, что при нагрузке  $M_{н1} = 20 \text{ Нм}$  электродвигатель развивает скорость равную  $307 / \text{уст } \omega = \text{рад с}$ , а при набросе нагрузки  $M_{н2} = 70 \text{ Нм}$  скорость снизилась на величину  $D = \omega 18,8 / \text{рад с}$  и стала равной  $2 288,2 / \text{уст } \omega = \text{рад с}$ .

### 3 СКАЛЯРНОЕ И ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

#### 3.1 Описание приводов для ЭЦН, достоинства и недостатки

Асинхронный погружной электродвигатель типа ПЭД представляет собой асинхронную электрическую машину с короткозамкнутым ротором, трехфазную, получающую электроэнергию от сети переменного напряжения.

Далее указаны основные достоинства асинхронных электродвигателей:

- опыт эксплуатации и широкое применение;
- простота конструкции, использования и обслуживания;
- низкая цена производства и малое количество затрат;
- высокая перегрузочная способность по току и по моменту;
- реализация плавного пуска с помощью частотных преобразователей и устройств плавного пуска.

Далее укажем основные недостатки асинхронных электродвигателей:

- наличие значительных потерь в роторе, в статоре: электрические, механические и добавочные потери;
- наличие более низкого коэффициента мощности в сравнении с вентильным ПЭД, к тому же при низкой нагрузке резко снижается коэффициент мощности;
- больший вес активных материалов в сравнении с вентильным ПЭД;
- высокие значения тока холостого хода;
- необходимость в регулируемом пуске ввиду ограничения токовых и электродинамических нагрузок, то есть необходимо ставить частотный преобразователь или устройство плавного пуска [13, 14, 15].

### **3.2 Скалярное управление асинхронным электродвигателем**

С целью регулировки угловой скорости вращения ротора, а также крутящего момента на валу современных бесщеточных двигателей, применяют либо векторное, либо скалярное управление электроприводом.

На данный момент на практике зачастую используется скалярное управление (частотное), которое получило широкое распространение на практике в виду простоты его реализации. Суть скалярного управления заключается в том, что амплитуда напряжения является функцией частоты, причем отношение напряжения к частоте оказывается приблизительно постоянным. Конкретный вид этой зависимости связан с нагрузкой на валу, однако принцип остается таковым: повышаем частоту, а напряжение при этом

пропорционально повышается в зависимости от нагрузочной характеристики данного двигателя. Получаем, что магнитный поток в зазоре между ротором и статором получается постоянным. Если же отношение напряжения к частоте отклонить от номинального для данного двигателя, то двигатель либо перевозбудится, либо недовозбудится, что приведет к потерям в двигателе и к сбоям в рабочем процессе [19].

На рисунке 3.1 приведены графики зависимости частоты сети от времени при скалярном управлении.

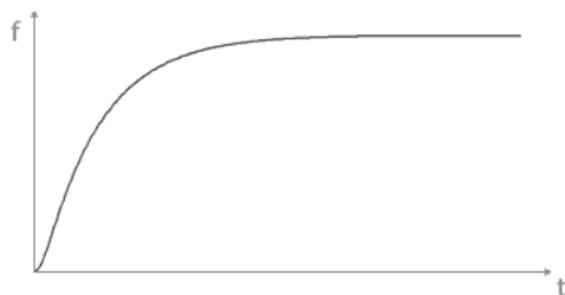


Рисунок 3.1 График зависимости частоты питания сети от времени

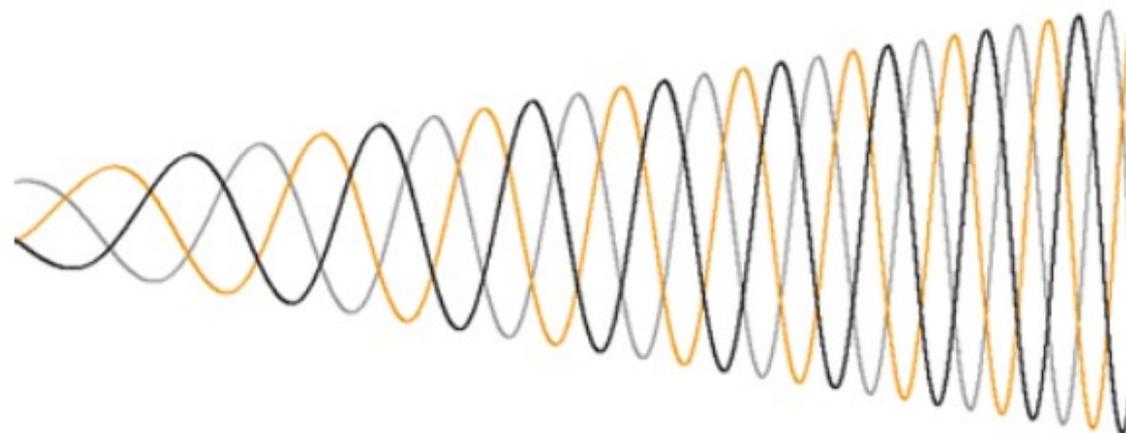


Рисунок 3.2 График напряжения двигателя при скалярном управлении

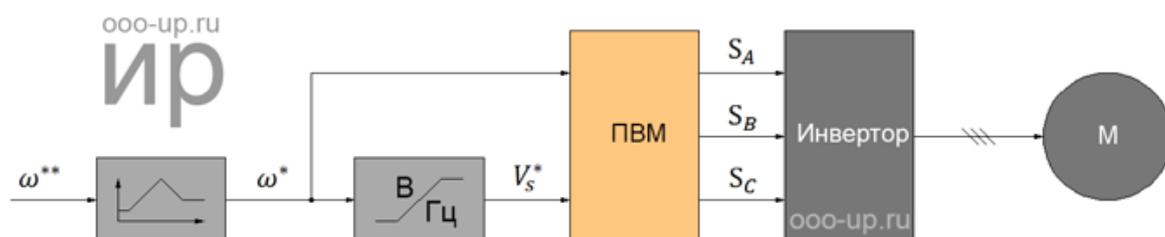


Рисунок 3.3 Скалярное управление двигателем без датчика скорости

При увеличении скорости происходит увеличение напряжения питания статора по пропорциональному закону.

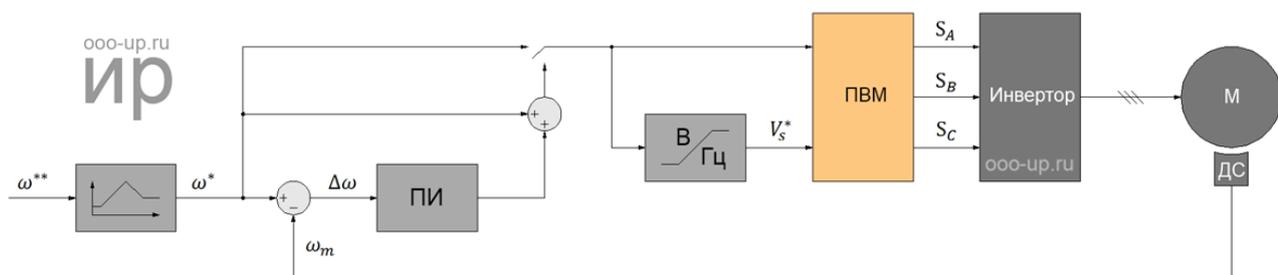


Рисунок 3.4 Скалярное управление с датчиком скорости

Таким образом скалярное управление позволяет добиться почти постоянного момента на валу в рабочем диапазоне частот независимо от частоты, однако на низких скоростях момент все же снижается (чтобы этого не произошло, необходимо повысить отношение напряжения к частоте), поэтому для каждого двигателя имеет место строго определенный рабочий диапазон скалярного управления.

Кроме того, невозможно построить систему скалярного регулирования скорости без датчика скорости, установленного на валу, ибо нагрузка сильно влияет на отставание реальной скорости вращения ротора от частоты питающего напряжения. Но даже с датчиком скорости при скалярном управлении не получится с высокой точностью регулировать момент (по крайней мере так, чтобы это было экономически целесообразно).

В этом и заключаются недостатки скалярного управления, объясняющие относительную немногочисленность сфер его применения, ограниченных в основном обычными асинхронными двигателями, где зависимость скольжения от нагрузки не является критичной

### 3.3 Векторное управление асинхронным электродвигателем

Сегодня подход к данному методу несколько иной: математическая модель двигателя позволяет рассчитывать скорость вращения ротора и момент на валу в зависимости от текущих токов фаз (от частоты и величин токов в обмотках статора).

Этот более прогрессивный подход предоставляет возможность независимо и почти безынерционно регулировать как момент на валу, так и скорость вращения вала под нагрузкой, ибо в процессе управления учитываются еще и фазы токов.

Некоторые более точные системы векторного управления оснащены схемами обратной связи по скорости, при этом системы управления без датчиков скорости именуется бездатчиковыми.

Так, в зависимости от области применения того или иного электропривода, его система векторного управления будет иметь свои особенности, свою степень точности регулировки.

Когда требования к точности регулировки скорости допускают отклонение до 1,5%, а диапазон регулировки — не превышает 1 к 100, то бездатчиковая система вполне подойдет. Если же требуется точность регулировки скорости с отклонением не более 0,2%, а диапазон сводится до 1 к 10000, то необходимо наличие обратной связи по датчику скорости на валу. Наличие датчика скорости в системах векторного управления позволяет точно регулировать момент даже при низких частотах до 1 Гц.

На данный момент активно развивается метод векторного управления, поскольку он позволяет регулировать скорость вращения и момент на валу электродвигателя во всем диапазоне с контролем частоты и фазы напряжения питания, тем самым при управлении асинхронным двигателем контролируется угол пространственного вектора, что делает управление более точным. При этом векторное регулирование трудно реализуемо, обладает большой вычислительной сложностью, что ограничивает его широкое применение [20].



соответствует идеологии работы (включено-выключено) полупроводниковых устройств инвертора.

К группе нелинейных регуляторов момента относят:

- прямое управление моментом с таблицей включения (ПУМ);
- прямое самоуправление (ПСУ);
- адаптивное прямое управление моментом;
- нейронные сети;
- регуляторы с нечеткой логикой.

Их основные преимущества заключаются в:

- простой схеме реализации;
- отсутствуют контуры тока и прямое регулирование тока;
- не требуется преобразование координат, что упрощает их реализацию;
- отсутствует отдельная модуляция напряжения;
- датчик положения не требуется.

Несмотря на преимущества нелинейные регуляторы обладают недостатками:

- требуется точная оценка вектора магнитного потокосцепления статора и момента;
- сильные пульсации момента и тока из-за нелинейного регулятора и переменной частоты переключения ключей;
- шум с широким спектром из-за переменной частоты переключения.

### **3.4 Выбор метода управления двигателем**

В данном пункте приведено сравнение и выбор оптимального метода

регулирования скорости вращения асинхронного двигателя ПЭД.

Таблица 3.1 Выбор оптимального метода регулирования скорости

Метод управления	Диапазон регулирования скорости	Погрешность скорости <sup>3</sup> , %	Время нарастания момента, мс	Пусковой момент	Цена
<a href="#">Скалярный</a>	1:101	5-10	Не доступно	Низкий	Очень низкая
Векторный линейный	>1:2002	0	<1-2	Высокий	Высокая
Векторный нелинейный	>1:2002	0	<1-2	Высокий	Высокая

Таким образом, на основании сравнения скалярного и векторного способа регулирования скорости вращения асинхронного двигателя делаем выбор в пользу скалярного метода управления, так как данный метод обеспечивает изменение напряжения питания электродвигателя при скалярном управлении, что необходимо в нашем случае, а также прост в реализации, в отличие от векторного метода управления не требует составления математической модели двигателя. Хотя и векторный метод регулирования скорости вращения асинхронного двигателя обеспечивает высокое быстродействие, возможность регулирования в широком диапазоне скоростей и возможность управления моментом электродвигателя, но он является труднореализуемым: большая вычислительная сложность и необходимость задания параметров электродвигателя, которые на практике вовсе не просто вычислить [15, 16, 17].

## 4 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

### 4.1 Расчет параметров двигателя

Мощность электродвигателя выбирается в соответствии с нижеприведенной формулой :

$$P_H = \frac{g \cdot Q \cdot H}{3600 \cdot \eta_H} = \frac{9,81 \cdot 6 \cdot 1400}{3600 \cdot 0,795} = 28,792 \text{ кВт}$$

где  $Q$  – подача насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q = 6 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $H$  – напор, м;  $\eta_H$  – КПД насоса.

В соответствии с ISO 5199 необходимо обеспечить необходимый запас по мощности двигателя. Следовательно, выбираем асинхронный двигатель типа ЭДТ32 – 103М1.

Определим параметры Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя ЭДТ32 – 103М1 со следующими каталожными данными:

- Номинальная мощность двигателя:  $P_H = 32 \text{ кВт}$ .
- Номинальное фазное напряжение:  $U_{1H} = 577 \text{ В}$ .
- Номинальное напряжение сети:  $U_{\phi H} = 1000 \text{ В}$ .
- Синхронная частота вращения:  $n_0 = 3000 \text{ об / мин}$ .
- Номинальное скольжение:  $s_H = 5,9\%$ .
- КПД в режиме номинальной мощности:  $\eta_H = 0,81 \text{ о.е.}$
- Момент инерции двигателя:  $J_{об} = 0,12 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .
- Коэффициент мощности в режиме номинальной мощности:  $\cos \varphi = 0,83 \text{ о.е.}$

- Кратность пускового тока:  $k_i = 60.e.$
- Кратность пускового момента:  $k_n = 2,00.e.$
- Кратность максимального момента:  $k_{max} = 2,30.e.$
- Коэффициент загрузки двигателя:  $p_{жс} = 0,750.e.$
- Число пар полюсов:  $p=1.$

Для того, чтобы произвести расчет электромеханических и механических характеристик асинхронного двигателя нужно указать математическую модель двигателя. Наиболее наглядной, простой и удобной является математическая модель на основе T-образной схема замещения, которая приведена на рисунке 1.

