

Школа Инженерная школа энергетики  
Направление подготовки – 13.03.02. Электроэнергетика и электротехника  
Отделение школы (НОЦ) Отделение электроэнергетики и электротехники

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

Тема работы
<b>Проектирование и исследование электрического привода установки электроцентробежного насоса для скважинной нефтедобычи</b>

УДК 62-83:622.276.53

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А97	Логина Анастасия Леонидовна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор ОЭЭ ИШЭ	Глазырин А. С.	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Якимова Т. Б.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Черемискина М. С.			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

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

Томск – 2023 г.

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника Промышленная электротехника и автоматизация Электропривод и автоматика	
Код компетенции СУОС	Наименование компетенции СУОС
<b>Универсальные компетенции</b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать в повседневной жизни и в профессиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества, в том числе при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в практической деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
УК(У)-10	Способен принимать обоснованные экономические решения в различных областях жизнедеятельности
УК(У)-11	Способен формировать нетерпимое отношение к коррупционному поведению
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК(У)-1	Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности
ОПК(У)-2	Способен разрабатывать алгоритмы и компьютерные программы, пригодные для практического применения
ОПК(У)-3	Способен применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач
ОПК(У)-4	Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин
ОПК(У)-5	Способен использовать свойства конструкционных и электротехнических материалов в расчетах параметров и режимов объектов профессиональной деятельности
ОПК(У)-6	Способен проводить измерения электрических и неэлектрических величин применительно к объектам профессиональной деятельности
<b>Профессиональные компетенции университета</b>	
ПК(У)-1	Способен анализировать параметры и требования, а также характеристики нагрузки, как основы технического задания для проектирования электроприводов и их компонентов
ПК(У)-2	Способен осуществлять сбор информации для решения проектных задач, поиск и систематизацию технико-экономических показателей существующих технических решений, их предварительный анализ
ПК(У)-3	Способен проводить проектирование отдельных узлов низковольтных комплектных устройств и электропривода в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных методов
ПК(У)-4	Способен проверять техническое состояние электротехнического оборудования, проводить профилактический осмотр и текущий ремонт по заданной методике
ПК(У)-5	Способен осваивать электротехническое оборудование по имеющейся технической документации



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

Школа Инженерная школа энергетики

Направление подготовки – 13.03.02. Электроэнергетика и электротехника

Отделение школы (НОЦ) Отделение электроэнергетики и электротехники

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы
---------------------

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

Студенту:

Группа	ФИО
5А97	Логина Анастасия Леонидовна

Тема работы:

<b>Проектирование электрического привода установки электроцентробежного насоса</b>	
Утверждена приказом директора ИШЭ	Приказ № <u>27-88/с</u> от <u>27.01.2023</u>

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Подача насоса – 250 м<sup>3</sup>/сут.</li> <li>2. Напор – 1320 м.</li> <li>3. Плотность нефти – 750 кг/м<sup>3</sup>.</li> <li>4. Параметры питающей сети – 3-х фазная сеть 380/220 В, 50 Гц.</li> <li>5. Длина кабеля – 1500 м.</li> <li>6. Температура окружающей среды (в скважине) – 60 град.</li> <li>7. Тип управления – скалярное управление частотным преобразователем.</li> <li>8. Диапазон регулирования – не менее <math>D\omega = 1-5</math>.</li> <li>9. Тип механизма – центробежный насос для добычи нефти.</li> <li>10. Номинальная частота напряжения для погружного двигателя – <math>f_n = 50</math> Гц.</li> </ol>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Аналитический обзор по литературным источникам для проектирования электропривода УЭЦН для скважной добычи нефти.</li> <li>2. Постановка задачи проектирования.</li> <li>3. Расчет силовой части.</li> <li>4. Разработка имитационной модели в среде Matlab Simulink.</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Имитационная модель электропривода УЭЦН для скважной добычи нефти в среде Matlab Simulink;</p>

<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p><i>Финансовый менеджмент</i></p>	<p>Якимова Т. Б., доцент ОСГН ШБИП, ТПУ</p>
<p><i>Социальная ответственность</i></p>	<p>Черемискина М. С., старший преподаватель, ТПУ</p>

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор ОЭЭ ИШЭ	Глазырин А. С.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А97	Логина Анастасия Леонидовна		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 87 страниц, 52 рисунков, 12 таблицы, 27 источников.

Ключевые слова: установка электроцентробежного насоса, система управления, частотно-регулируемый электропривод, кабельная линия, погружной электродвигатель, преобразователь частоты.

Объектом исследования является частотно-регулируемый электропривод для электроцентробежного насоса ЭЦНМ 5А-250-1400

Цель работы – Проектирование и исследование электрического привода с учетом специфических требований скважинной нефтедобычи и оптимизация его параметров для обеспечения эффективной работы насоса.

В процессе работы спроектирован электрический привод для асинхронного электродвигателя для электроцентробежного насоса. Выбран трансформатор, система управления, погружной электродвигатель, кабельная линия, блок погружной телеметрии, произведен расчет ПЭД и создана имитационная модель ПЭД . Были рассчитаны экономические показатели спроектированного электропривода УЭЦН, оценена безопасность и экологичность проекта.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2021 на листах белой бумаги формата А4 с помощью программных средств MATLAB: Simulink, MathCAD, Mathtype.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список принятых сокращений .....	8
1 Литературный обзор. Способы эксплуатации скважин, устройство УЭЦН .....	10
1.1 Назначение, устройство, принцип действия, технические и эксплуатационные характеристики .....	10
1.1 Назначение и состав силового канала станции управления установок электроцентробежных насосов.....	12
1.2 Анализ основных способов регулирования угловой скорости в уэцн.....	14
1.3 Способы повышения эффективности УЭЦН .....	16
2 Расчет и выбор силового оборудования системы регулируемого электропривода .....	18
2.1 Выбор погружного насоса, двигателя, трансформатора .....	18
2.1.1 Выбор погружного насоса .....	18
2.1.2 Выбор двигателя .....	19
2.1.3 Выбор трансформатора .....	20
2.2 Выбор преобразовательного устройства для системы регулируемого электропривода .....	21
2.3 Расчет и выбор типа и сечения кабеля для силовой части электропривода .....	23
2.4 Проектирование и расчет каналов измерения УЭЦН.....	26
2.5 Выбор аппаратуры управления и защиты .....	35
2.6 Проектирование защиты от обрыва и перекоса фазы .....	35
2.7 Обоснование и выбор синус фильтра .....	36
3 Статические характеристики погружного двигателя.....	38
3.1 Определение параметров схемы замещения погружного двигателя .	38
3.2 Расчет естественных характеристик $\omega = f(I)$ и $\omega = f(M)$ .....	42
3.3 Расчет искусственных характеристик $\omega = f(I)$ и $\omega = f(M)$ при частотном управлении.....	46
3.4 Расчет статической нагрузки УЭЦН и момента инерции двигателя .	49
3.5 Корректировка вольт-частотных характеристик .....	50
3.6 Расчет потерь при работе на разных частотах .....	52
4 Динамические характеристики уэцн .....	53
4.1 Имитационная модель АД в неподвижной системе координат .....	53
4.2 Исследование прямого пуска АД от сети .....	57

4.3	Исследование разомкнутой системы ПЧ АД при пуске и торможении	60
4.4	Проектирование и исследование замкнутой системы ПЧ-АД по угловой скорости.....	63
5.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	66
5.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	67
5.1.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности разработки проекта.....	67
5.1.2	Анализ конкурентных технических решений.....	68
5.1.3	SWOT-анализ .....	70
5.2	Планирование выполнения работ по проекту.....	73
5.2.1	Структура работ в рамках проектной работы.....	73
5.2.2	Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения работ .....	74
5.3	Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	78
5.3.1	Основная заработная плата исполнителей темы .....	78
5.3.2	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	79
5.3.3	Накладные расходы .....	80
5.3.4	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта .....	80
5.3.5	Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	81
	Заключение.....	83
	Список литературы.....	84

## Список принятых сокращений

ЭМС – электромеханическая система

ДПТ НВ – двигатель постоянного тока независимого возбуждения

СДУ – система дифференциальных уравнений

СЛАУ – система линейных алгебраических уравнений

ЭЦН – электроприводной центробежный насос

ПЭД – погружные электродвигатели

ПЧ – преобразователь частоты

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

ЗИ – задатчик интенсивности



## Введение

В современном мире энергетические ресурсы являются одними из самых ценных и востребованных, а нефть является одним из ключевых источников энергии. Поэтому разработка и использование новых технологий добычи нефти является важной задачей для развития отрасли. С каждым годом объем добычи нефти увеличивается, определяя экономический рост и развитие страны. В связи с этим важным фактором является повышение надежности и эффективности оборудования для добычи нефти.

Объектом исследования является регулируемый электропривод погружного насоса для добычи нефти. Предметом исследования являются технические характеристики, принцип действия и применение регулируемого электрического привода погружного насоса.

Управляемый электропривод погружного насоса является одним из наиболее эффективных и современных методов добычи нефти. Это обеспечивает эффективность, точность и надежность процесса добычи нефти и позволяет значительно повысить производительность скважин и снизить затраты на эксплуатацию нефтяных месторождений.

Техническое обслуживание и ремонт систем с электрическим погружным насосом (ЭЦН) является не сложным, потому что на поверхности скважины находятся только станция управления и трансформатор. Они не требуют частого технического обслуживания персоналом.

Разработка проекта по данной теме - погружной насос для скважной добычи нефти с частотно-регулируемым приводом - дает возможность углубиться в технические аспекты этого устройства. Работая над проектом, студент сможет изучить принципы работы, применения и внедрения данного устройства. В ходе работы над проектом, студент сможет изучить принципы работы, применение и реализацию данного устройства. Помимо этого, разработка проекта также позволит овладеть знаниями проектирования УЭЦН и построения имитационной модели, что является важным шагом на пути к получению практических знаний и опыта. Эти знания будут полезными в будущей работе в области нефтедобычи, и помогут ему лучше понимать технические аспекты данной области деятельности.

### 1.1 Назначение, устройство, принцип действия, технические и эксплуатационные характеристики

Электроприводы погружных нефтяных насосов с переменной скоростью используются в нефтяной промышленности для откачки нефти из скважин. Его основное назначение - эффективное управление погружными насосами, которые погружаются в скважину для добычи нефти.

Центробежные насосы приводятся в действие погружными электродвигателями (ПЭД). Для подачи питания к погружному электродвигателю используются специальные кабели с броней из масло- и газостойкой гибкой ленты, которые крепятся к НКТ (трубе) металлическими хомутами. На конце возле верхней трубы НКТ используются плоские удлинительные кабели для увеличения диаметра насосов и электродвигателей, установленных в обсадной колонне скважины.

Питание к ПЭД подается через специализированный кабель, находящийся в скважине рядом с НКТ. Установка привода рядом с насосом позволяет эффективно передавать мощность от привода к скважинному насосу. Это позволяет использовать насосы большой мощности.

Существует много причин для широкого использования электрофильтров. При высоких дебитах скважин ЭЦН является наиболее экономичным и требует наименьшего технического обслуживания по сравнению с добычей на базе компрессора или использованием других типов насосов (всасывающие насосы или гидронасосы). При достаточно высоких дебитах затраты на электроэнергию сравнительно низкими, при этом будет высокое КПД. [1].

Фильтрация пластового потока обеспечивается ситом в нижней части насоса, через которое пластовый поток поступает в насос. Насос перекачивает флюид из ствола скважины в трубу. Погружной электродвигатель (ПЭД) оснащен защитой, которая в свою очередь заполняется маслом и герметизируется. Вал двигателя соединяется с валом, защищенным от жидкости, а вал, защищенный от жидкости, соединяется с валом насоса.

Круглые кабели используются рядом с трубопроводом, а плоские - рядом с насосным агрегатом. Использование плоских кабелей приводит к несколько большему диаметру насоса и двигателя, что благоприятно сказывается на энергоэффективности.

Погружной электродвигатель погружной установки находится под протектором, а насос ЭЦН - над протектором. Вся сборка опускается в шахту по колонне труб, соединенной со скважинным оборудованием, и подвешивается на подвесных шайбах без какого-либо дополнительного оборудования в шахте. ПЭД приводится в движение по специализированной кабельной линии (КЛ), которая в свою очередь крепится к НКТ металлическими хомутами с крепежом.

Обратные клапаны и дренажные клапаны являются важными элементами при строительстве насосно-компрессорных труб (НКТ). Обратный клапан размещается в муфте с конической внутренней резьбой на каждом конце НКТ. Внутри гнезда обратного клапана находится седло, шар и ограничитель, который контролирует подъем шара. В некоторых конструкциях обратных клапанов используются другие типы запорных элементов, например, конусы или диски.

Функция обратного клапана заключается в поддержании жидкости в трубной колонне при остановке насоса. Это предотвращает слив жидкости из трубопровода в шахту, экономя время, которое обычно требуется для пополнения трубопровода после остановки насоса. Кроме того, наличие обратного клапана упрощает запуск системы. Запуск происходит, когда поднимающийся трубопровод уже заполнен жидкостью, что обеспечивает высокую скорость откачки. При необходимости этот напор может быть дополнительно увеличен путем закрытия нагнетательной задвижки на устье скважины. Поскольку центробежные насосы требуют меньшей мощности привода при больших напорах, наличие обратного клапана облегчает запуск системы, особенно при погружении насоса на большую глубину. Газосепараторы широко используются для обеспечения надежной и стабильной работы электроцентробежных насосов (ЭЦН) при высокой концентрации газа в пластовой жидкости. Это устройство основано на принципе отделения газа от жидкости и, будучи установленным в нижней части насоса, значительно повышает производительность системы.

