

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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
«Асинхронный частотно – регулируемый электропривод добычи нефти»

УДК 62-83-523:622.323

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM07	Брага Никита Петрович		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Александр Юрьевич	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Клемашева Елена Игоревна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Черемискина Мария Сергеевна	–		

По разделу на иностранном языке:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Воробьева Виктория Владимировна	к.ф.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гарганеев Александр Георгиевич	д.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ

13.04.02 электроэнергетика и электротехника

Код результата	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий.
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла.
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели.
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном языке, для академического и профессионального взаимодействия.
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия.
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки.
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки.
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы.
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен выбирать серийные и проектировать новые объекты профессиональной деятельности.
ПК(У)-2	Способен применять методы создания и анализа математических моделей, позволяющих прогнозировать свойства и поведение объектов профессиональной деятельности.
ПК(У)-3	Способен разрабатывать, реализовывать и осуществлять контроль выполнения технических и организационных мероприятий, направленных на энергосбережение и повышение энергетической эффективности.
ПК(У)-4	Способен формулировать технические задания, анализировать различные варианты и искать компромиссные решения.
ПК(У)-5	Способен проектировать и организовывать учебный процесс по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий.

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

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

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

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
5AM07	Браге Никите Петровичу

Тема работы:

«Асинхронный частотно – регулируемый электропривод добычи нефти»	
Утверждена приказом директора (номер, дата):	344-50/с 10.12.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:	28.05.2022
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p>	<p>Объектом исследования является электропривод установки электроцентробежного насоса добычи нефти с параметрами:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Синхронная частота вращения – 3000 об/мин; • Подача насоса – 125 м³/сут; • Напор – 1000 м; • Питающая сеть: $U_n = 380 \text{ В}, f_c = 50 \text{ Гц}$.
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Обзор установки электропривода центробежного насоса; • Выбор оборудования, расчет и выбор электродвигателя, определение параметров схемы замещения; • Моделирование в среде MatLab; • Социальная ответственность; • Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Схема устройства УЭЦН; • Структурная схема системы скалярного частотного управления с IR-компенсацией; • Имитационная модель системы ПЧ-АД с IR-компенсацией в среде Matlab Simulink; • Переходные характеристики скорости и электромагнитного момента электродвигателя.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Черемискина Мария Сергеевна
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Клемашева Елена Игоревна
Раздел на иностранном языке	Воробьева Виктория Владимировна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение; назначение, устройство и принцип работы установки электропривода центробежного насоса; заключение.	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	28.02.2022
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Александр Юрьевич	к.т.н.		28.02.2022

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM07	Брага Никита Петрович		28.02.2022

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

Студенту:

Группа	ФИО
5AM07	Брага Никита Петрович

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов научного исследования согласно средней стоимости по г. Томску. Оклады в соответствии с окладами сотрудников организации.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	16% накладные расходы, 1,3 районный коэффициент.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды – 30,2%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Анализ конкурентных технических решений. Оценки перспективности проекта по технологии QuaD. SWOT-анализ.
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Инициация проекта.
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Формирование плана и графика разработки: определение структуры работ, определение трудоемкости работ, разработка графика Ганта.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Определение ресурсоэффективности проекта; Оценка абсолютной эффективности проекта.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Карта сегментирования рынка
2. Оценочная карта QuaD
3. Матрица SWOT
4. График Ганта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	28.02.2022
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Клемашева Елена Игоревна	канд.экон.наук		28.02.2022

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM07	Брага Никита Петрович		28.02.2022

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 5AM07		ФИО Брага Никита Петрович	
Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение (НОЦ)	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Тема ВКР:

«Асинхронный частотно – регулируемый электропривод добычи нефти»	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
Введение – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при эксплуатации	Объект исследования: электропривод установки электроцентробежного насоса добычи нефти. Область применения: скважинная нефтедобыча. Рабочая зона: полевые условия, нефтедобывающая станция. Количество и наименование оборудования рабочей зоны: установка электропривода центробежного насоса, станция управления, трансформатор.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации – Специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– Конституции Российской Федерации; – Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018); – 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 нагревающем микроклимате в производственном помещении и на открытой местности в теплый период года»;
2. Производственная безопасность при эксплуатации – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора	Вредные производственные факторы: – Повышенное содержание вредных веществ в воздухе; – Повышенный уровень шума; – Повышенный уровень вибрации; – Неблагоприятные метеорологические условия; Опасные производственные факторы: – Электрический ток. Расчет заземления электрооборудования.
3. Экологическая безопасность при эксплуатации	Воздействие на атмосферу: загрязнение атмосферы испарениями нефти и попутного газа. Воздействие на литосферу: загрязнение почвы. Воздействие на гидросферу: загрязнение подземных вод и недр, поверхностных водотоков.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации	Возможные ЧС: пожар, разлив нефти. Наиболее типичная ЧС: пожар (возгорание).
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
28.02.2022	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Черемискина Мария Сергеевна	–		28.02.2022

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM07	Брага Никита Петрович		28.02.2022

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение электроэнергетики и электротехники
 Период выполнения: осенний / весенний семестр 2021/2022 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	28.05.2022
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.12.2021 г.	Литературный обзор	5
15.02.2022 г.	Общие вопросы проектирования	10
10.03.2022 г.	Выбор погружного оборудования, расчет электродвигателя	10
12.04.2022 г.	Расчет параметров схемы замещения	10
21.04.2022 г.	Построение естественных и искусственных характеристик	10
02.05.2022 г.	Моделирование работы в программе Matlab	20
15.05.2022 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
20.05.2022 г.	Социальная ответственность	10
25.05.2022 г.	Раздел на английском языке	5
27.05.2022 г.	Оформление результатов работы и выводов по работе. Формирование файла дипломной работы	10
28.05.2022 г.	Итог	100

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Александр Юрьевич	К.Т.Н.		28.02.2022

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гарганеев Александр Георгиевич	Д.Т.Н.		

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит: 124 страницы, 52 рисунка, 29 таблиц, 45 источника и 1 приложение.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, скалярное управление, погружной электродвигатель, преобразователь частоты.

Объект исследования: асинхронный частотно-регулируемый электропривод насоса добычи нефти.

Цель работы: разработка системы управления установкой электроцентробежного насоса добычи нефти.

В результате работы разработана установка электропривода центробежного насоса добычи нефти с системой управления «преобразователь частоты – асинхронный двигатель».

Актуальность данной работы обусловлена активным освоением месторождений нефти, производящихся посредством скважинной нефтедобычи. Если давления в продуктивном пласте не хватает, нефть извлекается при помощи специальных механизмов. В связи с чем приобретают актуальность глубинные центробежные нефтяные насосы.

Выпускная квалификационная работа оформлена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010. Моделирование производилось в программной среде MatLab Simulink.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	11
1 НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА.....	12
1.1 Назначение	12
1.2 Устройство и принцип работы установки электропривода центробежного насоса и ее составных частей	13
1.2.1 Установка электропривода центробежного насоса	13
1.2.2 Скважинный электроцентробежный насос	16
1.2.3 Погружной электродвигатель	16
1.2.4 Гидравлическая защита электродвигателя (протектор и компенсатор)	19
1.2.5 Газосепаратор	20
1.2.6 Кабельные линии установок электроцентробежного насоса	20
1.2.7 Оборудование устья скважины для эксплуатации установок электропривода центробежного насоса	21
1.2.8 Станция управления.....	22
1.2.9 Трансформатор.....	23
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ. ВЫБОР ПРИНЦИПА УПРАВЛЕНИЯ. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	24
2.1 Математическое описание работы асинхронного двигателя	24
2.2 Способы управления электроприводом	28
2.3 Механические характеристики электропривода	31
3 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА. ПОДБОР ОБОРУДОВАНИЯ	34
3.1 Выбор насоса	34
3.2 Выбор электродвигателя и расчет силовой части	34
3.3 Расчет и построение естественной механической и электромеханических характеристик	39
3.4 Выбор кабельной линии	41
3.5 Выбор трансформатора	42
3.6 Выбор станции управления	43
3.7 Выбор преобразователя	44
3.8 Расчет и построение искусственных механических и электромеханических характеристик системы	45
«Преобразователь частоты – асинхронный двигатель»	45
4 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK.....	50
4.1 Расчет переходных процессов скорости и момента. Силовой канал электропривода.....	50
4.2 Расчет системы «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель» с IR- компенсацией	52

4.3 Моделирование переходных процессов скорости и момента на валу двигателя системы «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель»	56
4.4 Имитационное исследование частотно-регулируемого асинхронного электропривода погружного насоса при заданном цикле работы.....	63
5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	65
5.1 Предпроектный анализ	65
5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	65
5.1.2 Технология QuaD.....	67
5.1.3 SWOT-анализ.....	68
5.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	70
5.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования	71
5.2 Инициация проекта.....	71
5.3 Планирование научно-исследовательских работ	72
5.3.1 Структура работ в рамках научного исследования	72
5.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	73
5.3.3 Разработка графика проведения научного исследования	74
5.3.4 Реестр рисков.....	77
5.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	78
5.4.1 Основная заработная плата исполнителей темы.....	78
5.4.2 Дополнительная заработная плата исполнителей темы	81
5.4.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые взносы)	82
5.4.4 Накладные расходы.....	83
5.4.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.....	83
5.4.6 Оценка эффективности проекта. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	84
5.4.7 Оценка абсолютной эффективности проекта	85
Вывод по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	89
6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	90
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации ..90	90
6.2 Производственная безопасность	93
6.2.1 Анализ выявленных вредных производственных факторов	94
6.2.2 Анализ выявленных опасных производственных факторов	97
6.2.2.1 Расчет заземления электрооборудования	98
6.3 Экологическая безопасность.....	100
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	101
Вывод по разделу «социальная ответственность»:	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	106
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	110

ВВЕДЕНИЕ

В XX веке асинхронные машины применялись, как правило, в нерегулируемых электроприводах (далее – ЭП), пуск которых осуществлялся прямым включением в сеть с помощью магнитных пускателей. С появлением новых поколений полупроводников и микропроцессоров, расширяется применение регулируемых ЭП, основу которых составляют асинхронные ЭП.

На сегодняшний день проектирование систем автоматизированного ЭП сводится в основном к синтезу параметров регуляторов исходя из требуемого качества переходных процессов двигателя или рабочего механизма. Но в то же время необходимы методики по расчету статических характеристик ЭП переменного тока, так как поддержание с заданной точностью регулируемых координат при изменениях нагрузки являются определяющим показателем качества систем ЭП в установившихся режимах.

Сегодня активно осваиваются месторождения нефти посредством скважин, пробуренных в толще горных пород. При нехватке давления в продуктивном пласте, нефть извлекается при помощи специальных механизмов, позволяющих поднимать сырье на поверхность, а также используются для продвижения перекачиваемой продукции по трубопроводам. В связи с чем приобретают актуальность установки электропривода центробежного насоса (далее – УЭЦН).

Одним из главных показателей эффективности насосного оборудования является надежность, которая определяется межремонтным периодом оборудования, так как ремонт подземного оборудования требует остановку скважины, что влечет за собой финансовые потери нефтедобывающей компании. Одно из направлений повышения эффективности работы УЭЦН является изменение скорости вращения вала насоса, с помощью частотно-управляемого электропривода. [1, 2]

Целью магистерской диссертации является разработка УЭЦН для поднятия пластовой жидкости на поверхность.

1 НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

1.1 Назначение

Фонтанный и газлифтный методы добычи нефти результативны при высоком давлении на забое скважины и значительном газовом факторе добываемого флюида. После извлечения большей части количества флюида из месторождения, пластовая энергия уменьшается, увеличивается обводненность добываемого флюида, уменьшается относительное содержание газа в отбираемой смеси и сам уровень отбираемой жидкости в скважине снижается. Фонтанный метод извлечения флюида становится невозможным, а газлифтный – не столь эффективным, тогда они заменяются механическим способом извлечения флюида.

Для извлечения флюида механическим способом применяются штанговые и бесштанговые насосы. Штанговые насосы комплектуются наземным приводом, скважинным насосом и длинной связью между ними, которая представляет собою длинную трубу из металлических свечей.

Бесштанговые насосы комплектуются скважинным насосом и электроприводом, напрямую соединенные между собой. Электроэнергия к приводу насоса подводится по кабелю. Благодаря отсутствию длинной механической связи между приводом и насосом – бесштанговые насосы имеют значительно более высокую мощность и КПД, чем штанговые. Данное преимущество дает возможность извлекать большие объемы жидкости некоторыми видами бесштанговых насосов. К этим насосам относятся погружные УЭЦН.

В Российской Федерации УЭЦН оборудовано более 40% всех нефтяных скважин и выкачивается приблизительно 70% от всей добываемой нефти. Нефтедобывающая индустрия все чаще нуждается в УЭЦН для отбора со скважины еще более значительного объема флюида. Больше всего пригодны для этих целей динамические лопастные насосы. Из лопастных насосов

максимальное распространение получили насосы с рабочими колесами центробежного типа, из-за того что они формируют более высокий напор при определенных подачах флюида и размерах насоса, обладая при этом довольно высоким КПД и высокой безотказностью.

Погружной центробежный насос приводится в действие погружным электродвигателем. Электроэнергия подводится к двигателю по кабелю, размещаемому в скважине на поверхности насосно-компрессорной трубы (далее – НКТ). При больших отборах флюида с забоя скважины установки ЭЦН более экономичны и менее сложны при обслуживании их сервисными компаниями, по сравнению с компрессорной добычей и насосами иных видов. При высоких подачах, энергетические расходы на монтаж относительно дешевы. Сервисное обслуживание УЭЦН просто, благодаря тому, что на поверхности размещаются только станция управления и трансформатор не требующие регулярного обслуживания. Все это обеспечивает межремонтный период службы приблизительно равный одному году (зависит от количества механических примесей в добываемом флюиде). Так же можно отметить, что УЭЦН достаточно легко подвергнуть автоматизации и телеметрии. [3, 4, 5]

1.2 Устройство и принцип работы установки электропривода центробежного насоса и ее составных частей

1.2.1 Установка электропривода центробежного насоса

УЭЦН – сложная техническая система, представляет собой совокупность уникальных по конструкции компонентов. Установка состоит из двух частей: наземной и погружной.

Флюид принимается насосом сквозь фильтрующую сетку грубой очистки, которая располагается в его нижней части. Сетка используется для фильтрации пластового флюида. Насос подает флюид с забоя скважины в НКТ. Погружной электродвигатель (далее – ПЭД) – маслonaполненный, герметизированный. Для исключения возможности проникновения в него пластового флюида, он имеет узел гидрозащиты. Ротор электродвигателя (далее – ЭД) объединен с валом

гидрозащиты и через него с валом насоса. При использовании асинхронного электродвигателя (далее–АД), ротор имеет скорость вращения до 3000 об/мин.

Для того чтобы увеличит результативность применения внутреннего диаметра обсадной колонны, обязательным условием является сокращение зазора между обсадной колонной и ПЭД до минимума. Минимальный допустимый зазор, обеспечивающий безаварийный спуск и подъем оборудования, как показывает практика, равен 6 мм. По внутреннему диаметру обсадной колонны и принятому зазору выбирают габариты ПЭД. [6, 7]

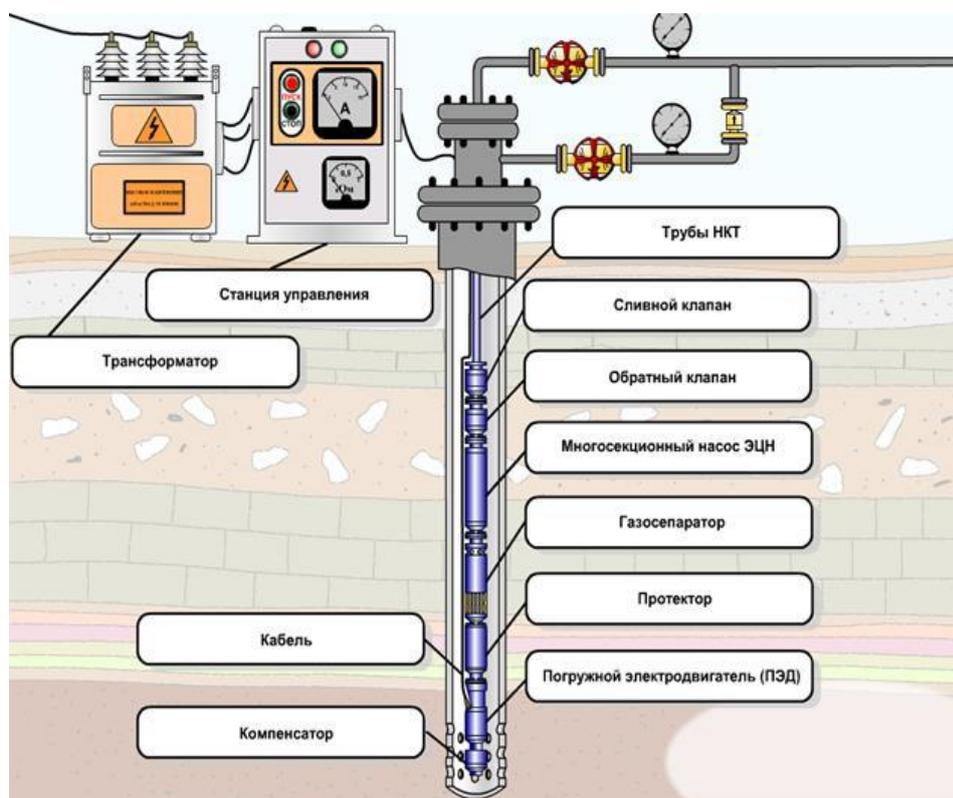


Рисунок 1 – Схема устройства установки электропривода центробежного насоса

Трансформатор – используется для повышения напряжения тока, получаемого от промышленной сети (380 В), т.к. у ПЭД напряжение значительно больше данного значения (400-2000 В и более). Помимо этого, трансформатор нужен для компенсации падения напряжения в длинном кабеле.

Станция управления – дает возможность включать и отключать УЭЦН вручную или автоматически при аварийном режиме работы. Помимо этого, станция содержит датчики, показывающие силу тока, напряжение,

сопротивление изоляции кабеля и другие параметры, т.е. новейшие СУ, дают возможность осуществлять диагностику работоспособности УЭЦН.

Колонна НКТ – снабжается обратным и спускным клапанами.

Обратный клапан – расположен в верхней части (головке) насоса в особой муфте и при остановке насоса дает возможность сохранить в колонне НКТ флюид. Таким образом, при остановке погружного насоса флюид не сливается из труб в скважину и не затрачивается время на заполнение НКТ, а также облегчается запуск установки, особенно при больших глубинах НКТ.

Спускной клапан – дает возможность очистить колонну НКТ от флюида, перед подъемом агрегата с забоя скважины. Спускной клапан аналогично размещен в особой муфте (соединяющей между собой НКТ) и выполнен в виде бронзовой трубки (ниппеля).

Многосекционный ЭЦН – многосекционная, многометровая конструкция с диаметром от 70 до 170 мм (в зависимости от мощности), каждая секция которого состоит из множества вращающихся лопастных колёс, насаженных на общий вал и закреплённых в металлическом корпусе.

Погружной электродвигатель (ПЭД) – это АД с короткозамкнутым ротором, заполненный диэлектрическим маслом.

Гидрозащита электродвигателя – обеспечивает защиту ЭД от попадания пластовой жидкости. Состоит из компенсатора и протектора или только протектора. Отделяет ЭД, заполненный маслом, от насоса, заполненного пластовой жидкостью, и при этом передаёт вращающий момент от ЭД к насосу.

Газосепаратор – служит для выделения из пластовой жидкости излишнего газа, который может нарушить стабильную работу насоса. Используется в основном на месторождениях с повышенным содержанием газа в пластовой жидкости.

Кабельная линия – передаёт электрическую энергию от СУ и трансформатора к ПЭД. Состоит из двух частей: круглый кабель идёт от клеммной коробки на поверхности до нижних секций НКТ, плоский кабель соединяет ПЭД с круглым кабелем. [8, 9]

1.2.2 Скважинный электроцентробежный насос

Глубинные центробежные насосы считаются многоступенчатыми машинами. Это обусловлено очень малыми величинами напора, которое создается одной ступенью (рабочим колесом и направляющим аппаратом). Конструкция погружного центробежного насоса может быть обычной и износостойкой, а помимо этого увеличенной коррозионной стойкостью. [10]

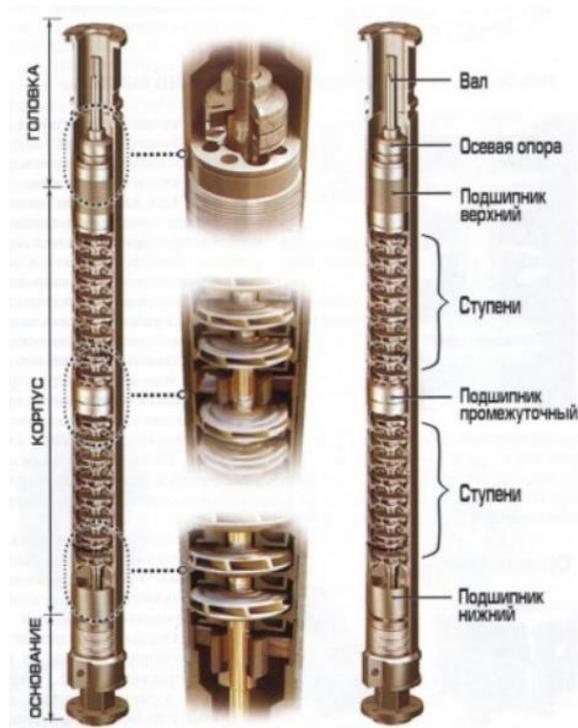


Рисунок 2 – Центробежный многоступенчатый насос

1.2.3 Погружной электродвигатель

Погружные маслonaполненные трехфазные асинхронные с короткозамкнутым ротором двух- (или четырех-) полюсные электродвигатели используются как привода для погружных центробежных насосов для откачки пластового флюида с забоя нефтяных скважин с углом отклонения от вертикали в месте закрепления не более 60° . Электродвигатели, так же как и насосы, обязаны иметь достаточно малые диаметры, различные для нефтяных скважин с разными обсадными колоннами. Малые диаметры и высокие мощности вызывают необходимость увеличивать длину электродвигателей, которая иногда превосходит 8 м. Электродвигатель с насосом соединяется с помощью

шлицевой муфты. Секционные электродвигатели состоят из верхней и нижней секции, которые соединяются при сборке электродвигателя на поверхности. Каждая секция состоит из статора и ротора, устройство которых такое же как и у односекционного электродвигателя. [11]

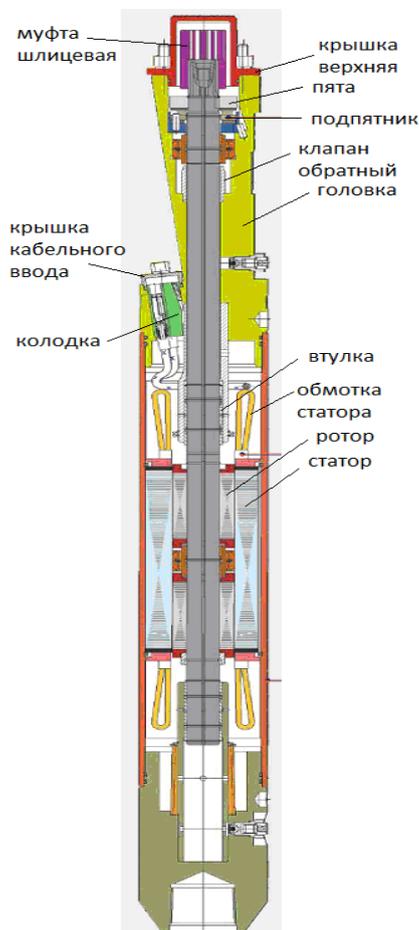


Рисунок 3 – Схема устройства погружного электродвигателя

Использование особых электротехнических материалов дает возможность использовать ПЭД при температуре пластового флюида 120°C , а в термостойком исполнении 150°C .

УЭЦН должен удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечение плавного пуска двигателя;
- продолжительный режим работы электродвигателя УЭЦН;
- широкий диапазон регулирования по частоте и мощности;
- экономичность.

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 следующими достоинствами:

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

На практике распространение получили преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока и автономным инвертором напряжения.

Узел токового ввода используется для питания обмотки статора электроэнергией и состоит из кабельной муфты и электроизоляционной колодки. В колодке расположены составные электрические контакты, соединенные с выводами обмотки статора. Соединение кабельной муфты с головкой ПЭД герметично и электрические контакты узла токового ввода размещаются внутри ЭД, который заполнен диэлектрическим маслом.



Рисунок 4 – Электрический разъем погружного электродвигателя

ЭД заполняется диэлектрическим нагревостойким маслом, обладающим высокими смазывающими свойствами. Циркуляция масла внутри двигателя производится из полости фильтра, из внутреннего отверстия в валу через пята - турбину, далее масло поступает для смазывания радиальных подшипников и оттуда попадает в зазор между статором и ротором, и направляется назад к фильтру. [12]

1.2.4 Гидравлическая защита электродвигателя (протектор и компенсатор)

Гидравлическая защита – используется в маслонаполненных ПЭД для защиты внутренней полости ЭД от попадания в нее пластового флюида, а также нивелирования температурных изменений объема масла. Пластовый флюид при попадании в ЭД существенно понижает изоляционные свойства диэлектрического масла, а попадая под изоляцию обмоточных проводов – служит причиной короткого замыкания обмотки. Помимо этого, ухудшается смазка подшипников вала ЭД, что способствует их коррозии и последующего выхода из строя. На данный момент на нефтепромыслах Российской Федерации широко распространены гидрозащиты типа Г, П и ПД. Гидравлическая защита типа Г производится из 2-х главных сборочных единиц: протектора, который ставится между насосом и двигателем и компенсатора, размещенного в нижней части ЭД.