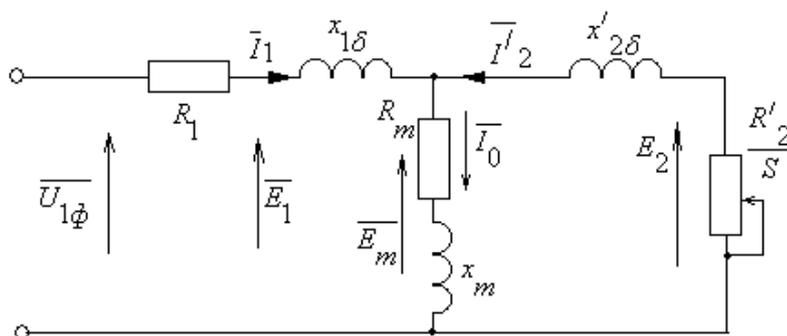


Рисунок 1 – Схема замещения асинхронного двигателя

Основные обозначения на схеме замещения:

- $U_{1\phi}$  – фазное напряжение подводимое к обмотке статора двигателя;
- $I_1$  – ток обмотки статора;
- $R_1$  – активное сопротивление обмотки статора;
- $X_{1\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;
- $I_2'$  – приведенный ток обмотки ротора к обмотке статора;

- $R_2'$  – приведенное активное сопротивление цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;
- $X_{2\sigma}'$  – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;
- $I_0$  – ток холостого хода (намагничивания);
- $X_m$  – индуктивное сопротивление контура намагничивания

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие данной схеме:

$$\bar{U}_{1\Phi} - \bar{E}_m - j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 = 0$$

$$\bar{E}_m + j \cdot X_2' \cdot \bar{I}_2 + R_2' \cdot \bar{I}_2 / s = 0$$

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 - \bar{I}_0 = 0$$

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений изображена на рисунке 2:

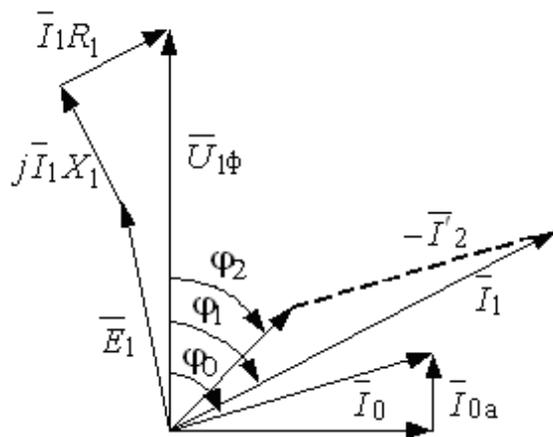


Рисунок 2 – Векторная диаграмма асинхронной машины

Найдем номинальную частоту вращения:

$$n_H = n_0 \cdot (1 - s_H) = 3000 \cdot (1 - 0,059) = 2823 \text{ об / мин}$$

Найдем ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(p_{жс} \cdot I_{1H} \cdot \frac{1-S_H}{1-p_{жс} \cdot S_H}\right)^2}{1 - \left(p_{жс} \cdot \frac{1-S_H}{1-p_{жс} \cdot S_H}\right)^2}}$$

где  $I_{11} = \frac{p_{жс} \cdot P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{ржс} \cdot \eta_{Hржс}} = \frac{0,75 \cdot 32000}{3 \cdot 577 \cdot 0,822 \cdot 0,81} = 20,819 \text{ А}$  – ток статора

двигателя при частичной нагрузке,

$$\eta_{Hржс} = \eta_H = 0,81 \text{ – КПД при частичной нагрузке,}$$

$$\cos \varphi_{ржс} = \cos \varphi \cdot \left(\frac{\cos \varphi_{0,75}}{\cos \varphi}\right) = 0,83 \cdot 0,99 = 0,822$$

коэффициент мощности при частичной нагрузке,

$$\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_H = 0,99$$

относительный коэффициент мощности при частичной нагрузке (из графика на рисунке 3).

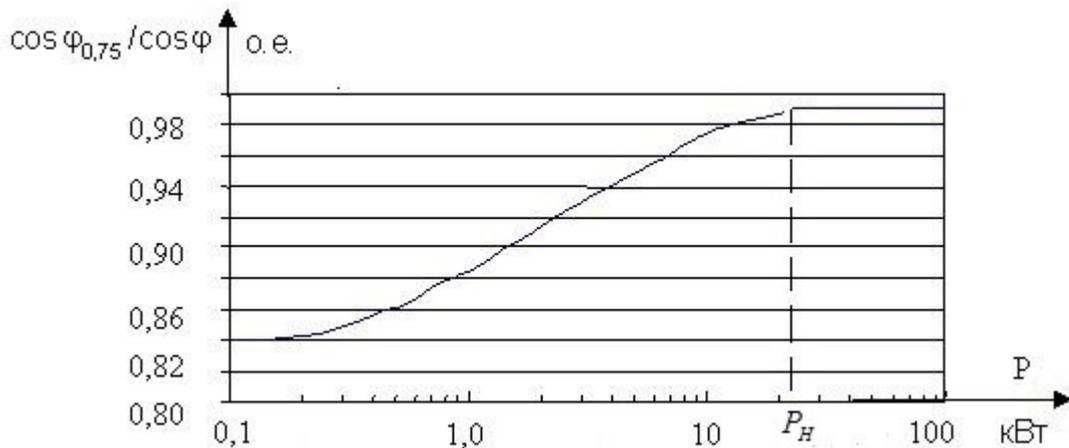


Рисунок 3 – Зависимость  $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_H$  от мощности асинхронного двигателя

номинальный ток статора двигателя вычислен по формуле.

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_H} = \frac{32000}{3 \cdot 577 \cdot 0,83 \cdot 0,81} = 27,481 \text{ А}$$

Получаем, что

$$I_0 = \sqrt{\frac{20,819^2 - \left(0,75 \cdot 27,481 \cdot \frac{1-0,059}{1-0,75 \cdot 0,059}\right)^2}{1 - \left(0,75 \cdot \frac{1-0,059}{1-0,75 \cdot 0,059}\right)^2}} = 6,898 \text{ A}$$

Из формулы Клосса определим соотношение для расчета критического скольжения. В первом приближении принимаем  $\beta = 1$

$$s_k = s_H \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} = 0,018 \cdot \frac{2,3 + \sqrt{2,3^2 - (1 - 2 \cdot 0,059 \cdot 1 \cdot (2,3 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,059 \cdot 1 \cdot (2,3 - 1)} = 0,307 \text{ о.е.}$$

Найдем значения коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \left(\frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}}\right) = 1 + \left(\frac{6,898}{2 \cdot 6 \cdot 27,481}\right) = 1,021 ;$$

$$A_1 = m \cdot U_{1H}^2 \cdot \frac{1 - s_H}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = 3 \cdot 577^2 \cdot \frac{1 - 0,059}{2 \cdot 1,021 \cdot 2,3 \cdot 32000} = 6,262 ;$$

Теперь можно определить активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k}\right) \cdot C_1} = \frac{6,262}{\left(1 + \frac{1}{0,307}\right) \cdot 1,021} = 1,441 \text{ Ом}$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,021 \cdot 1,441 \cdot 1 = 1,472 \text{ Ом}$$

Определим параметр  $\gamma$ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания  $x_{KH}$ :

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k^2}\right) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,307^2}\right) - 1^2} = 3,098$$

Найдем значение индуктивного сопротивления короткого замыкания:

$$x_{KH} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 3,098 \cdot 1,021 \cdot 1,441 = 4,599 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$x'_{2H} = 0,58 \cdot \frac{x_{KH}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{4,559}{1,021} = 2,59 \text{ Ом}$$

Найдем индуктивное сопротивление статорной обмотки:

$$x_{1H} = 0,42 \cdot x_{KH} = 0,42 \cdot 4,559 = 1,915 \text{ Ом}$$

По найденным значениям  $C_1, R_2'$  и  $x_{KH}$  определим критическое скольжение:

$$s_{k1} = \frac{C_1 \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_{KH}^2}} = \frac{1,021 \cdot 1,441}{\sqrt{1,472^2 + 4,559^2}} = 0,307 \text{ о.е.}$$

Рассчитанные значения  $S_{k1}$  и  $S_k$  равны.

Для того чтобы найти ЭДС ветви намагничивания  $E_1$  найдем  $\sin \varphi$ :

$$\varphi = \arccos(\cos \varphi) = \arccos(0,83) = 0,592$$

$$\sin \varphi = 0,558$$

Далее найдем ЭДС ветви намагничивания  $E_1$ , наведенную потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos \varphi - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \cdot \sin \varphi - x_{1H} \cdot I_{1H})^2} = \\ = \sqrt{(577 \cdot 0,83 - 1,472 \cdot 27,481)^2 + (577 \cdot 0,558 - 1,915 \cdot 27,481)^2} = 514,874 \text{ В}$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания:

$$x_{\mu n} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{514,874}{6,898} = 74,644 \text{ Ом}$$

## 4.2 Расчет и построение естественной механической и электромеханических характеристик

Преобразователь частоты выбираем из

Найдем синхронную угловую скорость:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 314,159 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Рассчитаем и построим естественную электромеханическую характеристику:

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + I_2'(\omega)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(\omega) \cdot \sin \phi_2},$$

$$\sin \phi_2 = \frac{x_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{\omega - \omega_0}\right)^2 + x_{KH}^2}}$$

где

$I'_2(\omega)$  - значение приведенного тока ротора от скольжения;

$$I'_2 = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{\omega - \omega_0}\right)^2 + (x_{1H} + x'_{2H})^2}}$$

По вышеприведенным формулам рассчитывается естественная электромеханическая характеристика, приведенная на рисунке 4:

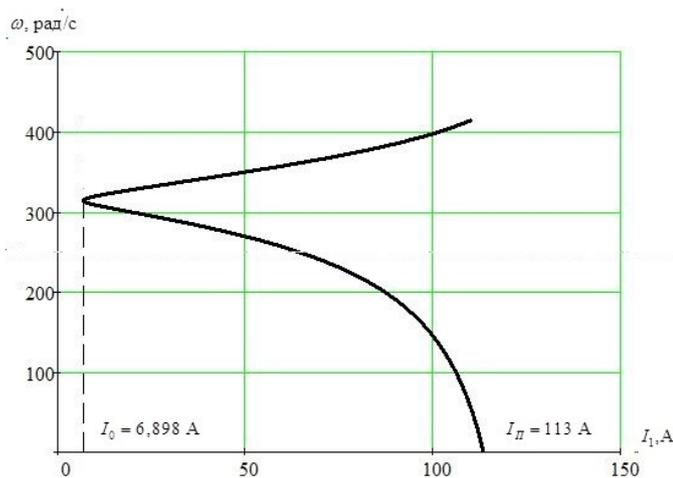


Рисунок 4 – Естественная электромеханическая характеристика асинхронного двигателя  $I_1(\omega)$ .

Рассчитаем и построим естественную механическую характеристику по следующей формуле:

$$M(\omega) = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{\omega - \omega_0} \right)^2 + x_{KH}^2 \right]}$$

Рассчитаем контрольные точки механической характеристики по паспортным данным:

Номинальная скорость:  $\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - s_n) = 314,159 \cdot (1 - 0,059) = 295,6 \text{ рад/с}$ ;

Момент номинальный:  $M_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\omega_{НОМ}} = \frac{32000}{295,6} = 108,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;

Момент критический:  $M_{КР.К} = M_{НОМ} \cdot k_{\max} = 108,25 \cdot 2,3 = 248,965 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;

Момент пусковой:  $M_{П.К} = M_{НОМ} \cdot k_n = 108,25 \cdot 2,0 = 216,491 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

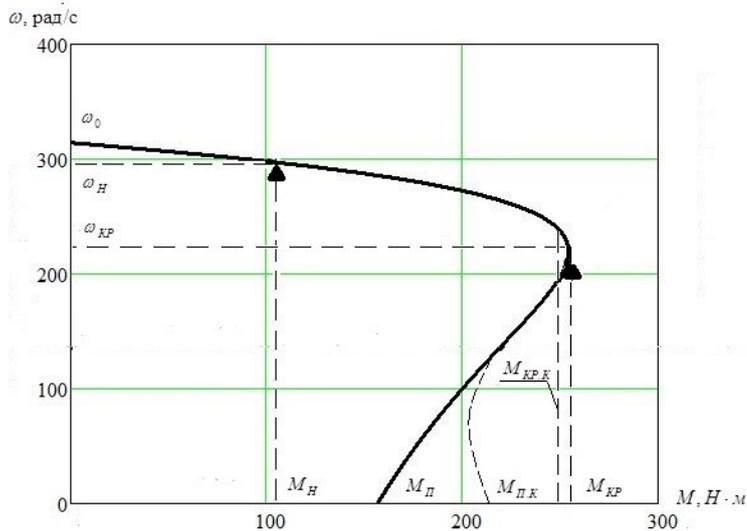


Рисунок 5 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя

Из графика механической характеристики определяем:

1. синхронная скорость  $\omega_0 = 314,159 \text{ рад/с}$ ;

момент ХХ  $M(\omega) = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;

2. номинальная скорость  $\omega_H = 295,6 \text{ рад/с}$ ;

номинальный момент  $M_H = 108,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;

3. критическое скольжение  $s_k = 0,307 \text{ о.е.}$ ,  $\omega_{КР} = 217,652 \text{ рад/с}$ ;

критический момент  $M_{КР} = 254,13 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;

4. скольжение в момент пуска  $s = 1$ ;

пусковой момент  $M_{П} = 156,77 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;

На основании анализа видно, что аналитически и графически определенные данные в контрольных точках существенно различаются только значение пускового момента. Это объясняется тем, что при скольжениях близких к единице проявляется поверхностный эффект, который не был учтен в расчетах.

### 4.3 Расчет переходных процессов скорости и момента

Моделирование асинхронного двигателя приведено в программе MATLAB Simulink. Для создания модели определены параметры:

Индуктивность фазы обмотки статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1H}}{2\pi \cdot f_{1H}} = \frac{1,915}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,006071 \text{ Гн.}$$

Индуктивность фазы обмотки ротора:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2H}}{2\pi \cdot f_{1H}} = \frac{2,59}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,008181 \text{ Гн.}$$

Индуктивность цепи намагничивания:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu H}}{2\pi \cdot f_{1H}} = \frac{74,644}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,238 \text{ Гн.}$$

Имитационная модель изображена на рисунке 6.

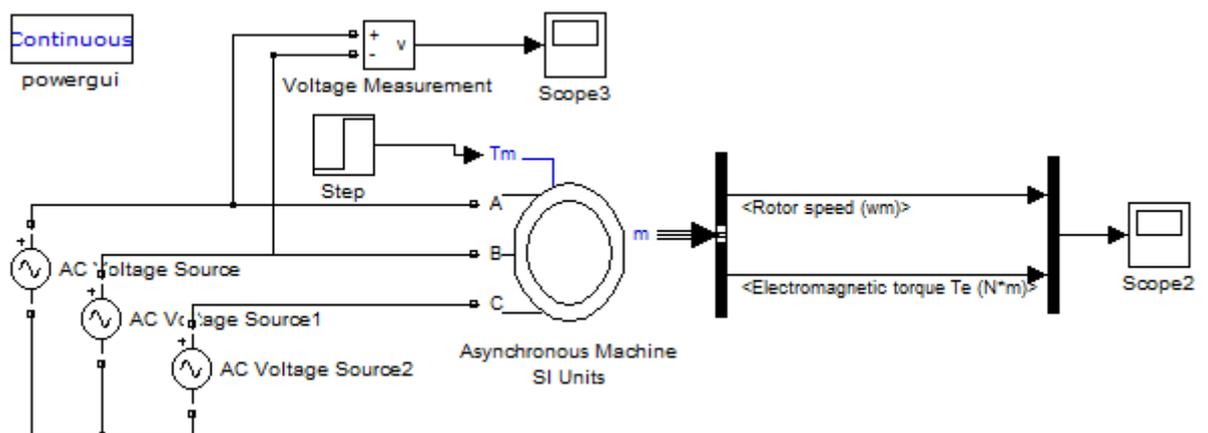


Рисунок 6 - Имитационная модель прямого пуска асинхронного двигателя

Ниже представлены переходные характеристики скорости и момента, а также динамическая характеристика при прямом пуске АД без нагрузки и при набросе нагрузки.