Внутри сепаратора тяжелая жидкость движется наружу и проходит по круговой траектории. В то же время более легкие газы выталкиваются к центру и располагаются вокруг оси. Таким образом, газы и жидкости разделяются под действием центробежных сил.

Отделенная жидкость поступает на первую ступень насоса и готова к дальнейшему движению в системе. Газ, напротив, попадает в кольцевое пространство, где давление падает и способствует дальнейшей рециркуляции.

Работа погружного электрического насоса основана на преобразовании механической энергии, передаваемой вращающимся валом, в кинетическую энергию

движущейся жидкости. Жидкость, поступающая из пласта, проходит через фильтр, где осуществляется первичная очистка от твердых частиц и примесей. Затем она направляется на лопасти рабочего колеса насоса. При вращении рабочего колеса центробежные силы приводят жидкость в движение, создавая повышенное давление на периферии колеса. При этом в центре колеса образуется область сниженного давления или вакуум. Это различие в давлении позволяет насосу поддерживать непрерывный поток жидкости. Жидкость, перемещаясь от центра к периферии, набирает скорость и напор, что обеспечивает ее перекачку на поверхность. Центробежные силы перемещают жидкость к периферии, создавая повышенное давление, а в центре колеса - вакуум. Эта разница в давлении гарантирует, что насос поддерживает постоянный поток жидкости. Для преобразования кинетической энергии жидкости, выходящей из рабочего колеса ЭЦН, в потенциальную энергию давления используется стационарное направляющее устройство с расширяющимися спиральными каналами. Скорость потока в каналах уменьшается, и часть кинетической энергии жидкости, поступающей в рабочее колесо насоса, преобразуется в потенциальную энергию давления. Устанавливая несколько блоков последовательно, можно достичь требуемого напора.

Некоторыми из основных параметров насоса являются расход  $Q$ , напор  $H$ , потребляемая мощность и КПД. Расход  $Q$  определяет объем перекачиваемой жидкости в единицу времени. Напор  $H$  — это разница в энергии между входом и выходом насоса.

Одной из значительных особенностей погружных электрических насосов (ЭЦН) является отсутствие длинного механического соединения, такого как шток, между приводом и насосом. Это позволяет ЭЦН обладать большей мощностью по сравнению со штанговыми насосами. За счет этого, ЭЦН способен справляться с большими объемами перекачиваемой жидкости и работать на глубинах до 3600 метров.

Таким образом, погружные электрические насосы являются надежными, эффективными и удобными в использовании устройствами, способными обеспечить высокую мощность, глубокую добычу, герметизацию устья скважины и экономичную работу.

### **1.1 Назначение и состав силового канала станции управления установок электроцентробежных насосов**

Силовой канал преобразования энергии системы управления электроцентробежным насосом (СУ УЭЦН) с преобразователем частоты (ПЧ) нужен, чтобы выполнять ряд необходимых функций. Он отвечает за прием электрической энергии от комплектной

промышленной подстанции (КТПН) через воздушную кабельную линию, преобразование переменного входного тока в постоянный и преобразование выпрямленного постоянного напряжения в трехфазное переменное напряжение с регулируемыми параметрами. Силовой канал передает регулируемое по частоте и напряжению трехфазное электрическое напряжение на повышающий трансформатор. Это в свою очередь позволяет поддерживать все необходимые параметры энергии для безостановочной работы установки. Заметим, что силовой канал выполняет не только все функции преобразования энергии, но и управления работой системы. Он позволяет операторам контролировать и изменять необходимые параметры, такие как давление на приеме электроцентробежного насоса, давление в скважине, суточный дебит добычи нефти и ток в электроцентробежном насосе. Силовой канал обеспечивает передачу данных о нефтедобыче по каналам ТМС для более гибкого управления режимами работы системы УЭЦН. Все это позволяет людям получать информацию о процессах добычи нефти и осуществлять программное изменение всех технологических параметров.

Контроллер силового канала СУ, разработанный с учетом передовых технологий, позволяет множеству профессионалов в области автоматизации достичь невероятных высот в эффективности и точности управления. Он предлагает уникальные функциональные возможности, которые делают его незаменимым инструментом в различных промышленных секторах. Электроцентробежные насосы широко используются в нефтедобывающей промышленности для подъема нефти из скважин.

Системы управления электроцентробежными насосами с преобразователями частоты, такие как СУ УЭЦН, позволяют увеличить эффективность добычи нефти и снизить затраты на энергию. Они также обеспечивают более гибкое и точное управление процессом добычи нефти, что является важным фактором в условиях постоянно меняющейся ситуации на рынке нефти и газа. В целом, силовой канал преобразования энергии системы управления электроцентробежным насосом с преобразователем частоты выполняет важные функции, не только по преобразованию энергии, но и по управлению процессом добычи нефти. Он позволяет повысить эффективность и точность управления, а также обеспечивает более гибкое управление процессом добычи нефти.

Силовая часть СУ УЭЦН основана на применении преобразователя частоты (ПЧ) с двухступенчатой схемой (выпрямитель - инвертор) и промежуточным звеном постоянного тока. Силовой выпрямитель (СВ) выполняет функцию преобразования мощности СКТП (кВА) и переменного напряжения 380 В, 50 Гц, поступающих от источника питания, в выпрямленный ток и напряжение. Промежуточное звено L0C0R0 (фильтр низких частот)

обеспечивает сглаживание пульсаций постоянного тока и напряжения на выходе СВ, обеспечивая стабильность работы системы.

Трехфазный автономный инвертор (АИ). Этот инвертор преобразует постоянное напряжение в переменное квазисинусоидальное напряжение с бесступенчатой регулировкой частоты  $f$  и амплитуды  $U$ . Транзисторные переключатели VT1... VT6 управляются с помощью широтно-импульсной модуляции.

Основной целью этого преобразования является передача эффективной мощности от источника постоянного напряжения к подводному двигателю (ПД). Для этого в качестве промежуточных элементов передачи мощности используются L0C0R0 и сам инвертор АИ. Важно отметить, что реактивная мощность должна передаваться на подводный двигатель во время работы, а кинетическая энергия должна возвращаться на подводный двигатель во время торможения. Активная мощность от СВ передается к ПЭД через промежуточное звено L0C0R0 и АИ, ВФ, ТМПП и ПКЛ. Кроме того, инвертированные диоды VD1... VD6, шунтирующий транзисторный переключатель VT1... VT6, и конденсатор фильтра C0. Когда транзисторный переключатель закрыт, индуктированный ток замыкается через обратный диод на конденсатор фильтра C0, способствуя эффективной циркуляции энергии в системе. Такая схема обеспечивает оптимальное использование энергии и повышает эффективность инвертора.

## **1.2 Анализ основных способов регулирования угловой скорости в узел**

В сборке насоса, газосепаратора и двигателя с гидрозащитой, общая длина может достигать значительных значений, превышающих 25 метров. Это требует учета частоты вращения вала без применения каких-либо преобразователей. При классической частоте тока 50 Гц, синхронная частота вращения составляет 3000 оборотов в минуту. Если же учитывать скольжение, то действительная частота вращения может варьироваться в диапазоне от 2800 до 2950 оборотов в минуту.

Для увеличения подачи и напора в рабочей ступени центробежного насоса, можно применять специальные исполнения погружных двигателей, такие как вентильные, либо использовать частотно-регулируемый привод (ЧРП) на основе короткозамкнутого асинхронного двигателя. Это позволяет регулировать скорость вращения вала насоса и, соответственно, изменять подачу и напор для оптимальной работы системы.

Для эффективного управления работой погружного насоса, используются средства измерения и контроля, включая блок ТМС. С их помощью можно измерять до 30 разных

параметров нескольких скважин и насосной установки кустовой площадки и вычислять до 10 параметров пласта. Это обеспечивает надежную и точную информацию о работе системы, что позволяет контролировать и оптимизировать ее производительность.

Главной целью управления является эффективное функционирование погружного насоса, который играет важную роль в процессе добычи. Для достижения этой цели необходимо реализовать ряд функций, которые включают удаленное управление системой УЭЦН, автоматизацию работы скважины, установку и поддержание заданного уровня забойного давления, обеспечение максимального дебита скважины, предоставление дополнительных функций, таких как определение коэффициента выходного дебита скважины и построение индикаторной диаграммы скважины.

Важно отметить, что оптимальное управление погружным насосом требует использования передовых методов и алгоритмов. Например, применение адаптивных алгоритмов регулирования может обеспечить оптимальную работу скважины в условиях изменяющихся параметров и внешних воздействий.

Основным устройством, требующим управления, является погружной насос. Важно обеспечить следующие функции: дистанционное управление устройством электропривода с частотным регулированием (УЭЦН); автоматизацию и оптимизацию работы скважины; достижение заданного режима работы; установку и поддержание необходимого забойного давления; обеспечение максимального дебита скважины; а также дополнительные сервисные функции, включающие получение коэффициента выходного дебита скважины и получение индикаторной диаграммы скважины. Большинство параметров можно регулировать путем изменения производительности погружного насоса. Гибкое управление насосными установками становится возможным благодаря использованию частотно-регулируемого привода для управления приводным двигателем насосной установки [1].

- Частотно-регулируемый электропривод обеспечивает ряд преимуществ, включая:
- Плавный пуск насоса;
- Длительную работу в заданном диапазоне скорости и нагрузки;
- Возможность реверсирования, торможения и остановки насоса;
- Защиту электрического и механического оборудования от аварийных режимов.

Частотно-регулируемые приводы — это не только устройства, которые эффективно преобразуют электрическую энергию в механическую, но и незаменимые инструменты для управления технологическими процессами. Они широко используются в различных

отраслях промышленности и как часть автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП).

Преимущество частотно-регулируемых приводов заключается в том, что они позволяют регулировать скорость вращения двигателя в широком диапазоне с высокой точностью регулирования скорости и крутящего момента. Это повышает гибкость системы и позволяет адаптировать ее к различным условиям эксплуатации.

При использовании в замкнутых системах управления они обеспечивают точное и стабильное управление процессом. Это приводит к улучшению качества продукции, снижению отклонений и повышению производительности. Использование частотно-регулируемых приводов также имеет важное значение для снижения износа оборудования, уменьшения шума и вибрации и повышения общей надежности системы.

В настоящее время выпуск частотно-регулируемых электроприводов осуществляют десятки различных фирм во многих странах. Например существуют такие компании: «Siemens» (Германия), ABB (Швейцария), «General Electric» (США), «Hitachi» (Япония), «Schneider Electric» (Франция), «Триол» (Россия) и другие.

Частотное управление асинхронными двигателями осуществляется двумя основными методами:

Скалярный (вольт-частотный) метод, основанный на функциональной зависимости между напряжением и частотой статора электродвигателя.

Векторный метод, который позволяет управлять амплитудой и фазой тока, обеспечивая более точное и гибкое управление двигателем.

Эти методы позволяют достичь оптимальной работы электропривода и максимальной производительности системы.

### **1.3 Способы повышения эффективности УЭЦН**

Одной из важных областей применения управляемых электрических центробежных насосов является механизированная добыча нефти. Энергопотребление в этом процессе распределяется на несколько составляющих. Примерно 29% потребляемой электроэнергии теряется в самом насосе, 14% - в погружном асинхронном электродвигателе, 9% - в трансформаторе, станции управления, насосно-компрессорных трубах, а до 15% - в питающем кабеле. Следовательно, только около 33% от общего потребления электроэнергии используется непосредственно для подъема жидкости.



Методы повышения эффективности механизированной добычи нефти в основном направлены на повышение эксплуатационной надежности подводных установок и энергоэффективности процесса. Среди предложений - использование энергоэффективного оборудования с высокими коэффициентами полезного действия, оптимизация выбора скважинного оборудования, внедрение систем энергомониторинга, разработка норм энергоэффективного проектирования, а также внедрение концепций интеллектуальных месторождений и увеличение площади поперечного сечения подводящих кабелей.

Оптимизация энергопотребления и внедрение новейших технологий в данной области играют ключевую роль в повышении производительности и снижении негативного влияния на окружающую среду.

Чтобы увеличить эффективности управляемых электрических центробежных насосов могут быть использованы следующие научные методы:

- Оптимизация конструкции насоса, увеличение его гидравлической эффективности и улучшение пропускной способности системы. Для этого можно использовать математические модели, методы вычислительной гидродинамики и технической оптимизации.
- Разработка алгоритмов управления и контроля процессов работы насосной системы, с использованием методов автоматического управления и оптимизации. Это позволяет регулировать скорость вращения насоса, подачу жидкости и другие параметры в реальном времени, оптимизируя их под текущие условия работы. Применение современных технологий и материалов, таких как нанотехнологии, композитные материалы и др. для улучшения характеристик системы. Это позволяет уменьшить потери энергии и повысить производительность.
- Использование средств контроля и мониторинга, таких как датчики, системы измерения и контроля параметров, которые позволяют в реальном времени получать информацию о работе системы и ее параметрах. Это позволяет оперативно реагировать на изменения условий работы и повышать эффективность системы. Оптимизация процессов технического обслуживания и ремонта системы, с помощью применения методов диагностики и прогнозирования неисправностей. Это позволяет предотвратить сбои в работе и уменьшить время простоя системы.
- Применение этих научных методов позволяет повысить эффективность УЭЦН и улучшить характеристики системы, что в свою очередь способствует повышению производительности добычи нефти и газа.