Протектор предназначен для гидравлической защиты ЭД от пластового флюида и смазывания радиально-упорного подшипника. Большой объем протектора, который состоит из эластичного мешка, заполнен жидким диэлектрическим маслом. Сквозь обратный клапан внешняя поверхность мешка воспринимает давление флюида скважины на глубине спуска подземного насосного агрегата. [13]

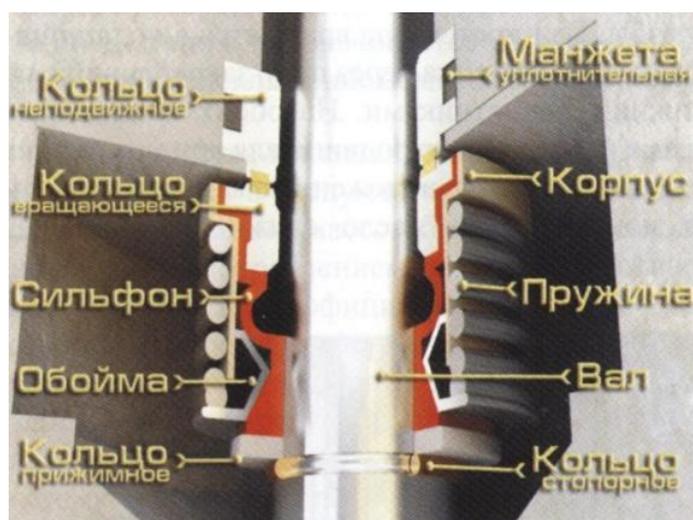


Рисунок 5 – Конструкция протектора гидрозащиты типа «Г»

1.2.5 Газосепаратор

Постоянная интенсификация добычи нефти и широкий диапазон изменения газового фактора добываемой нефти приводят к тому, что превышаются допустимые значения свободного газосодержания на входе в насос. Это приводит к ухудшению условий работы насоса и ПЭД, увеличению вибрации установки и снижению ее работоспособности. Для борьбы с газом в скважинах эксплуатируемых УЭЦН применяются газосепараторы. [14]

Газосепаратор – это устройство установленное на приеме насоса, разделяющие жидкость и газ, посредством центробежной силы. В итоге жидкость идет далее по трубе, а газ выбрасывается в затрубное пространство.

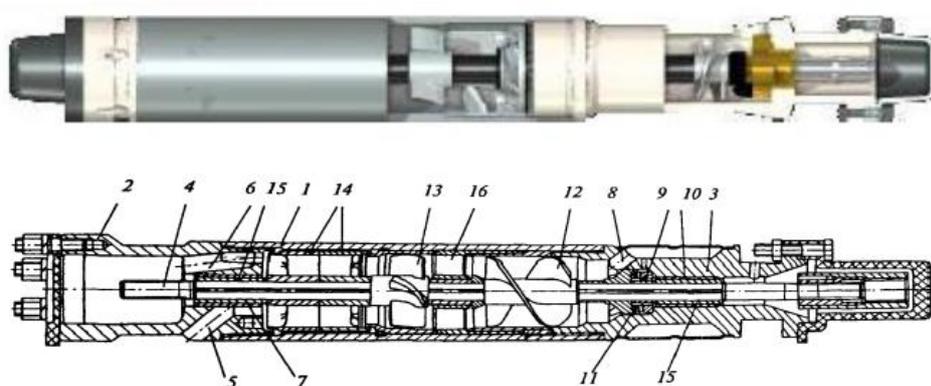


Рисунок 6 – Газосепаратор: 1 – трубный корпус; 2 – головка; 3 – основание; 4 – вал; 5, 6 – перекрестные каналы; 7, 10, 15 – втулки радиальных подшипников; 8 – полость с каналами; 9 – подпятник; 11 – пята; 12 – шнек; 13 – рабочее колесо; 14 - сепараторы.

1.2.6 Кабельные линии установок электроцентробежного насоса

Кабельные линии используются для передачи электроэнергии к ПЭД установок насосов добычи нефти и перекачки жидкости. Кабельная линия представляет собой главный питающий кабель (круглого или плоского) сечения, который располагается на стенках колонны НКТ от СУ до ПЭД, соединенного с муфтой кабельного ввода. К кабелям предъявляются жесткие требования к качеству изготовления: низкие электрические потери, малые

диаметральные габариты, высокие диэлектрические свойства изоляции кабелей, термостойкость к воздействию низких и высоких температур. [15, 16, 17]



Рисунок 7 – Кабельная муфта

Подсоединение насоса к силовому кабелю производится с помощью водонепроницаемой муфты термоусадочного или заливного типа, что исключает попадание влаги в контактную группу, которое может привести к короткому замыканию, а так же защищает сам ЭД от попадания в него воды. Провод питания ПЭД выводится на поверхность вдоль 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, для предотвращения механических повреждений.

1.2.7 Оборудование устья скважины для эксплуатации установок электропривода центробежного насоса

Устье скважин для эксплуатации УЭЦН оборудуется либо стандартной фонтанной арматурой со специальной планшайбой для пропуска и герметизации кабельной линии (типа АФК1Э), либо специальным оборудованием. Так многие российские фирмы выпускают оборудование устья скважин типа «ОУЭН», представленный на рисунке 8.

Крестовина 1 который соединяется с обсадной колонной, имеет в своей конструкции разъемный конус 2, за который крепятся НКТ. Поверх конуса располагается резиновое уплотнение 3, герметизирующее место вывода труб и кабеля 4. Уплотнение поджимается разъемным фланцем 5. Затрубное пространство нефтяной скважины соединяется с выходом из НКТ через колесо

6 и обратный клапан 7. Крестовик 1 имеет особое отверстие для использования эхолота или иных приборов для определения динамического уровня. [18]

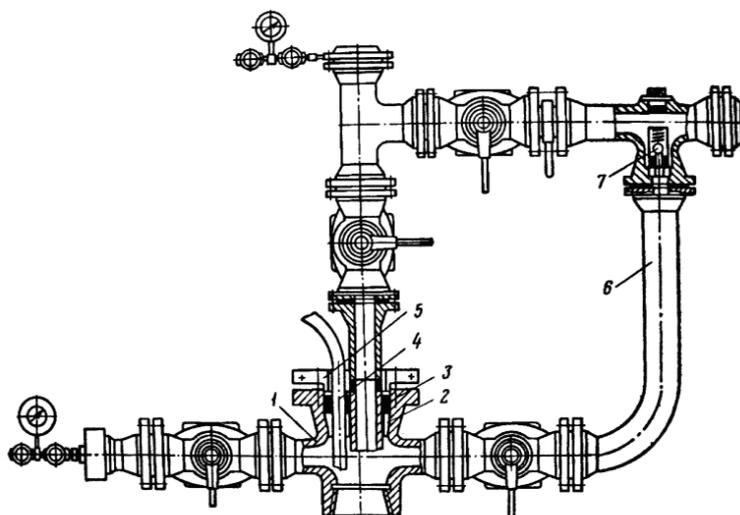


Рисунок 8 – Схема оборудования устья скважины типа «ОУЭН»:

1 – крестовина; 2 – разъемный вкладыш; 3 – уплотнение; 4 – кабель;

5 – разъемный фланец; 6 – труба, 7 – обратный клапан

1.2.8 Станция управления

СУ используется для управления работой и защиты УЭЦН. Все СУ оборудованы необходимыми контрольно-измерительными приборами и системами, автоматическими выключателями, разнообразными реле (максимальные, минимальные, промежуточные, реле времени). При нештатной ситуации срабатывают соответствующие системы защиты, и установка отключается. На рисунке 9 представлены станции управления «ЭЛЕКТРОН».



Рисунок 9 – Серия станций управления «ЭЛЕКТРОН»

1.2.9 Трансформатор

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 380 до 3000 В).

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». [13, 19].



Рисунок 10 – Общий вид трансформатора «ТМПН»

Наиболее распространенный закон управления – пропорциональный:

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

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 представляется в виде зависимости:

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

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ. ВЫБОР ПРИНЦИПА УПРАВЛЕНИЯ. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

ПЭД представляет собой трехфазный АД с короткозамкнутым ротором, питающийся от сети переменного напряжения.

Основные достоинства асинхронных электродвигателей:

- простота конструкции, использования и обслуживания;
- низкая себестоимость производства;
- высокая перегрузочная способность по току и по моменту;
- возможность реализации плавного пуска с помощью преобразователя частоты (далее–ПЧ) и устройств плавного пуска.

Основные недостатки асинхронных электродвигателей:

- наличие значительных потерь в роторе и статоре (электрические, механические и добавочные потери);
- более низкий коэффициент мощности, чем у вентильных ПЭД;
- большой вес активных материалов в сравнении с вентильным ПЭД;
- высокое значение тока холостого хода;
- необходимость в регулируемом пуске, ввиду ограничения токовых и электродинамических нагрузок.

2.1 Математическое описание работы асинхронного двигателя

Приведем математическое описание работы АД.

Для статора система уравнений имеет вид (1):

$$\begin{aligned}u_A &= R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\u_B &= R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\u_C &= R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt}\end{aligned}$$

Для ротора система уравнений имеет вид (2):

$$u_A = R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt}$$

$$u_B = R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt}$$

$$u_C = R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt}$$

Основные параметры, определяющие математическое описание работы АД: 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 $R_a=R_b=R_c=R_s$ - активное сопротивление роторной обмотки.

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

Для статора (3):

$$\psi_A = L_{AA}i_A + L_{AB}i_B + L_{AC}i_C + L_{Aa}i_a + L_{Ab}i_b + L_{Ac}i_c$$

$$\psi_B = L_{BA}i_A + L_{BB}i_B + L_{BC}i_C + L_{Ba}i_a + L_{Bb}i_b + L_{Bc}i_c$$

$$\psi_C = L_{CA}i_A + L_{CB}i_B + L_{CC}i_C + L_{Ca}i_a + L_{Cb}i_b + L_{Cc}i_c$$

Для ротора (4):

$$\psi_a = L_{aA}i_A + L_{aB}i_B + L_{aC}i_C + L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c$$

$$\psi_b = L_{bA}i_A + L_{bB}i_B + L_{bC}i_C + L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c$$

$$\psi_c = L_{cA}i_A + L_{cB}i_B + L_{cC}i_C + L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c$$

Из уравнения 3 и 4 видно, что потокосцепление каждой обмотки зависит от токов во всех обмотках. Указанные зависимости проявляются через взаимоиндукцию.

$$J_{\Sigma} \cdot \frac{d\vec{\omega}_m}{dt} = \vec{M} - \vec{M}_H$$

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

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

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

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

Определяем описание пространственного вектора статорного тока (5):

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

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

Таким образом, на рисунке 11 представлен пространственный вектор тока, который вращается с угловой скоростью ω в положительном направлении. [20, 21]

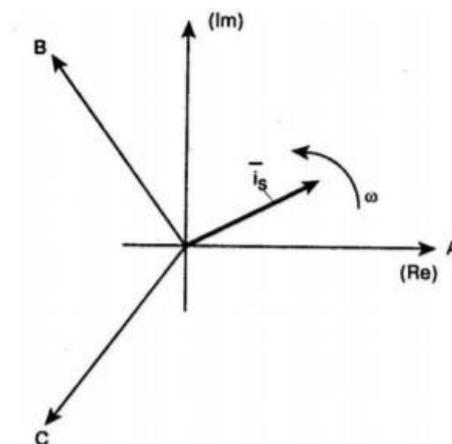


Рисунок 11 – Пространственный вектор тока

Далее приведем запись уравнений момента через некоторые пары переменных состояния асинхронной машины (6):

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

Далее перейдем к описанию в системе координат α, β (7):

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

На основании приведенной системы уравнений (7) можно составить структурную схему силового канала системы непрерывного линеаризованного «ПЧ–АД» с фиксированной системой координат, описывающую процессы в машине, значения напряжений, токов и потокосцепления действующих в синусоидальной форме.

Структурная схема представлена на рисунке 12. Входные величины структурной схемы являются составляющими управляющего напряжения преобразователя $U_{уп\alpha}$ и $U_{уп\beta}$, величина на выходе – угловая скорость двигателя ω . Структурная схема характеризуется координатами :

$U_{1\alpha}, U_{1\beta}, I_{1\alpha}, I_{1\beta}, \psi_{2\alpha}, \psi_{2\beta}$ – составляющие напряжения, тока статора и потокосцепления ротора в ортогональной системе координат α и β ;

$M_{двэм}$ – электромагнитный момент двигателя, Н·м.

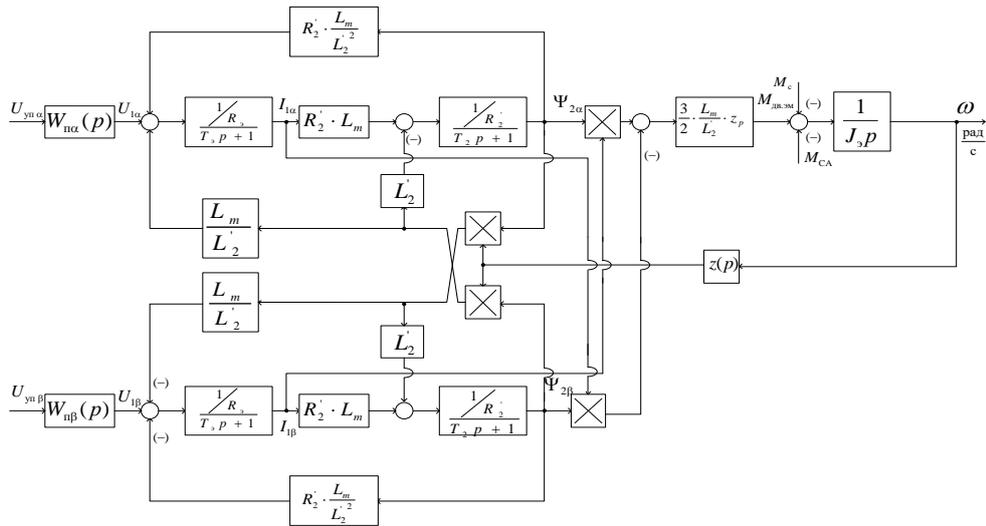


Рисунок 12 – Структурная схема силового канала системы «ПЧ–АД» в

Как показывает практика, переходные процессы полученные с помощью неподвижной двухфазной системы координат и готовой модели двигателя из библиотеки SimPowerSystem системы MatLab Simulink – практически идентичны в обоих случаях, так как построены по одному принципу. Поэтому при моделировании достаточно использовать готовую модель двигателя из библиотеки SimPowerSystem, системы MatLab Simulink.

2.2 Способы управления электроприводом

Принцип и способ управления ЭД выбираются в соответствии с требованиями управления скоростью и качественными показателями управления, такими как: диапазон регулирования, плавный ход и обеспечение неизменной скорости. Также необходимо учитывать динамические показатели качества регулирования, а именно: скорость, перерегулирование и т.д. При выборе системы управления, так же необходимо учитывать важное и обязательное условие, а именно, тип нагрузки создаваемой рабочим механизмом. Частотное управление электродвигателем использует два основных метода: скалярный и векторный принцип управления. [22]

Скалярный принцип чаще всего используется для управления электроприводом, поскольку технически просто измерять и контролировать абсолютные значения переменных АД.

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. Получается, что магнитный поток в зазоре между ротором и статором постоянен. Если же отношение напряжения к частоте отклонить от номинального для данного двигателя, то двигатель перевозбудится или недовозбудится, что приведет к потерям в ЭД и как следствие, сбоям в рабочем процессе.

На рисунке 13 представлена схема скалярного управления с датчиком скорости и обратной связью.

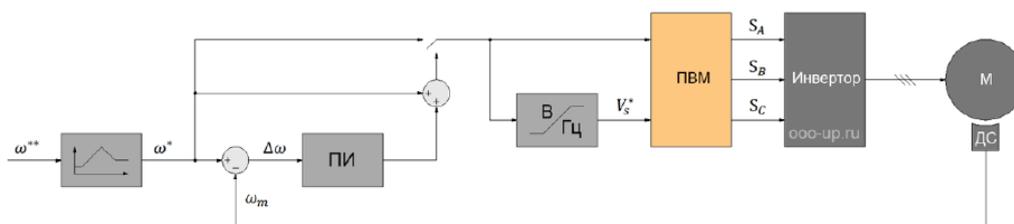


Рисунок 13 – Схема скалярного управления

Управление осуществляется в соответствии с функциональной характеристикой, которая сочетает в себе напряжение и частоту статора электродвигателя (характеристика - U/f) и использование модуля IR-компенсации для обеспечения связи магнитного потока статора в соответствии с характеристикой. Обратная связь позволяет достичь желаемых свойств электропривода. Этот принцип используется для электроприводов, которые не подвергаются высоким динамическим требованиям.

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 частотного управления. [23]

Векторный принцип основан на взаимном ориентации векторов магнитного потока и токов АД, расположенных в полярных или декартовых системах координат в соответствии с используемым законом регулирования. Управление АД обеспечивается путем регулирования модулей переменных и углов между их векторами, как в статике, так и в динамике, что впечатляющим образом улучшает качество переходных процессов. Этот факт имеет решающее значение при выборе системы и используется в электроприводах, где требуется средняя и высокая динамика. На рисунке 14 представлена схема векторного управления.

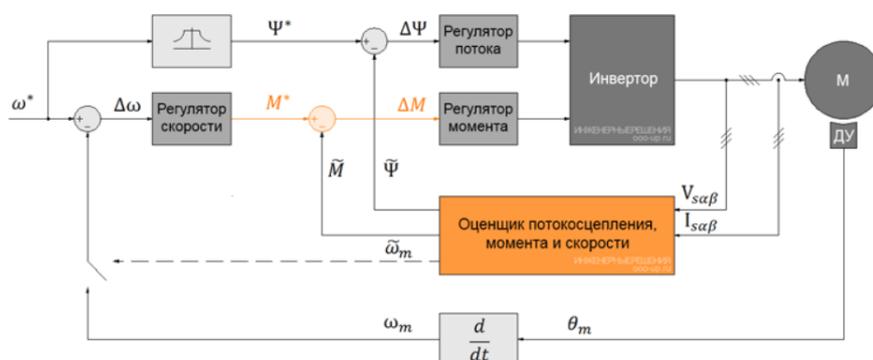


Рисунок 14 – Схема векторного управления

Этот более прогрессивный подход предоставляет возможность независимо и почти безынерционно регулировать как момент на валу, так и скорость вращения вала под нагрузкой, так как в процессе управления учитываются фазы токов. При очевидных плюсах, векторное регулирование трудно реализуемо и обладает высокой сложностью вычисления, что ограничивает его широкое применение. [23, 24]

Изучив принципы способов управления электроприводом, оптимизируем главное в таблицу 1.

Таблица 1 – Выбор оптимального метода регулирования скорости

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

Подводя итог сравнения можно сказать, что в приводах длительного режима работы с постоянной скоростью, диапазоном регулирования скорости не больше 1:10 и без особых требований к динамике целесообразно применение простейших структур и законов частотного управления. Поскольку скалярное управление дешево и просто в реализации, в отличие от векторного метода управления, не требует составления математической модели двигателя, а так же в виду отсутствия жестких требований к системе по динамическим характеристикам – делаем выбор в пользу скалярного метода управления в системе «ПЧ–АД», для УЭЦН.

2.3 Механические характеристики электропривода

При проектировании электроприводов, электродвигатель следует выбирать так, чтобы его механические свойства соответствовали механическим свойствам производственного механизма. Механические характеристики позволяют получить взаимосвязь переменных в установившемся состоянии.

Механической характеристикой механизма называется отношением между угловой скоростью и модулем момента сопротивления механизма, приведенным к валу двигателя $\omega = f(M_C)$, где M_C – момент сопротивления.

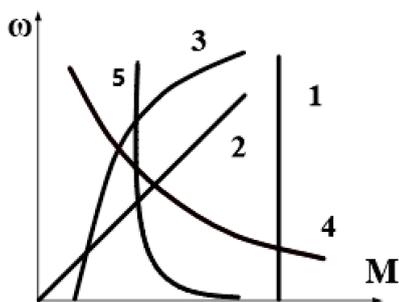


Рисунок 15 – Механические характеристики механизмов

1. Характеристика постоянна вне зависимости от скорости вращения:

$$M_C = const, X = 1.$$

2. Линейно-возрастающая механическая характеристика:

$$M_C = \beta \cdot n, X = 2;$$

3. Нелинейно-возрастающая механическая характеристика:

$$M_C = M_0 + M \cdot \omega^x,$$

$X = 2$ – вентилятор, $X = 3$ – насос;

4. Нелинейно-спадающая характеристика:

$$M_C = M \cdot \omega^{X-1}, X = 0.$$

5. Механическая характеристика при повышенном пусковом моменте.

Любой из видов механической характеристики может быть описан общей для них формулой:

$$M_C = M_0 + (M_{C.НОМ} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{НОМ}} \right)^3,$$

где: M_C – момент нагрузки, при ω ; $M_{C.НОМ.}$ – момент нагрузки при $\omega_{НОМ.}$;

M_0 – момент трения; X – показатель степени.

С помощью электрических преобразователей частоты у ЭД переменного тока для соответствующих моментов производственных механизмов можно формировать электромагнитные моменты двигателей. [20, 21]

При постоянном моменте нагрузки напряжение и частота статора асинхронного двигателя регулируются в соответствии с законом $U_{1j}/f_{1j} = const$

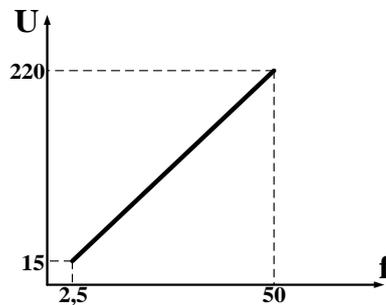


Рисунок 16 – Зависимость $U_{1j}/f_{1j} = const$

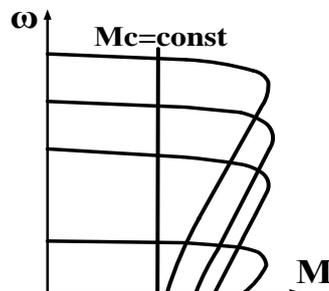


Рисунок 17 – Механические характеристики привода, контролируемая системой «ПЧ–АД» с постоянным моментом

При нелинейно-спадающей нагрузке – закон управления напряжением и частотой имеет вид $U_{1j}/\sqrt{f_{1j}} = const$;

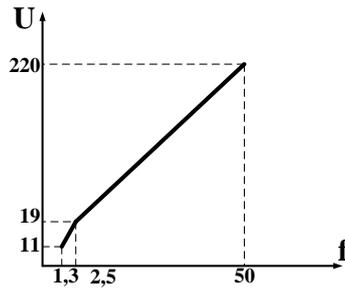


Рисунок 18 – Зависимость $U_{1j}/\sqrt{f_{1j}} = const$

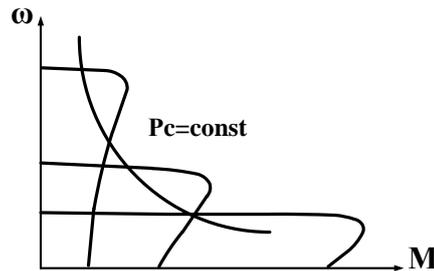


Рисунок 19 – Механические характеристики привода, контролируются системой «ПЧ–АД» с постоянной мощностью

При нелинейно-возрастающей «насосной» нагрузке напряжение и частота должны изменяться в соответствии с зависимостью $U_{1j}/f_{1j}^2 = const$

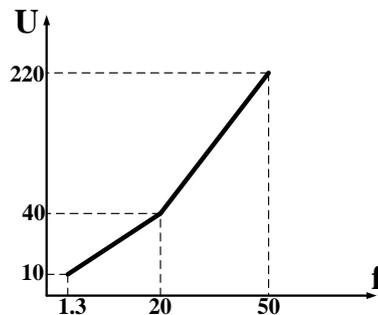


Рисунок 20 – Зависимость $U_{1j}/f_{1j}^2 = const$

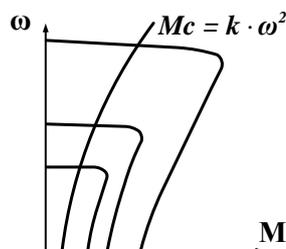


Рисунок 21 – Механические характеристики привода, контролируются системой «ПЧ–АД» с насосной нагрузкой [20, 25]

3 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА. ПОДБОР ОБОРУДОВАНИЯ

3.1 Выбор насоса

Выбор насоса производится с учетом необходимого дебита, напора и т.д. В соответствии с требованиями ТЗ, выбираем насос ЭЦНМ5-125-1000 с параметрами указанными в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики насоса ЭЦНМ5-125-1000

Параметр	Значение	Ед. измерения
Подача	125	м ³ /сут
Напор	1000	м
Частота вращения	3000	об/мин
КПД	58,5	%
Потребляемая мощность	24	кВт
Количество секций	3	шт.
Количество ступеней	227	шт.