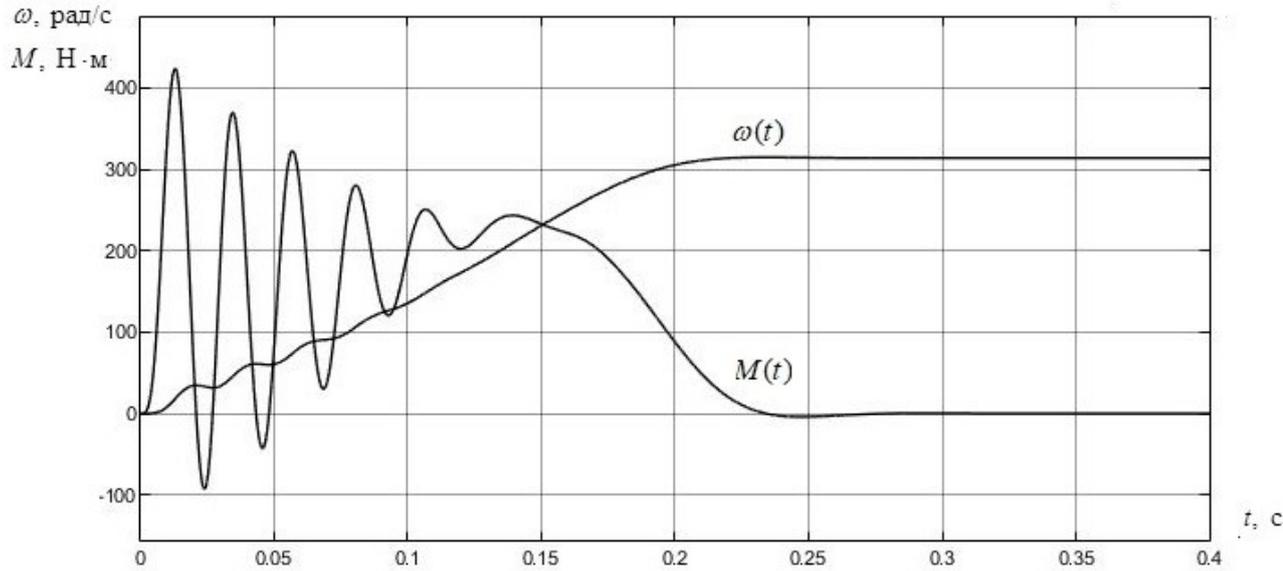


Рисунок 7 – Переходная характеристика скорости ротора и электромагнитного момента АД при прямом пуске

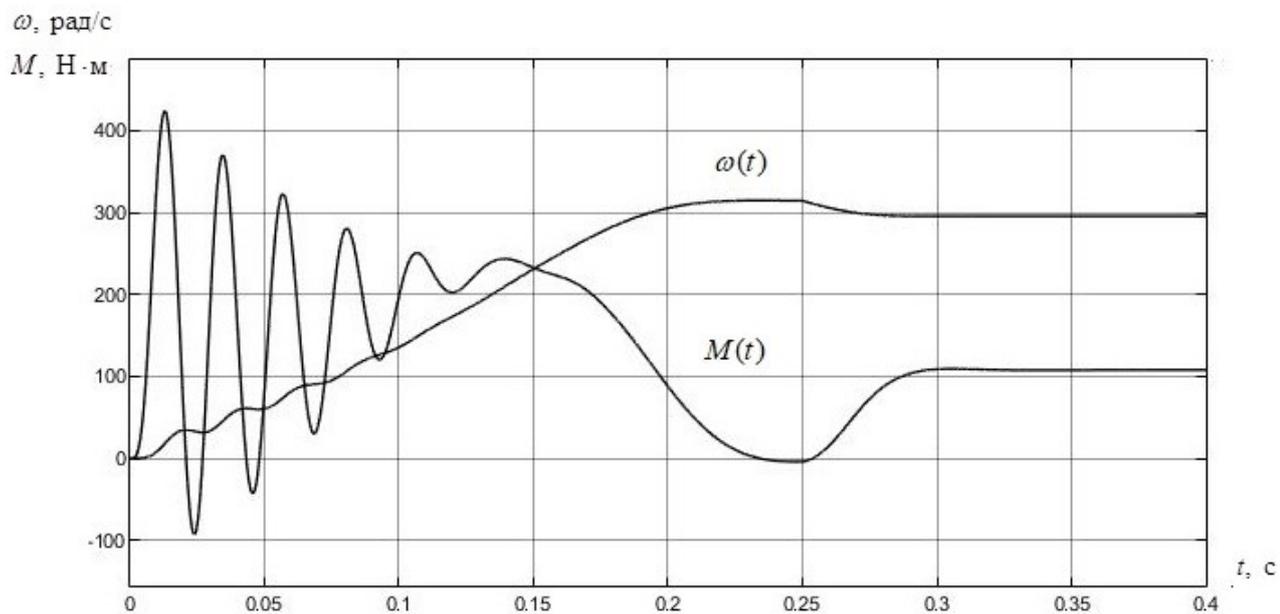


Рисунок 8 – Переходная характеристика скорости ротора и электромагнитного момента АД при прямом пуске и набросе нагрузки

Анализ расчета переходных процессов прямого пуска асинхронного

двигателя показывает, что асинхронный двигатель устойчивое звено, все переходные процессы сходящиеся, и его можно использовать для дальнейших расчетов. Сравнение результатов моделирования и расчета приведено в таблице 1.

Таблица 1 - Численные значения

	$\omega_0, \text{рад/с}$	$\omega_H, \text{рад/с}$	$M_H, \text{Н}\cdot\text{м}$
Расчет	314.159	295.6	108.25
Моделирование	314.1	295.4	108.15

#### 4.4 Выбор типа преобразователя

Выбираем преобразователь частоты фирмы SIEMENS, серии MIDIMASTER ECO, который реализует частотное скалярное регулирование.

Преобразователь частоты выбран из условий:

$$I_{н.пч} \geq I_{н.д.}, P_{н.пч} \geq P_{н.д.}$$

Выбираем модель ECO1-5500/3, со следующими техническими параметрами (таблица 2).

Таблица 2 - Технические параметры ПЧ ECO1-5500/3

Модель	Типо размер	Число фаз	Напряжение питания, В	Мощность двигателя (не более), кВт	Номинальный ток, А	Степень защиты
ECO1-5500/3	7	3	380-500	55	102	IP56

Что удовлетворяет условиям:  $102 \geq 27,481\text{А}$ ,  $55\text{кВт} \geq 32\text{кВт}$ .



Рисунок 9 – Преобразователи частоты серии *Midimaster Eco*

#### 4.5 Расчет и построение механических и электромеханических характеристик разомкнутой системы «Преобразователь частоты - асинхронный двигатель»

Расчет характеристик производим для частот  $f_1=50;25;10;5$  Гц.

При законе регулирования 
$$Z_p = \frac{U_{1H}}{f^2} = \frac{577}{50^2} = 0,231$$

Найдем относительные значения частот питающего напряжения:

при  $f_{1H1}=50$  Гц 
$$f_{1*1} = \frac{f_{1I}}{f_{1I}} = \frac{50}{50} = 1$$

при  $f_{1H2}=25$  Гц 
$$f_{1*2} = \frac{f_{2H}}{f_{1H}} = \frac{25}{50} = 0,5$$

при  $f_{1H3}=10$  Гц 
$$f_{1*3} = \frac{f_{3H}}{f_{1H}} = \frac{10}{50} = 0,2$$

при  $f_{1H4}=5$  Гц 
$$f_{1*4} = \frac{f_{4H}}{f_{1H}} = \frac{5}{50} = 0,1$$

Найдем фазное напряжение обмотки статора асинхронного двигателя:

$$U_{1H1} = z_p \cdot f_{1H1}^2 = 0,231 \cdot 50^2 = 577,5 \text{ В};$$

$$U_{1H2} = z_p \cdot f_{1H2}^2 = 0,231 \cdot 25^2 = 144,4 \text{ В};$$

$$U_{1H3} = z_p \cdot f_{1H3}^2 = 0,231 \cdot 10^2 = 23,1 \text{ В};$$

$$U_{1H4} = z_p \cdot f_{1H4}^2 = 0,231 \cdot 5^2 = 5,8 \text{ В}.$$

Далее выполним расчет значений скорости идеального холостого хода:

$$\omega_{01} = \frac{2\pi \cdot f_{1H1}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 314,159 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{02} = \frac{2\pi \cdot f_{1H2}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 30}{1} = 188,496 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{03} = \frac{2\pi \cdot f_{1H3}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 15}{1} = 94,248 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{04} = \frac{2\pi \cdot f_{1H4}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10}{1} = 62,832 \text{ рад/с}.$$

Определим токи холостого хода при данных частотах регулирования:

$$I_{01} = \frac{U_{1H1}}{X_{\mu H}} = \frac{577,5}{74,644} = 7,7 \text{ А};$$

$$I_{02} = \frac{U_{1H2}}{X_{\mu H} \cdot f_{1*2}} = \frac{144,4}{74,644 \cdot 0,5} = 3,87 \text{ А};$$

$$I_{03} = \frac{U_{1H3}}{X_{\mu H} \cdot f_{1*3}} = \frac{23,1}{74,644 \cdot 0,2} = 1,55 \text{ А};$$

$$I_{04} = \frac{U_{1H4}}{X_{\mu H} \cdot f_{1*4}} = \frac{5,8}{74,644 \cdot 0,1} = 0,78 \text{ А}.$$

Строим электромеханические характеристики  $\Gamma_2(\omega)$  для выбранных частот по выражениям:

$$I_2'(s, f) = \frac{U_1(f)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2(f) + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)}\right)^2}},$$

$$\text{где } \omega(s, f) = \omega_0(f) \cdot (1 - s).$$

$$f_{4H} = 5 \text{ Гц } \omega, \text{ рад/с}$$

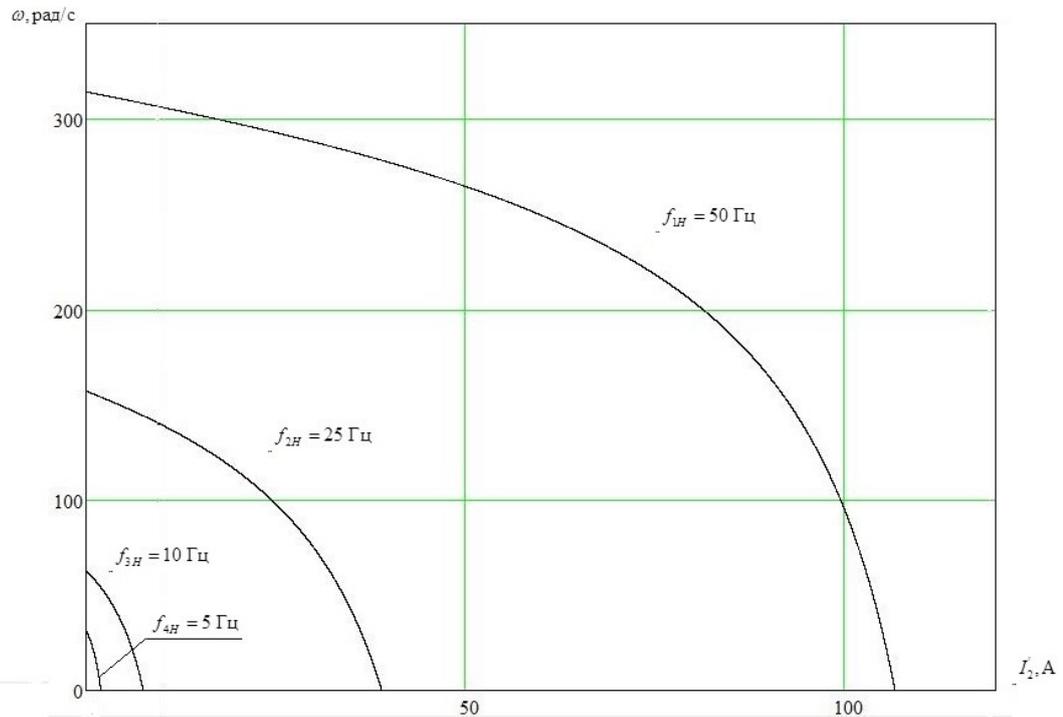


Рисунок 10 – Искусственные электромеханические характеристики  $\Gamma_2(\omega)$  при частотном регулировании скорости

Также строим электромеханические характеристики  $I_1(\omega)$  для выбранных частот по выражениям

$$I_1(s, f) = \sqrt{(I_0(f))^2 + (I_2'(s, f))^2 + 2 \cdot I_0(f) \cdot I_2'(s, f) \cdot \sin \varphi_2(s, f)},$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1 - s),$$

$$\sin \varphi_2(s, f) = \frac{X_{KH} \cdot f_{1*}(f)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2(f)}};$$

где

$$I_0(f) = \frac{U_1(f)}{X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)} \quad \text{– ток холостого хода асинхронного двигателя в}$$

зависимости от частоты.  $I_1, A$

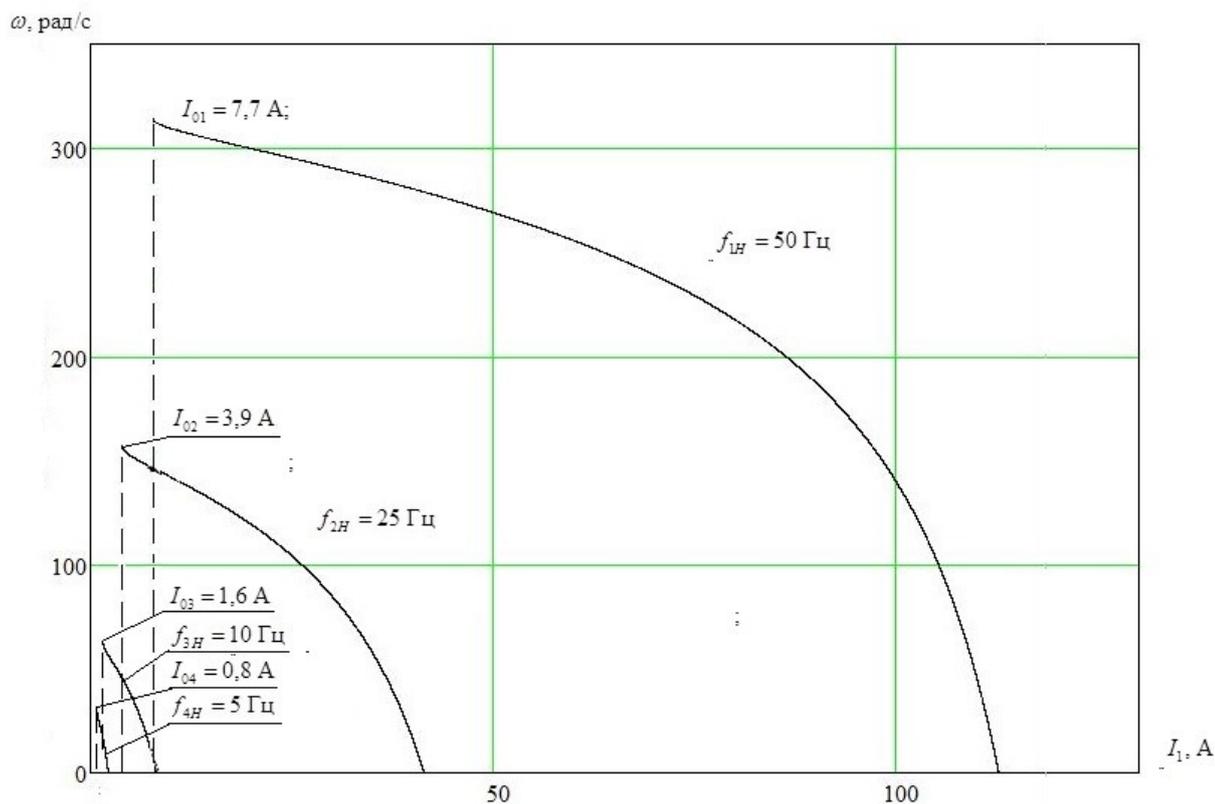


Рисунок 11 – Искусственные электромеханические характеристики  $I_1(\omega)$  при частотном регулировании скорости