## 2 РАСЧЕТ И ВЫБОР СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 2.1 Выбор погружного насоса, двигателя, трансформатора

#### 2.1.1 Выбор погружного насоса

Согласно техническому заданию ЭЦН должен обеспечивать: [8]

1. Напор – 1320 м
2. Подачу нефти – 250 м<sup>3</sup>/сут.
3. Частота вращения вала 50 Гц

При плотности нефти –  $\rho=900$  кг/м<sup>3</sup>.

Таблица 2.1 – Каталожные данные ЭЦНМ 5А-250-1400

Рабочий диапазон, $Q$ , м <sup>3</sup> /сут.	Длины тандемных насосных секций, м	Напор $H_{мех}$ , м	Количество ступеней $N$	Скорость вращения $n_{мех}$ , об/мин	Диаметр, мм
195– 300	3+5.5+5.5	1405	315	2910	103

Из таблицы видно, что выбранная установка полностью соответствует техническим требованиям.

По каталогу [8] выбираем ЭЦН типа ЭЦН 5А-250. Каталожные данные выбранного ЭЦН при номинальной частоте питающего напряжения 50 Гц приведены в таблице 2.1. Характеристики насоса представлены на рисунке 2.1, напорная характеристика насоса приводится на рисунке 2.2.

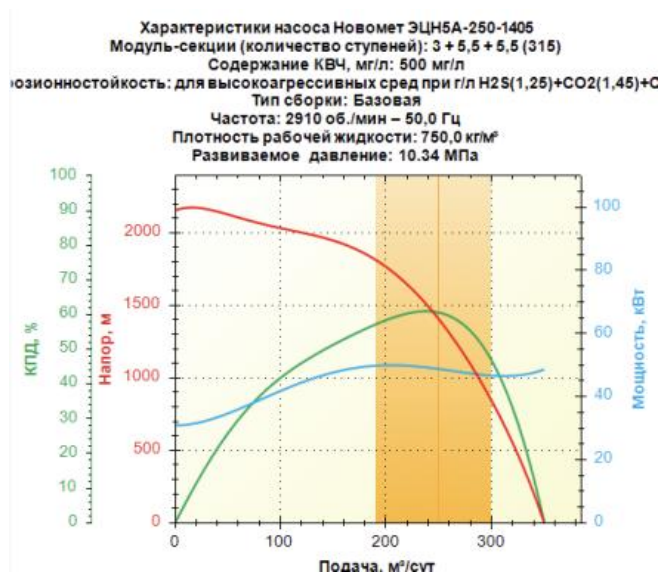


Рис.2.1. Характеристики ЭЦН5А-400-1200(315)

Из рисунка 2.1 видно, что при подаче в  $Q = 250 \text{ м}^3/\text{сут}$ , КПД насоса  $\eta_{\text{мех}} = 61\%$ . Максимальная мощность насоса составляет  $P_m = 48,810 \text{ кВт}$ .

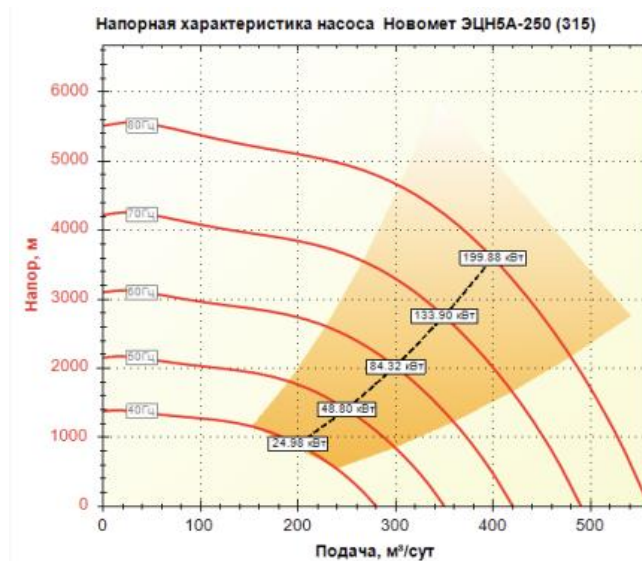


Рис.2.2. Напорная характеристика ЭЦН5А-400

### 2.1.2 Выбор двигателя

Для выбора двигателя необходимо знать расчетную мощность на валу двигателя с учетом запаса, выбранным равным 30 %. [5]

$$P_2 = k_3 \cdot P_{\text{нас}} = 1,3 \cdot 48,810 = 63,4 \text{ кВт}, \quad (1)$$

где  $k_3 = 1,3$  о.е. – коэффициент запаса.

Согласно ГОСТу [2], выбирается односекционный ПЭД типа ПЭДМТ 63-103. Каталожные данные выбранного ПЭД при номинальной частоте питающего напряжения 50 Гц приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Каталожные данные ПЭДМТ 63-103

Номинальная мощность $P_2$ , кВт	Номинальное линейное напряжение $U_n$ , В	Номинальный фазный ток $I_1$ , А	КПД $\eta_{\text{дв}}$ , %	Коэффициент мощности $\cos\varphi$ , о.е.	Номинальное скольжение $s_n$ , %	диаметр, мм
63	1700	33	78	0,83	6,5	103

Определяется расчетная полная потребляемая двигателем мощность:

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot 1700 \cdot 33 = 97,3 \text{ кВт}. \quad (2)$$

Проверка величины номинальной мощности из расчетной полной мощности:

$$P_2 = S_1 \cdot \eta_{дв} \cdot \cos(\varphi) = 97,2 \cdot 0,78 \cdot 0,83 = 62,9 \text{ кВт.} \quad (3)$$

Номинальная мощность, проверенная с помощью формулы, не имеет абсолютную погрешность 0,1 кВт.

В случае, когда известны все характеристики пласта, скважины, свойства жидкости глушения, согласована комплектация УЭЦН (наличие/отсутствие обратного клапана, станции управления с частотно-регулируемым приводом), выяснена потребляемая мощность насоса для данных условий, возможен более корректный подбор погружного электродвигателя.

### 2.1.3 Выбор трансформатора

Относятся к наземному оборудованию УЭЦН. Для уменьшения потерь в КЛ, улучшения условий запуска и технических характеристик ПЭД последние выполняются на рабочие напряжения, значительно превышающие выходное напряжение станции управления. Напряжение ПЭД зависит от их мощности, диаметральных размеров, рода изоляции и других факторов. Каждый типоразмер ПЭД имеет свое номинальное напряжение.

Кроме того, в КЛ имеют место потери напряжения, зависящие от протекающего тока и длины кабельной линии. Поскольку глубина спуска погружного агрегата в скважину, а, следовательно, и длина кабеля колеблется в больших пределах, соответственно будут колебаться и потери напряжения. Промысловые трансформаторы предназначены для повышения напряжения с 0,38 кВ от станции управления до напряжения 0,5– 3,5 кВ необходимого для работы ПЭД с учетом компенсации потерь напряжения в КЛ.

Выбор трансформатора производится из условий, что он должен обеспечивать номинальный режим работы ПЭД. Выбирается трансформатор ТМПН-300/3 [8], в таблицу 2.3 сводятся каталожные данные трансформатора.

Таблица 2.3 – Каталожные данные ТМПН-300/3

Номинальная мощность, кВ-А	Кол-во ступеней регулирования	Номинальное напряжение, В	Напряжения к.з., %	Потери х.х., Вт	Потери к.з., Вт	Выбранная ступень, В (А)
300	50	3819	6,0	650	4800	2021

Рассчитывается мощность, на которую рассчитывается ПЧ:

$$I_{K3} = \frac{P_{K3}}{U_{K3}} = \frac{4800}{6} = 800 \text{ A}, \quad (4)$$

$$\Delta P_{TP} = \frac{(P_{K3} - P_{XX})}{I_{K3}} \cdot I_1 + P_{XX} = \frac{(4800 - 650) \cdot 79,5}{800} + 650 = 1062 \text{ Вт}. \quad (5)$$

Определяется КПД трансформатора с учетом только постоянных потерь:

$$\eta_{TP} = \frac{P_{max} - \Delta P_{TP}}{P_{max}} \cdot 100\% = \frac{300000 - 1062}{300000} \cdot 100\% = 99,65\%. \quad (6)$$

Определяется полная мощность, которую должен передавать трансформатору преобразователь частоты:

$$S_{ПЧ} = \frac{S}{\eta_{TP}} = \frac{274,77}{0,9965} = 275,1 \text{ кВ-А}. \quad (7)$$

Таким образом имеются все данные, чтобы выбрать преобразователь частоты.

## **2.2 Выбор преобразовательного устройства для системы регулируемого электропривода**

Как уже было отмечено, основная область применения СУ – управление и защита погружных ЭЦН добычи нефти, оснащенных ПЭД.

Основными параметрами для выбора СУ и ПЧ являются номинальные мощность, напряжение, ток, частота вращения управляемого двигателя [11].

Станции управления серии «Электон-5» обеспечивают работу электропривода в следующих режимах:

- поддержание выходной частоты;
- поддержание тока ПЭД;
- работа по заданной программе;
- плавный разгон ПЭД с заданным темпом;
- плавное торможение ПЭД;
- режим самозапуска СУ после восстановления питания;
- поддержание заданного параметра (давления, температуры или любого другого по сигналу на аналоговых входах с помощью встроенного ПИД-регулятора) путем автоматического регулирования выходной частоты в зависимости от изменения величины этого параметра.

Силовая часть серийного ряда СУ построена по единой схеме и представляет собой двухступенчатый преобразователь энергии трехфазного тока сети в энергию трехфазного тока с регулируемым напряжением и частотой.

Преобразователь частоты выполнен по схеме управляемый тиристорный выпрямитель-промежуточное LC-звено-ШИМ инвертор на IGBT. Емкость силового фильтра набрана из двух групп конденсаторов, включенных последовательно, чтобы обеспечить необходимый запас по напряжению. Импульсы управления IGBT вырабатываются системой управления и поступают на плату драйверов, где формируются двухполярные мощные сигналы для управления затворами транзисторов. Плата драйверов содержит также элементы гальванических развязок и цепи отслеживания аварийных состояний транзисторов моста АИН. Напряжение на выходе ПЧ формируется как методом ШИМ, так и амплитудно-импульсной модуляции (АИМ) путем изменения уровня напряжения на выходе управляемого выпрямителя.

Модули тиристоров и IGBT в каждом исполнении СУ установлены на алюминиевые охладители, на которых вмонтированы датчики температуры. При достижении предельно допустимого нагрева радиатора сигнал от этих датчиков поступает в систему управления, которая формирует сигнал аварии с выдачей соответствующего сообщения на индикатор пульта управления [6].

По каталогу производителя [7] выбираем СУ Электон-05А ПЧ-ТППТ-250-380-50-УХЛ1. Каталожные данные СУ сведены в таблицу 2.4

Таблица 2.4 – Каталожные данные СУ Электон-05А ПЧ-ТППТ-400-380-50-УХЛ1

Номинальное напряжение, В	Предельно допустимое отклонение напряжения от номинального значения, %	Номинальный ток первичной силовой цепи, А, не более
380 (50±1Гц)	-50...+25	400
Полная выходная мощность, кВА	Температурный диапазон, °С	Диапазон изменения частоты, Гц
250	-60...+40	3,5...80±0,1% (±0,08 Гц)

Для обеспечения функций управления, защит и контроля СУ оснащена датчиками тока и напряжения.

СУ включает в себя контроллер, источник питания контроллера, драйверы управления IGBT и тиристорами силового выпрямителя, блок управления обдувом (обогревом), устройство измерения сопротивления изоляции [6].

### **2.3 Расчет и выбор типа и сечения кабеля для силовой части электропривода**

Кабельные линии предназначены для подачи электроэнергии с поверхности земли (от комплектных устройств и станций управления) к ПЭД.

К ним предъявляются достаточно жесткие требования – малые электрические потери, малые диаметральные габариты, хорошие диэлектрические свойства изоляции, термостойкость к низким и высоким температурам, хорошая сопротивляемость воздействию пластовой жидкости и газа и т.д.

В большинстве популярных электроприводов обычно используются трехфазные мостовые инверторы, благодаря применению быстропереключаемых силовых транзисторов они могут работать с несущими частотами до 200 кГц.

Кабельная линия состоит из основного питающего кабеля (круглого или плоского) и соединенного с ним плоского кабеля удлинителя с муфтой кабельного ввода.

Соединение основного кабеля с кабелем-удлинителем обеспечивается неразъемной соединительной муфтой. С их помощью могут быть соединены также участки основного кабеля для получения требуемой длины.

Кабельная линия на основной длине чаще всего имеет сечение круглое или близкое к треугольному.