3.2 Выбор электродвигателя и расчет силовой части

Мощность электродвигателя выбирается в соответствии с мощностью насоса. Проведем расчет мощности насоса по нижеприведенной формуле, сравним значение с каталожными данными и выберем двигатель:

$$P_H = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_H} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,001472 \cdot 1000}{1000 \cdot 0,585} = 24,689 \text{ кВт},$$

где: ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²;

Q – подача насоса, $Q = \frac{125}{24 \cdot 3600} = 0,001472 \text{ м}^3 / \text{с}$; H – напор, м; η_H – КПД насоса.

В соответствие с ISO 5199, для работы двигателя без перегрузок, требуется обеспечить запас мощности двигателя. Рассчитаем мощность двигателя с учетом запаса:

$$P_d = \frac{k \cdot P_H}{\eta_{\Pi}} = \frac{1,2 \cdot 24,6268}{0,97} = 30,543 \text{ кВт},$$

где k – коэффициент запаса, принимаем $k = 1,2$, поскольку ЭД является приводом насоса, который работает с постоянной непрерывной нагрузкой;

$\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи при соединении валов двигателя и насоса муфтой, $\eta_{\text{п}}=0,97$.

Следовательно, выбираем более мощный асинхронный двигатель типа ПЭДУ32 – 103В5.

Определим параметры Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя ПЭДУ32 – 103В5 со следующими каталожными данными:

Номинальная мощность двигателя	$P_n = 32 \text{ кВт}$
Номинальное фазное напряжение	$U_{1H} = 577 \text{ В}$
Номинальное напряжение сети	$U_{ФH} = 1000 \text{ В}$
Синхронная частота вращения	$n_0 = 3000 \text{ об/мин}$
Номинальное скольжение	$S_H = 5,9 \%$
КПД в режиме номинальной мощности	$\eta_H = 0,81 \text{ о.в.}$
Момент инерции двигателя	$J_{\text{об}} = 0,12 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
Коэффициент мощности в режиме номинальной мощности	$\cos\varphi = 0,83 \text{ о.в.}$
Кратность пускового тока	$k_i = 6 \text{ о.е.}$
Кратность пускового момента	$k_n = 2 \text{ о.е.}$
Кратность максимального момента	$k_{\text{max}} = 2,3 \text{ о.е.}$
Коэффициент загрузки двигателя	$p_{\text{жс}} = 0,75 \text{ о.е.}$
Число пар полюсов	$p = 1$

Составим Т-образную схему замещения, для дальнейшего расчета электромеханических и механических характеристик:

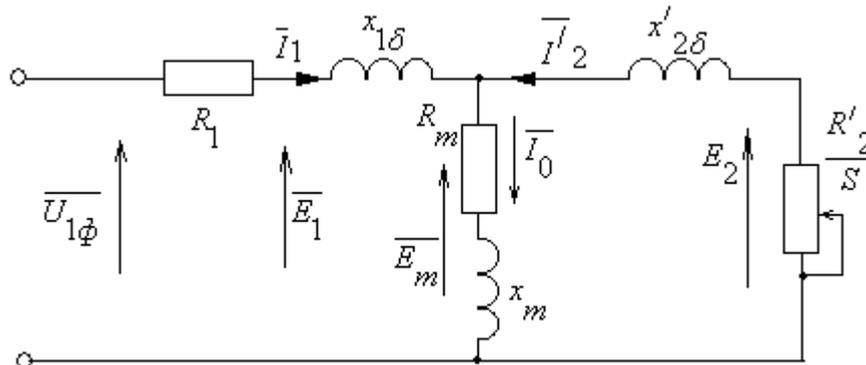


Рисунок 22 – Схема замещения асинхронного электродвигателя

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 асинхронной машины изображена на рисунке 23:

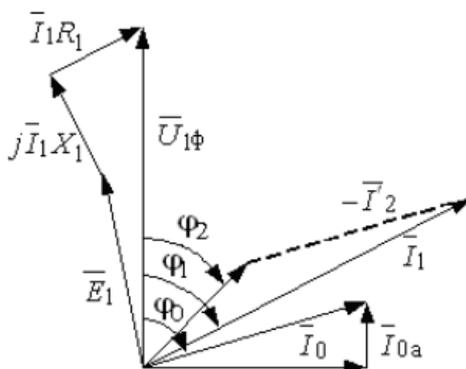


Рисунок 23 – Векторная диаграмма асинхронной машины

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:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - (p_{ж} \cdot I_{1H} \cdot \frac{1-s_H}{1-p_{ж} \cdot s_H})^2}{1 - (p_{ж} \cdot \frac{1-s_H}{1-p_{ж} \cdot s_H})^2}}$$

где: $I_{11} = \frac{p_{ж} \cdot P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{p_{ж}} \cdot \eta_{H p_{ж}}} = \frac{0,75 \cdot 32000}{3 \cdot 577 \cdot 0,822 \cdot 0,81} = 20,831 \text{ A}$ – ток статора двигателя

при частичной нагрузке; $\eta_{H p_{ж}} = \eta_H = 0,81$ – КПД при частичной нагрузке;

$\cos \varphi_{PЖ} = \cos \varphi \cdot \left(\frac{\cos \varphi_{0,75}}{\cos \varphi} \right) = 0,83 \cdot 0,99 = 0,822$ – коэффициент мощности при частичной

загрузке; $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_H = 0,99$ – относительный коэффициент мощности при частичной нагрузке (из графика на рисунке 24).

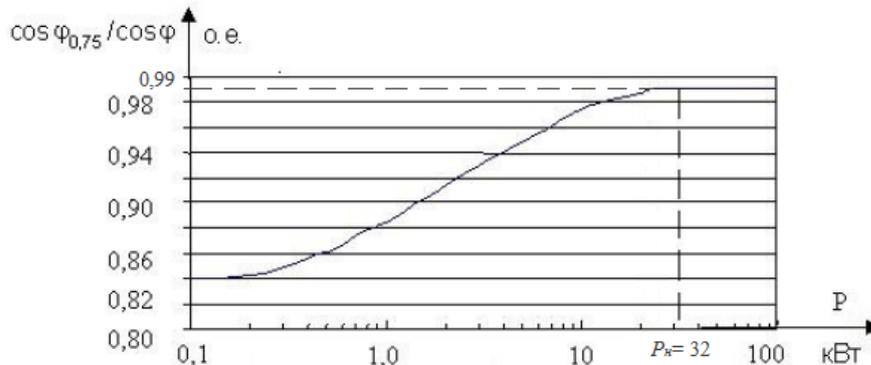


Рисунок 24 – Зависимость $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_H$ от мощности АД

Номинальный ток статора двигателя вычисляем по формуле:

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_H} = \frac{32000}{3 \cdot 577 \cdot 0,83 \cdot 0,81} = 27,487 \text{ A}$$

Получаем, что:

$$I_0 = \sqrt{\frac{20,831^2 - \left(0,75 \cdot 27,481 \cdot \frac{1-0,059}{1-0,75 \cdot 0,0059} \right)^2}{1 - \left(0,75 \cdot \frac{1-0,059}{1-0,75 \cdot 0,0059} \right)^2}} = 6,902 \text{ A}$$

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

$$s_K = s_H \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} = 0,018 \cdot \frac{2,3 + \sqrt{2,3^2 - (1 - 2 \cdot 0,059 \cdot 1 \cdot (2,3 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,059 \cdot 1 \cdot (2,3 - 1)} = 0,291 \text{ о.е.}$$

Найдем значения коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \left(\frac{I_0}{2 \cdot k_I \cdot I_{1H}} \right) = 1 + \frac{6,898}{2 \cdot 6 \cdot 27,497} = 1,021$$

$$A_1 = m \cdot U_{H1}^2 \cdot \frac{1 - s_H}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = 3 \cdot 577^2 \cdot \frac{1 - 0,059}{2 \cdot 1,021 \cdot 2,3 \cdot 32000} = 6,254$$

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

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_K} \right) \cdot C_1} = \frac{6,262}{\left(1 + \frac{1}{0,307} \right) \cdot 1,021} = 1,479 \text{ Ом}$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,021 \cdot 1,479 \cdot 1 = 1,057 \text{ Ом}$$

Определим параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания x_{KH} :

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_K}\right) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,291^2}\right) - 1^2} = 3,369$$

Найдем значение индуктивного сопротивления короткого замыкания:

$$x_{KH} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 3,369 \cdot 1,021 \cdot 1,479 = 5,088 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$x'_{2H} = 0,58 \cdot \frac{x_{KH}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{5,088}{1,021} = 2,891 \text{ Ом}$$

Найдем индуктивное сопротивление статорной обмотки:

$$x_{1H} = 0,42 \cdot x_{KH} = 0,42 \cdot 5,088 = 2,137 \text{ Ом}$$

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

$$s_{K1} = \frac{C_1 \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_{KH}^2}} = \frac{1,021 \cdot 1,479}{\sqrt{1,057^2 + 5,088^2}} = 0,291 \text{ о.е.}$$

Рассчитанные значения S_{K1} S_K и 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:

$$E_1 = \sqrt{(U_{H1} \cdot \cos(\varphi) - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{H1} \cdot \sin(\varphi) \cdot x_{1H} \cdot I_{1H})^2} = \\ = \sqrt{(577 \cdot 0,83 - 1,057 \cdot 27,487)^2 + (577 \cdot 0,558 - 2,137 \cdot 27,487)^2} = 521,113 \text{ В}$$

Индуктивное сопротивление намагничивания:

$$x_{\mu H} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{521,113}{6,902} = 75,503 \text{ Ом}$$

3.3 Расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристик

Найдем синхронную угловую скорость:

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

Рассчитаем и построим естественную электромеханическую характеристику:

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

$I_2'(\omega)$ - значение приведенного тока ротора от скольжения;

$$I_2' = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{\omega - \omega_0}\right)^2 + (x_{1H} + x_{2H}')^2}}$$

$$\sin \phi_2 = \frac{x_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{\omega - \omega_0}\right)^2 + x_{KH}^2}}$$

По вышеприведенным формулам рассчитывается естественная электромеханическая характеристика, приведенная на рисунке 25:

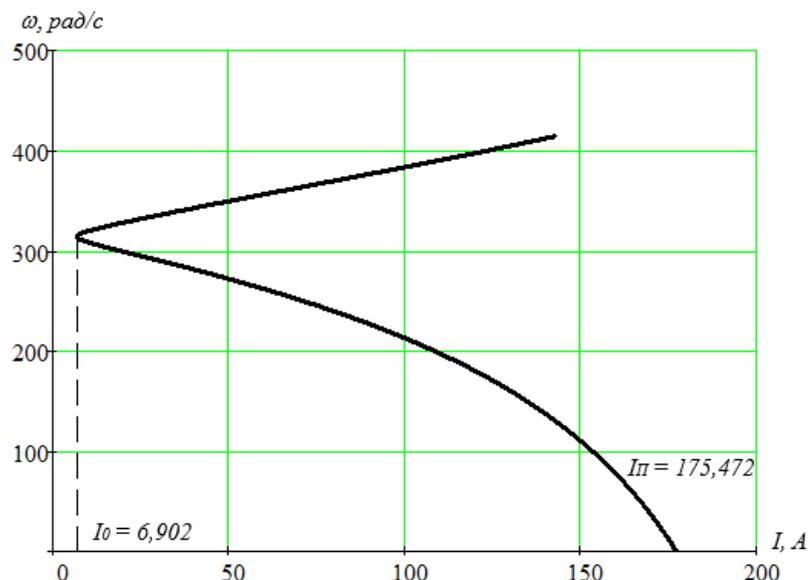


Рисунок 25 – Естественная электромеханическая характеристика асинхронного электродвигателя

Рассчитаем и построим естественную механическую характеристику по следующей формуле:

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

Рассчитаем контрольные точки механической характеристики по паспортным данным:

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

Момент номинальный: $M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{32000}{295,6} = 108,25 \text{ Н}\cdot\text{м}$;

Момент критический: $M_{кр} = M_H \kappa_{\max} = 108,25 \cdot 2,3 = 248,965 \text{ Н}\cdot\text{м}$;

Момент пусковой: $M_{п} = M_H \kappa_{п} = 108,25 \cdot 2 = 216,491 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

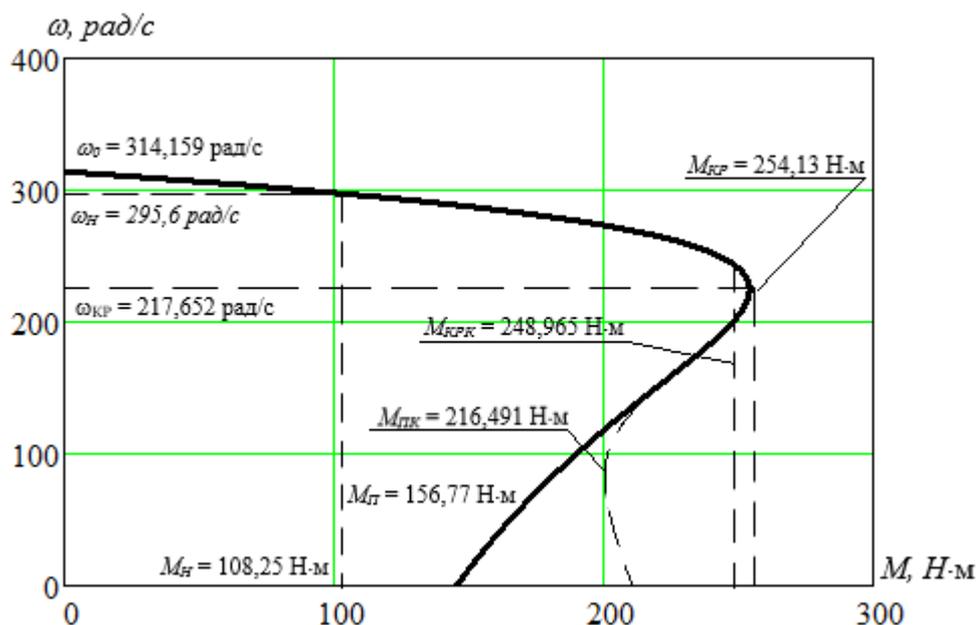


Рисунок 26 – Естественная механическая характеристика асинхронного электродвигателя

Из графика механической характеристики определяем:

- Синхронная скорость – $\omega_0 = 314,159 \text{ рад/с}$;
- Момент холостого хода – $M(\omega) = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- Номинальная скорость – $\omega_H = 295,6 \text{ рад/с}$;
- Номинальный момент – $M_H = 108,25 \text{ Н}\cdot\text{м}$;

- Критическое скольжение – $S_k = 0.307$ о.е., $\omega_{кр} = 217,652$;
- Критический момент – $M_{кр} = 254,13$ Н·м;
- Скольжение в момент пуска – $S = 1$;
- Пусковой момент – $M_{п} = 156,77$ Н·м;

На основании анализа аналитически и графически полученных данных делаем вывод, что существенно различается только значение пускового момента. Это объясняется тем, что при скольжениях близких к единице проявляется поверхностный эффект, который не был учтен в расчетах.

3.4 Выбор кабельной линии

Сечение жилы кабеля:

$$S = \frac{I_H}{i} = \frac{27,5}{5} = 5,5 \text{ мм}^2,$$

где: I_H – номинальный ток электродвигателя, А;

i – плотность рабочего тока в кабеле, мм^2 .

Электрическое сопротивление в кабеле на единицу длины:

$$R = \rho_{\text{меди}} \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_{20})) \cdot \frac{1}{S} = 0,0175 \cdot (1 + 0,004 \cdot (92 - 20)) \cdot \frac{1}{5,5} = 5,55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м},$$

где: $\rho_{\text{меди}}$ – удельное сопротивление меди, $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$;

α – температурный коэффициент для меди;

T – температура жидкости у приема насоса, $^{\circ}\text{C}$.

Тогда потери мощности в кабеле:

$$\Delta P_K = 3 \cdot I_H^2 \cdot R \cdot L_K = 3 \cdot 27,5^2 \cdot 5,55 \cdot 10^{-3} \cdot 1100 \cdot 10^{-3} = 13,85 \text{ Вт},$$

где: L_K – общая длина кабеля, м.

Выбираем кабель КПБК-3х10 длиной 1100 м, с каталожными данными представленными в таблице 3.

Таблица 3 – Каталожные данные кабеля КПБК-3х10

Число и сечение жил, мм^2	Конструкция жилы	Толщина резиновой изоляции, мм	Толщина защитной наиритовой оболочки, мм	Наружный диаметр, мм	Вес 1 км кабеля, кг
3х10	7х2,11	1,8	2,0	29	1990

3.5 Выбор трансформатора

По номинальной мощности выбранного двигателя вычисляется необходимая мощность трансформатора.

Минимально допустимая мощность ТМПН рассчитывается по формуле:

$$P_{TP} = P_{двн} \cdot k = 32000 \cdot 1,6 = 51,2 \text{ кВА},$$

где: $P_{двн}$ – номинальная мощность электродвигателя;

k – постоянный коэффициент.

Выбирается нужная ступень напряжения на трансформаторе, для чего ориентировочно определяется необходимое напряжение на выходе трансформатора с учётом потерь напряжения в кабельной линии по формуле:

$$U_{СТТР} = \frac{f}{50} \cdot U_{двн} + \Delta U,$$

где: $U_{двн}$ – номинальное линейное напряжение электродвигателя, В;

ΔU – потери напряжения в кабельной линии, В;

f – рабочая частота питающего напряжения.

Расчёт ведём как для кабеля с медными жилами сечением $3 \times 16 \text{ мм}^2$.

Для номинального тока двигателя $I_{двн} = 27,5 \text{ А}$ и температуры пластовой жидкости $70\text{--}90^\circ\text{С}$ потери напряжения кабельной линии длиной 1000 м составляет 57 В .

Тогда найдём потери напряжения на всей длине кабельной линии:

$$\Delta U = \frac{\text{табл.знач.} \cdot L_K}{1000} = \frac{57 \cdot 1100}{1000} = 62,7 \text{ В},$$

где: L_K – общая длина кабеля, м.

Найдём напряжение ступени трансформатора при 60 Гц :

$$U_{СТТР} = \frac{f}{50} \cdot U_{двн} + \Delta U = \frac{60}{50} \cdot 1000 + 62,7 = 1262,7 \text{ В}$$

Выбираем трансформатор ТМПН – 100/3 – УХЛ 1 с высшей ступенью регулирования $U_{отн.тмпн160} = 1690 \text{ В}$, так как при возникновении внештатных ситуаций, он позволяет произвести регулировку напряжения в большую сторону. Параметры трансформатора ТМПН – 100/3 – УХЛ 1 представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры трансформатора ТМПН – 100/3 – УХЛ 1

Мощность, кВ·А	Ном. напряжение обмотки НН, В	Номинальное напряжение обмотки ВН, В	Напряжение ступеней регулирования, В	Ном. ток вторичной обмотки, А	Масса, кг
100	380	1455	916–993–1070– 1137–1222–1304– 1378–1455–1532– 1690	36	520



Рисунок 27 – Общий вид трансформатора ТМПН – 100/3 – УХЛ 1

3.6 Выбор станции управления

Через номинальный ток двигателя и коэффициент трансформации ТМПН вычисляется максимальный ток на первичной обмотке трансформатора. По максимальному току на первичной обмотке трансформатора и потребляемой мощности электродвигателя подбирается станция управления. Так как частота на которой работает установка может быть отличной от 50 Гц, подбирается станция управления с частотным преобразователем.

$$I_{1\text{МАКС}} = I_{\text{НОМ.ДВ}} \cdot K_{\text{ТР}} = 27,5 \cdot 4 = 110 \text{ А,}$$

Выбираем станцию управления с частотным регулированием скорости «Электрон-05» 160.

Таблица 5 – Основные характеристики СУ «Электрон-05» 160

Ном. ток первичной силовой цепи, А	Ном. мощность преобразователя, кВА	Ном. напряжение питания, В	Диапазон отклонения питающего напряжения от ном. значения, %	Температурный диапазон, °С	Диапазон изменения частоты, Гц	Масса, кг
160	100	380 (50±1Гц)	-50...+25	-60...+40	3,5...70±1%	190



Рисунок 28 – Станция управления «Электрон-05» 160

3.7 Выбор преобразователя

В случае неисправности СУ и для возможности замены преобразователя в СУ, выбираем преобразователь частоты фирмы SIEMENS, серии MIDIMASTER ESO, который реализует частотное скалярное регулирование.

Преобразователь частоты выбран из условий:

$$I_{н.лч.} \geq I_{н.дв.}, U_{н.лч.} \geq U_{н.дв.}$$

Выбираем модель ESO1-5500/3, с техническими параметрами представленными в таблице 6.

Таблица 6 – Технические характеристики ПЧ ESO1-5500/3

Модель	Типоразмер	Число фаз	Напряжение питания, В	Мощность двигателя, кВт	Номинальный ток, А	Степень защиты
ESO1-5500/3	7	3	380-500	55	102	IP56

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



Рисунок 29 – Преобразователь частоты серии Midimaster ESO

3.8 Расчет и построение искусственных механических и электромеханических характеристик системы «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель»

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

$$\text{Закон регулирования: } Z_p = \frac{U_{1H}}{f^2} = \frac{577}{50^2} = 0,231$$

Найдем относительные значения частот питающего напряжения:

$$\text{при } f_{1H1} = 50 \text{ Гц: } f_{1*1} = \frac{f_{1H}}{f_{1H}} = \frac{50}{50} = 1,$$

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

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

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

Найдем фазное напряжение обмотки статора асинхронного двигателя:

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

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

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

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

Далее выполним расчет значений скорости идеального холостого хода:

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

$$\omega_{02} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1H2}}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 25}{1} = 157,1 \text{ рад/с;}$$

$$\omega_{03} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1H3}}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 10}{1} = 62,832 \text{ рад/с;}$$

$$\omega_{04} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1H4}}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 5}{1} = 31,416 \text{ рад/с;}$$

Определим токи холостого хода при выбранных частотах регулирования:

$$I_{01} = \frac{U_{1H1}}{\chi_{\mu H}} = \frac{577}{75,503} = 7,7 \text{ А;}$$

$$I_{02} = \frac{U_{1H1}}{\chi_{\mu H} \cdot f_{1*2}} = \frac{144,25}{75,503 \cdot 0,5} = 3,9 \text{ A};$$

$$I_{03} = \frac{U_{1H1}}{\chi_{\mu H} \cdot f_{1*3}} = \frac{23,1}{75,503 \cdot 0,2} = 1,6 \text{ A};$$

$$I_{04} = \frac{U_{1H1}}{\chi_{\mu H} \cdot f_{1*4}} = \frac{5,8}{75,503 \cdot 0,1} = 0,8 \text{ A}.$$

Построим электромеханические характеристики $\Gamma_2(\omega)$ по выражениям:

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

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

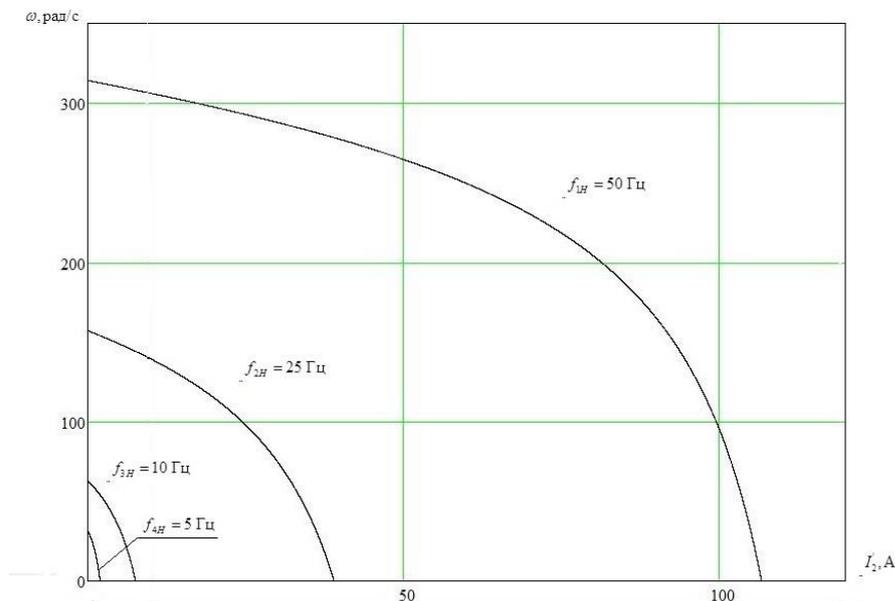


Рисунок 30 – Искусственные электромеханические характеристики $\Gamma_2(\omega)$ при частотном регулировании скорости

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

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

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

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

$$I_0(f) = \frac{U_1(f)}{X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)} \text{ – ток холостого хода АД в зависимости от частоты.}$$