Механические характеристики асинхронного двигателя  $M(\omega)$  рассчитываем для выбранных частот, по выражениям:

$$M(s, f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2 \cdot R'_2}{\omega_0(f) \cdot s \cdot \left[ X_{\text{ei}}^2 \cdot (f_1^*(f))^2 + \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\text{mi}} \cdot f_1^*(f)} \right)^2 \right]}$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1 - s)$$

Также зададим функцию нагрузки. Насосная нагрузка описывается функцией.

$$M_c(\omega) = M_0 + k \cdot \omega^2,$$

В работе произведен расчет момента насоса при нулевой скорости, который обычно составляет 10% от номинального момента двигателя

$$M_0 = 0,1 \cdot M_H = 0,1 \cdot 108,25 = 10,83 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Рассчитываем коэффициент  $k$  исходя из того, что при частоте  $f_{1H1} = 50$  Гц нагрузка проходит через точку  $0,75 \cdot M_H$ . Рабочая точка выбрана из условия, что при снижении питающего напряжения на 15%, двигатель не должен перегреваться, работая на искусственной характеристике при пониженном напряжении:

$$k = \frac{0,75 \cdot M_H - M_0}{\omega_H^2} = 8 \cdot 10^{-4}$$

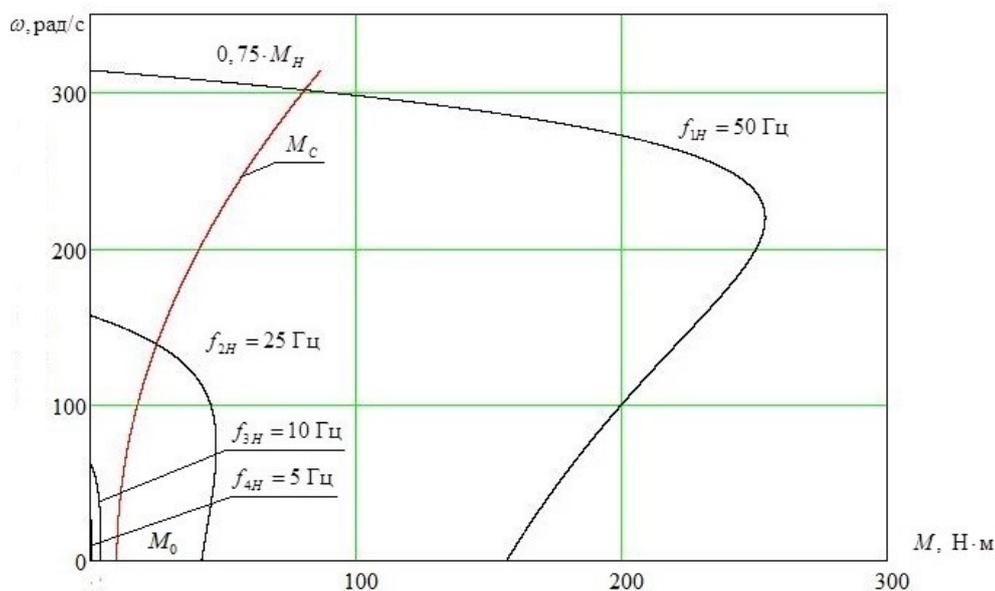


Рисунок 12 – Искусственные механические характеристики  $M(\omega)$  при частотном регулировании скорости

Исходя из графика, мы видим, что для работы на низких частотах необходимо увеличить напряжение. Следовательно, в первой итерации необходимо изменить вольт – частотную характеристику преобразователя частоты.

В технической литературе вентиляторная и насосная механическая характеристика описывается уравнением, когда момент пропорционален угловой скорости во второй степени:  $M_c(\omega) = M_0 + k \cdot \omega^2$ .

Практика показывает, что характеристика насоса определяется уравнением, когда момент пропорционален скорости в третьей степени:

$M_{с.п}(\omega) = M_0 + k_1 \cdot \omega^3$ , рассчитаем коэффициент  $k$ .

$$k_1 = \frac{0,75 \cdot M_H - M_0}{\omega_H^2} = 2,6 \cdot 10^{-6}$$

Построим характеристику  $M_{с.п}(\omega)$ :

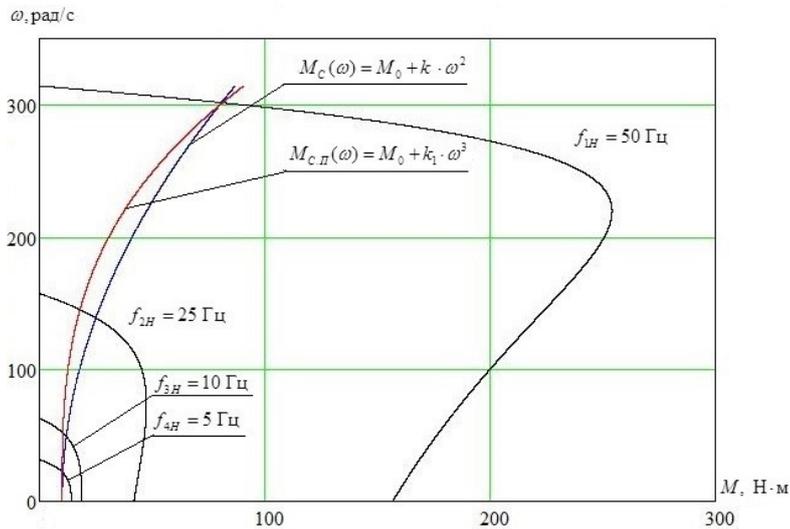


Рисунок 13 - Искусственные механические характеристики  $M(\omega)$  при частотном регулировании скорости с насосной характеристикой  $M_{с.п}(\omega)$

Построив характеристику  $M_{с.п}(\omega)$ , мы видим, что данная характеристика имеет незначительные отличия от характеристики  $M_c(\omega)$ . Следовательно, беря вышесказанное во внимание для дальнейших расчетов будет использована  $M_{с.п}(\omega)$ , момент пропорционален скорости в третьей степени.

#### 4.6 Моделирование системы ПЧ – АД в среде MatLab

На практике наибольшее распространение получил такие способы частотного регулирования скорости как  $E_{1j} / f_{1j} = const$ ,  $E_{1j} / f_{1j}^2 = const$ ,  $E_{1j} / \sqrt{f_{1j}} = const$ .

Структурная схема системы скалярного частотного управления с IR-компенсацией приведена на рисунке 43.

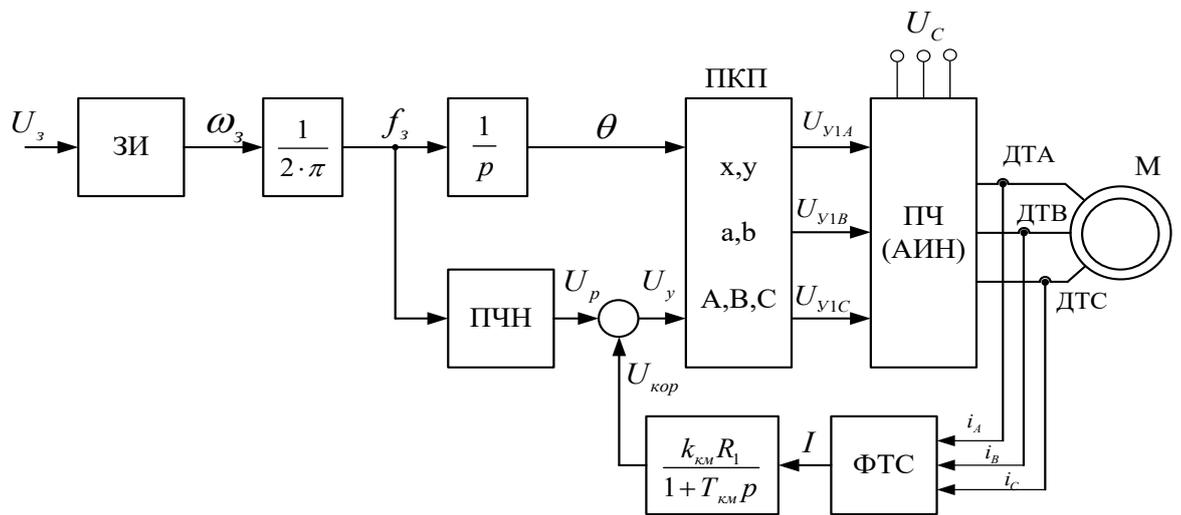


Рисунок 14 - Структурная схема системы скалярного частотного управления с ИР-компенсацией

Задатчик интенсивности определяет темп разгона двигателя и график его разгона.

Найдем эквивалентные сопротивление ротора с учетом ИР – компенсации  $I(t)$

$$R_{1ЭКВ1} = R_1 \cdot (1 - K_{KM1}) = 1,472 \cdot (1 - 0,25) = 1,104 \text{ Ом.}$$

$$R_{1ЭКВ2} = R_1 \cdot (1 - K_{KM2}) = 1,472 \cdot (1 - 0,5) = 0,736 \text{ Ом.}$$

$$R_{1ЭКВ3} = R_1 \cdot (1 - K_{KM3}) = 1,472 \cdot (1 - 0,75) = 0,368 \text{ Ом.}$$

Строим электромеханические характеристики  $\Gamma_2(\omega)$  для выбранных частот и коэффициентов  $K_{KM}$  (рис.21) по выражениям

$$I_2'(s, f, K_{KM}) = \frac{U_1(f)}{\sqrt{\left( R_{1ЭКВ}(K_{KM}) + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2(f) + \left( \frac{R_{1ЭКВ}(K_{KM}) \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)} \right)^2}},$$

где  $R_{1ЭКВ}(K_{KM}) = R_1 \cdot (1 - K_{KM})$  – эквивалентное активное сопротивление статорной цепи.

$$\omega(s, f) = \omega_0(f) \cdot (1 - s),$$

$$f_{1*}(f) = \frac{f}{f_{1H}} \text{ – относительная частота питающего напряжения;}$$

$\omega_0(f) = \omega_{0H} \cdot f_{1*}(f)$  – скорость идеального холостого хода при данной частоте напряжения питания;

в диапазоне скорости  $\omega = 0 \div \omega_0$ .

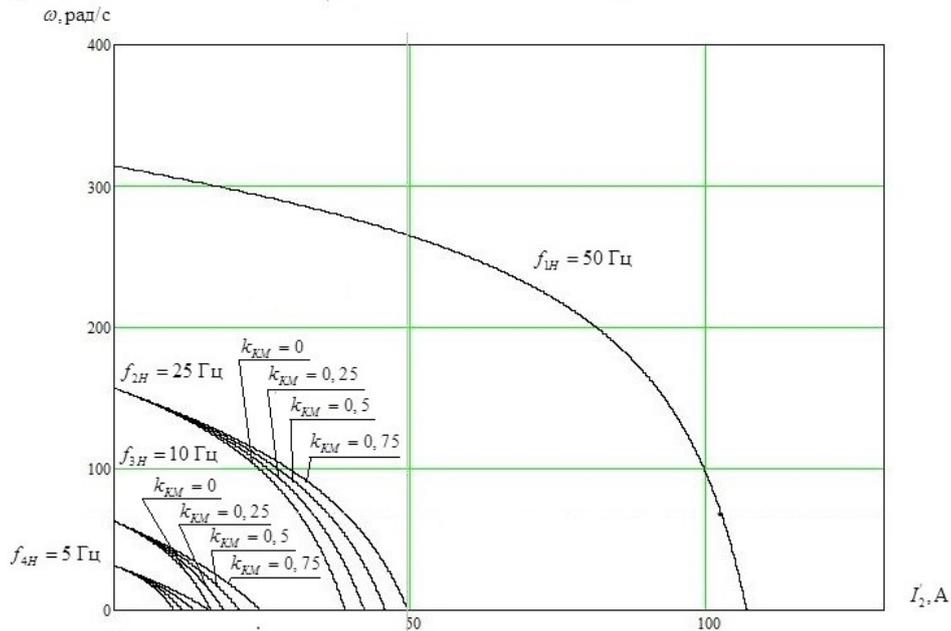


Рисунок 15 – Искусственные электромеханические характеристики  $I_2(\omega)$  при частотном регулировании скорости с IR-компенсацией

Также строим электромеханические характеристики  $I_1(\omega)$  для выбранных частот и коэффициентов  $K_{KM}$  по выражениям

$$I_1(s, f, K_{KM}) = \sqrt{(I_0(f))^2 + (I_2'(s, f, K_{KM}))^2 + 2 \cdot I_0(f) \cdot I_2'(s, f, K_{KM}) \cdot \sin \varphi_2(s, f, K_{KM})}$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1 - s),$$

$$\sin \varphi_2(s, f, K_{KM}) = \frac{X_{KH} \cdot f_{1*}(f)}{\sqrt{\left(R_{1\text{ЭКВ}}(K_{KM}) + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2(f)}}$$

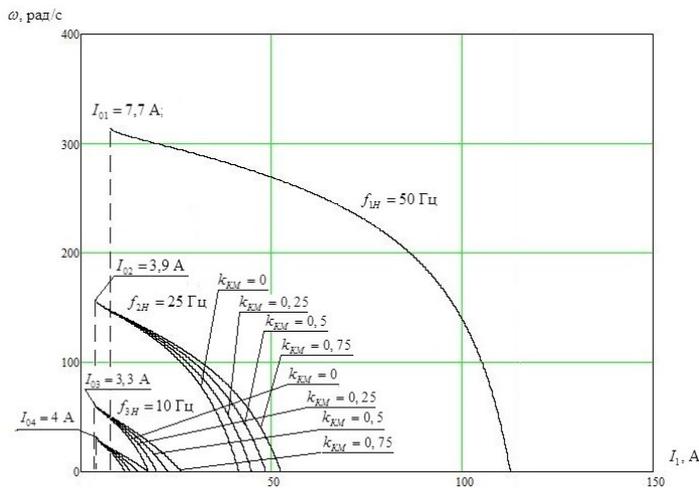


Рисунок 16 – Искусственные электромеханические характеристики  $I_1(\omega)$  при частотном регулировании скорости с IR-компенсацией

Механические характеристики асинхронного двигателя  $M(\omega)$  рассчитываем для выбранных частот и коэффициентов  $K_{KM}$  по выражениям

$$M(s, f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2 \cdot R'_2}{\omega_0(f) \cdot s \cdot \left[ X_{KH}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2 + \left( R_{1\text{ЭКВ}}(K_{KM}) + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_{1\text{ЭКВ}}(K_{KM}) \cdot R'_2}{s \cdot X_{MH} \cdot f_{1*}(f)} \right)^2 \right]}$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1-s) \cdot k_{KM} = 0,75$$

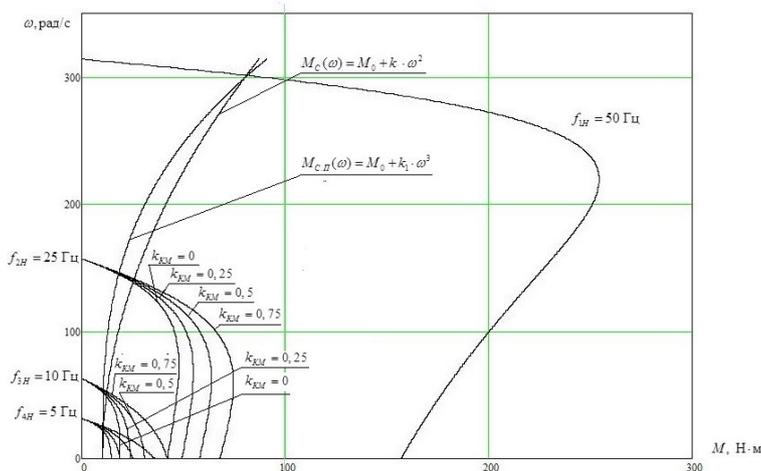


Рисунок 17 – Искусственные механические характеристики  $M(\omega)$  при частотном регулировании скорости с IR-компенсацией

Видим, что при увеличении коэффициента компенсации момента  $K_{KM}$  токи короткого замыкания  $I_{KЗ}$  имеют большие значения, причем эти различия тем больше, чем меньше частота обмоток статора  $f_1$ . Это происходит потому, что при малых частотах больше доля падения напряжения на активном сопротивлении  $R_1$ , следовательно, больше доля компенсации.