Для сокращения диаметра погружного агрегата (кабель-центробежный насос) нижняя часть кабеля имеет плоское сечение.

При выборе кабеля следует определить:

- 1) площадь сечения жилы кабеля;
- 2) тип кабеля;
- 3) длину кабеля.

Выбор площади сечения жилы и типа кабеля обуславливается совместным влиянием факторов: допустимых токовых нагрузок и температуры скважинной среды, параметров

флюида и пространственных ограничений в кольце между НКТ и обсадной трубой. В таблице 2.6 приводятся основные параметры для выбора кабеля [3].

Таблица 2.6 – Параметры для выбора кабеля

Температура в скважине, °С	Номинальный ток $I_1$ , А	Передаваемая мощность, кВт
60	33	63

В УЭЦН применяются специальные марки кабелей КПБК, КПБП и КПОБП с полиэтиленовой изоляцией, имеющие металлическую броню из оцинкованной стальной ленты для защиты кабеля при эксплуатации, подъемах и спусках в скважину.

Для скважин с температурой среды больше 95 °С используются теплостойкие кабели марок КПБПТ, КПОБПТ и КПБПТ (температура среды до 110 °С и 120°С), а также КПБТ, КЭПБТ (до 110°С).

Выбирается марка кабеля КПБК с медными жилами.

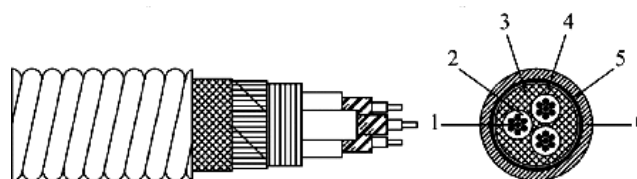


Рис.2.3. Круглый кабель серии КПБК:

1 – медная жила; 2 – резиновая изоляция; 3 – найритовая защитная оболочка; 4 – двухслойная оплетка из лакоткани; 5 – хлопчатобумажная пряжа; 6 – профилированная стальная оцинкованная лента

Сечение жил выбирается таким образом, чтобы они соответствовали минимальным приведенным годовым затратам на эксплуатацию КЛ, которые в существенной степени определяются потерями энергии в линии. Это требование сводится к применению нормативной экономической плотности тока и определению расчетного экономического сечения токопроводящей жилы  $F_1$  по формуле [3]:

$$F_1 = \frac{I_{м.р.}}{j_{эк}} = \frac{33}{2,5} = 13,2 \text{ мм}^2 \quad (8)$$



где,  $I_{м.р.}$  – максимальный расчетный ток в кабельной линии при номинальном режиме работы ПЭД,  $j_{эк} = 2.5 \frac{А}{мм^2}$  – экономическая плотность тока, принимается на основе опыта эксплуатации КЛ.

На рисунке 2.8 приводятся зависимости допустимых токовых нагрузок от температуры скважинной среды.

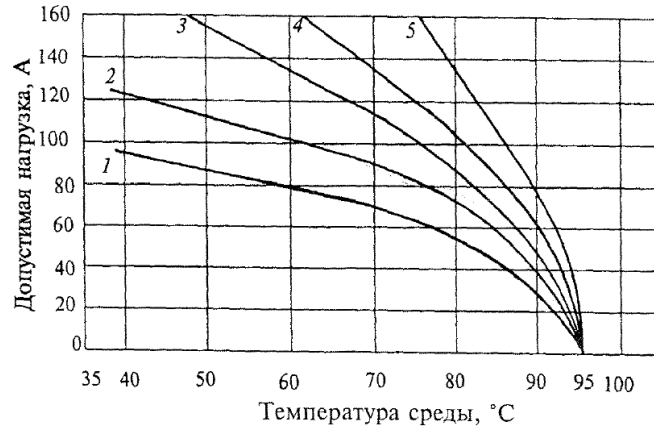


Рис. 2.4 Зависимость допустимых токовых нагрузок кабеля КПБК от температуры скважинной среды. Цифрами обозначены сечения (мм<sup>2</sup>)

1 – 10, 2 – 16, 3 – 35, 5 – 50

Согласно приведенному выше графику, выбирается кабель сечением 10 мм<sup>2</sup>.

Выбирается большее сечение. Согласно каталогу [9] подходит кабель 3x35 ТУ 16.505.129-2002. Каталожные данные данного кабеля приводятся в таблице 2.7 Необходимо произвести расчет потерь мощности и падение напряжения на кабеле, чтобы выбрать трансформатор.

Таблица 2.7 – Каталожные данные КПБК 3x35 ТУ 16.505.129-2002

Рабочее напряжение, В	Наружный диаметр, м	Температурный диапазон окружающей среды, °C	Электрическое сопротивление изоляции, МОм/км, не менее	Длина L, м	Гидростатическое давление, МПа
3,3	38,3	-60...+90	2500	1500	25

Так как проводником в кабеле выступает медь, то удельное сопротивление меди при температуре 70 °C равно:

$$\rho_{70} = \rho(1 + \alpha(70 - 20)) = 0,017 \cdot (1 + 0,0043 \cdot 50) = 0,021 \frac{Ом \cdot мм^2}{м}, \quad (9)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление меди при 20 °С, равное 0,017 Ом·мм<sup>2</sup>/м,

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления меди, равный 0,0043 Ом/м.

Рассчитывается полное сопротивление кабельной линии:

$$R = \frac{\rho_{80} \cdot L}{S} = \frac{0,0214 \cdot 1500}{35} = 0,917 \text{ Ом.} \quad (10)$$

Рассчитывается падение напряжение на кабеле в фазе:

$$\Delta U = I_1 \cdot R = 33 \cdot 0,917 = 30,261 \text{ В.} \quad (11)$$

Рассчитываются потери активной мощности в кабеле:

$$\Delta P = 3 \cdot I_1^2 \cdot R = 3 \cdot 33^2 \cdot 0,917 = 29,95 \text{ кВт.} \quad (12)$$

Рассчитывается полная мощность, потребляемая кабелем:

$$S_K = \frac{\Delta P}{\cos \varphi} = \frac{29,95}{0,83} = 36,09 \text{ кВ-А.} \quad (13)$$

#### 2.4 Проектирование и расчет каналов измерения УЭЦН

УЭЦН (унифицированные элементы ЦН) – это средства измерения давления, которые используются в различных технических системах и устройствах. Каналы измерения УЭЦН проектируются и рассчитываются с учетом особенностей конкретного применения и требований к точности измерения.

Проектирование каналов измерения УЭЦН начинается с определения требований к точности измерения и физических параметров среды, в которой будет производиться измерение давления.

Основными параметрами, которые учитываются при расчете канала измерения УЭЦН, являются гидравлическое сопротивление, скорость потока и диаметр канала. Кроме того, необходимо учитывать физические свойства среды, такие как плотность и вязкость, а также температуру и давление.

Важным аспектом при проектировании и расчете каналов измерения УЭЦН является обеспечение герметичности и прочности канала. Для этого используются специальные материалы и конструктивные решения, которые обеспечивают надежную работу канала в условиях высоких давлений и температур.

Выбираем систему погружной телеметрии «Электрон-ТМС-3-320-103-П5-1-К0» ТУ 4231-005-43174012-2003. Максимальным измеряемым давлением 320 атм, со стыковочным комплектом для ПЭД диаметром 103 мм производства ЗАО «Новомет-Пермь», в базовом

исполнении нижней части погружного блока, с датчиками, соответствующими типу 1, не коррозионностойкого исполнения для установки снаружи корпуса ПЭД.[21]



Рис. 2.5 блок погружной и наземный блок

Система погружной телеметрии "Электон – ТМС – 3" предназначена для регистрации и передачи внешним устройствам текущих значений:

- давление пластовой жидкости на приеме насосной установки;
- температура масла погружного электродвигателя (ПЭД);
- уровень виброускорения ПЭД в радиальном и осевом направлениях;
- температура пластовой жидкости;
- переменное напряжение в точке "0 ТМПН";
- сопротивление изоляции или ток утечки (по выбору) системы "ТМПН

погружной кабель–ПЭД".

Погружной блок рассчитан на подсоединение ко всем серийно выпускаемым ПЭД с диаметром корпуса 103, 117 и 130 мм. Для подключения погружного блока необходимо, чтобы статорная обмотка соединялась в "звезду" в нижней части двигателя.

В комплект поставки системы погружной телеметрии "Электон – ТМС – 3" входит:

- погружной блок "ЭлектонТМСП – 3";
- соединительный узел для подстыковки к ПЭД;
- наземный блок "ЭлектонТМСН – 3".

Телеметрическая информация с погружного блока передается через силовой кабель питания ПЭД, обрабатывается в наземном блоке и передается в контроллер. Данные о контролируемых параметрах хранятся в памяти и индицируются на дисплее наземного блока «Электон – ТМСН – 3Д» или контроллеров СУ серии "Электон", а с помощью программного обеспечения могут просматриваться в табличном и графическом виде на экране монитора компьютера или передаваться в систему телемеханики по интерфейсу RS485 (протокол Modbus).

Наземный блок ТМСН – 3 совместим с погружными блоками ТМСП – 2, ТМСП – 3.

Наземный блок «Электрон – ТМСН – 3Д» дополнительно обладает четырёхстрочным ЖК дисплеем и клавиатурой для просмотра параметров и настройки системы без использования контроллера СУ или переносного компьютера и содержит реле с группой переключаемых контактов, выведенных на разъём внешних подключений. Настройка работы реле осуществляется с помощью меню защит, доступ к которому осуществляется с помощью клавиатуры и дисплея, или с помощью компьютера.

Активация реле может происходить по любому измеряемому параметру, как по одному, так и по нескольким. Данную функцию можно использовать в СУ, контроллер которых не имеет интерфейсов RS 485 (RS232) или аналоговых входов, а также для систем телемеханики. Сертификат соответствия РОСС RU.AB57.H01173 [22]

Каталожные данные системы ТМС представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Каталожные данные системы погружной телеметрии ИРЗ ТМС.

Напряжение питания, В		Время обновления телеметрической информации, с		Диапазон рабочих температур, °С	
				блока погружного	наземного блока
160...300		20 (опционально, раз в 5 с – давление на приеме, остальные параметры – раз в 30)		-60...+60	0...+150 (опционально до +180)
Диапазон измерения температур, °С				Диапазон измерения давления, кгс/см <sup>2</sup>	Разрешение измерения давления, кгс/см <sup>2</sup>
статорной обмотки ПЭД	масла ПЭД	пластовой жидкости			
0...+200	0...+200	0...+150		0...600	0,01
Погрешность измерения, %			Диапазон измерения виброускорений ПЭД, g		Интерфейсы для связи с КСУ RS-232, RS-285
0,5			0...5		

Расчет канала измерения тока статора ПЭД производится согласно схеме, приведенной на рисунке 2.10. На рисунке 2.13 приводятся передаточные функции системы.

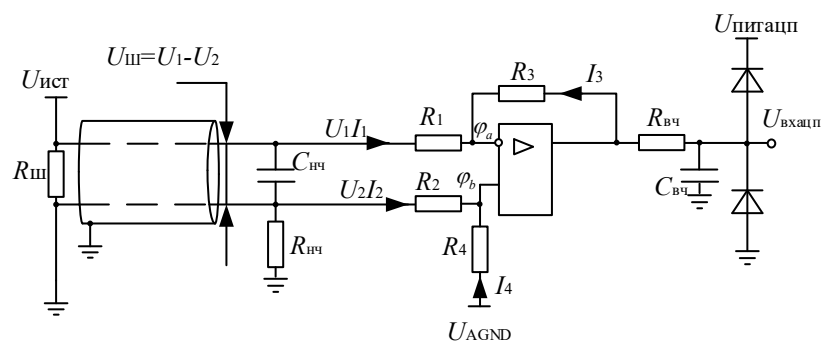


Рис. 2.6 Схема канала обратной связи по току

Для проектирования канала обратной связи по току, необходимо знать следующие данные:

$I_{ш\max}$  – максимально допустимый ток шунта, А;

$U_{ш\max}$  – максимальное напряжение шунта, при максимально допустимом токе, В;

$I_{дв\max}$  – максимальный фазный ток двигателя, А;

$U_{ос\max}$  – максимальное напряжение, которое может измерить устройство обратной связи, максимальное напряжение на входе АЦП.

$U_{ос\min}$  – минимальное напряжение, которое может измерить устройство обратной связи, максимальное напряжение на входе АЦП.

$U_{питаци}$  – напряжение питания АЦП.

$U_{GND}$  – напряжение измерительной нейтрали АЦП.

$n_{аци}$  – разрядность АЦП.

$N_{аци} = 2^{n_{аци}}$  – количество дискретных уровней АЦП.