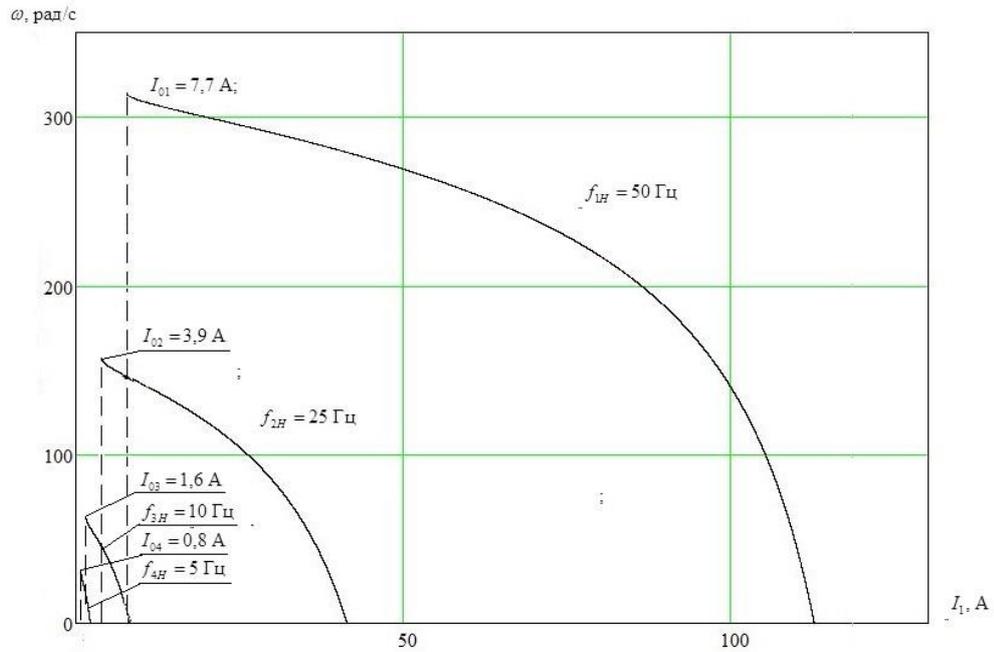


Рисунок 31 – Искусственные электромеханические характеристики $I_1(\omega)$ при частотном регулировании скорости

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

$$M(s, f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2 \cdot R'_2}{\omega_0(f) \cdot s \cdot \left[X_{\text{эф}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\text{лн}} \cdot f_{1*}(f)} \right)^2 \right]},$$

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

Критические момент и скольжение можно определить по выражениям:

$$M_{\text{к}}(f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2}{2 \cdot \omega_0(f) \cdot \left[R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2)} \cdot \left(1 + \frac{R_1^2}{X_{\text{лн}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2} \right) \right]},$$

$$s_{\text{к}}(f) = R'_2 \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{R_1^2}{X_{\text{лн}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2}}{R_1^2 + X_{\text{лн}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2}},$$

$$\omega_{\text{к}}(f) = \omega(s_{\text{к}}(f), f).$$

Также зададим функцию нагрузки. Насосная нагрузка описывается функцией:

$$M_{\text{с}}(\omega) = M_0 + k \cdot \omega^3,$$

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 $f_{нн1} = 50 \text{ Гц}$ 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: $0,75 \cdot M_H$

$$k = \frac{0,75 \cdot M_H - M_0}{\omega_H^2} = 1,071 \cdot 10^{-3}.$$

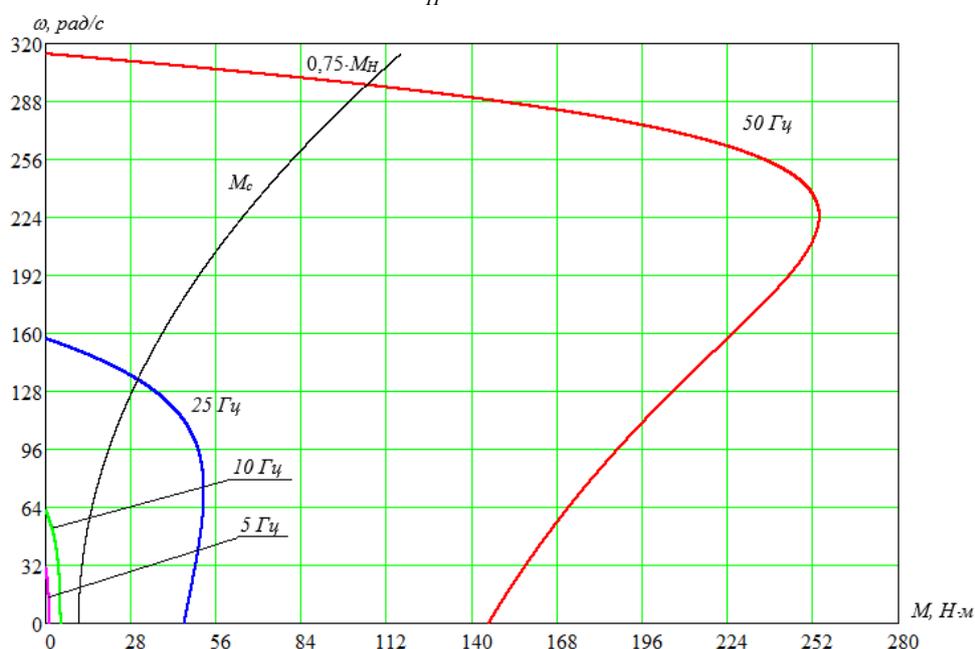


Рисунок 32 – Искусственные механические характеристики $M(\omega)$ при частотном регулировании скорости

Исходя из графика, мы видим, что для работы на низких частотах необходимо увеличить напряжение. Следовательно, в первой и второй 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:

$$M_{C.П}(\omega) = M_0 + k_1 \cdot \omega^3, \text{ рассчитаем коэффициент } k:$$

$$k = \frac{0,75 \cdot M_H - M_0}{\omega_H^3} = 3,552 \cdot 10^{-6}$$

Построим характеристику $M_{C.П}(\omega)$:

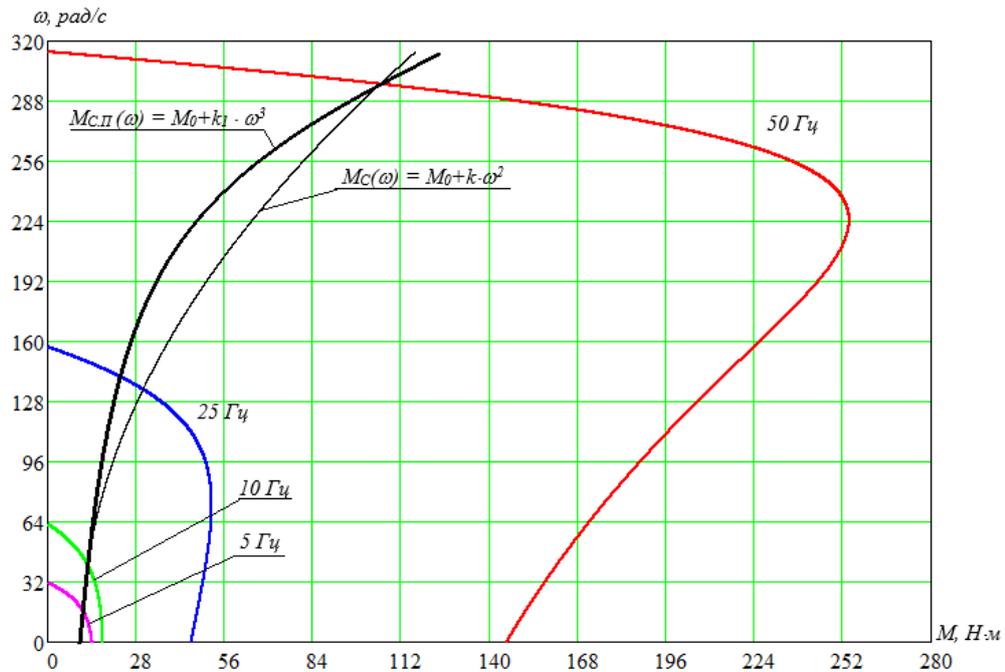


Рисунок 33 – Искусственные механические характеристики $M(\omega)$ при частотном регулировании скорости с насосной характеристикой $M_{C.П}(\omega)$

Построив характеристику $M_{C.П}(\omega)$, мы видим, что данная характеристика имеет незначительные отличия от характеристики $M_C(\omega)$. Следовательно, учитывая вышесказанное, для дальнейших расчетов будет использована $M_{C.П}(\omega)$, момент пропорционален скорости в третьей степени.

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

4.1 Расчет переходных процессов скорости и момента. Силовой канал электропривода

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

Индуктивность фазы обмотки статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{\chi_{1H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{2,137}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,006802 \text{ Гн}$$

Индуктивность фазы обмотки ротора:

$$L_{2\sigma} = \frac{\chi'_{2H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{2,891}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,009202 \text{ Гн}$$

Индуктивность цепи намагничивания:

$$L_{\mu} = \frac{\chi_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{75,503}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,24 \text{ Гн}$$

Имитационная модель изображена на рисунке 34.

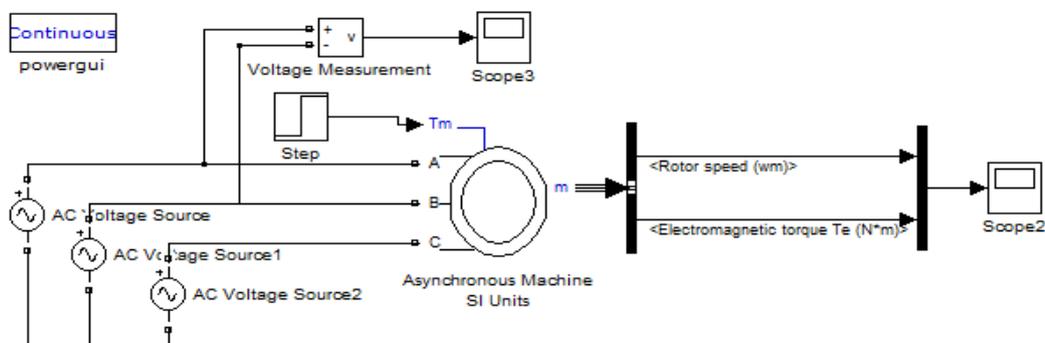


Рисунок 34 – Имитационная модель прямого пуска асинхронного электродвигателя

Силовой канал электропривода включает в себя: преобразователь частоты, электродвигатель и механическую систему.

На рисунках 35 и 36 представлены переходные характеристики скорости и момента, а также динамическая характеристика при прямом пуске АД без нагрузки и при набросе нагрузки соответственно.

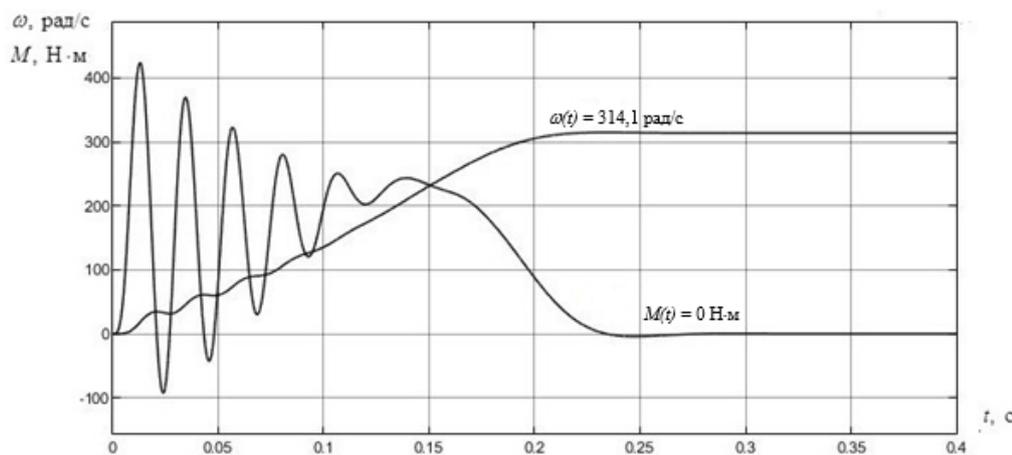


Рисунок 35 – Переходная характеристика скорости ротора и электромагнитного момента асинхронного электродвигателя при прямом пуске

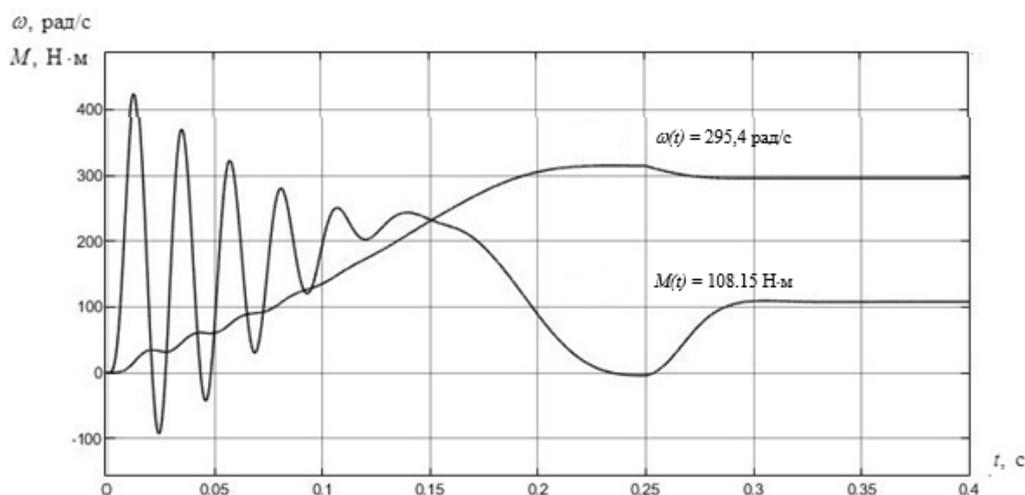


Рисунок 36 – Переходная характеристика скорости ротора и электромагнитного момента асинхронного электродвигателя при прямом пуске и набросе нагрузки

Анализ расчета переходных процессов прямого пуска АД 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 7.

Таблица 7 – Показатели при расчете и моделировании

	ω_0 , рад/с	ω_H , рад/с	M_H , Н·м
Расчет	314,159	295,6	108,25
Моделирование	314,1	295,4	108,15

4.2 Расчет системы «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель» с IR-компенсацией

Теоретически и практически доказано, что в классе законов U_{1j} / f_{1j} невозможно одновременно обеспечить удовлетворительные механические и энергетические характеристики в широком диапазоне скоростей и изменения нагрузки. Основная причина этого – возрастания влияния активного сопротивления обмотки статора при снижении частоты питающего напряжения. В асинхронных частотно-регулируемых электроприводах со скалярным управлением, кроме законов U_{1j} / f_{1j} , получили применение и другие законы регулирования: E_1 / f_1 , E_m / f_1 , E_2' / f_1 .

На практике наибольшее распространение получили такие способы частотного регулирования скорости как $E_{1j} / f_{1j} = const$, $E_{1j} / f_{1j}^2 = const$, $E_{1j} / \sqrt{f_{1j}} = const$. При регулировании скорости в классе законов E_{1j} / f_{1j} необходимо повышать фазное напряжение $U_{1j} = E_{1j} + I_1 \cdot R_1$ на величину падения напряжения $I_1 \cdot R_1$ на активном сопротивлении обмотки статора, а способ регулирования скорости асинхронного двигателя получил название – частотное регулирование с IR-компенсацией.

Структурная схема системы скалярного частотного управления с IR-компенсацией приведена на рисунке 37.

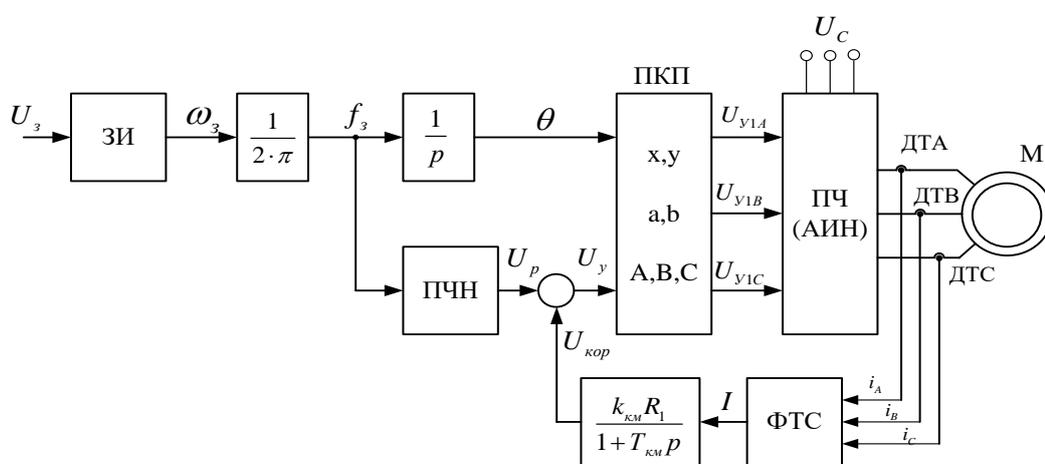


Рисунок 37 – Структурная схема системы скалярного частотного управления с IR-компенсацией

Задатчик интенсивности формирует кривую и темп разгона двигателя. При дистанционном управлении электроприводом сигналом задания скорости является задающее напряжение U_3 . Ему соответствует задающая частота f_3 местного управления, в этом случае управление пуском и остановом двигателем производится с панели преобразователя. Блок “преобразователь частота-напряжение” ПЧН формирует требуемую зависимость скалярного управления между частотой и напряжением преобразователя, чем и устанавливается принятый закон частотного регулирования $E_{1j} / f_{1j}^2 = const$.

При скалярной IR-компенсации сигнал управления U_y является суммой сигналов регулирования U_p и положительной обратной связи по току $U_{кор}$:

$$U_y = U_p + U_{кор} = U_p + k_{км} \cdot R_1 \cdot I ,$$

где $k_{км}$ – коэффициент положительной обратной связи по току;

R_1 - активное сопротивление фазы обмотки статора АД;

I – сигнал пропорциональный действующим значениям токов i_a, i_b, i_c обмоток статора АД.

Сигнал управления является входным для прямого координатного преобразователя (ПКП), на выходе которого формируется три синусоидальных напряжения управления $U_{1yA}, U_{1yB}, U_{1yC}$, сдвинутые относительно друг друга на угол $\pm 2\pi/3$, с амплитудами пропорциональными напряжению управления. Сигналы $U_{1yA}, U_{1yB}, U_{1yC}$ формируют фазные напряжения на выходе автономного инвертора напряжения (АИН).

Произведем расчет статических характеристик. Примем коэффициенты компенсации: $K_{KM}=0,25; 0,5; 0,75$. Найдем эквивалентные сопротивление статора с учетом IR – компенсации:

$$R_{1ЭKB1} = R_1 \cdot (1 - K_{KM1}) = 1,057 \cdot (1 - 0,25) = 0,79275 \text{ Ом};$$

$$R_{1ЭKB2} = R_1 \cdot (1 - K_{KM2}) = 1,057 \cdot (1 - 0,5) = 0,5285 \text{ Ом};$$

$$R_{1ЭKB3} = R_1 \cdot (1 - K_{KM3}) = 1,057 \cdot (1 - 0,75) = 0,26425 \text{ Ом};$$

Строим электромеханические характеристики $\Gamma_2(\omega)$ для выбранных частот и коэффициентов $K_{км}$ по выражениям:

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

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

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

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

$\omega_0(f) = \omega_{0\text{H}} \cdot f_{1*}(f)$ – скорость идеального холостого хода при данной частоте напряжения питания в диапазоне скорости $\omega = 0 \div \omega_0$.

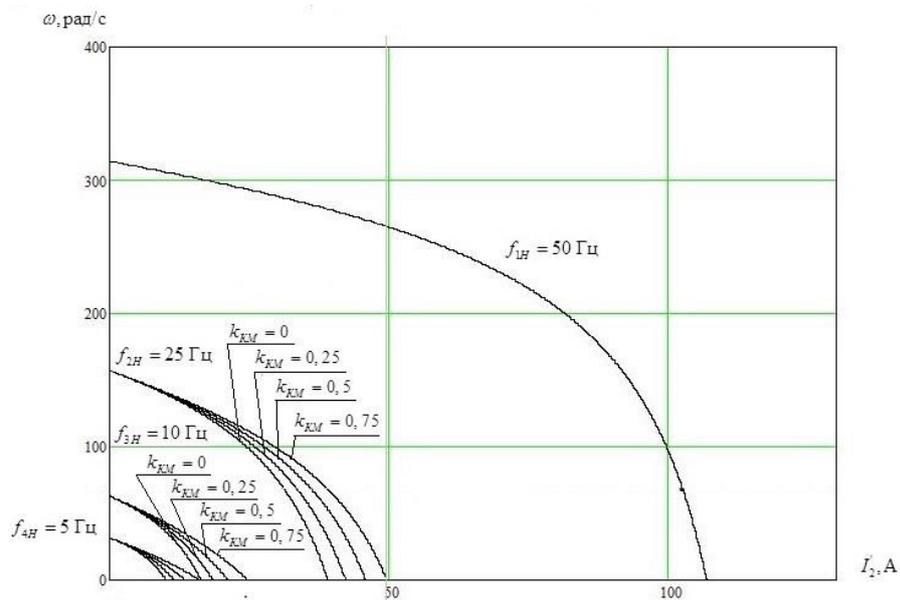


Рисунок 38 – Искусственные электромеханические характеристики $\Gamma_2(\omega)$ при частотном регулировании скорости с IR-компенсацией

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

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

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

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

$$I_0(f) = \frac{U_1(f)}{X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)} - \text{ток холостого хода АД в зависимости от частоты.}$$

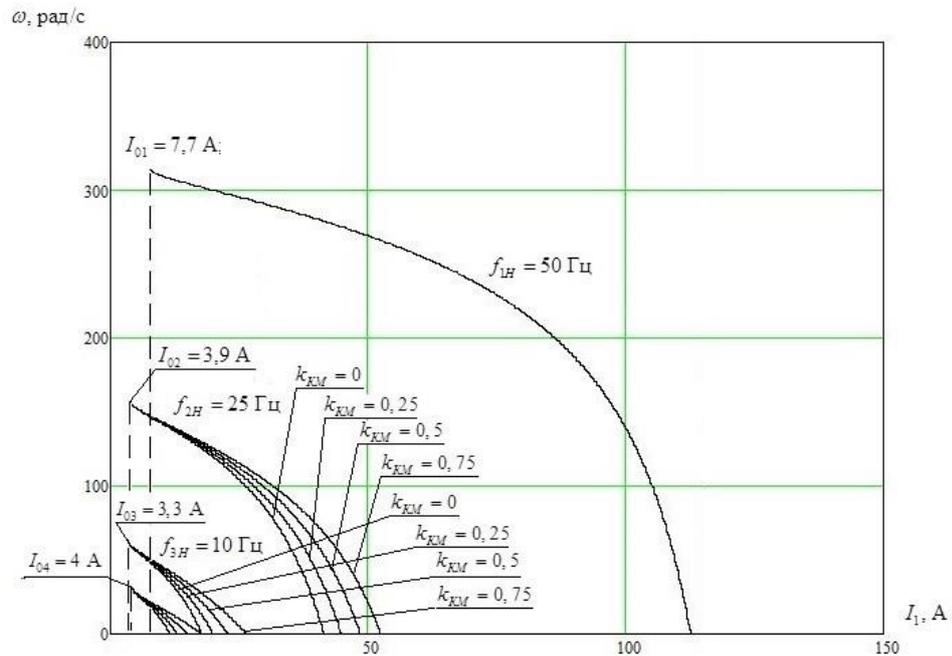


Рисунок 39 – Искусственные электромеханические характеристики $L(\omega)$ при частотном регулировании скорости с IR-компенсацией

Механические характеристики АД $M(\omega)$ представленные на рисунке 42 рассчитываем для выбранных частот и коэффициентов K_{KM} по выражениям:

$$M(s, f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2 \cdot R_2'}{\omega_0(f) \cdot s \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2 + \left(R_{1\text{экв}}(K_{KM}) + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_{1\text{экв}}(K_{KM}) \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)} \right)^2 \right]},$$

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

Критические момент и скольжение можно определить по выражениям:

$$M_k(f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2}{2 \cdot \omega_0(f) \cdot \left[R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2) \cdot \left(1 + \frac{R_1^2}{X_{\mu H}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2} \right)} \right]},$$

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

$$\omega_k(f) = \omega(s_k(f), f).$$

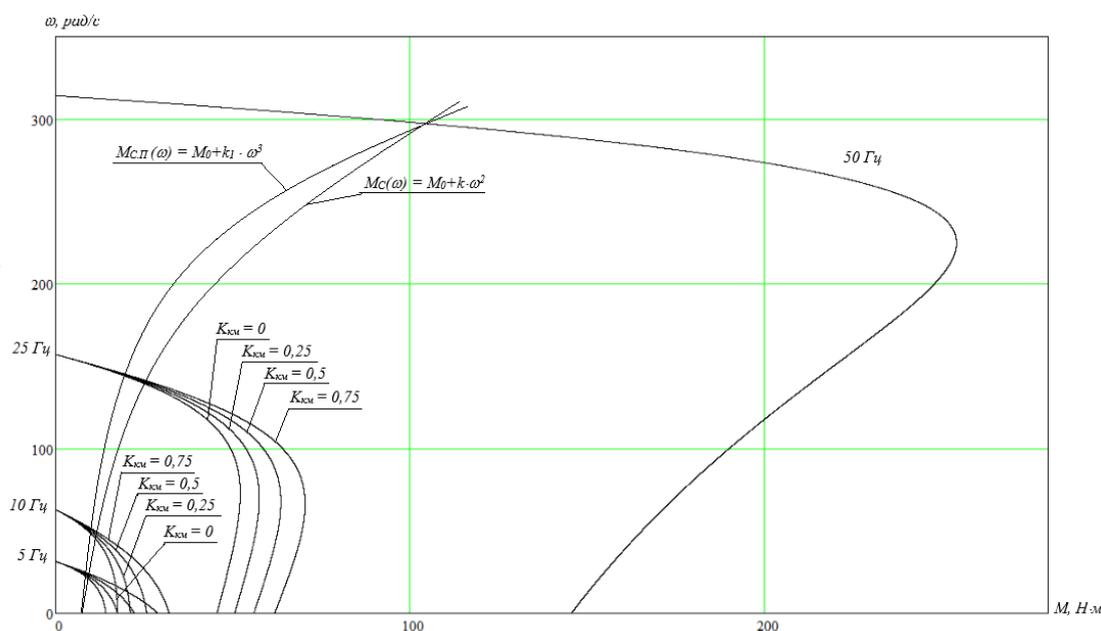


Рисунок 40 – Искусственные механические характеристики $M(\omega)$ при частотном регулировании скорости с IR-компенсацией

Из рисунка видим, что при увеличении коэффициента компенсации момента $K_{\text{км}}$ токи короткого замыкания $I_{\text{кз}}$ имеют большие значения, причем эти различия тем больше, чем меньше частота обмоток статора f_1 . Это обуславливается тем, 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 $K_{\text{км}}$ критический момент увеличивается, а характеристики становятся более жесткими.