Для механических характеристик получаем, что при увеличении коэффициента компенсации момента  $K_{KM}$  критический момент увеличивается, а характеристики становятся более жесткими.

#### **4.7 Расчет переходных процессов скорости и момента для режима пуска сброса и наброса нагрузки на валу двигателя замкнутой системы «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель»**

В соответствии с функциональной схемой, представленной на рисунке 18, составим имитационную модель привода. Для этого определим передаточные функции входящих в нее блоков.

На рисунке 18 представлены математически рассчитанная и аппроксимированная ломаными линиями кривые зависимости  $U_{1j} / f_{1j}^2 = const$ .

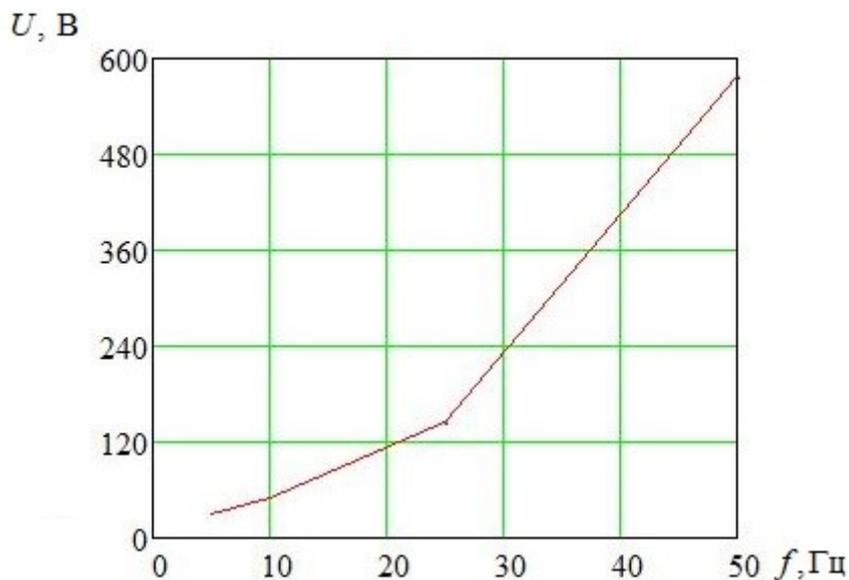


Рисунок 18 - Кривая зависимости  $U(f)$

Кривая задается в блоке ПЧН четырьмя точками:

$$1. f = 5 \text{ Гц}, U = 30 \text{ В} \quad 2. f = 10 \text{ Гц}, U = 50 \text{ В} \quad 3. f = 25 \text{ Гц}, U = 144,4 \text{ В} \quad 4. f = 50 \text{ Гц}, U = 500 \text{ В}$$

Инвертор напряжения представим апериодическим звеном. Его передаточная функция:

$$W_{ин}(p) = \frac{k_{ин}}{T_{ин} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,0002p + 1},$$

где  $k_{ин} = 1$  - коэффициент передачи инвертора;

$$T_{ин} = \frac{1}{f_{нч}} = \frac{1}{5000} = 0,0002$$

постоянная времени запаздывания автономного инвертора напряжения,

где  $f_{нч} = 5000 \text{ Гц}$  - несущая частота инвертора.

Положительная обратная связь по току представляется апериодическим звеном:

$$W_{ом}(p) = \frac{k_{км}}{T_{км} \cdot p + 1} = \frac{0,1}{0,001 \cdot p + 1},$$

где  $k_{км}$  - коэффициент положительной обратной связи по току, примем

$$k_{км} = 0,1;$$

$T_{KM}$  - постоянная времени задержки контура тока, время достаточное для определения мгновенного значения тока статора асинхронного двигателя с современными контроллерами составляет  $T_{KM} = 0,001$ .

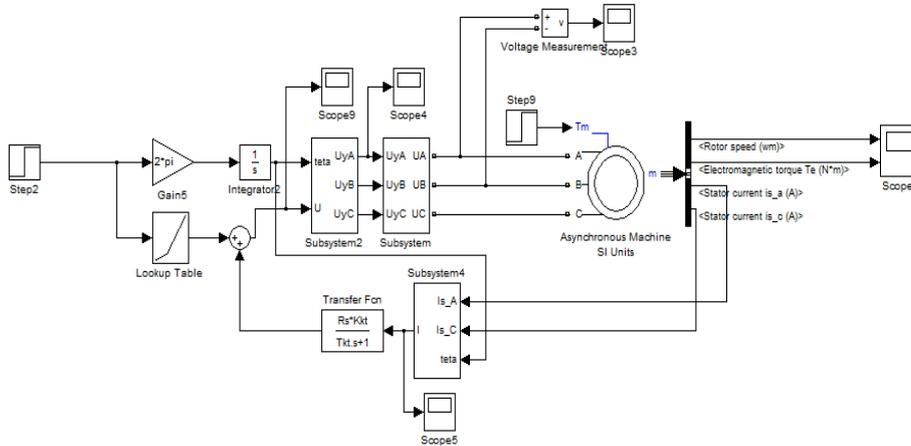


Рисунок 19 - Имитационная модель замкнутой системы ПЧ-АД с IR-компенсацией

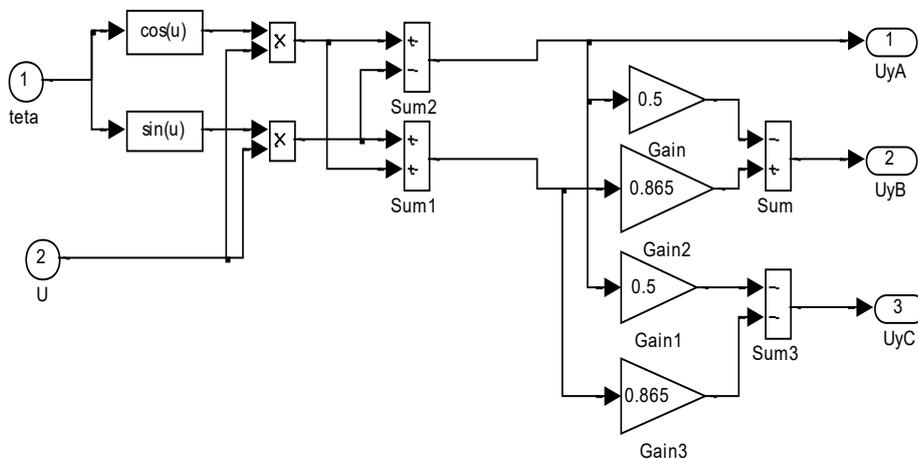


Рисунок 20 - Имитационная модель прямого координатного преобразователя

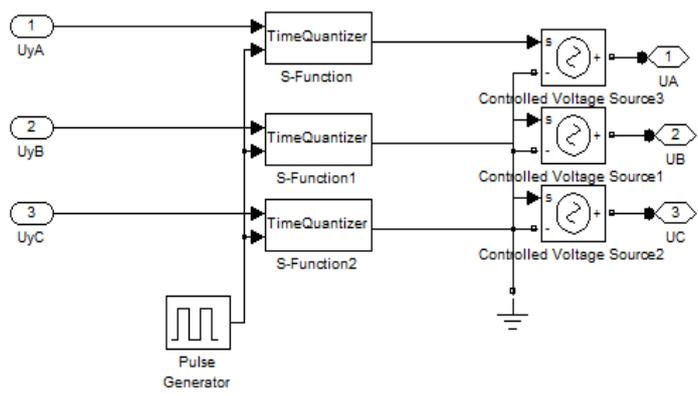


Рисунок 21 - Имитационная модель преобразователя частоты

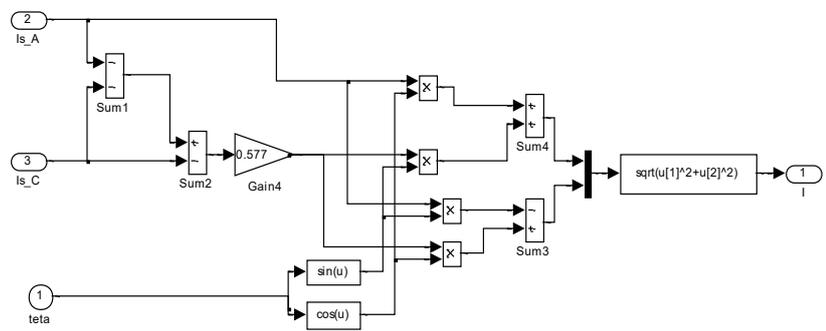


Рисунок 22 - Имитационная модель обратного координатного преобразователя

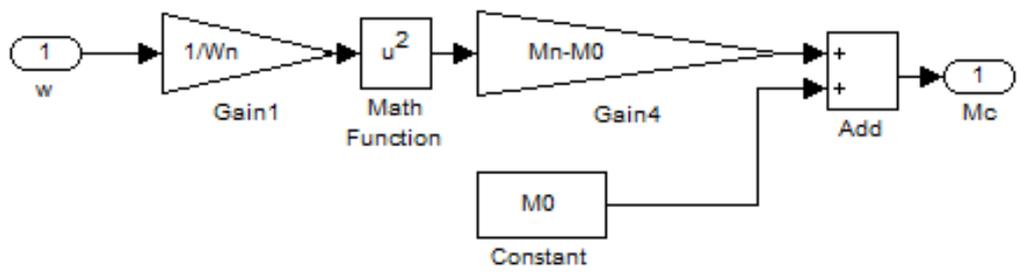


Рисунок 23 – Имитационная модель насосной нагрузки

Расчет переходных процессов скорости момента и тока для различных коэффициентов компенсации момента, проведенной в программной среде *MatLab-Simulink* для частоты 50 Гц преобразователя приведен на рисунках. На рисунке 52 переходные процессы получены для коэф компенсации момента  $k_{км} = 0,25$ .

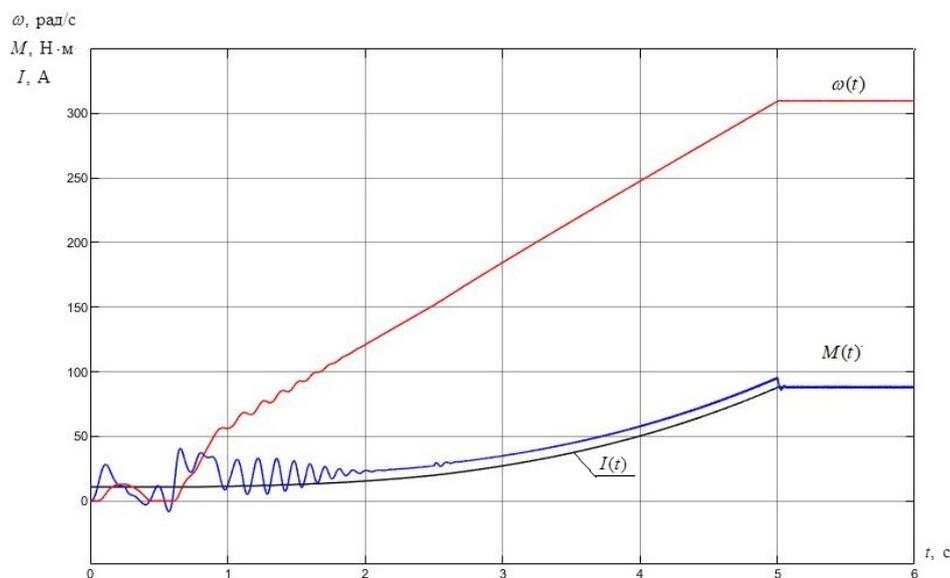


Рисунок 24 – Переходная характеристика для скорости ротора и электромагнитного момента АД при пуске ( $k_{км} = 0,25$ )

Анализ рисунка 24 показывает, что электропривод выходит на установленную скорость в соответствии с моментом сопротивления на его валу. Пуск ЭП проведен через задатчик интенсивности, поэтому скорость нарастает плавно. Изменение момента соответствует характеристики насоса, колебания электромагнитного момента незначительны и соответствуют требованиям и соответствуют требованиям механизмам – насосам.

Для обеспечения более жесткой механической характеристики электропривода в статике (см рис 25) примем  $k_{км} = 0,5$  и проведем исследование переходных процессов от задатчик интенсивности.