На рисунке 2.11 приводится зависимость входного напряжения АЦП от времени. Максимальное входное напряжение АЦП должно соответствовать уровню дискретизации  $N_{аци} - 1$ . Минимальное входное напряжение АЦП должно соответствовать уровню дискретизации 1. Таким образом формулы для  $U_{ос\max}$  и  $U_{ос\min}$  выглядят следующим образом.

$$U_{ос\max} = U_{питаци} - \frac{U_{питаци}}{N_{аци}},$$

$$U_{\text{осmin}} = \frac{U_{\text{питацп}}}{N_{\text{ацп}}}$$

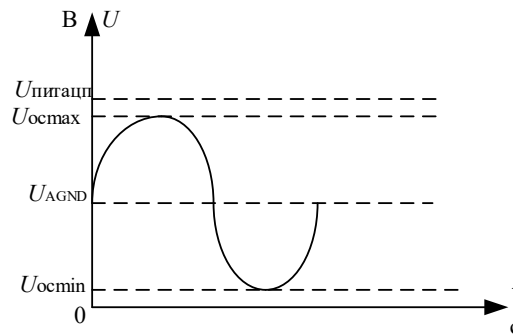


Рис. 2.7 Зависимость входного напряжения АЦП от времени

На рисунке 2.12 приводится зависимость выходного напряжения ОУ от входного напряжения. Как видно, организованно смещение нуля, чтобы сохранить отрицательную полуволну.

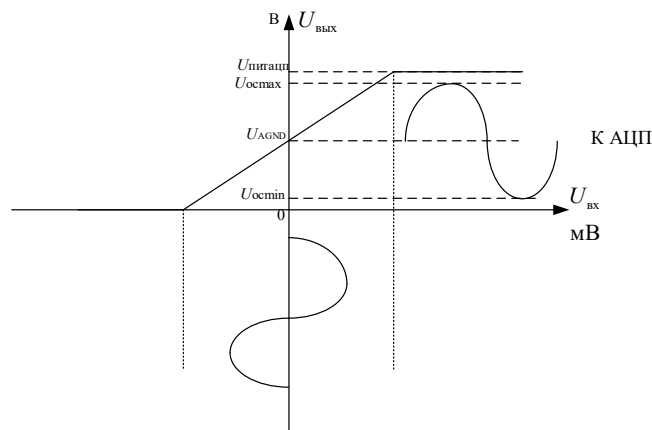


Рис. 2.8 Зависимость выходного напряжения ОУ от входного

Следует определить значение напряжения измерительной нейтрали АЦП, как среднего между минимальным и максимальным входным напряжением АЦП.

$$U_{\text{GND}} = \frac{U_{\text{осmax}} + U_{\text{осmin}}}{2} = \frac{U_{\text{питацп}} - \frac{U_{\text{питацп}}}{N_{\text{ацп}}} + \frac{U_{\text{питацп}}}{N_{\text{ацп}}}}{2} = \frac{U_{\text{питацп}}}{2}$$

Определяется диапазон измерения АЦП:

$$D = \frac{U_{\text{осmax}}}{U_{\text{осmin}}} = \frac{U_{\text{питацп}} - \frac{U_{\text{питацп}}}{N_{\text{ацп}}}}{\frac{U_{\text{питацп}}}{N_{\text{ацп}}}} = N_{\text{ацп}} - 1.$$

Теперь можно рассчитать усилитель, позволяющий согласовать источник сигнала и приемник (АЦП).

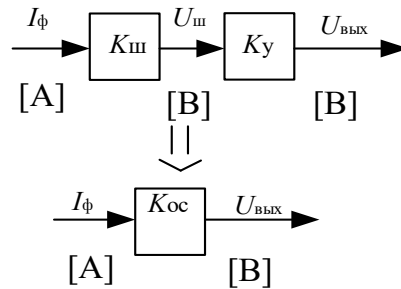


Рис. 2.9 Передаточные функции системы

По рисунку 2.13 рассчитывается полный коэффициент передачи системы:

$$K_{ос} = \frac{U_{осmax}}{I_{дватx}}$$

Рассчитывается коэффициент передачи шунта по формуле:

$$K_{ш} = \frac{U_{шxmax}}{I_{шатx}}$$

Рассчитывается коэффициент передачи каскада усиления, согласно передаточной функции на рисунке 2.13.

$$K_{у} = \frac{K_{ос}}{K_{ш}} = \frac{U_{осxmax} \cdot I_{шатx}}{U_{шxmax} \cdot I_{дватx}}$$

Подбирая сопротивления \$R\_1, R\_2, R\_3, R\_4\$, можно добиться нужного коэффициента усиления операционного усилителя и компенсировать синфазную помеху. Ниже приводится методика расчета балансирующих сопротивлений операционного усилителя.

По рисунку 2.9 записываются уравнения закону Кирхгофа для токов в узлах \$\varphi\_a\$ и \$\varphi\_b\$:

$$I_2 = I_4;$$

$$I_1 = I_3;$$

Записываются уравнения по закону Кирхгофа для напряжений в разомкнутом контуре:

$$\frac{U_1 - \varphi_a}{R_1} = I_1;$$

$$\frac{\varphi_a - U_{\text{ВЫХ}}}{R_3} = I_3;$$

$$\frac{U_2 - \varphi_b}{R_2} = I_2;$$

$$\frac{\varphi_b}{R_4} = I_4.$$

Преобразуя данные уравнения, получается следующее уравнение с учетом закона Кирхгофа для токов:

$$\frac{\varphi_a - U_{\text{ВЫХ}}}{R_3} = \frac{U_1 - \varphi_a}{R_1};$$

$$\frac{U_2 - \varphi_b}{R_2} = \frac{\varphi_b}{R_4}.$$

Данные уравнения преобразуются с учетом  $\varphi_a = \varphi_b$ :

$$\varphi_a = \frac{U_1 R_3 + U_{\text{ВЫХ}} R_1}{R_1 + R_3};$$

$$\varphi_b = \frac{U_2 R_4}{R_4 + R_2};$$

$$\frac{U_1 R_3 + U_{\text{ВЫХ}} R_1}{R_1 + R_3} = \frac{U_2 R_4}{R_4 + R_2}.$$

Выражается  $U_{\text{ВЫХ}}$ :

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_2 R_4 \cdot (R_1 + R_3)}{(R_4 + R_2) R_1} - \frac{U_1 R_3}{R_1};$$

Выражается  $U_1$  через  $U_2$ , а  $U_2$  принимается синфазной помехой:

$$U_c = U_2;$$

$$U_1 = U_2 + U_{\text{ш}} = U_c + U_{\text{ш}}.$$

Уравнение для  $U_{\text{ВЫХ}}$  примет вид:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_c R_4 \cdot (R_1 + R_3)}{(R_4 + R_2) R_1} - \frac{(U_c + U_{\text{ш}}) R_3}{R_1};$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_c (R_4 R_1 - R_2 R_3)}{(R_4 + R_2) R_1} - \frac{U_{\text{ш}} R_3}{R_1}.$$



Теперь можно выразить коэффициент усиления дифференциального и синфазного сигнала:

$$K_y = -\frac{R_3}{R_1};$$

$$K_{ycc} = \frac{(R_4 R_1 - R_2 R_3)}{(R_4 + R_2) R_1}.$$

Сопротивления выбираются так, чтобы обеспечить  $K_y$  и сделать  $K_{ycc}$  как можно меньше, в идеальном случае, равным нулю.

Канал обратной связи должен иметь гальваническую развязку, чтобы защитить логические микросхемы от больших токов и напряжений силовой цепи, от кондуктивных помех, и требования к этой гальванической развязке очень жесткие, потому что информацию нужно передавать точно. Чаще всего гальванические развязки используют трансформаторные и оптические. Высокочастотные трансформаторы дорогие, поэтому оптические развязки в логических устройствах использовать рациональнее. Хорошим примером является микросхема HCPL-788J (HCPL-7840) [11] Схема подключения данной микросхемы для измерения тока фаз трехфазного двигателя и согласования напряжения с шунта с АЦП приводится на рисунке 2.14.

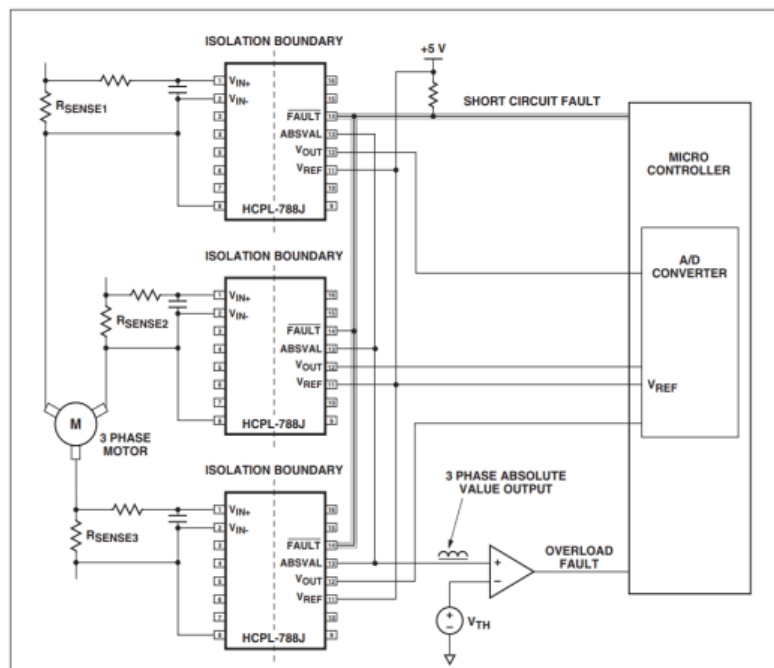


Рис. 2.10 Схема подключения HCPL-788J

Как видно, микросхема обеспечивает гальваническую развязку с помощью оптической связи. Но оптопара может передавать только дискретный сигнал, поэтому перед оптической

развязкой сигнал происходит сигма-дельта модуляция, а после гальванической развязки – демодуляция.

Для рассмотрения работы сигма-дельта модуляции приводится структурная схема на рисунке 2.10 и временная диаграмма на рисунке 2.11 [12]:

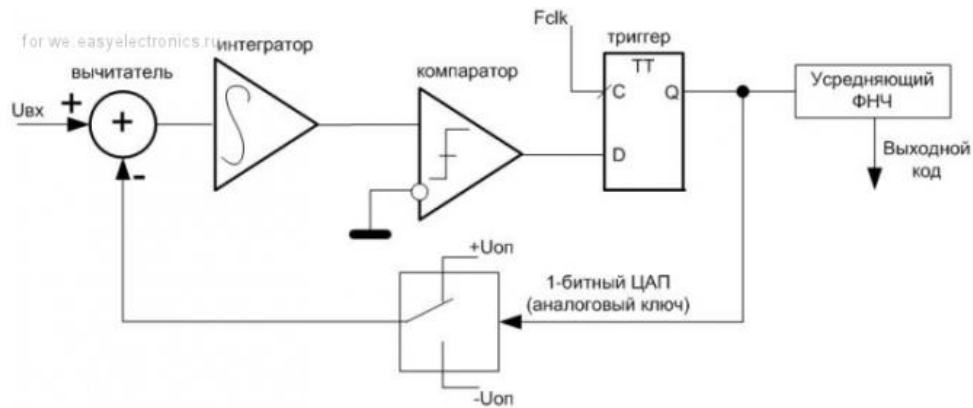


Рис. 2.11 Схема сигма-дельта модулятора

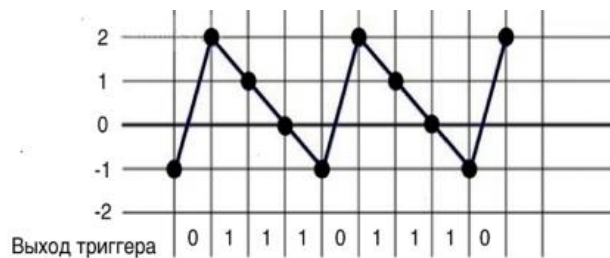


Рис. 2.12 Временная диаграмма сигма-дельта модулятора

На вход интегратора подается разность входного и опорного сигнала, и пока напряжение на интеграторе меньше, чем задание компаратора, на выходе модулятора будет 0, и на сумматор подается  $-U_{оп}$ , как только напряжение интегратора стало больше напряжения сравнения компаратора на выходе 1 и к обратной связи подключается напряжение  $+U_{оп}$ , таким образом на выходе модулятора появляется последовательность бит (логических нулей и единиц), содержащих информацию об уровне входного сигнала. Стоит отметить, что на вход может подаваться сигнал в пределах от  $-U_{оп}$  до  $+U_{оп}$ .

Для передачи сигнала от СУ к ключам инвертора используется микросхема HCPL-316J с оптической гальванической развязкой [13]. Данная микросхема способна обеспечить вольтодобавку, чтобы полностью открыть ключ. Требования к данной гальванической развязке не такие жесткие как к развязке датчиков, потому что нужно передавать не дискретный сигнал.

## **2.5 Выбор аппаратуры управления и защиты**

При выборе преобразовательного устройства для системы регулируемого электропривода было отмечено, что СУ Электон-05А ПЧ-ТТПТ-63-380-50-УХЛ1 также выступает в качестве средства управления и защиты. СУ Электон-05А ПЧ-ТТПТ-63-380-50-УХЛ1 имеет следующие виды защит:

- защита от «сухого хода»;
- защита от перегрузки ПЭД;
- защита от КЗ;
- защита от недогрузки ПЭД;
- контроль коэффициента мощности;
- защита от перенапряжения во входной сети;
- защита от дисбаланса токов;
- контроль изоляции кабеля «трансформатор-погружной кабель-ПЭД».