4.3 Моделирование переходных процессов скорости и момента на валу двигателя системы «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель»

В соответствии с функциональной схемой, представленной на рисунке 34, составим имитационную модель привода. Для этого определим передаточные функции входящих в нее блоков.

На рисунке 41 представлены математически рассчитанная и аппроксимированная ломаными линиями кривые зависимости $U_{1j} / f_{1j}^2 = const$.

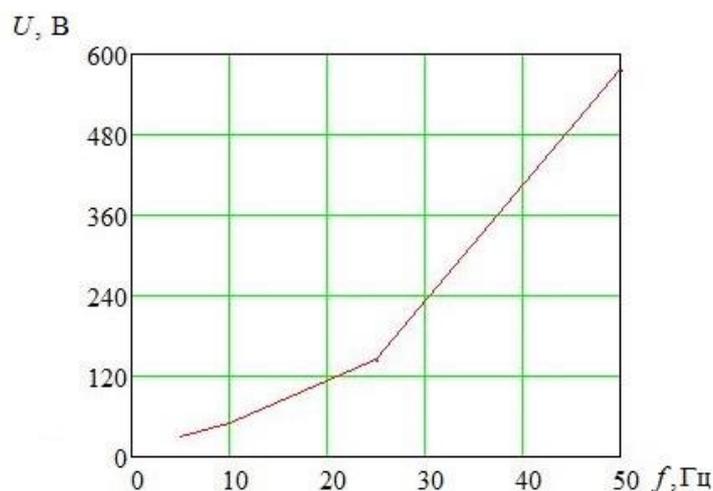


Рисунок 41 – Зависимость $U(f)$

Проанализировав полученную зависимость, можно сделать вывод, что уменьшение частоты приводит к уменьшению и потерь. Это можно объяснить тем, что момент нагрузки прямо пропорционален частоте.

Зависимость строится исходя из заданных точек в блоке ПЧН:

$$f_1=5 \text{ Гц}, U_1 = 5,8 \text{ В}; \quad f_3=25 \text{ Гц}, U_3 = 144,25 \text{ В};$$

$$f_2=10 \text{ Гц}, U_2 = 23,1 \text{ В}; \quad f_4=50 \text{ Гц}, U_4 = 577,5 \text{ В}.$$

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;

$$T_{ин} = \frac{1}{f_{ин}} = \frac{1}{5000} = 0,0002 \text{ – постоянная времени запаздывания автономного}$$

инвертора напряжения,

где: $f_{ин} = 5000 \text{ Гц}$ – 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, $k_{км} = 0,1$;

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

Имитационная модель системы ПЧ-АД с IR-компенсацией изображена на рисунке 42. Модели входящих в нее блоков представлены на рисунках 43–47.

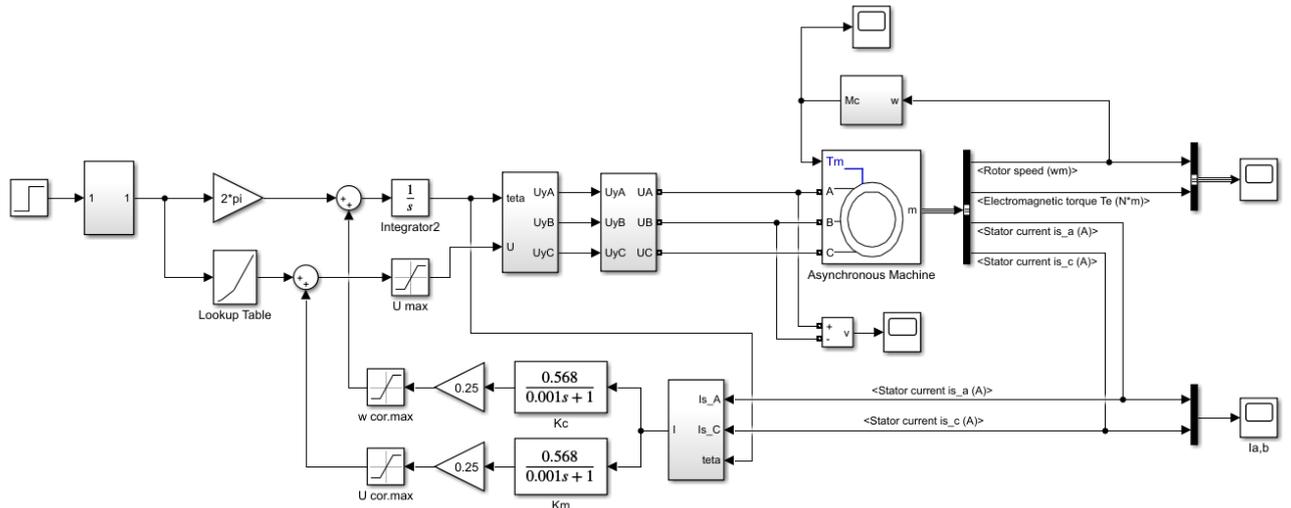


Рисунок 42 – Имитационная модель системы ПЧ-АД с IR-компенсацией

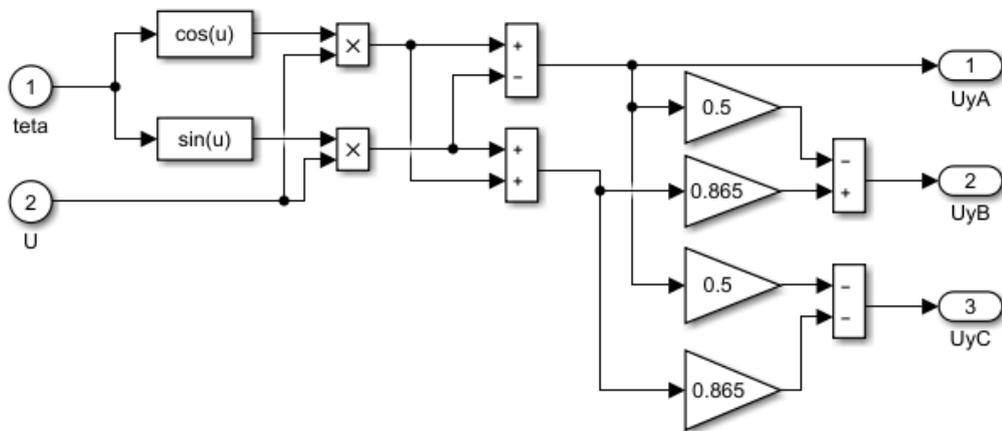


Рисунок 43 – Имитационная модель прямого координатного преобразователя

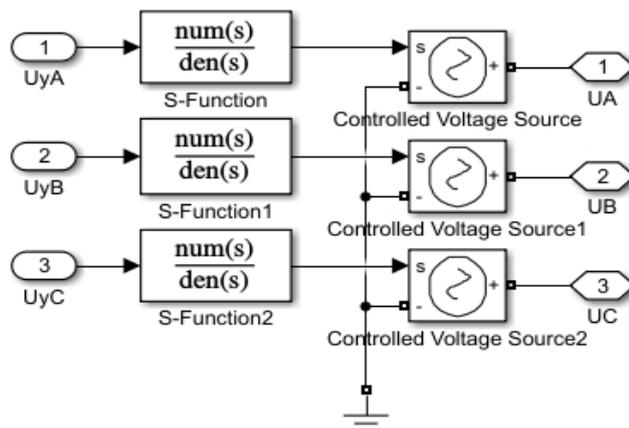


Рисунок 44 – Имитационная модель преобразователя частоты

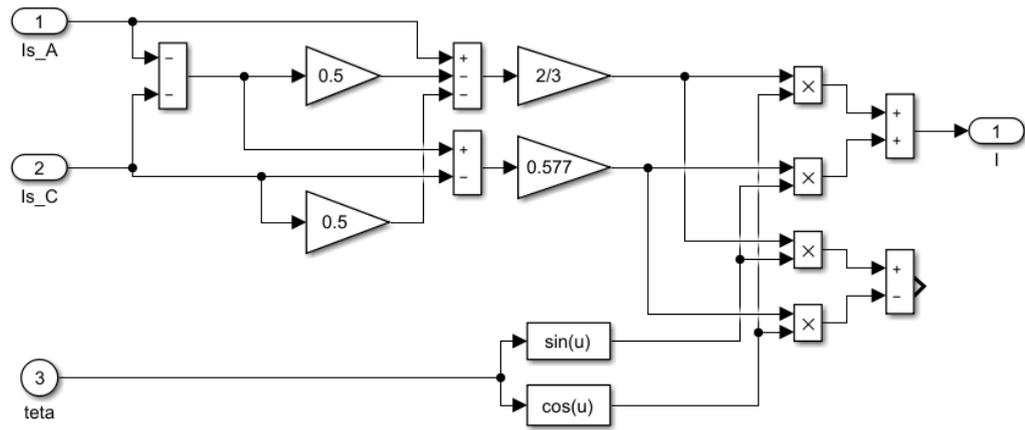


Рисунок 45 – Имитационная модель обратного координатного преобразователя

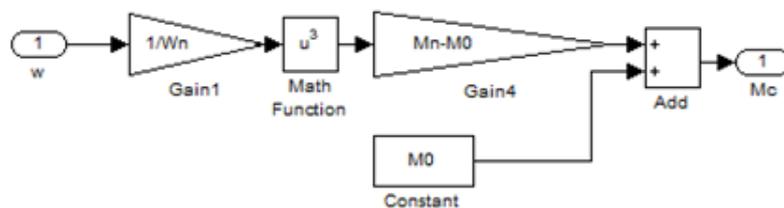


Рисунок 46 – Имитационная модель насосной нагрузки

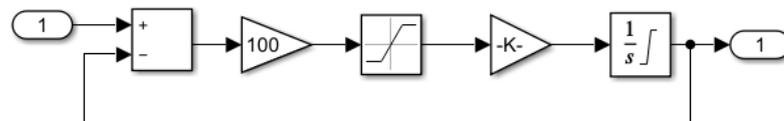


Рисунок 47 – Имитационная модель задатчика интенсивности

Проведем моделирование в программной среде MatLab Simulink пуска электродвигателя с заданной номинальной насосной нагрузкой на частоте 50 Гц с различными коэффициентами компенсации, без задатчика интенсивности и модулей насыщения в каналах регулирования управляющего напряжения и частоты.

Результат моделирования переходных характеристик скорости и электромагнитного момента АД представлен на рисунке 48.

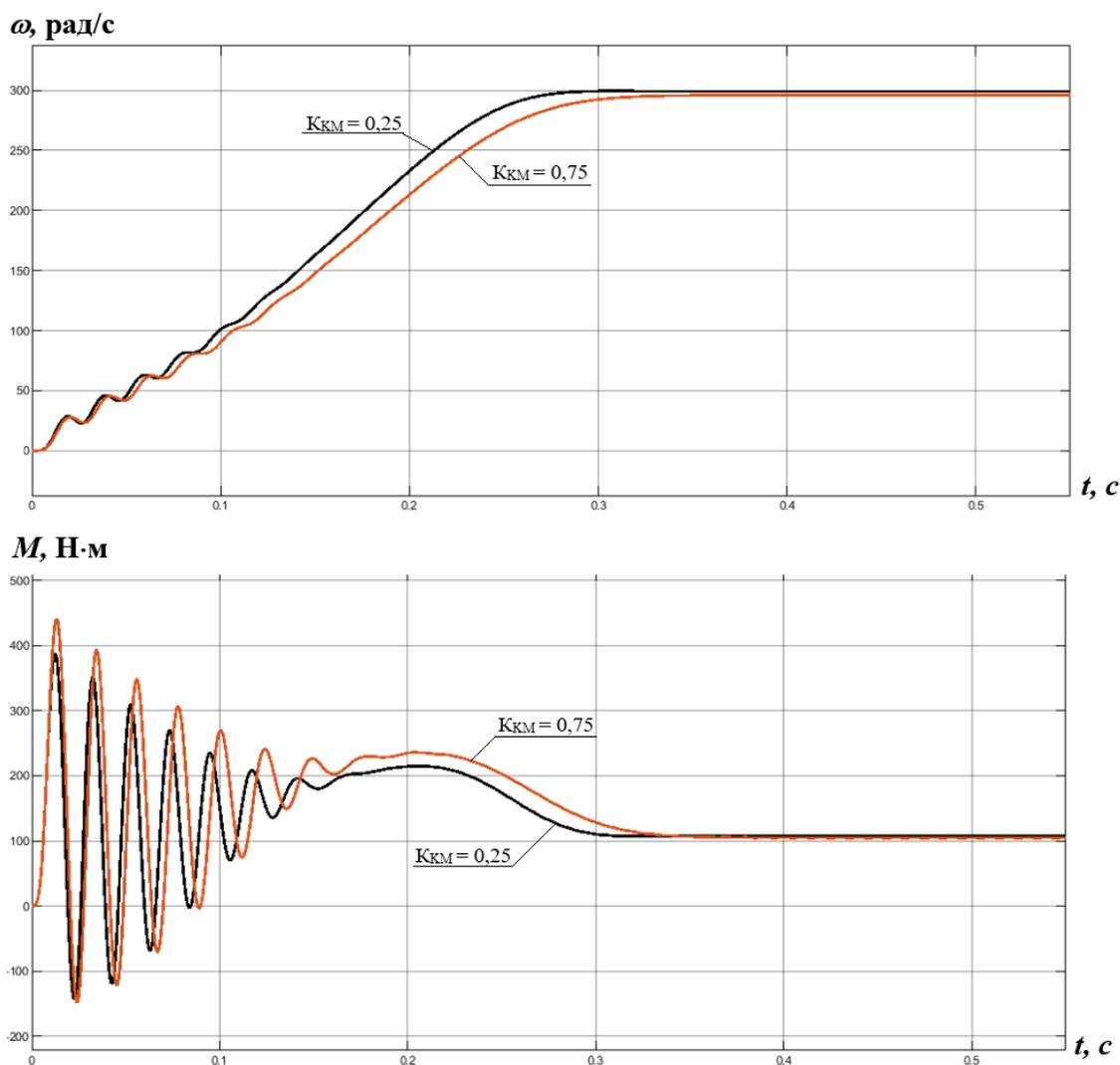


Рисунок 48 – Переходная характеристика скорости и электромагнитного момента электродвигателя при коэффициенте компенсации $K_{KM} = 0,25$ и $0,75$, без задатчика интенсивности и модулей насыщения

Как видно из полученных характеристик, колебания электромагнитного момента и время переходного процесса увеличивается с увеличением коэффициента IR-компенсации.

Теперь внедрим в модель задатчик интенсивности и модули насыщения в каналах регулирования управляющего напряжения и частоты, и проведем моделирование пуска электродвигателя с заданной номинальной нагрузкой на частоте 50 Гц с различными коэффициентами компенсации.

Переходная характеристика скорости и электромагнитного момента АД представлен на рисунке 49.

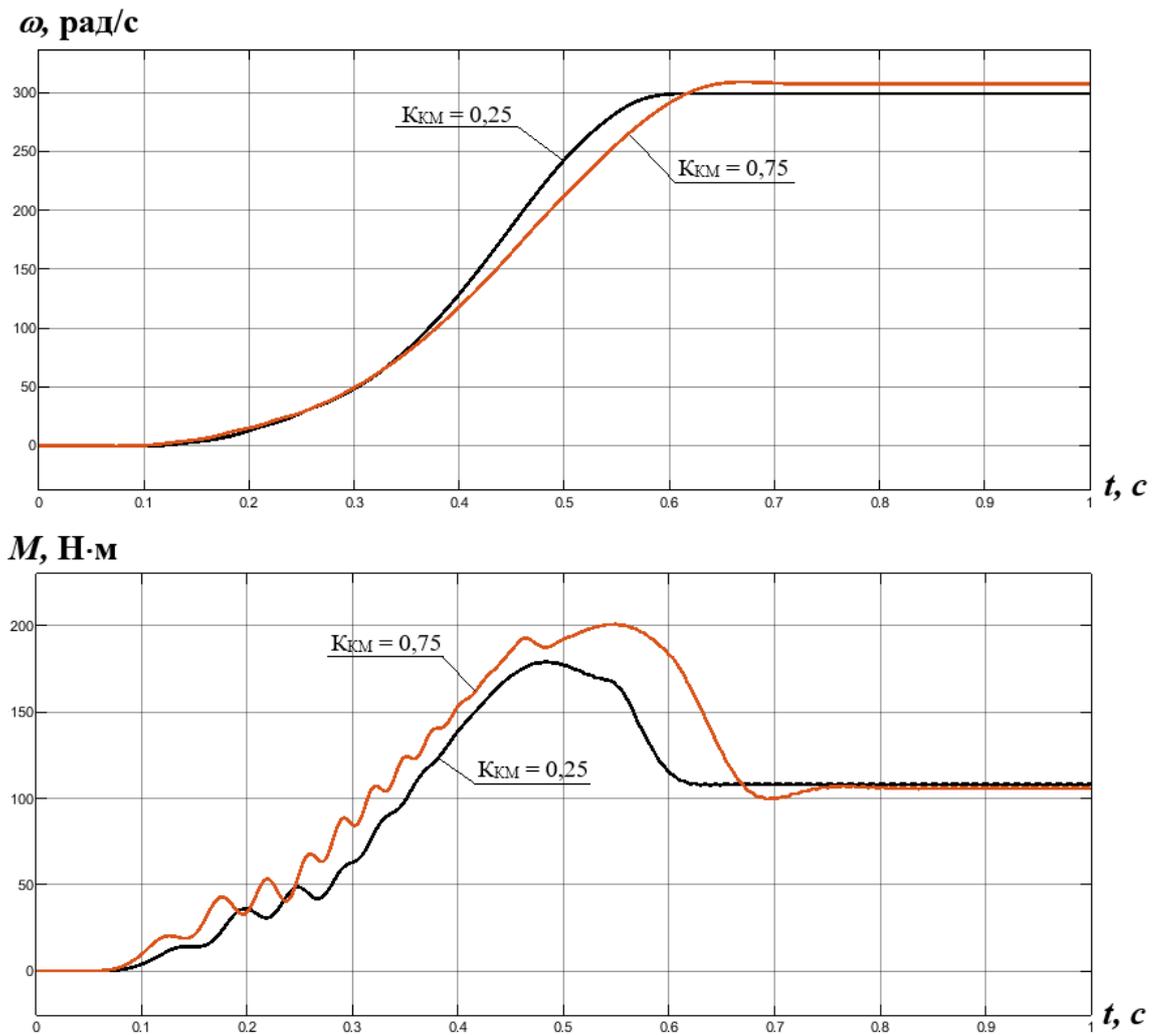


Рисунок 49 – Переходная характеристика скорости и электромагнитного момента электродвигателя при коэффициенте компенсации $K_{KM} = 0,25$ и $0,75$, с задатчиком интенсивности и модулями насыщения

Из проведенного моделирования и анализа характеристик, представленных на рисунках 48 и 49, можно сделать вывод, что электропривод выходит на установленную скорость в соответствии с моментом сопротивления на его валу; изменение момента соответствует характеристики насоса; при увеличении коэффициента ИР-компенсации в каналах регулирования управляющего напряжения и частоты, увеличивается колебание электромагнитного момента и время переходного процесса АД, следовательно, принимаем для работы модели коэффициент компенсации $K_{KM} = 0,25$. Так же можно сказать о том, что при интеграции в модель задатчика интенсивности и грамотной его настройке, а так же модулей насыщения в каналы регулирования

управляющего напряжения и частоты – способствуют более плавному пуску АД без значительных бросков электромагнитного момента, что соответствует требованиям к механизмам – насосам.

Проведем моделирование пуска АД с номинальной насосной нагрузкой на частоте 25 Гц, с различным коэффициентом компенсации и внедренных в модель задатчика интенсивности и модулей насыщения.

Результат моделирования переходных характеристик скорости и электромагнитного момента АД при работе на частоте 25 Гц, для различных коэффициентов компенсации момента приведен на рисунке 50.

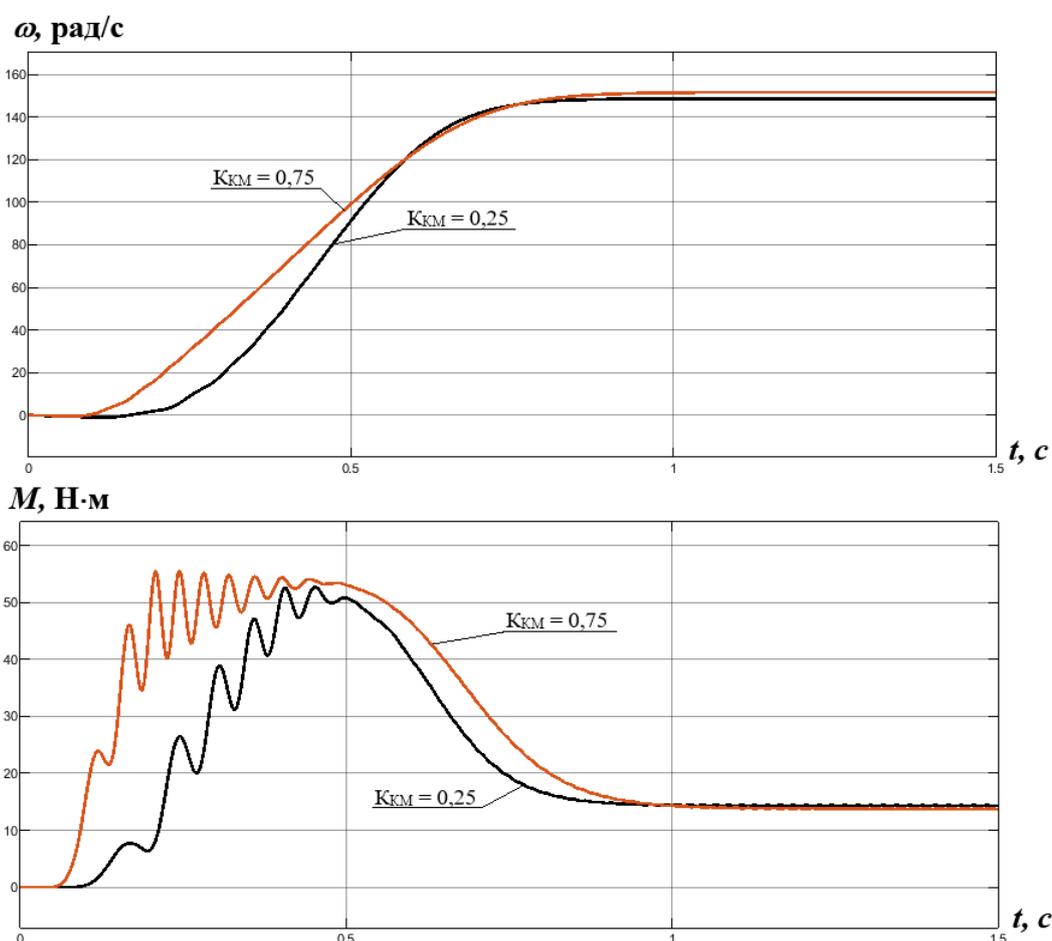


Рисунок 50 – Переходная характеристика скорости и электромагнитного момента двигателя при коэффициенте компенсации $K_{KM} = 0,25$ и $0,75$, с задатчиком интенсивности и модулями насыщения

Как видно из полученных характеристик при увеличении коэффициента IR-компенсации, время переходного процесса и колебание электромагнитного момента двигателя увеличиваются (как было замечено ранее при работе на

частоте 50 Гц). Следует также отметить, что в установившихся продолжительных режимах характеристика на частоте 25 Гц использоваться не будет. Однако, данная характеристика будет задействована при разгоне электропривода.

4.4 Имитационное исследование частотно-регулируемого асинхронного электропривода погружного насоса при заданном цикле работы

В процессе имитационных исследований рассмотрим следующий цикл работы системы электропривод – насос:

- пуск электропривода на частоте 10 Гц (I);
- разгон электропривода на частоте 25 Гц (II);
- переход на номинальную частоту работы 50 Гц (III);
- остановка погружного электронасосного агрегата (IV).

Переходные процессы скорости и момента электропривода при заданном цикле работы представлены на рисунке 51.