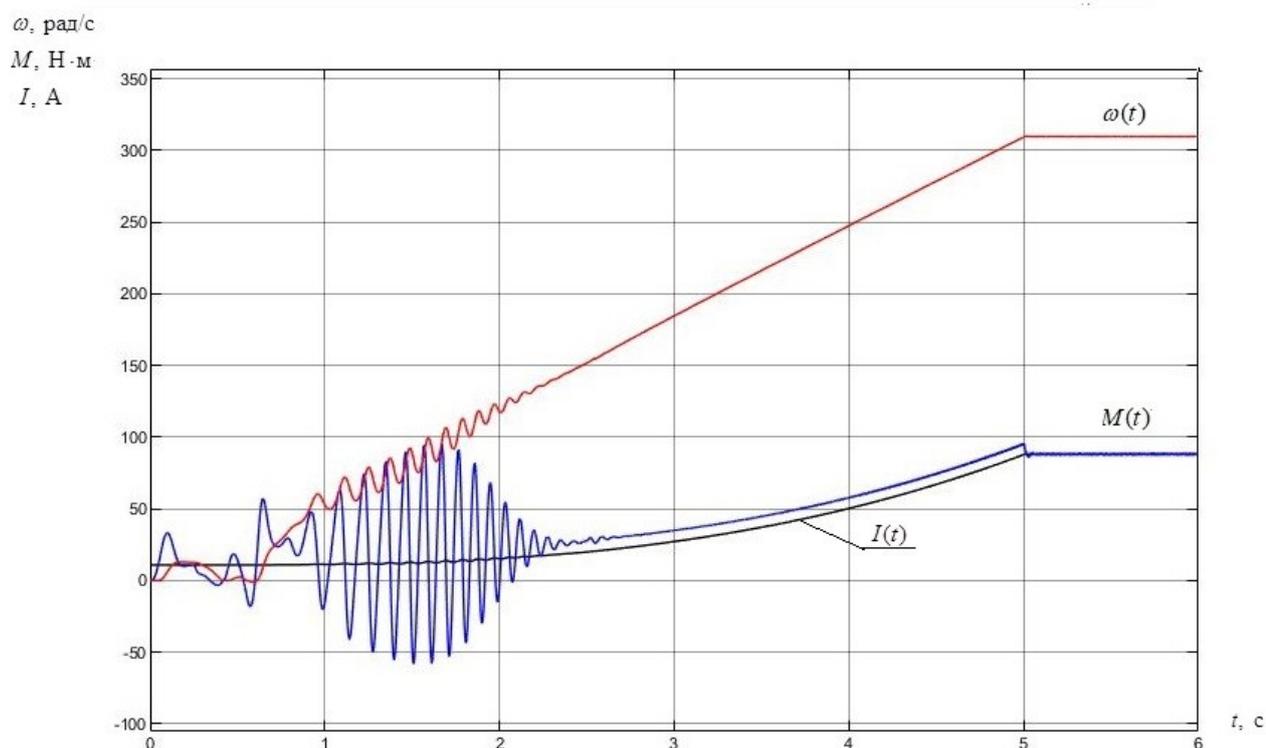


Рисунок 25 – Переходная характеристика для скорости ротора и электромагнитного момента АД при пуске ( $k_{км} = 0,5$ )

Как можно видеть из рисунка при уменьшении коэффициента компенсации момента, колебательность заметно уменьшилась. Для большей наглядности построим характеристику для  $k_{км} = 0,75$

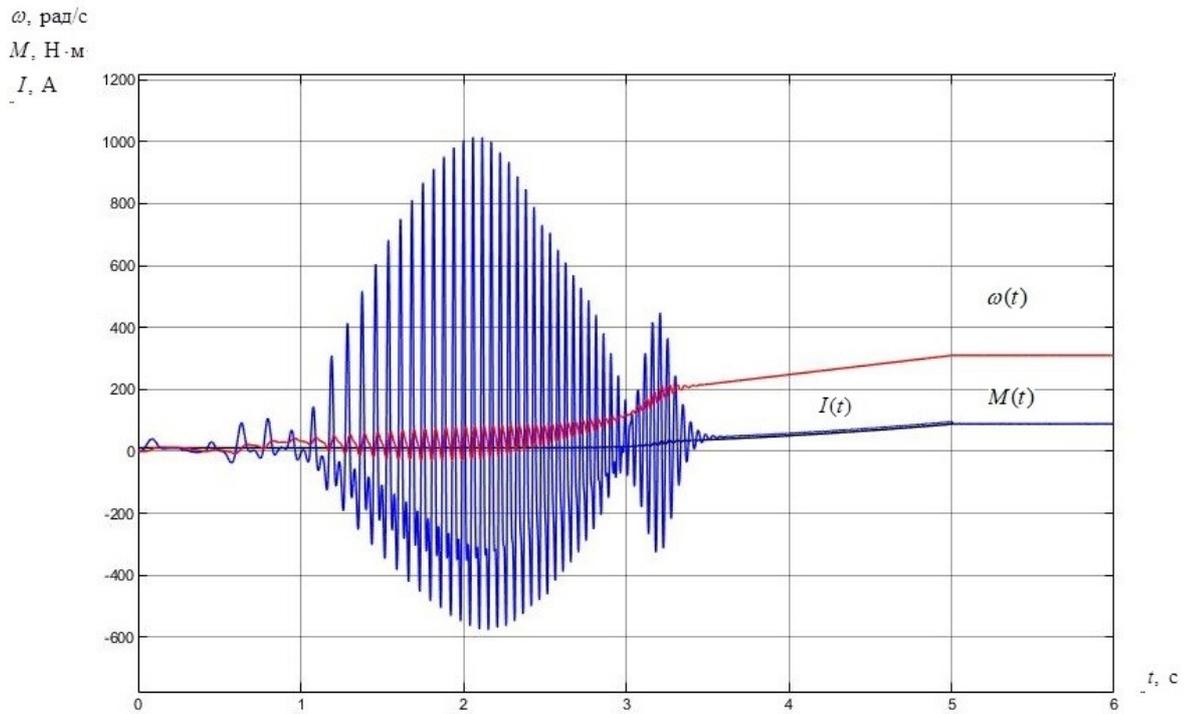


Рисунок 26 – Переходная характеристика для скорости ротора и электромагнитного момента АД при пуске ( $k_{км} = 0,75$ )

Также рассмотрим характеристики для частоты 25 Гц

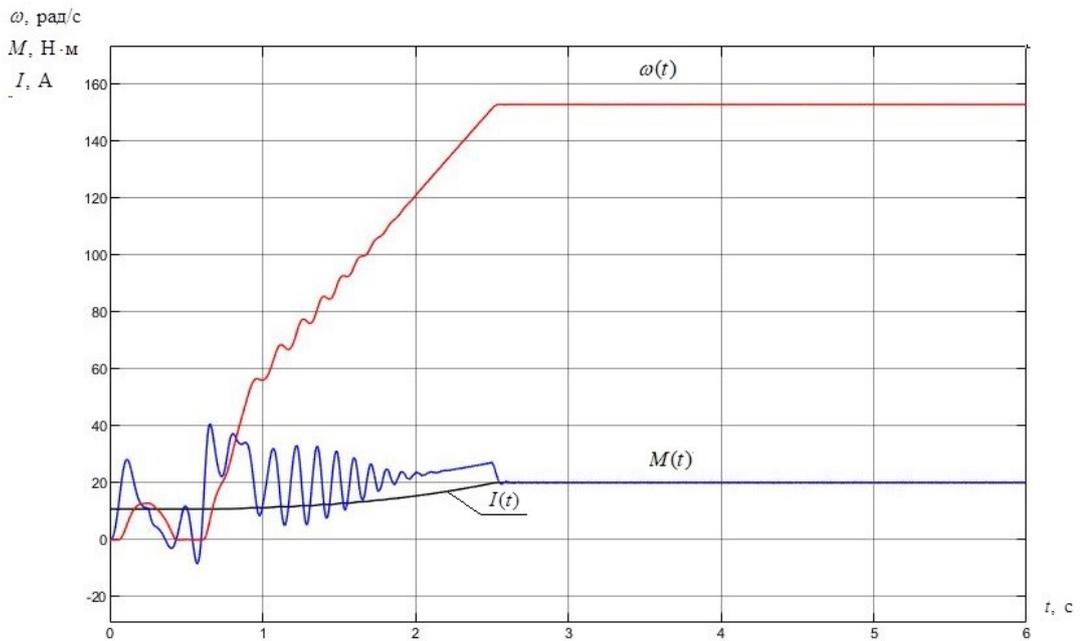


Рисунок 27 – Переходная характеристика для скорости ротора и электромагнитного момента АД при пуске ( $k_{км} = 0,25$ )

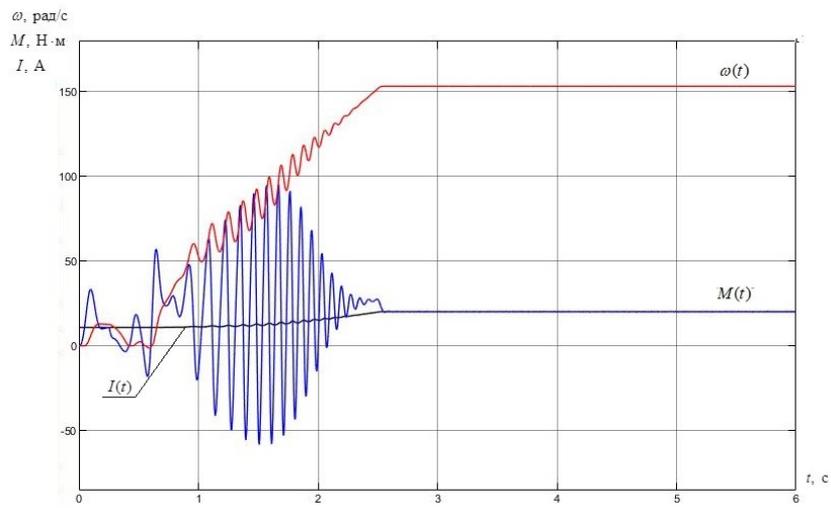


Рисунок 28 – Переходная характеристика для скорости ротора и электромагнитного момента АД при пуске ( $k_{км} = 0,5$ )

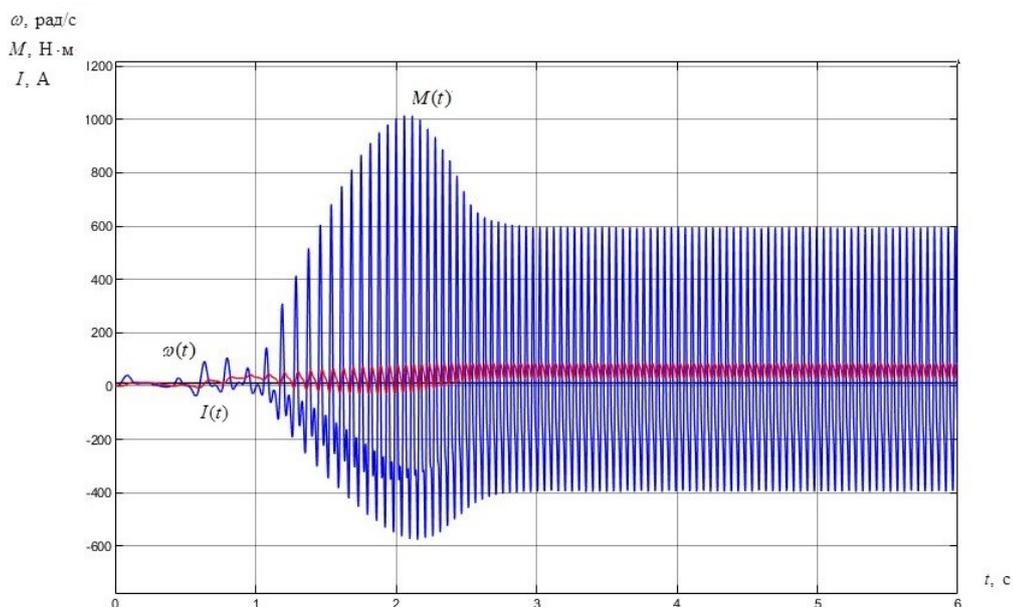


Рисунок 29 – Переходная характеристика для скорости ротора и электромагнитного момента АД при пуске ( $k_{км} = 0,75$ )

Как видно из полученных характеристик при увеличении коэффициента IR-компенсации, время переходного процесса и колебания электромагнитного момента двигателя увеличиваются. Следует также отметить, что в установившихся продолжительных режимах характеристика на 25 Гц использоваться не будет. Однако данная характеристика будет задействована в разгоне.

## 5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

### 5.1 Введение

Объектом исследования является проектируемый электропривод погружного насоса. Установка состоит из двух частей: наземной и погружной. Наземная часть включает автотрансформатор, станцию управления. Погружная часть включает колонну, на которой погружной агрегат спускается в скважину, бронированный трехжильный электрический кабель, по которому подается питающее напряжение погружному электродвигателю. Исходя из этого мы рассмотрим возможные вопросы охраны труда и техники безопасности

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

Согласно статье 7, пункту 2 и статье 37, пункту 3 Конституции РФ в Российской Федерации осуществляется охрана труда и здоровья людей, также каждый имеет право на труд в условиях, отвечающих требованиям безопасности и гигиены

Также, согласно статье 216 «Государственное управление охраной труда» главе 35 «Организация охраны труда» Трудового кодекса Российской Федерации

В целях государственного управления охраной труда Правительство Российской Федерации, уполномоченные федеральные органы исполнительной власти:

- обеспечивают разработку нормативных правовых актов, определяющих основы государственного управления охраной труда;
- разрабатывают федеральные целевые программы улучшения условий и охраны труда и обеспечивают контроль за их выполнением;
- устанавливают порядок организации и проведения обучения по охране труда работников, в том числе руководителей организаций, а также работодателей - индивидуальных предпринимателей, проверки знания ими требований охраны труда, а также порядок организации и проведения обучения оказанию первой помощи пострадавшим на производстве, инструктажа по охране труда, стажировки на рабочем месте.

Стоит также отметить статью 218 «Комитеты (комиссии) по охране труда», согласно которой по инициативе работодателя и (или) по инициативе работников либо их представительного органа создаются комитеты (комиссии) по охране труда. В их состав на паритетной основе входят представители работодателя и представители выборного органа первичной профсоюзной организации или иного представительного органа работников. Типовое положение о комитете (комиссии) по охране труда утверждается федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере

труда.

При этом, комитет (комиссия) по охране труда организует совместные действия работодателя и работников по обеспечению требований охраны труда, предупреждению производственного травматизма и профессиональных заболеваний, а также организует проведение проверок условий и охраны труда на рабочих местах и информирование работников о результатах указанных проверок, сбор предложений к разделу коллективного договора (соглашения) об охране труда.

Нормирование ГОСТ 12.1.038 – 82 «ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов» [14] устанавливает предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека при нормальном режиме работы электроустановок производственного и бытового назначения постоянного и переменного тока частотой 50 и 400 Гц,

На подстанция имеется комплект предупредительных плакатов.

На рабочем месте дежурного персонала находится полный комплект рабочих инструкций и инструкций по технике безопасности:

1. Должностная инструкция дежурного данного района обслуживания.
2. Инструкция по производству оперативных переключений на подстанции данного района.
3. Инструкция действий оперативного персонала в случае аварии.
4. Инструкция по отысканию однофазных замыканий на землю в данном районе подстанций.
5. Инструкция дежурного персонала по технике безопасности.
6. Оперативный журнал.
7. Журнал производства работ.
8. Журнал телефонограмм.
9. Журнал закороток.

На подстанции имеется список лиц административно – технического персонала утвержденный главным энергетиком предприятия,

имеющих право единоличного осмотра подстанций.

### 5.3 Производственная безопасность

Производственная безопасность – это система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих воздействие на работающих опасных производственных факторов. Для удобства используем таблицу

Таблица

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разра ботка	Изгот овлен	Экспл уатац	
1. Работа на открытом воздухе			+	МР 2.2.7.2129-06 «Режимы труда и отдыха работающих в холодное время года на открытой территории или в неотапливаемых помещениях» МР 2.2.8.0017-10 «Гигиена труда. Средства коллективной и индивидуальной защиты. Режимы труда и отдыха работающих в нагреваемом микроклимате в производственном помещении и на открытой местности в теплый период года» ГОСТ 12.1.003-2014 «Шум. Общие требования безопасности» Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95. ГОСТ 12.1.012–2004 «ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования», Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.556 – 96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий» Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 24 июля 2013 г. № 328н «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок»
2. Превышение уровня шума		+	+	
3. Недостаточная освещенность рабочей зоны		+	+	
4. Повышенное Виброакустические вредные факторы	+	+	+	
5. Поражение электрическим током	+	+	+	

### **5.3.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов**

#### **5.3.1.1 Работа на открытом воздухе**

На рабочих при работе на открытом воздухе в условиях низких температур возможно воздействие следующих опасных и вредных производственных факторов:

- пониженная температура воздуха рабочей зоны;
- повышенная влажность воздуха рабочей зоны;
- повышенная скорость движения воздуха;
- переохлаждение, обморожение;

Признаками переохлаждения являются:

- озноб и дрожь;
- нарушение сознания: заторможенность и апатия, бред и галлюцинации, неадекватное поведение;
- посинение и побледнение губ;
- снижение температуры тела.