Так как ПЭД могут эксплуатироваться в самых разнообразных условиях, необходимо применять специализированные устройства для их защиты [24].

Одним из устройств является гидрозащита. Обеспечение защиты ПЭД от проникновения пластовой жидкости, а также компенсации утечки воды, тепловых расширений в процессе работы – главные задачи гидрозащиты. В качестве основных элементов гидрозащиты являются газосепаратор, компенсатор и протектор.

## **2.6 Проектирование защиты от обрыва и перекоса фазы**

Проектирование защиты и обрыва перекоса фаз является важной задачей при разработке систем электропитания, которые используются в промышленности и других отраслях. Перекос фазы может возникнуть в системе электропитания при нарушении баланса фаз в трехфазной сети. Это может привести к перегрузкам, повреждению оборудования, пожару и другим негативным последствиям. Обрыв фазы также может привести к серьезным последствиям, таким как перегрузки и повреждение оборудования, поэтому необходимо предусмотреть меры защиты от обрыва фазы. Для предотвращения этих проблем необходимо использовать специальные защитные устройства. Такие устройства могут быть реализованы как часть системы управления, а также в виде отдельных блоков.

Защитное устройство, изображенное на рисунке 2.10, основано на принципе создания искусственной нулевой точки, образованной тремя одинаковыми конденсаторами С1-С3. Между этой точкой и нулевым проводом N включено дополнительное реле Р с нормально замкнутыми контактами. При нормальной работе электродвигателя напряжение в проводе N равно нулю и ток через обмотку реле не протекает.

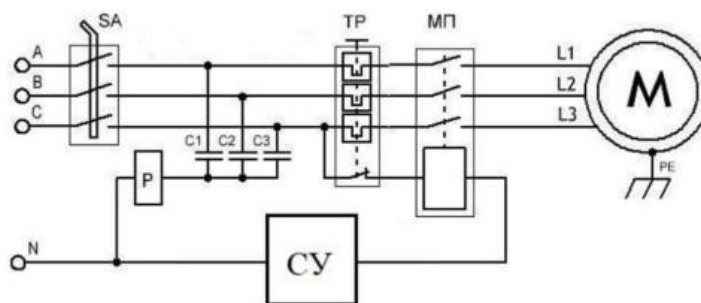


Рис. 2.13 Устройство защиты асинхронного двигателя от обрыва и перекоса фаз

При отключении одного из линейных проводов сети нарушается электрическая симметрия трехфазной системы, в проводе N появляется напряжение, реле Р срабатывает и своими контактами обесточивает обмотку магнитного пускателя (МП) – асинхронный двигатель М отключается.

Это устройство обеспечивает высокую надежность. В качестве реле Р может использоваться реле типа МКУ. Конденсаторы С1-С3 – бумажные, емкостью 10 мкФ, на рабочее напряжение не ниже удвоенного фазного.

Чувствительность устройства очень высока. Двигатель может отключиться в результате нарушения электрической симметрии, вызванной подключением сторонних однофазных потребителей, питающихся от этой сети. Чувствительность можно снизить, применив конденсаторы с большей емкостью.

## 2.7 Обоснование и выбор синус фильтра

Синусные фильтры — это компоненты электропривода, которые используются для фильтрации высокочастотных помех, которые могут возникать в результате работы частотных преобразователей. Система управления Электрон-05А ПЧ-ТТПТ-63-380-50-УХЛ1 может быть оснащена синусными фильтрами, которые обеспечивают более чистый сигнал на выходе частотного преобразователя, что позволяет уменьшить уровень электромагнитных помех и обеспечить более надежную работу электропривода. Применение синусных фильтров в системе управления Электрон-05А ПЧ-ТТПТ-63-380-50-УХЛ1 может помочь увеличить срок службы электропривода, снизить уровень шума и вибрации, а также улучшить качество работы оборудования в целом. Однако, необходимо

учитывать требования конкретного применения и рекомендации производителя для определения необходимости и типа синусного фильтра для конкретной системы управления и привода.

Примером синусоидального фильтра является LC-фильтр нижних частот, сглаживающие формы сигналов выходного напряжения инвертора, что позволяет формировать токи двигателя и формы сигналов напряжения с формой, близкой к синусоидальному. Наиболее популярная топология синусоидального фильтра состоит из катушек индуктивности и соединенных звездой конденсаторов, как показано на рисунке 2.5.

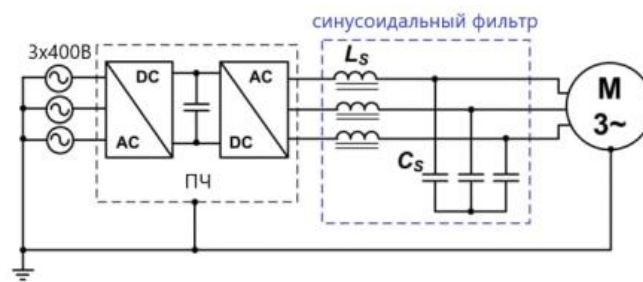


Рис. 2.14 Электропривод с синусоидальным фильтром

### 3 Статические характеристики погружного двигателя

#### 3.1 Определение параметров схемы замещения погружного двигателя

Основные каталожные данные двигателя ПЭДМТ 63-103 были приведены в таблице 2.2. Для выполнения расчета параметров схемы замещения по методике, изложенной в [6], необходимо дополнить каталожные данные до расчетных данных (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Расчетные данные ПЭДС63-103

Р2, кВт	Uл, В	I1, А	ηдв, %	cosφ, о.е.	сн, %	zр	f, Гц	K1	KМК	KМП
63	1700	33	78	0,83	6,5	2	50	6,5	2,2	1,2

Для аналитических расчетов Т-образная схема замещения асинхронного двигателя является самой простой и наиболее оптимальной (рисунок 3.1).

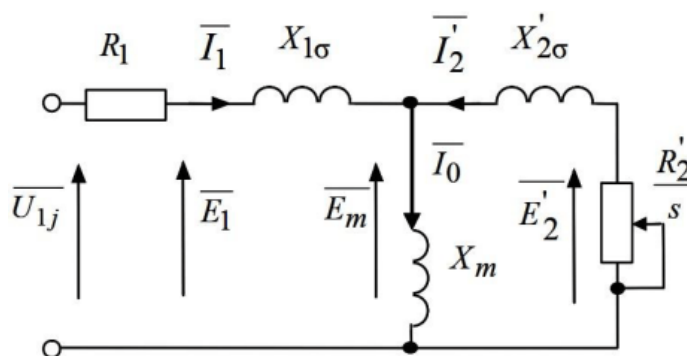


Рис. 3.1 Схема замещения асинхронного двигателя

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующей представленной схеме замещения:

$$\begin{cases} \bar{U}_{1\phi} - \bar{E}_m - jX_{1\sigma}\bar{I}_1 - R_1\bar{I}_1 = 0, \\ \bar{E}_m + jX'_{2\sigma}\bar{I}'_2 + R'_2\bar{I}'_2/s = 0, \\ \bar{I}_1 + \bar{I}'_2 - \bar{I}_0 = 0, \end{cases}$$

где  $U_{1\phi} = U_{л}/\sqrt{3} = 1700/\sqrt{3} = 981,5$  В – фазное напряжение обмотки статора;

$R_1$  – активное сопротивление обмотки статора;

$X_{1\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;

$I_1 = 33,049$  А – ток обмотки статора;

$E_1$  – ЭДС обмотки статора;

$R_2'$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;

$X_{2\sigma}'$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;

$s$  – скольжение;

$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 / z_p$  – синхронная угловая скорость;

$\omega$  – угловая скорость асинхронного двигателя;

$z_p$  – число полюсов;

$f_1$  – значение частоты напряжения переменного тока, подводимого к обмотке статора;

$E_m$  – ЭДС от главного магнитного потока машины;

$E_2'$  – ЭДС обмотки ротора, приведенная к обмотке статора.

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений, соответствующая приведенной системе уравнений, приведена на рисунке 3.2.

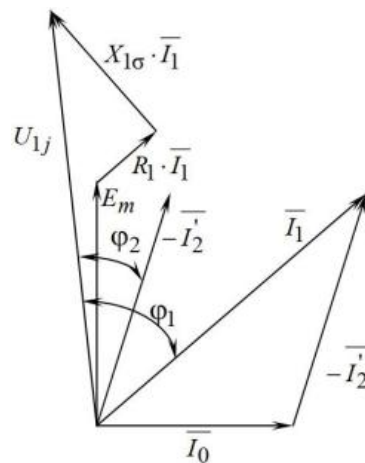


Рис. 3.2 Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Определим дополнительные параметры АД по каталожным данным.

Синхронная угловая частота вращения вала:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 3000}{30} = 314,159 \text{ рад/с.} \quad (14)$$

Номинальная угловая частота вращения вала:

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - s_H) = 314,159 \cdot (1 - 0,065) = 293,74 \text{ рад/с.} \quad (15)$$

Номинальный момент на валу:

$$M_H = \frac{P_{2H}}{\omega_H} = \frac{63000}{293,74} = 214,476 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (16)$$

КПД при частичной нагрузке:

$$\eta_{0,75} = \eta_H = 0,78 \text{ о.е.} \quad (17)$$

Коэффициент мощности при частичной нагрузке, согласно графику зависимости  $\frac{\cos \varphi_{0,75}}{\cos \varphi_H}$  от  $P_{2H}$ :

$$\cos \varphi_{0,75} = 0,99 \cos \varphi_H = 0,99 \cdot 0,83 = 0,822 \text{ о.е.} \quad (18)$$

Ток статора при частичной нагрузке:

$$I_{11} = \frac{0,75 \cdot P_{2H}}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \eta_{0,75} \cdot \cos \varphi_{0,75}} = \frac{0,75 \cdot 63000}{3 \cdot 981,5 \cdot 0,78 \cdot 0,822} = 25,037 \text{ А.} \quad (19)$$

Ток холостого хода АД:

$$I_0 = \frac{I_{11}^2 - \left[ \frac{0,75 \cdot I_{1H} \cdot (1 - s_H)}{(1 - 0,75 \cdot s_H)} \right]^2}{1 - \left[ \frac{0,75 \cdot I_{1H} \cdot (1 - s_H)}{(1 - 0,75 \cdot s_H)} \right]^2} =$$

$$= \frac{25,04^2 - \left[ \frac{0,75 \cdot 33 \cdot (1 - 0,065)}{(1 - 0,75 \cdot 0,065)} \right]^2}{1 - \left[ \frac{0,75 \cdot 33 \cdot (1 - 0,065)}{(1 - 0,75 \cdot 0,065)} \right]^2} = 8,54 \text{ А.} \quad (20)$$

Выберем коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статора и ротора, равным  $\beta=1$ .

Критическое скольжение, выраженное из формулы Клосса:

$$s_K = s_H \cdot \frac{K_{MK} + \sqrt{K_{MK}^2 - [1 - 2 \cdot s_H \beta (K_{MK} - 1)]}}{[1 - 2 \cdot s_H \beta (K_{MK} - 1)]} =$$

$$= 0,065 \cdot \frac{2,2 + \sqrt{2,2^2 - [1 - 2 \cdot 0,065 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1)]}}{[1 - 2 \cdot 0,065 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1)]} = 0,343. \quad (21)$$

Расчет промежуточных коэффициентов для дальнейшего расчета параметров АД:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot K_I I_{1H}} = 1 + \frac{8,5}{2 \cdot 6,5 \cdot 33} = 1,02 \text{ о.е.} \quad (22)$$

$$A_1 = \frac{3U_{1\phi}^2(1-s_H)}{2C_1 \cdot K_{MK} \cdot P_{2H}} = \frac{3 \cdot 981,5^2 \cdot (1 - 0,065)}{2 \cdot 1,02 \cdot 2,2 \cdot 63000} = 9,558. \quad (23)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,343^2} - 1,3} = 2,607. \quad (24)$$

Активное сопротивление ротора, приведенное обмотке статора:

$$R'_2 = \frac{A_1}{(\beta + \frac{1}{s_K}) C_1} = \frac{9,558}{(1 + \frac{1}{0,343}) \cdot 1,02} = 2,22 \text{ Ом.} \quad (25)$$



Активное сопротивление статора:

$$R_1 = C_1 R_2' \beta = 1,02 \cdot 2,22 \cdot 1,3 = 2,95 \text{ Ом.} \quad (26)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_{\text{КН}} = \gamma C_1 R_2' = 2,6 \cdot 1,02 \cdot 2,22 = 5,91 \text{ Ом.} \quad (27)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния ротора, приведенное к обмотке статора:

$$X_{2\sigma}' = 0,58 \frac{X_{\text{КН}}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{5,91}{1,02} = 3,363 \text{ Ом.} \quad (28)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статора:

$$X_{1\sigma} = 0,42 X_{\text{КН}} = 0,42 \cdot 5,91 = 2,484 \text{ Ом.} \quad (29)$$

ЭДС ветви намагничивания в номинальном режиме:

$$E_{\text{мн}} = \sqrt{(U_{1\phi} \cos \varphi_{\text{н}} - R_1 I_{1\text{н}})^2 + (U_{1\phi} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\text{н}}} - X_{1\sigma} I_{1\text{н}})^2} = \\ = \sqrt{(981,5 \cdot 0,83 - 2,95 \cdot 33)^2 + (981,5 \sqrt{1 - 0,83^2} - 2,484 \cdot 33)^2} = 0,854 \cdot 10^3 \text{ В} \quad (30)$$

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания:

$$X_m = \frac{E_{\text{мн}}}{I_0} = \frac{0,854 \cdot 10^3}{8,54} = 100,12 \text{ Ом.} \quad (31)$$

Полученные расчетные параметры схемы замещения двигателя сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Расчетные параметры схемы замещения двигателя

$R_1, \text{Ом}$	$X_{1\sigma}, \text{Ом}$	$X_{\text{КН}}, \text{Ом}$	$R_2', \text{Ом}$	$X_{2\sigma}', \text{Ом}$	$X_m, \text{Ом}$
2,95	4,49	5,91	2,22	3,36	100,12

Параметры схемы замещения будут использованы для построения естественных электромеханической и механической характеристик.