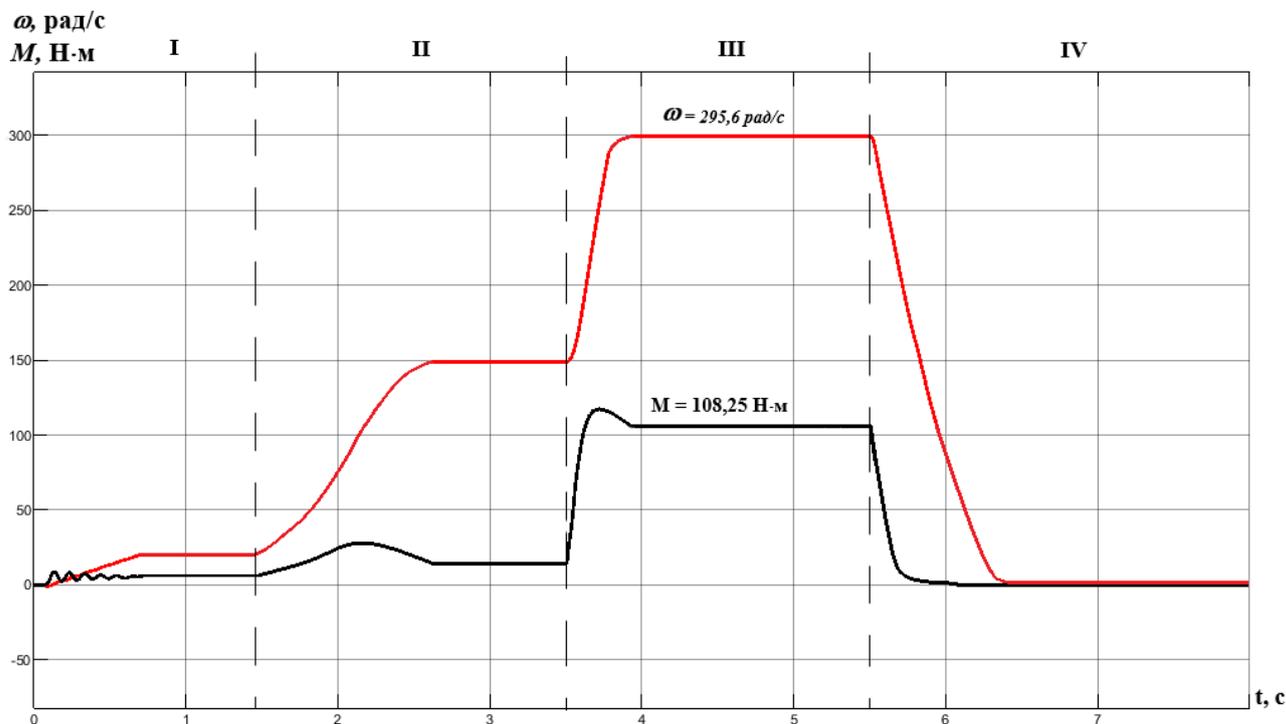


Рисунок 51 – Переходные процессы скорости и момента электропривода при заданном цикле работы

Полученные графики переходных процессов свидетельствуют об адекватной работе имитационной модели. Анализ полученных данных при моделировании практически идентичны расчетным. Так же можно сказать, что более тонкая настройка задатчика интенсивности позволила уменьшить и сгладить броски момента при переходе электропривода с работы на одной частоте, на другую частоту. Так же можно осуществить цикл работы без выхода электропривода на работу в установившемся режиме при частоте 10 и 25 Гц, а использовать только те части характеристики при работе на данных частотах, которые обеспечивают плавный пуск, разгон и выход на номинальную рабочую частоту. На рисунке 52 установившейся режим для частоты 10 и 25 Гц показан для наглядности работы электропривода при различных частотах.

5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данного раздела является определение перспективности и успешности НТИ, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Оценить коммерческий потенциал и перспективность НТИ;
2. Осуществить планирование этапов выполнения исследования;
3. Рассчитать бюджет затрат на исследования;
4. Произвести оценку научно-технического уровня исследования и оценку рисков.

К научно-исследовательским работам относятся работы поискового, теоретического и экспериментального характера, которые выполняются с целью расширения, углубления и систематизации знаний по определенной научной проблеме и создания научного задела.

5.1 Предпроектный анализ

5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Данная разработка может быть применена на различных электроприводах для скважинной нефтедобычи. Как и любой проект, разрабатываемая система должна быть конкурентоспособной. Для этого проведем сравнение. Результаты сравнения приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Сравнительный анализ

	УЭЦН с системой управления «ПЧ–АД» (вариант I)	Штанговые станки-качалки (вариант II)
Надежность	Высокая	Средняя
Количество основных	Четыре: преобразователь частоты/станция управления, ПЭД,	Восемь: платформа, стойка, преобразователь частоты/станция

составных элементов	оборудование устья скважины	управления, электродвигатель, редуктор, балансир, клиноременная передача, кривошипно-шатунный механизм
Структура	Сложная	Сложная
Стоимость	Малая	Малая

Видно, что УЭЦН с системой управления «ПЧ–АД» является наименее громоздкой и наиболее надежной, по причине того, что не требует частого обслуживания и проверок, в отличие от штанговых качалок. Так же нужно учитывать КПД и экономичность варианта I.

Внедрение ПЭД с системой «ПЧ–АД» подстраивает управляющие воздействия к изменениям нагрузок и внутренних параметров двигателей, а так же имеет более короткую связь рабочих механизмов, что обеспечивает большую мощность. Можно утверждать, что в среднем эффективность ПЭД с системой «ПЧ–АД» выше чем у штанговых станков-качалок на 35 – 40% только за счет быстрого реагирования системы на изменяющуюся нагрузку и короткую связь с исполняющими механизмами. Соответственно экономическая эффективность выше.

Целевым потребителем разработки являются предприятия нефтедобывающей отрасли промышленности. Предприятия можно разделить по объему добычи нефтепродукта на три группы: большие, средние, малые объемы добычи.

Для построения карты сегментирования рынка выберем два наиболее значимых критерия: методы добычи нефти и объемы добычи предприятия.

Таблица 9– Карта сегментирования рынка

	Первичный	Вторичный	Третичный
Большие			
Средние			
Малые			

- Фонтанный способ добычи;
- Насосно-компрессорный (станки-качалки, УЭЦН);
- Газлифт.

На основании анализа карты сегментирования рынка, можно сделать вывод, что большая доля использования УЭЦН приходится на третичный метод добычи флюида.

5.1.2 Технология QuaD

Технология QuaD (QUalityADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект. Для упрощения процедуры проведения QuaD оценка проводится в табличной форме (таблица 10).

В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по сто балльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Таблица 10 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)x100
1	2	3	4	5	
Показатели оценки качества разработки					
1. Энергоэффективность	0,07	95	100	0,95	6,65
2. Помехоустойчивость	0,1	87	100	0,87	8,7
3. Надежность	0,03	90	100	0,9	2,7
4. Унифицированность	0,09	90	100	0,9	8,1
5. Уровень материалоемкости разработки	0,06	97	100	0,97	5,82
6. Уровень шума	0,03	80	100	0,8	2,4
7. Безопасность	0,01	80	100	0,8	2,4
8. Потребность в ресурсах памяти	0,02	75	100	0,75	1,5
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,04	85	100	0,85	3,4

10. Простота эксплуатации	0,04	98	100	0,98	3,92
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,05	96	100	0,96	4,8
12. Ремонтпригодность	0,06	100	100	1	6
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
13. Конкурентоспособность продукта	0,04	90	100	0,9	3,6
14. Уровень проникновения на рынок	0,04	70	100	0,7	2,8
15. Перспективность рынка	0,07	95	100	0,95	6,65
16. Цена	0,1	65	100	0,65	6,5
17. Послепродажное обслуживание	0,03	90	100	0,9	2,7
18. Финансовая эффективность научной разработки	0,05	78	100	0,78	3,9
19. Срок выхода на рынок	0,03	71	100	0,71	2,13
20. Наличие сертификации разработки	0,04	80	100	0,8	3,2
Итого	1				87,87

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum B_i \cdot B_i = 0,07 \cdot 95 + 0,1 \cdot 87 + \dots + 0,04 \cdot 80 = 87,87,$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Значение P_{cp} входит в диапазон от 100 до 80, что говорит о перспективности данной разработки, что говорит о ее перспективность на рынке и целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект.

5.1.3 SWOT- анализ

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

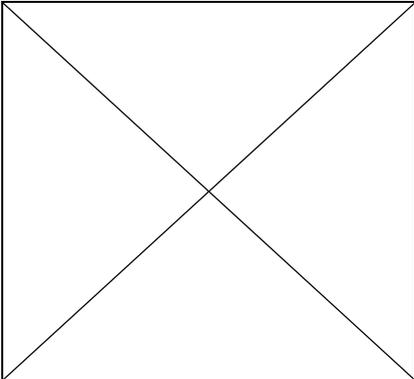
Применительно к проектируемой АСР уровня, SWOT-анализ позволит оценить сильные и слабые стороны проекта, а также его возможности и угрозы.

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; У – угрозы;
В – возможности;

Таблица 11 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны проекта: С1. Высокая энергоэффективность и энергосбережение технологи. С2. Экологичность технологии. С3. Квалифицированный персонал. С4. Повышение безопасности производства С5. Уменьшение затрат на ремонт оборудования</p>	<p>Слабые стороны проекта: Сл1. Трудность монтажа оборудования Сл2. Дороговизна оборудования Сл3. Сложность эксплуатации электрооборудования</p>
<p>Возможности: В1. Увеличение производительности электрооборудования</p> <p>В2. Появление дополнительной автоматизированной системы управления насосной станцией</p> <p>В3. Снижение таможенных пошлин на оборудование используемых в лабораторной установке</p> <p>В4. Появление более простых универсальных электрических систем внутризаводской сети</p>	<p>С1. Высокая энергоэффективность и энергосбережение технологи; С2. Экологичность технологии; С3. Квалифицированный персонал; С4. Повышение безопасности производства.</p> <p>С1. Высокая энергоэффективность и энергосбережение технологи; С5. Уменьшение затрат на ремонт оборудования.</p> <p>С5. Уменьшение затрат на ремонт оборудования.</p> <p>С1. Высокая энергоэффективность и энергосбережение технологи; С4. Повышение безопасности производства; С5. Уменьшение затрат на ремонт оборудования.</p>	<p>Сл1. Трудность монтажа оборудования; Сл2. Дороговизна оборудования.</p> <p>Сл2. Дороговизна оборудования.</p> <p>Сл1. Трудность монтажа оборудования; Сл2. Дороговизна оборудования; Сл3. Сложность эксплуатации электрооборудования.</p>

Угрозы: У1. Отсутствие спроса на технологии производства У2. Ограничения на экспорт технологии У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции	С3. Квалифицированный персонал.	Сл1. Трудность монтажа оборудования; Сл2. Дороговизна оборудования.
	–	–
	С5. Уменьшение затрат на ремонт оборудования.	Сл2. Дороговизна оборудования.

5.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Чтобы определить степень готовности проекта к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого заполним форму приведенную в таблице 12.

Таблица 12 – Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	5	4
2	Определены перспективы направления коммерциализации научно-технического задела	4	3
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	3	3
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	3
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	3
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	3
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	4	3
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	5	5
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	3
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	3

11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	2
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	2
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	3
14	Имеется команда коммерциализации	2	3
15	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
	ИТОГО БАЛЛОВ	49	44

Исходя из таблицы 12, можно сделать вывод, что перспективность разработки выше среднего уровня и знания разработчика на достаточном уровне.

5.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Принимая во внимание факт то, что потенциальный потребитель проекта это нефтедобывающие компании, то целесообразно и выгодно будет провести коммерциализацию методом торговли патентными лицензиями, либо инжинирингом. Более предпочтительным для данного проекта является инжиниринг, т.к. можно оказывать услуги проектирования, строительства, контроля и эксплуатации, а так же модернизацию технических комплексов уже работающих на нефтедобывающем предприятии. Это хорошая возможность зарекомендовать себя как специалиста, продвигать проект, а так же извлекать прибыль.

5.2 Инициация проекта

Цель проекта – разработка УЭЦН управляемой системой «ПЧ–АД».

Задача проекта – проанализировать имеющийся систему управления УЭЦН, выбрать наиболее оптимальную. Подобрать закон управления системы «ПЧ–АД» и провести моделирование работы спроектированной УЭЦН, а так же настроить работу системы управления в соответствии с заданной нагрузкой.

Предполагаемый результат – работоспособная модель УЭЦН с системой управления «ПЧ–АД» с IR-компенсацией, отвечающая требованиям ТЗ.

На данном этапе у проекта нет заказчиков, в реализации проекта заинтересована сторона-разработчик. В дальнейшем разработка может привлечь потенциального потребителя в лице нефтедобывающих компаний с последующей реализацией проекта в виде конечной используемой в производстве системы.

В рабочую группу проекта входит:

- Руководитель проекта (научный руководитель)– отвечает за реализацию проекта, координирует и консультирует исполнителя проекта;
- Исполнитель проекта (магистрант) – проводит анализ/исследование источников, расчет технических параметров УЭЦН, подбор оборудования, моделирование системы. Отвечает за своевременное выполнение отдельных разделов работы и оформление конечной работы.

5.3 Планирование научно-исследовательских работ

5.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

Составляем перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, проводим распределение исполнителей по видам работ. Результат представлен в таблице 13.

Таблица 13 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Исполнитель
	3	Описание объекта автоматизации (модернизации)	Исполнитель
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель

Теоретические и экспериментальные исследования	5	Изучение технической литературы	Исполнитель
	6	Выбор погружного и наземного оборудования	Исполнитель
	7	Составление модели электродвигателя и системы управления	Исполнитель
	8	Проверка работоспособности модели системы погружного асинхронного двигателя	Исполнитель
	9	Проведение моделирования работы системы «ПЧ-АД» ПЭД	Исполнитель
Обобщение и оценка результатов	10	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
<i>Проведение ОКР</i>			
Разработка технической документации и проектирование	11	Технико-экономические расчеты	Исполнитель
	12	Вопросы безопасности и экологичности проекта	Исполнитель
	13	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Исполнитель
Оформление отчета по НИР	14	Составление схемы диагностической системы	Исполнитель
	15	Составление пояснительной записки	Исполнитель

Указав этапы работ и назначив исполнителей работ приступаем к определению трудоемкости выполнения работ.

5.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения научного исследования 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:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

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

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

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

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

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

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел./дн.

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

5.3.3 Разработка графика проведения научного исследования

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

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ки} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

где $T_{ки}$ – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пр}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа.

Таблица 14 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожi}$, чел-дни					
	Руководитель	Исполнитель	Руководитель	Исполнитель	Руководитель	Исполнитель	Руководитель	Исполнитель	Руководитель	Исполнитель
Составление и утверждение технического задания	1		2		2		2		4	
Подбор и изучение материалов по теме		5		8		7		7		11
Описание объекта автоматизации (модернизации)		3		4		4		4		7
Календарное планирование работ по теме	3		5		4		4		7	
Изучение технической литературы		14		30		20		20		26
Выбор погружного и наземного оборудования		4		6		5		5		8
Составление модели электродвигателя и системы управления		2		4		8		8		12
Проверка работоспособности модели системы погружного асинхронного двигателя		2		4		3		3		5
Проведение моделирования работы системы «ПЧ–АД» ПЭД	3		6		5		5		8	
Оценка эффективности полученных результатов	2		3		3		3		5	
Технико-экономические расчеты		3		7		5		5		8
Вопросы безопасности и экологичности проекта		3		7		5		5		8
Составление отчета		1		3		2		2		4

На основе таблицы 15 строим календарный план-график. График строится для максимального, по длительности, исполнения работ в рамках научно-

исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделяем различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 15 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№	Вид работ	Исполнитель и	T _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				фев.		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	3														
2	Подбор и изучение материалов по теме	Исполнитель	11														
3	Описание объекта автоматизации	Исполнитель	7														
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	6														
5	Разработка системы управления для АД	Исполнитель	20														
6	Решение проблемы настройки системы управления	Исполнитель	8														
7	Решение задачи анализа информации	Исполнитель	12														
8	Проверка системы управления для АД с помощью математической модели	Исполнитель	5														

2	Риск несвоевременного завершения работы	Негативное	3	4	Средний
3	Риск ошибочной оценки бюджетов, необходимых для реализации проекта	Негативное	3	3	Средний
4	Риск форс-мажоров	Негативное	2	3	Низкий
5	Риск отключения электричества	Негативное	2	2	Низкий
6	Риск утраты, гибели, повреждения имущества в результате пожара	Негативное	2	4	Низкий
7	Риск низкого качества проектирования	Негативное	2	4	Низкий

5.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

Все необходимое оборудование и материалы имеются в лаборатории, поэтому расчет материальных затрат проводить не будем.

5.4.1 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из

трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в таблицу 17.

Таблица 17 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Зарплата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4	2351	9404
2	Подбор и изучение материалов по теме	Исполнитель	11	1523	16753
3	Описание объекта автоматизации (модернизации)	Исполнитель	7	1523	10661
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	6	2351	16457
5	Разработка наблюдателя состояний для асинхронных двигателей	Исполнитель	20	1523	30460
6	Решение проблемы цифрового дифференцирования	Исполнитель	8	1523	12184
7	Решение задачи фильтрации полученных оценок	Исполнитель	12	1523	18276
8	Проверка наблюдателя состояний для асинхронного двигателя с помощью математической модели	Исполнитель	5	1523	7615
9	Экспериментальная проверка наблюдателя состояний для асинхронного двигателя на лабораторном стенде	Исполнитель	3	1523	4569
10	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	2	2351	4702
11	Технико-экономические расчеты	Исполнитель	8	1523	12184
12	Вопросы безопасности и экологичности проекта	Исполнитель	8	1523	12184
13	Составление пояснительной записки	Исполнитель	4	1523	6092
14	Проверка пояснительной записки	Руководитель	2	2351	4702
Итого:					161541

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

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

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p,$$

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

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{53594 \cdot 10,4}{237} = 2351 \text{ руб.},$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб.дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб.дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн.

Таблица 18 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни/праздничные дни	66	66
Потери рабочего времени - отпуск/невыходы по болезни	62	62
Действительный годовой фонд рабочего времени	237	237

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{\text{ТС}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_d) \cdot k_p = 27484 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 53594 \text{ руб}$$

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

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{\text{ТС}}$);

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от $Z_{тс}$);

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

Тарифная заработная плата $Z_{тс}$ находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда $T_{ci} = 600$ руб. на тарифный коэффициент k_T и учитывается по единой для бюджетной организации тарифной сетке. Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии. Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 19.

Таблица 19 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб.дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	27484	0,3	0,2	1,3	53594	2351	13	30563
Исполнитель	17808	0,3	0,2	1,3	34725	1523	86	130978
Итого $Z_{осн}$								161541

Основная заработная плата руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент.

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) иные выплаты; районный коэффициент.

5.4.2 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и

общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

- для руководителя $Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,12 \cdot 30563 = 3668$ руб,
- для исполнителя $Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,12 \cdot 130978 = 15717$ руб,

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

5.4.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые взносы)

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:

- для
руководителя $Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,302 \cdot (30563 + 3668) = 10338$ руб
- для инженера
 $Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,302 \cdot (130978 + 15717) = 44302$ руб

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

Таблица 20 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель проекта	30563	3668
Исполнитель	130978	15717
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,302	
	Итого, руб.	
Руководитель	10338	
Исполнитель	44302	

5.4.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

- для

$$\begin{aligned} \text{руководителя: } Z_{\text{накл}} &= (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{\text{нр}} = (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + Z_{\text{внеб}}) \cdot 0,16 = \\ &= (30563 + 3668 + 10338) \cdot 0,16 = 7131 \text{руб,} \end{aligned}$$

- для инженера:

$$\begin{aligned} Z_{\text{накл}} &= (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{\text{нр}} = (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + Z_{\text{внеб}}) \cdot 0,16 = \\ &= (130978 + 15717 + 44302) \cdot 0,16 = 30560 \text{руб,} \end{aligned}$$

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

Величину коэффициента накладных расходов берем в размере 16%.

5.4.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Таблица 21 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	%
1. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	161541	Пункт 4.1
2. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	19385	Пункт 4.2
3. Отчисления во внебюджетные фонды	54640	Пункт 4.3
4. Накладные расходы	37691	16 % от суммы ст. 1-3
5. Бюджет затрат НТИ	273257	Сумма ст. 1-4

5.4.6 Оценка эффективности проекта. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Финансовую эффективность проекта можно оценить при помощи интегрального финансового показателя:

$$I_{фин}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}$$

где:

$I_{фин}^{исп.i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Таблица 22 – Расчёт интегрального финансового показателя конкурентных технических решений

Вариант исполнения	Φ_{max} , руб.	Φ_{pi} , руб.	$I_{фин}^{исп.i}$, о.е.
1	44115,6	30400	0,69
2		44115,6	1

Величина интегрального финансового показателя разработки варианта исполнения 1 отражает соответствующее численное удешевление стоимости электропривода при одинаковой мощности. Вариант исполнения 2 имеет наименьший интегральный показатель и, следовательно, вариант исполнения 1 является наиболее финансово эффективным, что является определяющим критерием.

Определение ресурсоэффективности варианта исполнения 1 можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

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

Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности схем проводим в виде табличной формы.

Таблица 23 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Частотно-регулируемый электропривод	Системы управления электроприводами с внедренной разработкой
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	5	5
2. Удобство в эксплуатации	0,1	5	5
3. Помехоустойчивость	0,1	4	4
4. Энергосбережение	0,15	4	5
5. Надёжность	0,25	4	4
6. Материалоёмкость	0,15	4	5
Итого:	1,00	4,35	4,65

Рассчитываем показатель ресурсоэффективности:

$$I_p = 0,25 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 = 4,65.$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение, что говорит об эффективности использования технического проекта.

5.4.7 Оценка абсолютной эффективности проекта

Рассчитываем следующие показатели:

- 1) Чистая текущая стоимость (**NPV**);
- 2) Индекс доходности (**PI**);
- 3) Внутренняя ставка доходности (ВНД, **IRR**);
- 4) Срок окупаемости (Т окуп., **PP**).

Таблица 24 – Расчет чистой текущей стоимости по проекту

Наименование показателя	Шаг расчета					
	0	1	2	3	4	5
1. Выручка от продажи, руб.	0	521149,3	521149,3	521149,3	521149,3	521149,3
2. Итого приток, руб.	0	521149,3	521149,3	521149,3	521149,3	521149,3
3. Инвестиционные издержки, руб.	235000	0	0	0	0	0
4. Операционные затраты, руб.	0	393382,7	393382,7	393382,7	393382,7	393382,7

5.Налогооблагаемая прибыль, руб. (1-4)	0	127766,6	127766,6	127766,6	127766,6	127766,6
6. Налоги (20%*5), руб.	0	25553,3	25553,3	25553,3	25553,3	25553,3
7. Чистая прибыль, руб. (5-6)	0	102213,2	102213,2	102213,2	102213,2	102213,2
8. Амортизация оборудования, руб.	0	47000	47000	47000	47000	47000
9.Чистый денежный поток (ЧДП), руб. (7+8)	-235000	149213,2	149213,2	149213,2	149213,2	149213,2
10. Коэффициент дисконтирования при $i=20\%$	1	0,83	0,72	0,67	0,54	0,45
11. Чистый дисконтированный доход, руб. ($i=20\%$)	-235000	123846,9	107433,5	99972,8	80575,1	67145,9
12. Σ ЧДД		478974 руб.				

1) Чистая текущая стоимость (**NPV**)

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{опt}}{(1+i)^t} - I_0,$$

где $ЧДП_{опt}$ – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

I_0 – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

t – номер шага расчета ($t=0, 1, 2 \dots n$);

n – горизонт расчета;

i – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Чистая текущая стоимость является абсолютным показателем.

Условием эффективности инвестиционного проекта по данному показателю является выполнение следующего неравенства: $NPV > 0$.

Чем больше NPV , тем больше влияние инвестиционного проекта на экономический потенциал предприятия, реализующего данный проект, и на экономическую ценность этого предприятия.

$$I_0 = 235000,0$$

$$NPV = 478974 - 235000 = 243974$$

2) Индекс доходности (рентабельности) инвестиций (**PI**)

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_t}{(1+i)^t} / I_0,$$

где I_0 – первоначальные инвестиции.

Условием эффективности инвестиционного проекта по данному показателю является выполнение $PI > 1$.

$$PI = 478974 / 235000 = 2,038$$

3) Внутренняя ставка доходности (IRR)

$$\sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{опt}}{(1+IRR)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{I_t}{(1+IRR)^t}$$

Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности». Формальное определение «внутренней ставки доходности» заключается в том, что это та ставка дисконтирования, при которой суммы дисконтированных притоков денежных средств равны сумме дисконтированных оттоков или $NPV=0$. По разности между IRR и ставкой дисконтирования i можно судить о запасе экономической прочности инвестиционного проекта. Чем ближе IRR к ставке дисконтирования i , тем больше риск от инвестирования в данный проект.