Признаки обморожения нижних конечностей:

- потеря чувствительности;
- кожа бледная, твердая и холодная на ощупь;
- нет пульса у лодыжек.

Не менее опасна и повышенная температура. Ухудшается самочувствие, состояние здоровья, понижается работоспособность. Работы при повышенных температурах воздуха производственного помещения или работы на открытом воздухе в жаркое время года необходимо тщательно планировать, режим труда и отдыха для таких работ должен соответствовать устанавливаемым нормативными документами требованиям.

#### **5.3.1.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны**

Свет влияет на физиологическое состояние человека, правильно организованное освещение стимулирует протекание процессов высшей нервной

деятельности и повышает работоспособность. При недостаточном освещении человек работает менее продуктивно, быстро устает, растет вероятность ошибочных действий, что может привести к травматизму. Недостаточное освещение рабочего места затрудняет длительную работу, вызывает повышенное утомление и способствует развитию близорукости. Слишком низкие уровни освещенности вызывают апатию, сонливость, а в некоторых случаях способствуют развитию чувства тревоги. Длительное пребывание в условиях недостаточного освещения сопровождается снижением интенсивности обмена веществ в организме и ослаблением его реактивности. К таким же последствиям приводит длительное пребывание в световой среде с ограниченным спектральным составом света и монотонным режимом освещения.

Излишне яркий свет слепит, снижает зрительные функции, приводит к перевозбуждению нервной системы, уменьшает работоспособность, нарушает механизм сумеречного зрения. Воздействие чрезмерной яркости может вызывать фотоожоги глаз и кожи, кератиты, катаракты и другие нарушения.

### **5.3.1.3 Шум**

Шум — один из наиболее распространенных неблагоприятных факторов производственной среды. Основные производственные процессы, сопровождающиеся шумом — это работа электропривода. Говоря о действии шума на организм, следует иметь в виду, что он оказывает как местное, так и общее воздействие. При этом учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, изменяются двигательная и секреторная функции желудка и других органов. Неблагоприятно отражается шум на нервной системе, вызывая головные боли, бессонницу, ослабление внимания, замедление психических реакций, что в конечном счете приводит к понижению работоспособности. Предельно допустимые уровни шума представлены в таблице 2.

Таблица 2

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

### 5.3.1.4 Вибрация

Одним из наиболее опасных для человеческого организма производственных факторов является вибрация. Под вибрацией понимается колебание твёрдых тел. Источником вибрации является электродвигатель. Вибрация является общей и постоянной

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

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

Гигиеническое нормирование вибраций регламентирует параметры производственной вибрации и правила работы с виброопасными механизмами и оборудованием, ГОСТ 12.1.012–2004 «ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования» [20], Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.556 – 96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных

Таблица 9.3 – Гигиенические нормы вибрации

Вид вибрации	Допустимый уровень вибростойкости, дБ, в активных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц					
	2	4	8	16	32,5	63
Технологическая	108	99	93	92	92	92

### 5.3.1.5 Поражение электрическим током

Поражение электрическим током происходит, когда человеческий организм вступает в контакт с источником напряжения. Коснувшись проводника, который находится под напряжением, человек становится частью электросети, по которой начинает протекать электрический ток. Как известно, организм человека состоит из большого количества солей и жидкости, что является хорошим проводником электричества, поэтому действие электрического тока на организм человека может быть летальным.

#### Виды воздействий электрического тока на организм человека

Последствия, которые возникнут в результате действия электрического тока на человека зависят от многих факторов, а именно:

- от величины и рода протекающего тока, переменный ток является более опасным, чем постоянный;

- продолжительности его воздействия, чем больше время действия тока на человека, тем тяжелее последствия;

- пути протекания, самую большую опасность представляет ток, протекающий через головной и спинной мозг, область сердца и органов дыхания(легкие);

- от физического и психологического состояния человека. Организм

человека обладает неким сопротивлением, это сопротивление варьируется в зависимости от состояния человека.

Минимальная величина тока, которую способен почувствовать человеческий организм составляет 1 мА. При повышении тока более 1 мА человек начинает чувствовать себя некомфортно, возникают болезненные сокращения мышц, при увеличении тока до 12-15 мА возникает судорожное сокращение мышц, контролировать свою мышечную систему человек уже не в состоянии и собственными силами не может разорвать контакт с источником тока. Этот ток называется неотпускаемым.

Действие электрического тока более 25 мА приводит к параличу мышц органов дыхания в результате чего человек может просто-напросто задохнуться. При дальнейшем увеличении тока возникает фибрилляция сердца.

Электрический ток проходя через организм человека может оказывать на него три вида воздействий: термическое, электролитическое, биологическое.

Основными факторами поражения которые возникают в результате действия электрического тока на человека являются: электрические травмы, электрические знаки, металлизация кожи, электроофтальмия.

— местное повреждения тканей организма в результате действием электрического тока или электрической дуги. К электрическим травмам можно отнести такие повреждения как электрические ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, механические повреждения.

Наиболее распространенной электротравмой являются электрические ожоги, примерно 60% от всех случаев поражения электрическим током. Электрические ожоги бывают токовые и дуговые.

- проявляются на коже человека, который подвергся действию тока, в

виде пятен овальной формы серого или бледно желтого цвета. Как правило, безболезненны, затвердевают подобно мозоли, со временем омертвевший слой кожи сходит самостоятельно.

- возникает в результате проникновения в верхний слой кожи мелких частиц металла, который оплавился под действием электрической дуги. Кожа в месте поражения становится болезненной, становится жесткой, принимает темный металлический оттенок.

– возникает в результате воспаления наружной оболочки глаз под действием ультрафиолетовых лучей электрической дуги. Для защиты необходимо пользоваться защитными очками и масками с цветными стеклами.

Механические повреждения проявляются под действием тока, произвольным судорожным сокращением мышц. Это может привести к разрыву кожи, кровеносных сосудов и нервных тканей.

Из выше перечисленных повреждений, которые возникают в результате действия электрического тока на организм человека, наиболее опасными являются электрические удары.

### **5.3.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на работающего**

#### **5.3.2.1 Работа на открытом воздухе**

При проведении работ на открытом воздухе в холодное время года делаются периодические перерывы для обогрева или вообще прекращаются работы; эти меры устанавливаются из местных условий в зависимости от температуры воздуха и силы ветра в месте работ. Вопросы о числе и продолжительности перерывов, а также о месте обогрева разрешаются в

каждом отдельном случае в зависимости от местных условий.

Помещения для обогрева предоставляются на месте работы или в непосредственной близости от него. При кратковременных работах допускается обогрев у костра. Во всех случаях, когда должны делаться перерывы для обогрева или прекращения работы, производитель работ обязан дать об этом соответствующее распоряжение. Самовольное установление работниками перерывов или прекращения работ не допускается. При производстве работ на открытом воздухе, вызванных стихийным бедствием или аварией (снежные заносы, повреждения, угрожающие безопасности движения поездов и т. п.), допускается отступления от указанных правил по согласованию с соответствующей профсоюзной организацией.

В соответствии с устанавливающими гигиенические требования к режиму работ в нагревающем микроклимате и на открытой местности) допустимая продолжительность непрерывного пребывания в нагревающем микроклимате зависит от энергозатрат. В среднем для температур 26-28 градусов Цельсия при крайне низких физических нагрузках суммарная длительность составляет 3-5 часов, а при очень высоких показателях энергозатрат – от полутора до двух с половиной; режим «работа – отдых» таким образом выглядит как 25-40 минут работы для легких работ, и 10-20 минут для тяжелых в течение одного часа.

Затем необходимо провести время в помещении с комфортным микроклиматом (15-20 минут – легкие работы; для более тяжелых время увеличивается).

#### **5.3.2.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны**

Для обеспечения рационального освещения (отвечающего техническим и санитарно-гигиеническим нормам) необходимо правильно подобрать

источники искусственного освещения в сочетании с естественным светом.

К гигиеническим требованиям, отражающим качество производственного освещения, относятся:

- равномерное распределение яркостей в поле зрения и ограничение теней;
- ограничение прямой и отраженной блескости;
- ограничение или устранение колебаний светового потока.

Нормы освещенности равномерности освещенности, предельного показателя блескости и значения общего индекса цветопередачи для различных участков и видов работ приведены в таблице

Наименование участка	$E_{экс}$ , лк	$U_o$ , не менее	$GR_L$ , не более	$R_a$ , не менее
Морская поверхность под буровой	30	0,25	50	20
Ступени, лестницы, дорожки	100		45	
Места причала лодок, транспортные площади			50	
Вертолетные палубы*		0,40	45	40
Деррик (мачтовый кран)		0,50		
Участки технологических работ				
Стеллажи для труб	150			
Испытательная станция, вибростенды, скважины	200			20
Насосные участки				
Спасательные шлюпки			50	
Буровая вышка, балкон верхового рабочего	300		40	40
Растворный узел и отбор проб				
Насосы для сырой нефти			45	
Площадь предприятия			40	
Стол бурового ротора	500			
* Не допускается прямой свет в направлении командно-диспетчерской пункта и мест приземления. Прямой свет выше горизонта должен быть минимальным.				

### 5.3.2.3 Шум

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

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

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

#### **5.3.2.4 Вибрация**

Опасным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего в

Для виброзащиты применяются средства индивидуальной защиты для рук, ног и тела оператора. В качестве средства защиты для рук применяются рукавицы и перчатки, вкладыши и прокладки по ГОСТ 12.4.002 "Система стандартов безопасности труда. Средства защиты рук от вибрации. Технические требования и методы испытаний".

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

#### **5.3.2.5 Поражение электрическим током**

Правила устройства электроустановок [15] и Приказ Министерства труда

и социальной защиты РФ от 24 июля 2013 г. № 328н “Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок” (вступил в силу 4 августа 2014 года) [16], устанавливает следующие меры защиты:

1. Для работы с электроустановками выше 1000 В применяются:

а) Основные защитные средства:

–изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, указатели напряжения, устройства и приспособления для ремонтных работ;

–изолирующие устройства и приспособления для работ на ВЛ с непосредственным прикосновением электромонтера к токоведущим частям (изолирующие лестницы, площадки, изолирующие тяги, канаты, корзины телескопических вышек, кабины для работы у провода и др.).

б) Дополнительные защитные средства:

–диэлектрические перчатки;

–диэлектрические боты;

–диэлектрические ковры;

–индивидуальные экранирующие комплекты;

–изолирующие подставки и накладки;

–диэлектрические колпаки;

–переносные заземления;

–оградительные устройства;

–плакаты и знаки безопасности.

2. Для работы с электроустановками ниже 1000 В применяются

а) Основные защитные средства:

–изолирующие и электроизмерительные клещи;

–указатели напряжения;

–диэлектрические перчатки;

–слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками.

б) Дополнительные защитные средства:

- диэлектрические боты;
- диэлектрические ковры;
- переносные заземления;
- изолирующие подставки и накладки;
- оградительные устройства;
- плакаты и знаки безопасности.

К основным техническим средствам защиты от опасности прикосновения к токоведущим частям электроустановок согласно Межотраслевым правилам по охране труда относятся:

- отключение электроустановки и электрическая изоляция токоведущих частей;
- ограждение и вывешивание запрещающих, указательных, предупреждающих и предписывающих плакатов;
- сигнализация и блокировка;
- использование малых напряжений;
- электрическое разделение сети;
- зануление, защитное заземление;
- выравнивание потенциалов;
- защитное отключение;
- средства индивидуальной защиты и защитные средства: штанги изолирующие, диэлектрические перчатки, боты, галоши, коврики, изолирующие подставки, слесарно-монтажный инструмент с изолированными рукоятками, переносные заземления, предупредительные плакаты, предохранительные пояса.

К основным организационным мероприятиям, обеспечивающим безопасность работ в электроустановках согласно Межотраслевым правилам по охране труда относятся:

- оформление работ нарядом, распоряжением или перечнем работ, выполняемых в порядке текущей эксплуатации;

- допуск к работе;
- надзор во время работы;
- оформление перерыва в работе, перевода на другое место, окончание работы.

#### **5.4 Экологическая безопасность**

Работа в закрытом и иногда открытом помещении сопряжена с образованием газов и твердых отходов.

Мероприятия по охране природы регламентируются ГОСТ 17.0.001-86 (Основные положения) [28], ГОСТ 17.2.1.01-86 (Атмосфера) [29] и ГОСТ 17.11.02-86 (Гидросфера) [30].

Твердые отходы, к которым относятся первичная упаковка сырья, отработавшие фильтры, и т.д. сжигаются в собственных устройствах. Остальные отходы вывозятся на объекты размещения отходов. Твердые отходы, которые представляет вторичная упаковка, можно сортировать и отправлять на переработку на картонажно-бумажные фабрики.

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

## 5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация (ЧС) - это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

По природе возникновения чрезвычайные ситуации классифицируются:

–природные, связаны с проявлением стихийных сил природы (землетрясения, вулканы, цунами, бури и т.д.);

–техногенные, связаны с техническими объектами (пожар, взрывы, обрушение зданий, выброс радиоактивных веществ и т.д.);

–экологические, связаны с аномальными изменениями биосферы и природной среды (опустынивание, деградация почвы, загрязнение среды, разрушение озонового слоя и т.д.);

–биологические, связаны с распространением инфекционных заболеваний людей, животных и поражением сельскохозяйственных растений (эпидемии, эпизоотии, эпифитотии и т.д.);

–социальные, связаны с общественными событиями (терроризм, насилие, бандитизм, наркомания, алкоголизм, войны, проституция и т.д.);

–антропогенные, являются следствием ошибочных действий людей;

–комбинированные, включают несколько причин возникновения ЧС.

В нашем случае, мы имеем дело с ЧС техногенного характера, к которому относится пожар.

Причинами пожара могут стать:

- Короткое замыкание и перегрузка в электросетях, старая проводка
- Брошенные непотушенные спички, сигареты
- Нарушение правил хранения легко воспламеняющихся жидкостей

Для снижения вероятности пожара предусмотрена автоматическая пожарная сигнализация. На случай возникновения пожара предусмотрены первичные средства пожаротушения.

Ликвидация последствий стихийных бедствий организуется, как правило, под руководством специально создаваемых чрезвычайных комиссий. Для непосредственного осуществления мероприятий гражданской обороны (ГО) и проведения спасательных и неотложных

## **6 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Цель раздела обосновать целесообразность использования технического проекта в рамках выпускной квалификационной работы используя планово-временные и материальные показатели процесса разработки.

**Достижение цели обеспечивается решением задач:**

- оценка коммерческого потенциала и перспективности выполнения технического проекта;
- планирование технико-конструкторских работ;
- определение ресурсоэффективности проекта.

## 6.1 SWOT-анализ по разработке проекта электропривода

SWOT-анализ является инструментом стратегического менеджмента. Представляет собой комплексное исследование технического проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [17, 18].

Применительно к проектируемой АСР уровня, SWOT-анализ позволит оценить сильные и слабые стороны проекта, а также его возможности и угрозы.

Для проведения SWOT-анализа составляется матрица SWOT, в которую записываются слабые и сильные стороны проекта, а также возможности и угрозы.