Индуктивность рассеяния статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2\pi f_1} = \frac{4,49}{2\pi \cdot 50} = 7,9 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (32)$$

Индуктивность рассеяния ротора, приведенная к обмотке статора:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2\pi f_1} = \frac{3,36}{2\pi \cdot 50} = 11 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (33)$$

Индуктивность ветви намагничивания:

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f_1} = \frac{100,12}{2\pi \cdot 50} = 0,319 \text{ Гн.} \quad (34)$$

Эквивалентная индуктивность цепи статора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0,319 + 7,9 \cdot 10^{-3} = 0,327 \text{ Гн.} \quad (35)$$

Эквивалентная индуктивность цепи ротора, приведенная к индуктивности статора:

$$L'_2 = L_m + L'_{2\sigma} = 0,319 + 11 \cdot 10^{-3} = 0,329 \text{ Гн.} \quad (36)$$

Коэффициенты для расчета динамики АД:

$$K_r = \frac{L_m}{L'_2} = \frac{0,319}{0,329} = 0,968 \text{ о.е.} \quad (37)$$

$$A_r = \frac{R'_2}{L'_2} = \frac{2,22}{0,329} = 6,753 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}. \quad (38)$$

$$L_3 = L_1 - \frac{L_m^2}{L'_2} = 0,319 - \frac{0,319^2}{0,329} = 0,018 \text{ Гн.} \quad (39)$$

$$R_3 = R_1 + R'_2 \cdot K_r^2 = 2,95 - 2,22 \cdot 0,968^2 = 5,032 \text{ Ом.} \quad (40)$$

$$K_m = \frac{3}{2} K_r \cdot z_p = \frac{3}{2} \cdot 0,968 \cdot 2 = 2,903 \text{ о.е.} \quad (41)$$

Полученные параметры индуктивностей и коэффициентов будут использоваться для расчетов динамики.

### 3.2 Расчет естественных характеристик $\omega = f(I)$ и $\omega = f(M)$

Естественные характеристики двигателя рассчитываются для того, чтобы сравнить, насколько совпали основные характерные для электродвигателя точки расчетных характеристик с характеристиками двигателя, найденными по справочным техническим данным выбранного электродвигателя [2][6]. Все дальнейшие расчеты и построение характеристик производится средствами системы компьютерной математики Mathcad.

Зададимся величиной скольжения  $s=0\dots 1$  для построения характеристик, соответствующих двигательному режиму.

Расчет естественной механической характеристики (МХ) АД для номинальной частоты  $f_{1н}=50$  Гц производится по выражению:

$$M(s) = \frac{3U_{1\phi}^2 R_2'}{\omega_0 s \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right) + X_{кн}^2 \right]}$$

При этом угловая частоты вращения определяется данным выражением:

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

Определим величины номинального и критического моментов и угловой частоты вращения при критическом моменте:

$$M_H = \frac{3U_{1\phi}^2 R_2'}{\omega_0 s_H \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s_H} \right) + X_{кн}^2 \right]} = 214,476 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (42)$$

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2}{\omega_0 \cdot 2 \cdot \left[ R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{кн}^2) \cdot \left( 1 + \frac{R_1}{X_{\mu}} \right)^2} \right]} = 471,619 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (43)$$

$$\omega_K(s) = \omega_0(1 - s_K) = 239,39 \text{ рад/с}. \quad (44)$$

Для построения искусственных характеристик необходимо построить вольт-частотную характеристику (рис. 3.3) чтобы вычислить значение напряжения  $U_{1j}$  при любой частоте.

Коэффициент пропорциональности для заданного закона регулирования:

$$K = \frac{U_{1н}}{f_{1н}^2} = \frac{981,5}{50^2} = 0,393 \text{ о. е.} \quad (45)$$

Вольт-частотная характеристика тогда примет вид:

$$U(f) = K \cdot f^2.$$

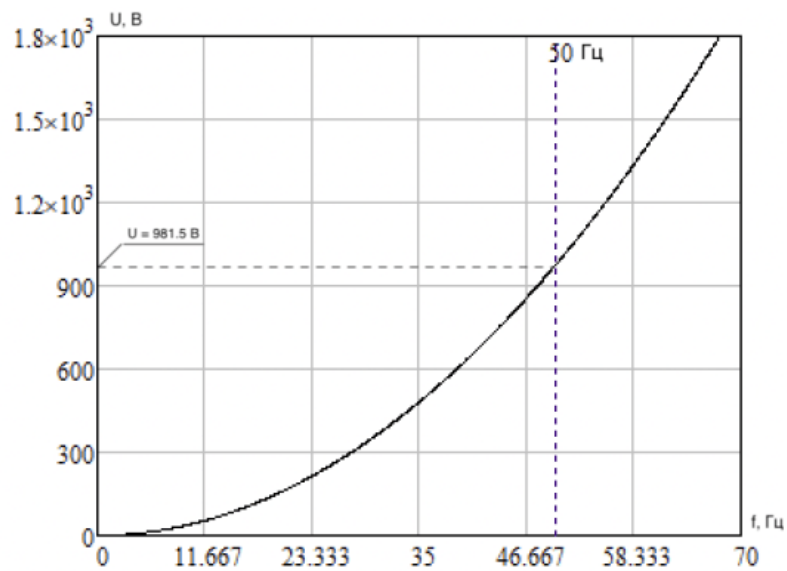


Рис. 3.3 Вольт-частотная характеристика при законе  $\frac{U_1}{f_1^2} = const$

Расчет естественных электромеханических характеристик (ЭМХ) АД производится по выражениям:

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + X_{KH}^2}},$$

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

где  $\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + X_{KH}^2}}$  — синус угла между вектором фазного напряжения статора

и сопряженным вектором тока ротора.

Естественная МХ изображена на рисунке 3.3.

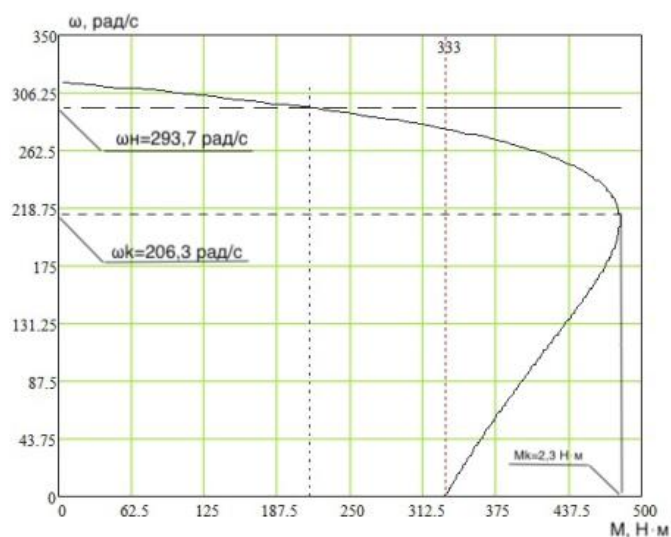


Рис. 3.4 Естественная механическая характеристика двигателя

Определим величины номинальных и пусковых токов:

$$I'_{2H} = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R'_2}{s_H})^2 + X_{KH}^2}} = 33,049 \text{ A}, \quad (46)$$

$$I'_{2П} = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R'_2}{1})^2 + X_{KH}^2}} = 124,9 \text{ A}, \quad (47)$$

$$I_{1H} = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s_H) + 2I_0I_2'(s_H) \sin \varphi_2(s_H)} = 28,67 \text{ A}, \quad (48)$$

$$I_{1П} = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(1) + 2I_0I_2'(1) \sin \varphi_2(1)} = 131,423 \text{ A}. \quad (49)$$

Естественные ЭМХ изображены на рисунках 3.5 для ротора и 3.6 для статора.

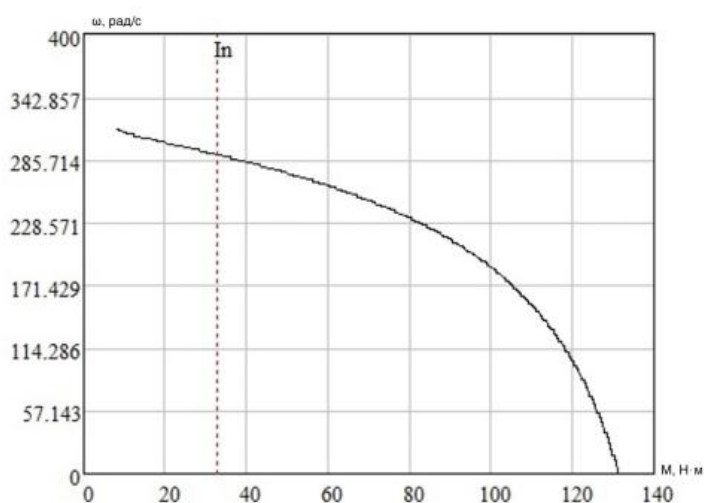


Рис. 3.5 Естественная электромеханическая характеристика тока ротора

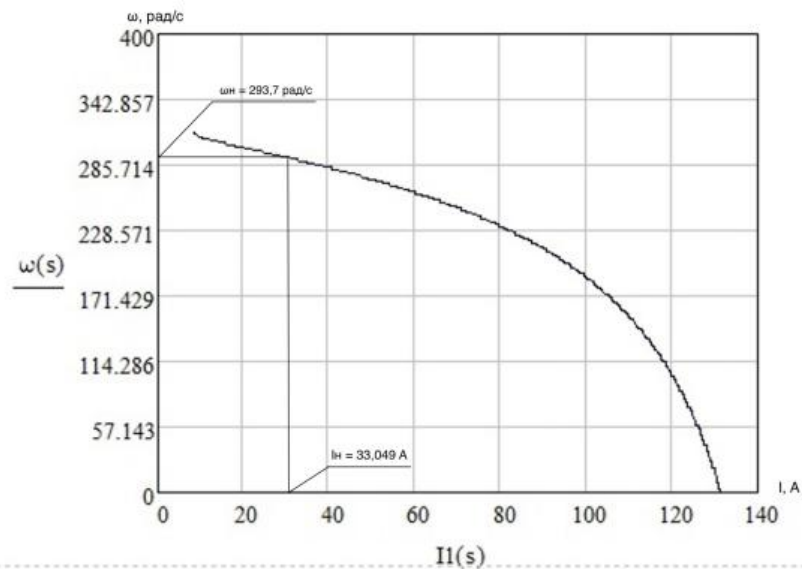


Рис. 3.6 Естественная электромеханическая характеристика тока статора

Предельные характеристики обобщенной системы преобразователь-двигатель ограничивают область работы электропривода максимально достижимой или допустимой скоростью с одной стороны, а с другой – длительно или кратковременно допустимыми значениями токов или моментов электропривода. Предельными характеристиками разомкнутой системы ПЧ-АД являются естественные механическая и электромеханические характеристики приводного двигателя [14].

### 3.3 Расчет искусственных характеристик $\omega = f(I)$ и $\omega = f(M)$ при частотном управлении

Искусственные статические характеристики системы ПЧ-АД будут рассчитываться при законе регулирования  $\frac{U}{f^2} = const$ . Потому что насосная нагрузка подразумевает увеличение момента сопротивления с ростом частоты вращения вала. Характеристики разомкнутой системы ПЧ-АД при выбранном законе регулирования будут построены для ряда выбранных значений выходной частоты инвертора, соответствующему диапазону регулирования скорости  $D=1:10$  [6]. МХ и ЭМХ определяются по формулам:

$$M(s, f_1) = \frac{3[U_{1\phi}(f_1)]^2 R_2'}{\omega_0 \frac{f_1}{f_{1H}} s \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( X_{KH} \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left( \frac{R_1 R_2'}{s \cdot X_m \frac{f_1}{f_{1H}}} \right)^2 \right]}$$

$$I_2'(s, f_1) = \frac{U_{1\phi}(f_1)}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( X_{KH} \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left( \frac{R_1 R_2'}{s \cdot X_m \frac{f_1}{f_{1H}}} \right)^2}}$$

$$I_0(s, f_1) = \frac{U_{1\phi}(f_1)}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_m)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}},$$

$$I_1(s, f_1) = \sqrt{I_0^2(f_1) + I_2'^2(s, f_1) + 2I_0(f_1) \cdot I_2'^2(s, f_1) \cdot \sin \varphi_2(s, f_1)},$$

$$U_{1\phi}(f_1) = U_{1\phi} \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2;$$

$$\sin \varphi_2(s, f_1) = \frac{X_{KH} \frac{f_1}{f_{1H}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_{KH} \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}};$$

При этом угловая частоты вращения определяется следующим выражением:

$$\omega(s, f_1) = \omega_0 \frac{f_1}{f_{1H}} (1 - s).$$

Расчет характеристик производится в интервале от 5 до 50 Гц (D=1:10) по значениям 50, 40, 30, 20, 10, 5 Гц.