Таблица 25 – Расчет IRR

	0	1	2	3	4	5	
Поток от оп:	-235000,0	149213,2	149213,2	149213,2	149213,2	149213,2	
К диск-я:							
0,1	1,000	0,909	0,826	0,751	0,683	0,621	
0,2	1,000	0,833	0,694	0,579	0,482	0,402	
0,3	1,000	0,769	0,592	0,455	0,350	0,269	
0,4	1,000	0,714	0,510	0,364	0,260	0,186	
0,5	1,000	0,667	0,444	0,296	0,198	0,132	
0,6	1,000	0,625	0,391	0,244	0,153	0,095	
0,7	1,000	0,588	0,346	0,204	0,120	0,070	
ЧДД :						NPV	
0,1	-235000,0	157686,6	138921,0	126291,8	114810,8	104373,4	407083,6
0,2	-235000,0	144546,0	116732,3	97276,9	81064,1	67553,4	272172,6
0,3	-235000,0	133427,1	99464,2	76510,9	58854,5	45272,7	178529,4
0,4	-235000,0	123896,6	85762,5	61258,9	43756,4	31254,5	110928,9
0,5	-235000,0	115636,8	74708,6	49805,8	33203,8	22135,9	60491,0
0,6	-235000,0	108409,5	65661,9	41038,7	25649,2	16030,7	21790,0
0,7	-235000,0	102032,5	58164,2	34214,2	20126,0	11838,8	-8624,3

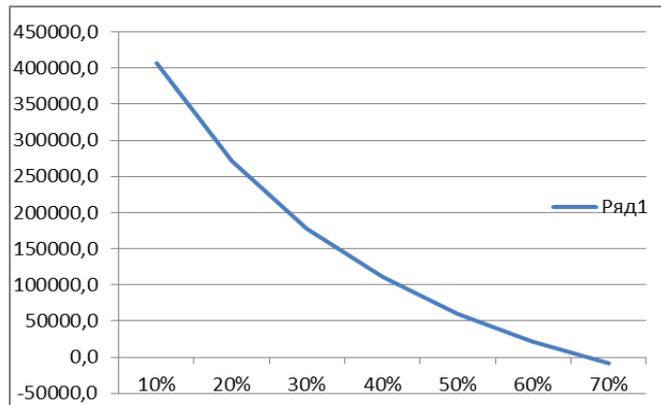


Рисунок 52 – Зависимость **NPV** от ставки дисконтирования

IRR = 67% (запас экономической прочности проекта **67%**)

4) Срок окупаемости инвестиций

Метод расчета срока окупаемости инвестиций **PP** (Токуп.) состоит в определении того периода, через который первоначальные инвестиции будут возвращены прибылью или чистыми денежными поступлениями. Этот метод ориентирован на краткосрочную оценку, рассматривает, как скоро инвестиционный проект окупит себя. Чем быстрее проект окупит первоначальные затраты, тем эффективнее проект. Использование данного показателя предполагает установление приемлемого значения срока окупаемости как меры оценки эффективности инвестиций.

Таблица 26 – Срок окупаемости инвестиционного проекта

Период	0	1	2	3	4	5
ЧП	-235000	173455,233	168094,44	168094,44	168094,44	168094,44
Поток от оп:	-235000,0	144488,2	116657,5	97158,6	81021,5	67574,0
Накопленным итогом	-235000,0	-90511,8	26145,8	123304,3	204325,9	271899,8

$$\mathbf{PP_{дск} = 1 + 23456 / 999421 = 2,35 \text{ (лет)}}$$

Проект следует считать инвестиционно-привлекательным, поскольку:

- **NPV = 243974 (NPV > 0)**
- **PI = 2,038 (PI > 1)**
- **IRR = 67% (IRR > 20%)**
- **PP_{дск} = 2,35 лет.**

Вывод по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

В данном разделе были решены следующие задачи:

1) Проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования на примере SWOT-анализа, результат которого показал большой потенциал применения методики;

2) Определен полный перечень работ, проводимых при компьютерном моделировании. Определена трудоемкость проведения работ. Ожидаемая трудоемкость работ для научного руководителя и студента-исполнителя составила 99 чел-дней;

3) Суммарный бюджет затрат НИР составил – 273257рублей;

4) Определена целесообразность и эффективность научного исследования путем оценки научно-технического уровня проекта, а также оценки возможных рисков. В результате проводимое исследование имеет высокую значимость теоретического уровня и приемлемый уровень рисков.

Таким образом, переход к УЭЦН с системой «ПЧ–АД» целесообразен так как, проект обладает высокой ресурсоэффективностью. Следует отметить важность для проекта в целом, проведенных в данной главе работ, которые позволили объективно оценить эффективность проводимого научно-технического исследования.

6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Добыча ведется на территории Томской области от Стрежевого, базового города, порядка 800 км в сторону Лугинецкого и 100 км в сторону Ваха. Рабочий – оператор по добычи нефти и газа. В его обязанности входит: обход закрепленных за ним кустов (участков добычи), проверка параметров аппаратуры, обслуживание установки и ее частей, а так же контроль за работой системы управления ЭЦН и при необходимости ее корректировка. Станция управления может находиться как в помещении, так и на открытом воздухе, и управляться персоналом во время обхода или целенаправленного посещения.

Исходя из специфики объекта исследования, его предназначения и условий эксплуатации, рассмотрим актуальные вопросы охраны труда и техники безопасности.

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации

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. [27]

Также, согласно статье 216 «Государственное управление охраной труда» главе 35 «Организация охраны труда» ТК РФ, 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, 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.

Согласно статье 218 «Комитеты (комиссии) по охране труда» ТК РФ, 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. [28]

Согласно п. 5 «Общие гигиенические требования к режиму работ в охлаждающей среде» МР 2.2.7.2129-06 «Режимы труда и отдыха работающих в холодное время года на открытой территории или в не отапливаемых помещениях»:

- к работе на холоде допускаются лица, прошедшие медицинские осмотры в соответствии с действующими приказами Минздравсоцразвития России и не имеющие противопоказаний;
- работы в охлаждающей среде должны проводиться при соблюдении требований к мерам защиты работников от охлаждения;
- лиц, приступающих к работе на холоде, следует проинформировать о его влиянии на организм и мерах предупреждения охлаждения;
- работающие на открытой территории в холодный период года должны быть обеспечены комплектом СИЗ от холода, имеющим теплоизоляцию, соответствующую величинам для различных климатических регионов;
- во избежание локального охлаждения тела работников и уменьшения общих теплопотерь с поверхности тела, их следует обеспечивать рукавицами, обувью, головными уборами, имеющими соответствующую теплоизоляцию;
- при разработке внутрисменного режима работы на период рабочей смены следует ориентироваться на допустимую степень охлаждения

работающих, регламентируемую временем непрерывного пребывания на холоде и временем обогрева.[29]

Согласно п. 3 «Общие гигиенические требования к организации работ в нагреваемом микроклимате» 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»:

- к работе в нагреваемом микроклимате допускаются лица, прошедшие медицинские осмотры в соответствии с действующими приказами Минздравсоцразвития России и не имеющие противопоказаний;
- работы в нагреваемом микроклимате проводятся при соблюдении мер профилактики перегревания и рекомендаций относительно режима работ, изложенных в данном документе;
- при проведении предварительных и периодических медицинских осмотров у лиц, производственная деятельность которых сопровождается воздействием термической нагрузки, определяется тепловая устойчивость;
- к работе в условиях потенциальной опасности перегревания (классы 3.3 и 3.4) допускаются лица, получившие оценку тепловой устойчивости "высокая", а лица, получившие оценку "средняя" или "низкая" проходят курс тепловой подготовки;
- при работе, сопровождающейся существенной термической нагрузкой на организм человека (повышенная температура воздуха, физическая работа категории Па – III), которая может привести к повышению температуры тела до 38°C и выше, необходим медицинский контроль за работающими в течение рабочей смены.[30]

Комната дежурного персонала оборудована обогревателями для ног и рук, шкафчиками для верхней одежды, столами и стульями, а так же необходимым кухонным оборудованием для приготовления согревающих напитков (чая).

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

1. Должностная инструкция дежурного данного участка обслуживания;
2. Инструкция по производству оперативных переключений;
3. Инструкция действий персонала в случае аварии;
5. Инструкция дежурного персонала по ТБ;
6. Журнал производства работ;
8. Журнал связи.

6.2 Производственная безопасность

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

Таблица 27 – Вредные и опасные производственные факторы при эксплуатации насосной установки

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
1. Повышенное содержание вредных веществ в воздухе	ГОСТ 12.1.005-88 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»
2. Повышенный уровень шума	ГОСТ 12.1.003-83 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности»; СанПиН 2.1.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»
3. Повышенный уровень вибрации	ГОСТ 12.1.012–2004 «ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования»; СанПиН 2.1.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»
4. Неблагоприятные метеорологические условия	ГОСТ 12.1.005-88 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»
5. Электрический ток	ПУЭ «Правила устройства электроустановок»; ГОСТ 12.1.019-2017 «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты»

6.2.1 Анализ выявленных вредных производственных факторов

Повышенное содержание вредных веществ в воздухе

В ходе производственных операций рабочие могут подвергаться воздействию вредных газов и паров нефти, источником которых являются нарушения герметичности фланцевых соединений, механической прочности фонтанной арматуры (свищи, щели по шву) вследствие внутренней коррозии или износа, превышения максимально допустимого давления, отказы или выходы из строя регулирующих и предохранительных клапанов. Пары нефти и газа при определенном содержании их в воздухе могут вызвать отравления и заболевания. При постоянном вдыхании нефтяного газа и паров нефти поражается центральная нервная система, снижается артериальное давление, становятся реже пульс и дыхание, понижается температура тела.

Предельно допустимые концентрации вещества согласно ГОСТ 12.1.005-88: азота диоксид – 2 мг/м³; бензол – 10 мг/м³; углерода оксид – 20 мг/м³; H₂S – 0,1 мг/м³.

Коллективные средства защиты - устройства, препятствующие появлению человека в опасной зоне.

Индивидуальной защиты: очки, защитные маски, противогазы.[31]

Превышение уровня шума на рабочем месте

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.

Оценивается превышение норм уровней шума, например, при работе ЦНС, установки статического и динамического зондирования, насосов при откачке воды и закачке рабочего агента в пласт и т.д. При необходимости разрабатываются коллективные и (или) индивидуальные меры по их снижению. Допустимые уровни шума для производственных объектов приведены в таблице 28.

Таблица 28 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука согласно ГОСТ 12.1.003-83[32]

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Насосная станция	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80
Пульт управления	96	8	74	68	63	60	57	55	54	65

Для защиты от шума по СанПиН 2.1.3685-21 предусматриваются:

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты по ГОСТ 12.4.011 – 89;
- установка звукоизолирующих кабин;
- звукоизолирующие кожухи и экраны.[33]

Повышенный уровень вибрации

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 – виброболезнь, сопровождающаяся головокружением, онемением нижних конечностей и потерей ориентации в пространстве.

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

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», СанПиН 2.1.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Нормы вибрации представлены в таблице 30.

Таблица 29 – Нормы вибрации [34]

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

Для защиты вибрации по СанПиН 2.1.3685-21 предусматриваются:

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты по ГОСТ 12.4.011 – 89;
- установка виброизолирующих кабин;
- виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы).[33]

Неблагоприятные метеорологические условия

Работающие в холодное время года на открытом воздухе или в закрытых не обогреваемых помещениях обеспечиваются комплектом средств индивидуальной защиты от холода с учетом климатического региона. Во избежание локального охлаждения работники обеспечиваются рукавицами, обувью, головными уборами, имеющими соответствующую теплоизоляцию. При температуре воздуха ниже -40 °С должна обеспечиваться защита лица и верхних дыхательных путей.

Доставка к месту работы и с работы должна осуществляться в утепленном транспорте, перевозка людей в транспортных средствах, не оснащенных системами автономного обогрева, не допускается.

Для периодического обогрева и отдыха работников предусматриваются специально оборудованные помещения. Расстояние от рабочего места до помещения для обогрева должно быть не более 150 м для открытых территорий и 75 м - для не обогреваемых помещений.

В целях нормализации теплового состояния температура воздуха в местах обогрева должна поддерживаться на уровне 21-25 °С.

Работникам, работающим в холодное время года на открытом воздухе или в закрытых не обогреваемых помещениях, предоставляются специальные перерывы для обогрева и отдыха, которые включаются в рабочее время.

Перерывы на обогрев могут сочетаться с перерывами на восстановление функционального состояния работника после выполнения физической работы. В обеденный перерыв работник обеспечивается горячим питанием, при этом начинать работу на холоде следует не ранее чем через 10 минут после приема горячей пищи (чая и др.).

В целях более быстрой нормализации теплового состояния и меньшей скорости охлаждения организма в последующий период пребывания на холоде, в помещении для обогрева следует снимать верхнюю утепленную одежду.

Во избежание переохлаждения работникам не следует во время перерывов в работе находиться на холоде в течение более 10 мин. При температуре воздуха до -10 °С и не более 5 мин. при температуре воздуха ниже -10 °С. [35]

6.2.2 Анализ выявленных опасных производственных факторов

Поражение электрическим током

Электрооборудование должно иметь исправную взрывозащиту, проходить техническое обслуживание и текущие ремонты согласно графика ППР с записью в «Журнале осмотра взрывозащищенного оборудования»,

который храниться у мастеров цеха. В журнале указываются виды проведенных работ, с подписями их производивших. Работы, выполняемые на кустовых площадках, должны проводиться искробезопасным инструментом.[36]

Средства защиты от поражения электрическим током:

- перчатки (защитные перчатки должны быть широкими и не менее 35 см в длину, чтобы их было удобно надевать поверх шерстяных перчаток, а сами они покрывали кисть и часть руки);
- обувь (галоши и ботинки предназначаются для защиты от земного и шагового напряжений);
- подставки (подставки делают из стекла, фарфора или металла, металл нельзя использовать для соединения, минимальный размер – 0,75×0,75 м);
- указатели (для техники с рабочим напряжением менее 500 В);
- щиты (щиты для временных ограждений электрических установок делают из промасленного дерева или текстолита).

Защита от статического электричества на объекте обеспечивается путем присоединения всего электрооборудования к защитному контуру заземления. К сетям заземления присоединены корпуса электродвигателей, аппаратов, каркасы щитов, шкафов, кабельные конструкции.[37]

6.2.2.1 Расчет заземления электрооборудования

Расчет производится в соответствии «Типовых расчетов по электрооборудованию».

Сопротивление растеканию тока одиночных стержневых заземлителей определяется по формуле:

$$R_{\infty} = \frac{\rho \cdot K_c}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\frac{\ln 2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \frac{\ln 4t + l}{4t - l} \right) = \frac{1 \cdot 10^4 \cdot 1,65}{2 \cdot 3,148 \cdot 500} \cdot \left(\frac{\ln 2 \cdot 500}{1,2} + \frac{1}{2} \frac{\ln 4 \cdot 570 + 500}{4 \cdot 570 - 500} \right) = 37,5 \text{ Ом}$$

где: ρ – удельное сопротивление грунта, 1×10^{-4} Ом*см; K_c -коэффициент сезонности, для I климатической зоны $K_c = 1,65$; l – длина стержня; d - диаметр стержня; t – глубина залегания.

Необходимое количество стержней:

$$n = \frac{R_{oc}}{\eta_c \cdot R_3} = \frac{37,5}{0,61 \cdot 4} = 15,37 \text{ Ом}$$

где: η – коэффициент использования стержневых заземлителей;

R_3 - сопротивление, оказываемое заземляющим устройством растеканию тока.

Сопротивление всех стержней:

$$R_c = \frac{R_{oc}}{n \cdot \eta_c} = \frac{37,5}{15,37 \cdot 0,61} = 3,8 \text{ Ом}$$

Сопротивление растекания горизонтального (протяжного) заземлителя определяется по формуле:

$$R_n = \frac{0,336 \cdot \rho_{расч}}{I_n} \cdot \frac{I_n^2}{d \cdot t_1} = \frac{0,336 \cdot 5 \cdot 10^4}{100000} \cdot \frac{100000^2}{1,2 \cdot 70} = 14,3 \text{ Ом}$$

где: I_n – общая длина горизонтального заземлителя (полосы 40x4 мм);

t_1 – глубина залегания протяжного заземлителя; $K_c = 5$ - для I климатической зоны; $\rho_{расч} = \rho \cdot K_c = 10^4 \cdot 5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Действительное сопротивление растеканию протяжного заземлителя с учетом коэффициента использования $\eta_n = 0,32$:

$$R_n^D = \frac{R_n}{\eta_n} = \frac{14,3}{0,32} = 44,7 \text{ Ом}$$

Общее сопротивление заземляющего устройства:

$$R_3 = \frac{R_c \cdot R_n^D}{R_c + R_n^D} = \frac{3,8 \cdot 44,7}{3,8 + 44,7} = 3,5 \text{ Ом}$$

Из расчета следует, что полученное значение сопротивления не превышает допустимого, а следовательно будет обеспечено полноценное заземление объекта, соответствующее ГОСТу 12.1.019-2017.

6.3 Экологическая безопасность

Защита окружающей среды - это комплексная проблема, требующая усилия учёных многих специальностей. Выброс токсичных веществ в окружающую среду, поступление бытовых и производственных отходов в различных формах прежде всего, отражается на здоровье населения, вредит сельскому хозяйству, оказывает влияние на климат отдельных регионов и состояния озонового слоя Земли, приводит к гибели флоры и фауны.

Влияние отходов и мероприятия по защите атмосферы

Загрязнение атмосферы происходит при сгорании газа в факелах и потери его через негерметичное оборудование в районе компрессорной станции, при авариях на газо- и нефтепроводах.

Влияние отходов и мероприятия по защите гидросферы и литосферы

Нефтяное загрязнение гидросферы и литосферы происходит вследствие несовершенства технологии добычи нефти, аварийных разливов и несоблюдение природоохранных требований. Так же возможно загрязнение природной среды промышленными и бытовыми отходами, в процессе развитие отрицательных физико-геологических процессов в зоне строительства и эксплуатации объектов (изменение поверхностного стока, заболачивание, подтопление, развитие оврагов, оползней, эрозии, активизация криогенных процессов на участках распространения многолетних мерзлых пород, засоление выходом сеноманских вод).

Для предотвращения загрязнения окружающей среды рекомендуются следующие мероприятия:

- закрытая система сбора и транспорта нефти. Автоматическое отключение насосов, перекачивающих нефть, при падении давления в трубопроводе и установка запорной арматуры для отключения участка трубопровода в случае его порыва;
- площадки размещения технологического оборудования выполнены из сборных бетонных плит и ограждены бордюрным камнем и имеют

дождеприемные колодцы, через которые загрязненные дождевые стоки и разлившаяся при аварии жидкость стекает в закрытую сеть производственно-дождевой канализации в очистные сооружения при УПСВ с последующей утилизацией в систему ППД;

- по периметру площадки куста предусмотрено обвалование, необходимо устройство приустьевых площадок для сбора возможных утечек с сальников фонтанной арматуры и загрязненного поверхностного стока, со сбросом в дренажно-канализационную емкость, с дальнейшей закачкой в систему нефтесбора;

- на каждой скважине разрабатывается организационный план ликвидации аварий, который позволит правильно организовать работу во время аварии и уменьшит возможное отрицательное воздействие на компоненты окружающей среды;

- отходы образовавшиеся после замены охлаждающих и рабочих жидкостей оборудования, утилизируются согласно ГОСТ Р 57703-2017;

- для утилизации ТБО следует руководствоваться Федеральным законом "Об отходах производства и потребления" от 24.06.1998 N 89-ФЗ.

6.4 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. В нашем случае, мы имеем дело с ЧС техногенного характера.

Розлив нефти – возможная чрезвычайная ситуация, которая может возникнуть в результате разгерметизации нефтепровода.

При возникновении аварийных ситуаций с разливом нефти, существует ряд мероприятий, выполняемых в следующей последовательности:

- ликвидировать источник разлива нефти;
- оценить объем произошедшего разлива и выявить оптимальный способ его ликвидации;
- локализовать нефтяной разлив и предотвратить его дальнейшее распространение;
- в случае аварийной ситуации локализация средних аварийных разливов осуществляется путем установления барьеров из земли с устройством защитных экранов, предотвращающих интенсивную пропитку барьера нефтью, локализация больших объемов разлитой нефти производится с помощью отрывных траншей;
- собрать и вывезти собранную с почвы, болотной и водной поверхности нефть на комплексный пункт сбора продукции скважин или ближайший пункт утилизации.[38]

Пожар – наиболее вероятная ЧС, которая может возникнуть.

Основными причинами пожара могут быть: перегрузка проводов, короткое замыкание, большие переходные сопротивления в электрических цепях, электрическая дуга, искрение и неисправности оборудования, брошенные непотушенные спички и сигареты, нарушение правил хранения легко воспламеняющихся жидкостей и ГСМ.

Согласно ГОСТ 12.1.004-91 , пожарная профилактика обеспечивается:

- системой предотвращения пожара;
- системой противопожарной защиты;
- организационно–техническими мероприятиями.

К мерам предотвращения пожара относятся:

- применение средств защитного отключения возможных источников загорания;
- применение искробезопасного оборудования;
- применение устройства молниезащиты;
- выполнение правил (инструкций) по пожарной безопасности. [39]

При обнаружении возгорания, обнаружившему следует немедленно сообщить в пожарную охрану и руководителю, после чего приступают к эвакуации людей и материальных ценностей. Ликвидация пожара осуществляется первичными средствами пожаротушения с момента обнаружения пожара. Пострадавшим при пожаре обеспечивается первая медицинская помощь, так же необходимо вызывать скорую медицинскую помощь.

Вывод по разделу «социальная ответственность»:

В данном разделе были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, вопросы производственной и экологической безопасности, а так же действия при чрезвычайных ситуациях.

Проведен анализ вредных и опасных производственных факторов, определены меры предотвращения этих факторов. Проанализировано влияние объекта на окружающую среду, определены меры по обеспечению экологической безопасности. Рассмотрен вопрос по обеспечению безопасности в случае чрезвычайной ситуации, предложены методы по предотвращению и ликвидации последствий чрезвычайной ситуации.

Установлено, что объект относится к I категории, оказывающих значительное негативное влияние на окружающую среду, имеет категорию «Б» по взрывопожарной и пожарной опасности. Персонал работающий на объекте имеют III категорию тяжести труда, а так же II группу по электробезопасности.

На основании вышеизложенного, при эксплуатации насосной станции могут быть приняты меры по предотвращению возможных выявленных проблем. Путем выполнения необходимых условий, таких как: оптимизация работы персонала и аппаратуры, введение необходимых коллективных и индивидуальных средств защиты, соблюдения техники безопасности и мер предосторожности при выполнении своих должностных обязанностей, а так же организацией мероприятий по предотвращению чрезвычайных ситуаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной магистерской диссертации было рассмотрено назначение, устройство и принцип работы УЭЦН, рассмотрены способы управления системы «ПЧ–АД» и выбран скалярный метод управления. Выбран насос типа ЭЦНМ5-125-1000 и электродвигатель ПЭДУ32 – 103В5, в соответствии с требованиями ТЗ. Подобрано наземное оборудование: трансформатор ТМПН – 100/3 – УХЛ 1, станция управления «Электрон-05» 160, а так же питающий кабель электропривода КПБК-3х10.

Рассчитаны параметры схемы замещения асинхронного двигателя и построены естественные и искусственные механические и электромеханические характеристики электропривода с насосной нагрузкой. В результате расчета и построения характеристик, определено, что номинальный ток статора двигателя $I_{ном.} = 27,5$ А, номинальный момент электропривода $M_{ном.} = 108,25$ Н·м, при номинальной скорости вращения вала $\omega_{ном.} = 295,6$ рад/с.

Рассчитана и составлена имитационная модель системы «ПЧ–АД» с IR-компенсацией, проведено моделирование работы системы. В результате имитационного моделирования были сняты динамические характеристики двигателя при прямом пуске и выяснено, что двигатель является устойчивым звеном, и параметры схемы замещения вычислены правильно. Расчет статических характеристик замкнутой системы с IR-компенсацией, а так же моделирование пуска электропривода на различных частотах, при различных коэффициентов компенсации момента ($K_{KM} = 0,25$ и $0,75$), показал, что IR-компенсация оказывает существенное влияние только при малых частотах, где потери на активном сопротивлении статора увеличиваются.

Так же при моделировании разработан задатчик интенсивности разгона электропривода. В процессе моделирования доказано, что внедрения и тонкая настройка задатчика интенсивности, а так же модулей насыщения в каналы регулирования управляющего напряжения и частоты – позволяет получить

плавный разгон электропривода, без больших бросков момента, что и требуется для электроприводов погружного насоса.

Проведено имитационное исследование электропривода при заданном цикле работы, которое показало, что установка функционирует исправно, система обрабатывает заданные параметры и модель настроена корректно.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования на примере SWOT-анализа, определен полный перечень, а так же трудоемкость проведения работ. Определена целесообразность и эффективность научного исследования путем оценки научно-технического уровня проекта, а также оценки возможных рисков.

В разделе «Социальная ответственность» рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, вопросы производственной и экологической безопасности, а так же действия при чрезвычайных ситуациях. Проведен анализ вредных и опасных производственных факторов, определены меры предотвращения этих факторов. Проанализировано влияние объекта на окружающую среду, определены меры по обеспечению экологической безопасности. Рассмотрен вопрос по обеспечению безопасности в случае чрезвычайной ситуации, предложены методы по предотвращению и ликвидации последствий чрезвычайной ситуации.