При составлении матрицы SWOT удобно использовать следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта;

Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности;

У – угрозы;

Матрица SWOT приведена в таблице 15

Таблица 15 - Матрица SWOT

	<b>Сильные стороны проекта:</b>	<b>Слабые стороны проекта:</b>
	С1. Высокое качество питающего напряжения	Сл1. Повышение уровня вибрации
	С2. Надежность технологии и аварийной сигнализации	Сл2. Аварийность
	С3. Экономия потребляемой электрической энергии	Сл3. Высокая стоимость оборудования
	С4. Квалифицированный персонал	
	С5. Уменьшение затрат на ремонт оборудования	

<b>Возможности:</b> В1. Экономия электроэнергии за счет использования ПЧ  В2. Повышение износостойкости электропривода  В3. Резервное питание электропривода  В4. Повышение стоимости конкурентных систем	В1С1С2С3С4;	В1Сл1Сл3;
	В2С2С4С5;	В2Сл1Сл2;
	В3С1С2С4С5;	В3Сл2Сл3;
	В4С1С3С5;	
<b>Угрозы:</b> У1. Развитая конкуренция  У2. Риск несвоевременной поставки оборудования У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции  У4. Отсутствие финансового обеспечения со стороны государства	У1С5;	У1Сл3;
	У1С4;	У3Сл1;
	У3С4;	У3Сл1;
	У4С5.	У4Сл3.

На основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации (таблица 16, 17).

Таблица 16 – Интерактивная матрица возможностей

Возможности	Сильные стороны проекта					
		С1	С2	С3	С4	С5
	В1	+	+	+	+	-
	В2	-	+	-	+	+
	В3	+	+	-	+	+
	В4	+	-	+	-	+
	Слабые стороны проекта					
		Сл1	Сл2	Сл3		
	В1	-	-	+		
	В2	-	-	-		
	В3	+	-	-		
	В4	-	-	+		

Таблица 17 – Интерактивная матрица угроз

Угрозы	Сильные стороны проекта					
		С1	С2	С3	С4	С5
	У1	-	-	+	-	-
	У2	-	-	-	-	-
	У3	-	-	-	-	+
	У4	+	+	-	-	+
	Слабые стороны проекта					
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	У1	+	+	-	-	-
	У2	-	-	-	-	-
У3	+	+	-	-	-	
У4	-	+	-	-	-	

Анализ интерактивных матриц, приведенных в таблицах, показывает, что слабые стороны не оказывают существенного влияния на проект. Кроме того, угрозы имеют низкие вероятности и незначительное воздействие, что говорит о высокой надежности проекта.

## 6.2 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

### 6.2.1 Структура работ в рамках технического проектирования

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и дипломник. Составлен перечень этапов и работ в рамках проведения проектирования и произведено распределение исполнителей по видам работ.

Номерам этапов соответствуют следующие виды выполняемых работ, представленные в таблице 26:

№ 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 – поиск и изучение литературы – ознакомление с предметом работы, изучение различных источников, касающихся различных сторон технического проекта;

№ 3 – выбор оборудования – подбор необходимых технических средств систем автоматизации;

№ 4 – расчёт и проверка параметров АД – построение естественных механических и электромеханических характеристик в среде MATLAB;

№ 5 – расчёт и проверка параметров АД-ПЧ – расчет и построение семейства механических  $\omega(M)$  и электромеханических  $\omega(I)$  характеристик асинхронного двигателя при изменении частоты в среде MATLAB;

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

№ 7 – окончательная проверка выпускной квалификационной работы руководителем – включает в себя окончательную проверку руководителем, устранение недочетов по оформлению дипломником.

№ 8 – сдача проекта – подготовка презентации и защита проекта.

Таблица 18 – Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Составление и утверждение технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Поиск и изучение литературы	2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник
Выбор оборудования	3	Выбрать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и систему управления	Дипломник
Расчет и проверка параметров АД	4	Построение естественных механических и электромеханических характеристик	Дипломник, Научный руководитель
Расчет и проверка параметров АД – ПЧ	5	Построение естественных механических и электромеханических характеристик	Дипломник, Научный

		при изменении частоты	руководитель
Составление пояснительной записки	6	Ознакомление руководителя с выполненными работами, возможные корректировки и исправления	Дипломник, Научный руководитель
Проверка ВКР руководителем	7	Устранение недочетов по оформлению	Дипломник, Научный руководитель
Сдача проекта	8	Подготовка презентации и защита проекта	Дипломник, Научный руководитель

### 6.2.2 Определение трудоемкости выполнения ТП

Трудоемкость выполнения технического проекта оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула [14]:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (84)$$

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

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

$t_{maxi}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

В таблице 19 приведены ожидаемая трудоемкость и время выполнения работ.

Таблица 19 – Временные показатели продолжительности работ

№	Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях	
		$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ожі}$ , чел-дни			
		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	Поиск и изучение литературы	-	2	-	6	-	3,6	-	4
3	Выбор оборудования	-	2	-	2	-	2	-	2
4	Расчет и проверка параметров АД	1	35	1	37	1	35,8	1	36
5	Расчет и проверка параметров АД – ПЧ	1	34	1	36	1	34,8	1	35
6	Составление пояснительной записки	2	8	2	12	2	9,6	2	10
7	Проверка ВКР руководителем	2	1	2	1	-	1	2	1
8	Сдача проекта	1	4	1	4	-	4	1	4

Примечание: минимальное  $t_{\min}$  и максимальное время  $t_{\max}$  получены на основе экспертных оценок.

### 6.2.3 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 [15]. На основе таблицы 27 строим план-график проведения работ (таблица 20).



Исходя из составленной диаграммы, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает 12 декад, начиная со второй декады февраля, заканчивая первой декадой июня. Продолжительность выполнения технического проекта составит 96 дней. Из них:

92 дня – продолжительность выполнения работ дипломника;

8 дней – продолжительность выполнения работ руководителя;

### **6.3 Составление сметы затрат на разработку ТП**

Смета затрат включает в себя следующие статьи [14]:

- полная заработная плата исполнителей технического проекта;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

#### **6.3.1 Расчет полной заработной платы исполнителей темы**

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:

$$Z_{3П} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (85)$$

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

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) исполнителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot F_{дн}, \quad (86)$$

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

$F_{дн}$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн. (табл. 19);

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{окл}} + Z_{\text{р.к.}}}{F_{\text{д}}}, \quad (87)$$

где  $F_{\text{дн}}$  – количество рабочих дней в месяце (26 при 6 – дневной рабочей неделе), раб. дн.

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

$Z_{\text{р.к.}}$  – районная доплата, руб.

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 21.

Дополнительная заработная плата составляет 12 – 15% от основной, расчет дополнительной и полной заработной платы приведен в таблице 22.

Таблица 21 – 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	33 664	10 099	43 763	1 683	8	13 464
Дипломник	17 000	5 100	22 100	850	92	78 200
Итого						95 030

Таблица 22– Расчет дополнительной и полной заработной платы

Исполнители	Кэф. доплаты	Основная заработная плата руб	Дополнительная заработная плата руб	Полной заработная плата, руб.
Руководитель	0,15	13 464	2 036	15 500
Дипломник	0,12	78 200	9 384	87 500
Итого:		91 664	11 420	103 000

### 6.3.2 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются 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:

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.) [14].

На 2015 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2 %.

Отчисления во внебюджетные фонды составят:

$$Z_{внеб} = 0,302 \cdot 103 = 31,1 \text{ тыс.руб}$$

### 6.3.3 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Величина коэффициента накладных расходов принимается в размере 16%.

### 6.4 Формирование сметы затрат технического проекта

Рассчитанная величина затрат технического проекта является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при заключении договора с заказчиком защищается организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку технической продукции.

Определение бюджета затрат на технический проект приведен в таблице 23.

Таблица 23 – Смета затрат технического проекта

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Структура затрат, %
1. Затраты по полной заработной плате исполнителей темы	103,0	65,0
2. Отчисления во внебюджетные фонды	31,0	19,0

3. Накладные расходы	26,0	16,0
4. Итого	160,0	100,0

В ходе выполнения данного параграфа была рассчитана продолжительность выполнения технического проекта, которая составляет 92 раб. дня для дипломника и 8 для руководителя. Составлен календарный график выполнения работ. Смета затрат на разработку технического проекта составляет 160 тыс.руб, из которых более половины (65%) составляют затраты на оплату труда. Все результаты проекта оказались ожидаемы и могут быть реализованы.

### 6.5 Определение ресурсоэффективности проекта

Определение ресурсоэффективности проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности по формуле [14]:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (88)$$

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:

1. Экономичность: оптимизация затрат на электрическую часть предприятия на стадии проектирования приводит к их уменьшению на доли процентов, в абсолютном же измерении речь идет об экономии значительных средств.

2. Гибкость: возможность частых перестроек технологии производства и развития предприятия.

3. Безопасность: обеспечение безопасности работ, как для электротехнического персонала, так и для не электротехнического;

4. Обеспечение надлежащего качества электроэнергии: качество электроэнергии, удовлетворяющее требованиям ГОСТ 13109-97.

5. Надежность: бесперебойное снабжение электроэнергией в пределах допустимых показателей ее качества и исключение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды.

6. Простота и удобство в эксплуатации: возможность использования персоналом более доступного, автоматизированного и адаптивного по конструкции техническим характеристикам электрооборудования на предприятии.

7. Энергоэффективность: использование меньшего количества энергии для обеспечения установленного уровня потребления энергии в зданиях либо при технологических процессах на производстве [3].

Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики приведены в таблице 24.

Таблица 24 - Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки
1. Экономичность	0,15	4
2. Гибкость	0,10	4
3. Безопасность	0,15	5
4. Обеспечение надлежащего качества электроэнергии	0,18	5
5. Надежность	0,20	5
6. Простота и удобство в эксплуатации	0,07	5
7. Энергоэффективность	0,15	4
Итого:	1,00	

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности технического проекта составит [15]:

$$I_{p-ucn1} = 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,18 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,07 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 = 4,6$$

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

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

- в результате проведения SWOT-анализа были выявлены сильные и слабые стороны выбора технического проекта. Установлено, что технический проект имеет несколько важных преимуществ, обеспечивающих повышение производительности, безопасности и экономичности технического производства.

- при планировании технических работ был разработан график занятости для трех исполнителей, составлена ленточная диаграмма Ганта, позволяющая

оптимально скоординировать работу исполнителя.

- составление сметы технического проекта позволило оценить первоначальную сумму затрат на реализацию технического проекта.

- оценка ресурсоэффективности проекта, проведенная по интегральному показателю, дала высокий результат (4,6 по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности реализации технического проекта.

Реализация данного технического проекта, позволяет увеличить эффективность производства ферросплавного завода путем улучшения энергоэффективности, энергосбережения при внедрении более универсального оборудования, требующего меньше затрат при эксплуатации и производства ферросплавов.



## Заключение

В данной работе приведены основные сведения о составе и функционирование установки электропривода центробежного насоса, а также математическая модель работы асинхронного двигателя. Далее произведено описание и анализ эффективности векторного и скалярного управления. На основании сравнения скалярного и векторного способа регулирования скорости вращения асинхронного двигателя сделан выбор в пользу скалярного метода управления, так как данный метод обеспечивает изменение напряжения питания электродвигателя при скалярном управлении, что необходимо в нашем случае. В следующем разделе выполнен расчет параметров асинхронного двигателя типа АД255М2 и определены параметры Т-образной схемы замещения. После чего приведено построение естественной механической и электромеханической характеристик.

В заключительном разделе приведено моделирование работы двигателя в среде *MATLAB* - расчет переходных процессов скорости и момента. Реализована имитационная модель силового канала системы преобразователь - асинхронный электродвигатель, а также имитационная модель преобразователя частоты. В результате получены: переходная характеристика давления, скорости ротора, электромагнитного момента и фазного тока АД при пуске, открытии и закрытии клапана и переходная характеристика давления, скорости ротора, электромагнитного момента и фазного тока АД при пуске, падении и нарастании давления до максимальных значений, по которым сделан вывод о режиме работы двигателя.

### **Список использованных источников**

1. Богданов А.А. Погружные центробежные электронасосы для добычи нефти. – М.: «Недра», 2008.
2. Ребенков, С.В. Энергетическая эффективность УЭЦН и УЭВН // Инженерная практика.- 2010.- № 3.- С. 62-66.
3. Юсупов, М.Д., Долгих, А.В., Ненашев, А.И. Опыт внедрения энергоэффективных УЭЦН // Энергетическая стратегия.- 2012.- № 8 (26).- С. 102-104.
4. Богданов, А.А. Погружные центробежные электронасосы для добычи нефти.– М.: Недра, 1968.– С. 29-272.
5. Лысенко В.Д. Инновационная разработка нефтяных месторождений. Москва, 2000г.
6. Зайцев Ю.В., Балакиров Ю.А. «Технология и техника эксплуатации нефтяных и газовых скважин», М.,1986г.
7. Бухаленко Е.И. «Справочник по нефтепромысловому оборудованию», М., 1983г.
8. Крец В.Г. Основы нефтегазового дела: учебное пособие / В.Г, Крец , А,В, Шадрина. – Томск:Изд – во ТПУ, 2010. – 182 с.
9. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности. Учеб.для вузов. – М.: ОАО, Недра, 2008. – 487с.
10. Сипайлов В.А., Букреев В.Г., Сипайлова Н.Ю, Оптимальное управление установкой электроцентробежного насоса с частотно-регулируемым асинхронным приводом. – Известия вузов. Электромеханика. – 2009. - №4. – с. 66 – 69.

11. Гиматудинов Ш. К., Андриасов Р. С., Мищенко И. Т., Петров А. И. и др. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти. М., Недра, 1983, 455 с.
12. Павленко, В.И, Климов, В.П., Климов, И.В. Сравнительный анализ электромагнитных процессов в структурах электроприводов нефтедобывающей промышленности // Силовая электроника. - 2010. - №3. - С. 30-35.
13. Каплан Л.С., Семенов А.В., Разгоняев Н.Ф. Эксплуатация осложненных скважин центробежными насосами. М.: Недра, 2003, С.256-428.
14. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В. Н. Ивановский [идр.]. – Москва : ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 824 с.
15. Видяев И. Г., Серикова Г. Н., Гаврикова Н. А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно методическое пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – 150с.
16. СТП 57.00.047-81. Уровни допустимого динамического снижения питающего напряжения погружных центробежных электронасосов / И. А. Ниссенбаум [и др.]. – Тюмень, 1980. – 12 с.
17. Абрамович, Б. Н. Динамическая устойчивость работы установок электроцентробежных насосов / Б. Н. Абрамович, Д. А. Устинов, В. Е. Поляков // Нефтяное хозяйство. – 2010. – № 9. – С. 104–106.
18. Комплекс технических решений по энергосбережению и повышению устойчивости частотно-регулируемых электроприводов ответственных механизмов / Р. Р. Храмшин [и др.] // VIII Международная (XIX Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск, 2014. – С. 417–421.

19. Характеристики погружных электродвигателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/5332923/page:4/>

20. Скалярное и векторное управление асинхронными двигателями - в чем различие? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/elprivod/1975-skaljarnoe-i-vektornoe-upravlenie.html>

21. Преимущества векторного управления асинхронным двигателем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tehprivod.su/poleznaya-informatsiya/preimushchestva-vektornogo-upravleniya-elektrovdigatелеm.html>