ПЕРЕЧЕНЬ 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. Бочарников В. Ф; Погружные скважинные центробежные насосы с электроприводом: Учебное пособие. — Тюмень; Издательство «Вектор Бук», 2003.-336 с.
4. Ребенков, С.В. Энергетическая эффективность УЭЦН и УЭВН // Инженерная практика.- 2010.- № 3.- С. 62-66.
5. Юсупов, М.Д., Долгих, А.В., Ненашев, А.И. Опыт внедрения энергоэффективных УЭЦН // Энергетическая стратегия.- 2012.- № 8 (26).- С. 102-104.
6. Богданов, А.А. Погружные центробежные электронасосы для добычи нефти.– М.: Недрa, 1968.– С. 29-272.
7. Лысенко В.Д. Инновационная разработка нефтяных месторождений. Москва, 2000г.
8. Зайцев Ю.В., Балакиров Ю.А. «Технология и техника эксплуатации нефтяных и газовых скважин», М.,1986г.
9. Бухаленко Е.И. «Справочник по нефтепромысловому оборудованию», М., 1983г.
10. Крец В.Г. Основы нефтегазового дела: учебное пособие / В.Г. Крец , А.В. Шадрина. – Томск: Издательство ТПУ, 2010. – 182 с.
11. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности. Учеб. для вузов. М.: ОАО, Недрa, 2008. 487с. Сипайлов В.А., Букреев В.Г.
12. СТП 57.00.047-81. Уровни допустимого динамического снижения питающего напряжения погружных центробежных электронасосов / И. А. Ниссенбаум [и др.]. – Тюмень, 1980. – 12 с.

13. СТП 57.00.047-81. Уровни допустимого динамического снижения питающего напряжения погружных центробежных электронасосов / И. А. Ниссенбаум [и др.]. – Тюмень, 1980. – 12 с.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Сипайлова Н. Ю. Оптимальное управление установкой электроцентробежного насоса с частотно-регулируемым асинхронным приводом. – Известия вузов. Электромеханика. – 2009. - №4. – с. 66 – 69.
18. 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.
19. Каплан Л.С., Семенов А.В., Разгоняев Н.Ф. Эксплуатация осложненных скважин центробежными насосами. М.: Недра, 2003, С.256-428.
20. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В. Н. Ивановский [и др.]. – Москва: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 824 с.

21. А.Ю. Чернышев. Электропривод переменного тока: учебное пособие / А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2022. – 218с.
22. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электрический привод: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 224с.
23. Кояин Н.В., Удут Л.С., Мальцева О.П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч.5. Применение программы DORA-FUZZY в расчетах электроприводов постоянного тока: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – 156с.
24. Мальцева О.П. Системы управления электроприводов: учебное пособие / О.П. Мальцева, Л.С. Удут, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 152с.
25. Скалярное и векторное управление асинхронными двигателями - в чем различие? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/elprivod/1975-skaljarnoe-i-vektornoe-upravlenie.html>.
26. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат; 1986. – 416 с.
27. Характеристики погружных электродвигателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/5332923/page:4>.
28. Характеристики станций управления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elekton.ru/elekton05.shtml>.
29. Характеристики трансформаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rec.su/catalog/maslyanye-transformatory/tmpn-tmpng/>.
30. Характеристики кабеля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kabel-s.ru/catalog/kpbp-90/kpbp-90-3x10/>.
31. Характеристики преобразователя частоты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.privod.su/Siemens/2877699940>.
32. Конституции Российской Федерации.

33. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018).
34. МР 2.2.7.2129-06 «Режимы труда и отдыха работающих в холодное время года на открытой территории или в неотапливаемых помещениях».
35. МР 2.2.8.0017-10 «Гигиена труда. Средства коллективной и индивидуальной защиты. Режимы труда и отдыха работающих в нагревающем микроклимате в производственном помещении и на открытой местности в теплый период года».
36. ГОСТ 12.1.005-88 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»;
37. ГОСТ 12.1.003-83 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности».
38. СанПиН 2.1.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
39. ГОСТ 12.1.012–2004 «ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования».
40. ГОСТ 12.1.005-88 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».
41. ГОСТ 12.1.019-2017 «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».
42. ПУЭ «Правила устройства электроустановок».
43. ГОСТ Р 57703-2017 –«Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Ликвидация отработанных нефтепродуктов.
44. ГОСТ 12.1.004-91 - Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования.
45. Видяев И. Г., Серикова Г. Н., Гаврикова Н. А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно методическое пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – 150с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Asynchronous frequency–controlled electric drive for oil production

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM07	Брага Никита Петрович		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Александр Юрьевич	к.т.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Воробьева Виктория Владимировна	к.ф.н.		

INTRODUCTION

The oil and gas industry, with exploration of the newest fields, needed pumps in order to select a significant amount of water from the bottom of the well. Of course the blade electric water pump, adapted to increase the feeds is more reasonable. Pumps with centrifugal impellers have gained traction with the vane pumps, since they produced enormous pressure when the water supply and the pump dimensions were set. The extensive using of deep centrifugal pumps with an electric drive is conditioned by numerous conditions. The presence of such condition as a large amount of water at the bottom of the well ESP installation is more economical and less difficult to maintain for service companies, in comparison with compression mining and lifting of water from the face, pumps of other types.

With large feeds, the energy consumption for installation is relatively small. Repair and maintenance of ESP units is a simple procedure, since only the control station and the transformer, which do not require continuous maintenance, are located on the surface.

1 PURPOSE, DEVICE, PRINCIPLE OF OPERATION, TECHNICAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS

1.1 Purpose

Fountain and gas lift (compressor and noncompressor) methods of oil production are effective at high and ultra-high pressure at the bottom of the well and a significant gas factor of the produced fluid. After extracting most of the fluid from the deposit, the reservoir energy decreases, the water cut increases in the produced fluid, and the relative gas content decreases of the withdrawn mixture. The level of the bleed liquid is reduced in the borehole. The fountain method of fluid extraction becomes impossible, and the compressor method is not so effective, and because of this they are replaced by a mechanical method of fluid extraction.

Rod and rodless pumps are used to extract the fluid. The rod pumps are equipped with a surface drive, a downhole pump and a long connection between them, which represents a long tube made of metal candles.

Bottom pumps have a downhole pump and a downhole pump drive, directly connected to each other. Electricity is supplied to the pump drive by cable (with electric drive) or by pipeline (with hydraulic drive or pneumatic drive). Due to the lack of a long connection between the drive and the pump, the rodless pumps have much higher power than the rod pumps. This advantage makes it possible to maintain large fluid withdrawals by some types of scraper pumps. These pumps are submersible centrifugal pumps with electric drive. These pumps produce the largest selection of fluid from the bottom of the wells during mechanical oil recovery. In Russia, installations of submersible centrifugal pumps with the abbreviation ESP (electric drive centrifugal pump installations) have equipped more than 35% of all oil wells and pumped out about 70% of all produced oil.

The main type of energy for rodless pumping units is electricity, or the power of a fluid or gas supplied by a variety of types of communications to the submersible motor. The torque from the engine goes to the deep pump with the help of the transmission, which, depending on the application, can (and has) a diverse design of the main working units of the pump.

A great variety of schemes and designs of blade, volumetric and injection (jet) pumps explains the many permissible types of submersible mechanisms of rodless pumps.

Today, there are about ten varieties of widely used or undergoing industrial testing. The main of them - centrifugal, screw and diaphragm pumps with electric drive, hydro-piston, jet with a hydraulic drive. In addition to the pump and drive, the units of the rodless pumps have service equipment for controlling, transporting energy, etc.

The oil industry regularly needs pumps to extract even more fluid from the bottom of the well. The most suitable for these purposes are dynamic vane pumps. Of the vane pumps, the pumps with centrifugal impellers had the maximum distribution, because they form a sufficiently high head with certain fluid feeds and pump dimensions, while possessing a rather high efficiency and high failure-free performance. The submersible centrifugal pump is driven by an immersion motor. Electric power is supplied to the motor by a special cable placed in the well on the surface of the tubing. The extensive use of submersible electric drive centrifugal

pumps is conditioned by numerous conditions. With large downhole fluid samplings, ESP units are more economical and less complex when serviced by service companies, compared to compressor mining and fluid lifting by other types of pumps. At high feed rates, the energy costs for installation are relatively cheap. With this sphere of use, its efficiency is quite high (up to 0.35). The service of the ESP units is easy, due to the fact that only the control station and the transformer, which do not require regular maintenance, are located on the surface. With the use of ESP devices it is easy enough to subject them to automation and telemetry. Installation of ESP ground equipment is simple, due to the fact that the control station and the transformer do not need a base. Overhaul period of service - about a year (basically it depends on the amount of mechanical impurities in the produced ESP fluid).

1.2 Device

1.2.1 ESP Device

The depth pump is multi-sectional and has 80 to 500 sections.

The ESP installation is a difficult technical system, it is a set of components unique in design. The installation consists of two parts: ground part and submerged part.

The fluid is taken by the pump through the coarse filter screen, which is located in its lower part. The grid is used to filter the formation fluid. The pump supplies the fluid from the bottom of the well to the tubing. Submersible electric motor (SED) – is oil-filled and sealed. It has a hydro-protection unit to exclude the possibility of penetration into the formation fluid. The rotor of the electric motor is integrated with the hydroprotection shaft and through it with the pump shaft. During using asynchronous motors, the rotor has a rotational speed of 2800 - 2950 rpm.

It is necessary that the gap between the casing and the submersible centrifugal pump be minimized to increase the effectiveness of the internal diameter of the casing. The minimum clearance that is permissible, ensuring trouble-free descent and lifting equipment is six millimeters as demonstrated by practical activities. The

dimensions of the submersible centrifugal pump are chosen from the inside diameter of the casing and the assumed clearance.

The transformer 5 is used to increase the voltage of the current received from the industrial network (380 V). The motor voltage is much higher than this value (400-2000 V and more). In addition, the transformer is needed to compensate the voltage drop in the long cable.

The control station enables to turn on and off the ESP manually or automatically during emergency operation. In addition, the station contains sensors showing the current strength, voltage, insulation resistance of the cable and other parameters. This equipment makes it possible to perform diagnostics of the ESP performance.

The tubing column is provided with a return 6 and a drain 11 valves. The non-return valve is located in the upper part (head) of the pump in a special coupling, where there is a seat, ball and ball-lift limiter. In some varieties of non-return valves, other types of locking elements (a tare, a cone) are used.

The check valve 11 makes it possible to stop the pump (stops may occur, for example, due to the fact that the electrical power was cut off in the event of an accident on the power line) to store the fluid in the tubing string. Thus, when the submersible pump stops, the fluid does not drain from the pipes into the well, and the time to fill the tubing is not wasted, and the start-up of the plant is facilitated, especially at large tubing depths (a large column of pipes corresponds to a large head). A smaller drive power is required using high headers for a centrifugal pump (in comparison with low head and large feed).

The drain valve 6 makes it possible to clean the tubing string from the fluid, before lifting the unit from the bottom of the well. The drain valve is similarly located in a special coupling (connecting tubing) and represents a bronze tube (nipple), one end of which is sealed, and the opposite, open end, on the thread is fixed to the coupling from the inside. The drain valve is horizontal with respect to the vertical string of tubing. When it is necessary to lift the installation from the bottom of the well, a scrap is dumped into the tubing string, which destroys the bronze tube

of the drain valve, and the fluid is merged during the ascent from the tubing. The using of such drain valve is not recommended if a scraper is used in the installation to clean the tubing from paraffin and hydrates, because when the wire on which scraper is lowered falls, it collapses and destroys the nipple, an unplanned fluid flows into the near-pipe of the well occurs, and the unit must be lifted. Because of this, drain valves of other types are used, brought into operation without scrapping, for example, by increasing the pressure in the tubing. The terminal box (remote connection point of the cable) 10 is used to break the cable.

1.2.2 Downhole centrifugal pumps (ESP)

Deep centrifugal pumps are considered multi-stage machines. Firstly, this is due to the very small values of the head, which is created by one stage (impeller and directing device).

The design of the submersible centrifugal pump can be normal and wear-resistant, in addition it increases corrosion resistance. The diameters and design of the pump units are the same for all pump designs in most cases.

Submersible electric centrifugal pump of standard design is designed for lifting from the bottom of the well fluid with water cut to 99%. Mechanical impurities in the fluid to be lifted should not be more than 0.1 g / l, hydrogen sulphide - not more than 0.01 g / l, the concentration of gas should not be more than 25% at the pump suction.

The stainless steel electric centrifugal pump is designed to operate at a concentration of not more than 1.25 g / l in the elevated sulphide fluid.

Wear-resistant design makes it possible to raise the fluid with a concentration of mechanical impurities no more than 0.5 g / l.

The working body of the submersible centrifugal pump is a pump stage (SN) with a cylindrical (CL) or oblique-cylindrical blades (NCL), which consists of an impeller and a guiding device.

Steps with NCL are used in pumps with a high feed rate. They have a higher efficiency and more than one and a half times the increased feed rate, when compared with CF.

The radial bearing of the electric centrifugal pump senses the radial loads that appear when the pump is used. It consists of a bearing sleeve with a liner, the support sleeve and the liner are fixed parts and a sleeve rotating together with the shaft. In each module-section there are two radial bearings - upper and lower, and in the module-sections of pumps of wear-resistant design, intermediate radial supports are also used.

1.2.3 Submersible motor (SEM)

Submersible oil-filled three-phase asynchronous squirrel-cage rotors (two- or four-) pole motors are used as a drive for submersible centrifugal pumps for pumping out formation fluid from the bottom of oil wells with an angle of deviation from the vertical at the fixing point of no more than 60° . Electric motors, as well as pumps, are required to have sufficiently small diameters, different for oil wells with different casing columns. The power of electric motors can approach 500 kW.

Small diameters and high power make it necessary to increase the length of electric motors, which sometimes exceeds 8 m.

With the pump the motor is connected with a splined coupling.

Sectional electric motors consist of the upper and lower sections, which are connected when assembling the electric motor on the surface. Each section consists of a stator and a rotor, the arrangement of which is the same as that of a single-section electric motor. At least 100 modifications of electric motors of different capacities are made, which can help to choose the most optimal combination of electric motor - pump to ensure the operation of the unit with the maximum possible efficiency.

The use of special electrotechnical materials makes it possible to use submersible electric motors at a reservoir fluid temperature of not more than 120°C , and in a heat-resistant version - no more than 150°C .

After the electric motor is assembled on a special stand, on which the quality of individual components is controlled, the electric motor is subjected to testing at the station in conditions that are close to real, including with heating up to operating

temperatures. Tests are carried out on all electric motors, after all the tests have been tested and thoroughly checked. The insulation resistance is monitored by the polarization index.

Submersible electric motor rotor is short-circuited and multi-section. The rotor consists of a shaft, a rotor package, a radial support (sliding bearing), bushings.

The rotor packages are mounted on the shaft in groups of 3-4 packs. The group of packages is fixed to the shaft by locking rings so that a 2-3 mm gap is guaranteed, compensating for thermal expansion during operation.

Alternately, with the packages on the shaft, radial friction pairs are installed: bearings and bearing bushings.

Bearing bushes are made of bronze-graphite powder metallurgy.

The current input unit is used to supply the stator winding with electrical energy and consists of a cable clutch and an electrical insulating pad. In the shoe, there are composite electrical contacts which are connected to the terminals of the stator winding. The connection of the cable coupling to the head of the submersible motor is hermetically, and the electrical contacts of the current input unit are located inside the electric motor, which is filled with dielectric oil.

The electric motor is filled with a special dielectric heat-resistant oil, which has high lubricating properties and a dielectric strength of at least 32 kV. The oil circulation inside the engine is made from the filter cavity from the inner hole in the shaft through the heel-turbine, then the oil comes in to lubricate the radial bearings, and from there it enters the gap between the stator and the rotor and is directed back to the filter.

1.2.4. Hydraulic motor protection (protector and compensator)

Hydraulic protection is used for use in submersible oil-filled electric motors with a body diameter of 103, 117 and 130 mm, which are used as a drive for centrifugal pumps to lift fluids from the bottom of oil wells, and is designed to protect the internal cavity of the electric motor from penetration of the formation fluid into it Including the leveling of temperature changes in the oil volume.

The reservoir fluid, when it enters the electric motor, significantly reduces the insulating properties of the dielectric oil, and, falling under the insulation of the winding wires, this can cause a short circuit of the winding. In addition, the lubrication of the bearings of the motor shaft also decreases.

At this point in time, the Russian Federation's fisheries are very popular for waterproofing types G, P and PD.

Hydraulic protection type G is made of 2 main assembly units: a protector, which is placed between the pump and the engine and the compensator located at the bottom of the engine.

The protector is designed for hydraulic protection of the motor from the formation fluid and lubrication of the radial-thrust bearing. A larger tread volume, which consists of an elastic bag 5, is filled with a liquid dielectric oil. Through the check valve 7, the outer surface of the bag senses the pressure of the well fluid at the depth of the descent of the underground pump set.

The upper part of the shaft 1 is connected by a splined coupling with the lower end of the pump shaft. The mechanical seal 2 separates the upper cavity, in which the well fluid may be located, from the cavity just below the seal, which is filled with a transformer dielectric oil, like a wellbore fluid, at a high pressure that is equal to the pressure at the depth of immersion.

Below the face seal 2 there is a sliding friction bearing, and even lower there is the knot 3 - the supporting heel, which perceives the axial force of the pump shaft (also works in liquid dielectric oil). Still further, the second mechanical seal 4 is provided for a higher degree of sealing of the motor. Underneath is a rubber bag 5 in the housing 6, it seals the 2 cavities: an inner cavity of the bag filled with a transformer dielectric oil and a cavity between the housing 6 and the bag itself, into which the well fluid can flow through the check valve 7. The fluid entering the cavity, compresses the bag with dielectric oil to a pressure that is equal to the external one. Liquid dielectric oil through the gaps along the shaft comes to the end seals and down to the submersible motor. It was designed the construction of the hydraulic

protection of the diesel locomotive in which there is a small turbine on the shaft, which creates a higher pressure in the inner cavity of the bag 5.

In the body of the compensator there are holes connecting the outer surface of the bag with the borehole. The inner cavity of the bag is connected to the electric motor, and the outer cavity is connected to the borehole.

When the dielectric oil cools down, the volume of the bag decreases and the wellbore fluid passes through the holes in the compensator housing into the gap between the outer surface of the bag and the inner wall of the compensator housing, thereby creating the condition for full filling of the internal cavity of the submerged electric motor with dielectric oil. As the temperature of the dielectric oil increases in the electric motor, its volume increases, and the dielectric oil enters the inner cavity of the compensator bag where fluid through the gap between the outer surface of the bag and the inner surface of the body is forced through holes in the well.

1.2.5 Gas separator

The constant intensification of oil production and a wide range of changes in the gas factor of the oil produced lead to the fact that the permissible values of the free gas content at the pump inlet are exceeded. This leads to a deterioration in the operating conditions of the pump and submersible motor, increasing the vibration of the installation and reducing its performance.

To combat gas in the wells operated by the ESP, various designs of gas separators and dispersing devices are used.

The use of gas separators or dispersants can prevent cavitation, locking the pump's working parts, provide the required pump capacity, and increase the efficiency.

The use of separators implies the installation of special devices separating liquid and gas from the pump and the release of gas into the annulus.

The use of dispersants makes it possible to increase the maximum allowable value of the volumetric gas content at the reception of a submersible pump from 0.10 to 0.25 due to the formation of a finely dispersed structure of the lifted fluid.

Dispersers have a high coefficient of efficiency in the watered wells forming a viscous emulsion, since they contribute to the destruction of its structure.

The dispersant is a strong flow turbulator and allows to effectively equalize the structures of the gas-liquid fluid. Dispersers can be mounted both outside the pump housing and inside the pump, however, several operating stages must be removed from the pump casing for this purpose.

World companies produce three types of gas separators: gravity, vortex, centrifugal.

The use of centrifugal gas separators is recognized as the most reliable means of protecting electric centrifugal pumps from the harmful effects of free gas. The operating conditions of centrifugal separators largely depend on the conditions of use and the operating time for failure of a submersible centrifugal pump in a well. In order to separate the gas from the liquid in these gas separators, it is possible to use the buoyancy of gas bubbles under the influence of gravitational or centrifugal forces.

The gravitational gas separator is the separator with the lowest separation coefficient, the centrifugal separator is the largest separation coefficient, and the vortex gas separator occupies the middle position by the separation coefficient.

The gas separator works in this way: the gas-liquid mixture enters through the grid and the openings of the input module onto the screw and further to the working parts of the gas separator. Due to the created pressure, the gas-liquid mixture enters the rotating chamber of the separator equipped with radial ribs, where, under the action of centrifugal forces, the gas separates from the liquid. Further, the liquid from the outer perimeter of the separator chamber is fed through the channels of the sub-device to the submersible pump, and the gas through the inclined openings is retracted into the annular space.

1.2.6 Cable lines of ESP units

Cable lines are used to transfer electricity to downhole motors of oil pump installations and pumping liquids.

Cable lines are manufactured in sufficiently stringent requirements to the quality of production - low electrical losses, low diametrical dimensions, high dielectric parameters of cable insulation, heat resistance to low and high temperatures, high resistance to formation fluid and gas, etc.

The cable line is made from the main supply cable (round or flat), which is located on the walls of the tubing string from the control station to the downhole electric motor, the extension cable connected to it with the cable entry clutch. The main cable is connected to the extension cable by an integral coupling (cable splice). With the help of a splice, the sections of the main cable can also be connected to obtain the required length.

The cable line on the main line usually has a circular cross-section (round cable). To reduce the diameter of the downhole unit (cable + submerged centrifugal pump), the lower part of the cable is manufactured in a flat section.

The cable is manufactured with polymer insulation, which is applied to the cable core in two layers. Three insulated cores of the cable are connected together, wrapped with a protective substrate under the armor, and then covered with metal armor. Metal armor tape is the protection of the insulation of the cable veins from mechanical influences during storage, transportation and operation, primarily in the descent and lifting of equipment.

At the downhole electric motor, the cable line ends with a plug-in coupling, which allows a tight connection with the stator winding of the motor.

The cable line during transportation and storage is located on a special drum used also for descents and lifts of installations on oil wells, preventive and repair work with a cable line.

The first layer of insulation is made of polypropylene, the second - from polypropylene or high-density polyethylene.

A cable entry clutch is mounted on the end of a flat extension cable that connects to an immersion motor. The cable is in a metal casing, soldered to the armor of a flat extension cable, the insulated conductors of this cable are hermetically packed in the casing with a rubber seal clamped between the washer and the nut. At

the ends of the conductor cores of the cable, screw terminals are mounted with threaded connections, as well as soldering is applied to the threaded surfaces of the conductors to guarantee a reliable electrical contact. Threaded joints make it possible to restore the installation dimensions of the couplings in the shrinkage of the insulation of the cable veins and the axial displacements of the cores themselves without the coupling being reworked.

In order to maintain the integrity of the cable and its insulation in the SPO, it is necessary to fix the cable on the tubing string. For this, it is necessary to use fixing devices near the site of increasing the external diameter of the tubing string, i. Next to the coupling or the expansion under the thread. When fixing the cable, you need to make sure that the cable fits snugly against the tubing, and if a flat cable is used, make sure that the cable does not twist.

The simplest device for fixing the cable to the tubing and tubing of the submersible pumping unit of the ESP are metal belts with buckles or clamps (from the English clamp - clamp, clamp).

Fixing the extension cable to the components of the submersible pump unit (submersible pump, tread and motor) is carried out in the places indicated in the operating manuals of this type of pumping equipment. The extension cable and the main cable are fixed to the tubing on either side of each tubing coupler, at a distance of 200-250 mm from the top and bottom ends of the coupling.

Using the installation of electric centrifugal pumps in inclined, horizontal and curved wells required the design of devices to secure the cables and protect them from mechanical damage.

1.2.7 Wellhead equipment for operation of the ESP

The wellhead for operation with ESP facilities is equipped with either standard fountain fittings with a special faceplate for skipping and sealing the cable line (type AFK1E), or with special equipment.

So many Russian firms produce wellhead equipment such as OWEN. The crosspiece which connects to the OK, has in its design a split cone, behind which the

tubing is attached. On the top of the cone there is a rubber seal sealing the place of withdrawal of pipes and cable. The seal is urged by a detachable flange. The annulus of the oil well is connected to the tubing from the tubing through the elbow and the check valve. The crosspiece has a special hole for using the echo sounder or Other devices for determining the dynamic level.

1.2.8 Control station

The control station is used to control the operation (start / stop) and to protect the installation of the electric centrifugal pump. All control stations are equipped with the necessary instrumentation and systems, circuit breakers, various relays (maximum, minimum, intermediate, time relay). If an abnormal situation occurs, the appropriate protection systems are triggered and the installation is disabled.

1.2.9 Transformer

The transformer increases the voltage so that the motor at the input to the stator winding has a specified nominal voltage. As explained above, the rated voltage of the motors is 380-2000 V. In addition, it is necessary to take into account the voltage drop in the long cable (long line effect).

CONCLUSION

In this master's project a mathematical model of a submersible asynchronous electric motor was developed and studied with the help of the Matlab program, a simulated model of the open-loop IF-AD system by syscalar control.

During the development and implementation of the project, equipment was selected. Selection and calculation of submersible motor parameters It is proposed to use a modern asynchronous frequency-controlled electric drive.

The mechanical and electromechanical characteristics of the selected asynchronous motor are obtained, constructed according to design and catalog values. As a control law, a regulation law is chosen for the frequency converter.

Also a simulation of transient processes was done when the engine was started in the Matlab software environment. With the use of simulation models dynamic characteristics are constructed.

A system with a scalar control and a law was chosen to provide a starting torque at low speeds in the converter. The correction function (increasing the initial voltage value) of the volt-frequency characteristic in the region of low frequencies of the inverter output voltage is provided. Conclusions were done based on the results of simulation.