Фазные напряжения статора АД при частотном регулировании:

$$U_{1\phi}(f_1 = 50 \text{ Гц}) = 981,49 \text{ В},$$

$$U_{1\phi}(f_1 = 40 \text{ Гц}) = 628,16 \text{ В},$$

$$U_{1\phi}(f_1 = 30 \text{ Гц}) = 353,34 \text{ В},$$

$$U_{1\phi}(f_1 = 20 \text{ Гц}) = 157,04 \text{ В},$$

$$U_{1\phi}(f_1 = 10 \text{ Гц}) = 39,26 \text{ В},$$

$$U_{1\phi}(f_1 = 5 \text{ Гц}) = 9,815 \text{ В}.$$

Скорости холостого хода АД при частотном регулировании:

$$\omega_0(f_1 = 50 \text{ Гц}) = 314 \text{ рад/с},$$

$$\omega_0(f_1 = 40 \text{ Гц}) = 251,3 \text{ рад/с},$$

$$\omega_0(f_1 = 30 \text{ Гц}) = 188,5 \text{ рад/с},$$

$$\omega_0(f_1 = 20 \text{ Гц}) = 125,7 \text{ рад/с},$$

$$\omega_0(f_1 = 10 \text{ Гц}) = 62,8 \text{ рад/с},$$

$$\omega_0(f_1 = 5 \text{ Гц}) = 31,4 \text{ рад/с}.$$

Искусственные МХ и ЭМХ представлены на рисунках 3.7-3.9.

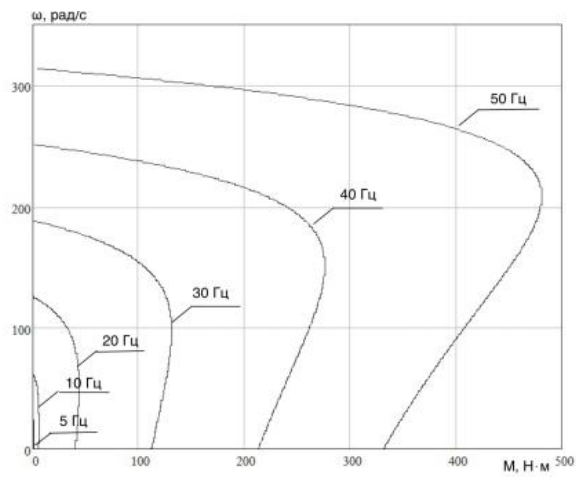


Рис. 3.7 Искусственные механические характеристики двигателя при частотном регулировании

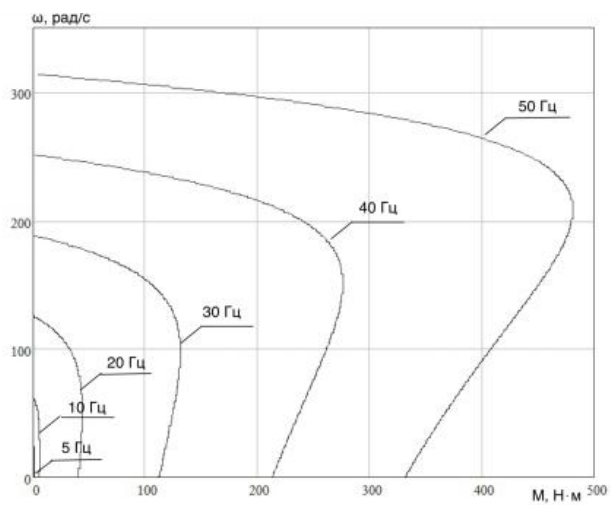


Рис. 3.8 Искусственные электромеханические характеристики тока ротора при частотном регулировании

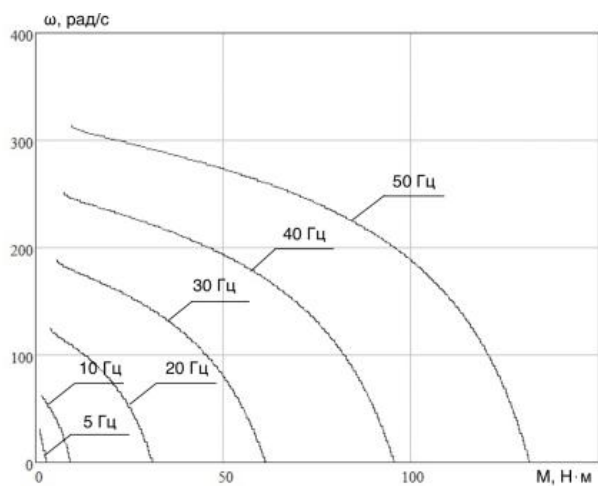


Рис. 3.9 Искусственные электромеханические характеристики тока статора при частотном регулировании



Как видно из полученных искусственных механических характеристик, пусковой момент при малых частотах может оказаться слишком мал для статической нагрузки, образуемой УЭЦН, и, как следствие, потребуется корректировка вольт-частотной характеристики. Для этого необходимо определить статическую нагрузку УЭЦН.

### 3.4 Расчет статической нагрузки УЭЦН и момента инерции двигателя

Поскольку механические характеристики АД были рассчитаны для электромагнитного момента, то полная нагрузка на валу должна учитывать собственный момент трения двигателя. Момент от сил трения на валу АД можно принять постоянным и равным:

$$\Delta M_{с.дв} = M_{эм.н} - M_{да.н} = 214,476 - 222,2 = 7,725 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (50)$$

Поскольку УЭЦН представляет собой производственный механизм с насосным типом нагрузки с нелинейно-возрастающей механической характеристикой, выражение для полного момента сопротивления на валу АД, именуемое формулой Бланка, имеет вид:

$$M_c(\omega) = \Delta M_{с.дв} + (M_{эм.н} - \Delta M_{с.дв}) \left( \frac{\omega}{\omega_H} \right)^2.$$

$$M_c(\omega) = 7,725 + (214,476 - 222,2) \cdot \left( \frac{\omega}{298,4} \right)^2. \quad (51)$$

Определим приближенное значение момента инерции ПЭД в соответствии с формулой:

$$J_{дв} = m \cdot r^2,$$

где  $r=58$  мм – наружный радиус ПЭД;

$m=646$  кг – масса ПЭД.

$$J_{дв} = 646 \cdot (58 \cdot 10^{-3})^2 = 2,173 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (52)$$

Принимаем эквивалентный момент инерции электропривода равным:

$$J_{экр} = 1,2 \cdot J_{дв} = 1,2 \cdot 2,173 = 2,608 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (53)$$

Механическая характеристика полного момента сопротивления на валу двигателя, совмещенная с МХ двигателя при частотном регулировании, приведена на рисунке 3.10.

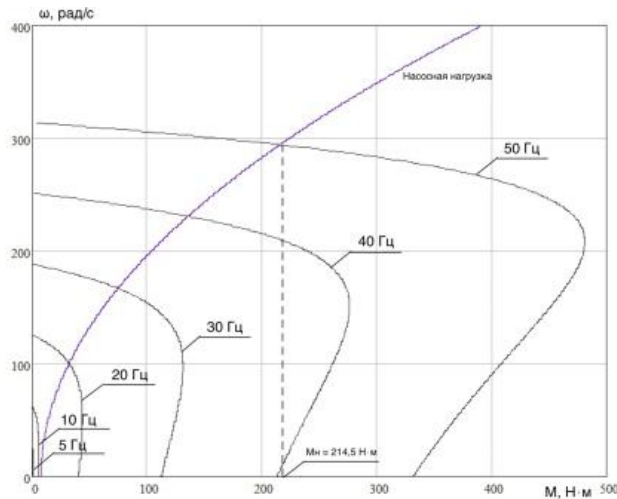


Рис. 3.10 Механические характеристики полного момента сопротивления на валу двигателя и механические характеристики двигателя при частотном регулировании

Из рисунка 3.10 видно, что на частотах 5 и 10 Гц пусковой момент двигателя недостаточен для пуска УЭЦН. Введем корректировку вольт-частотных характеристик на частотах 5 и 10 Гц.

Для получения динамических характеристик необходима передаточная функции цепи обратной связи по току в канале регулирования напряжения вида

$$W(p)_{iR} = \frac{k_{iR}(f_1)}{T_{iR}p + 1},$$

где постоянная времени выбирается исходя из условия

$$T_{iR} \geq 4T_3 = \frac{4}{2\pi f_{1н\text{э}к}} = 0,051 \text{ с.} \quad (54)$$

### 3.5 Корректировка вольт-частотных характеристик

Для корректировки вольт-частотной характеристики определяется начальное значение фазного напряжения статора для заданного закона регулирования при  $f=0$ :

$$U_{1\text{нач}} = \frac{U_{1\phi}(f_{\text{н.нач}}) - U_{1\phi\text{н}} \left( \frac{f_{\text{н.нач}}}{f_{1\text{н}}} \right)^2}{1 - \left( \frac{f_{\text{н.нач}}}{f_{1\text{гр.макс}}} \right)^2}.$$

Поскольку корректировка вольт-частотной характеристики может быть осуществлена для конкретного тока двигателя, то и применять ее следует при работе с постоянной нагрузкой. При увеличении нагрузки напряжение двигателя оказывается недостаточным, что приводит к уменьшению потокосцепления и момента. При

уменьшении нагрузки напряжение оказывается излишним, что приводит к увеличению потока и насыщению магнитной системы двигателя [6].

С целью увеличения пускового момента двигателя на частотах 5 и 10 Гц экспериментально выполнен подбор параметров начального участка вольт-частотной характеристики преобразователя. Окончательно выбраны для начального участка характеристики следующие параметры:

$$U_{1\text{нач}} = 40 \text{ В}; f_{и.нач} = 5 \text{ Гц.}$$

В результате вольт-частотные характеристики представлены следующей зависимостью [6]:

$$U_{1\phi}(f_1) = U_{1\text{нач}} + (U_{1\phi} - U_{1\text{нач}}) \left( \frac{f_1}{f_{1Н}} \right)^2 ;$$

$$U_{1\phi}(f_1 = 10 \text{ Гц}) = 77,66 \text{ В,}$$

$$U_{1\phi}(f_1 = 5 \text{ Гц}) = 7,392 \text{ В.}$$

Искусственные МХ с корректировкой вольт-частотных характеристик представлены на рисунке 3.10.

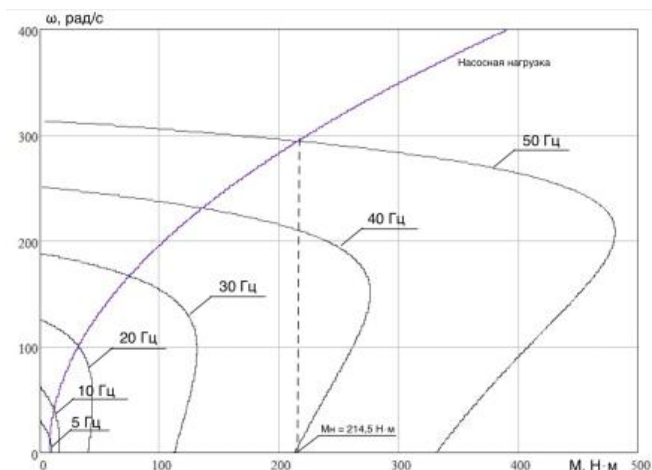


Рис. 3.11 Искусственные механические характеристики двигателя при частотном регулировании с вольт-частотной корректировкой

После вольт-частотной корректировки МХ на частотах 5 и 10 Гц обеспечивается повышенный пусковой момент, позволяющий запустить УЭЦН. Таким образом, электродвигатель ПЭДС63-103 обеспечивает требуемое значение максимальной частоты вращения ЭЦН  $\omega_{дв.н} = 293,739 \text{ рад/с}$ , длительную работу при максимальном моменте нагрузки и более чем двукратную перегрузку момента во всем диапазоне регулирования D.

### 3.6 Расчет потерь при работе на разных частотах

Потери в асинхронном двигателе обусловлены постоянными (не зависят от момента на валу) и переменными потерями (зависят от момента на валу).

Рассчитываются постоянные потери:

$$\Delta P_{\text{п}} = \Delta M_{\text{с.дв}} \cdot \omega_{\text{н}} = 18,25 \cdot 298,45 = 2,269 \text{ кВт.} \quad (55)$$

Переменные потери обусловлены выделением тепловой мощности на статорной и роторной обмотке. Так как магнитопровод выполняется шихтованным, то токи Фуко не учитываются, потери на перемагничивание электротехнической стали не учитываются, потому что составляют малую часть от общих потерь. Расчет переменных потерь:

$$\Delta P_{\text{пер}}(f_1 = \text{var } \Gamma_{\text{ц}}) = I_1^2 R_1 + I_2'^2 \cdot R_2'$$

Расчет потерь для нескольких частот:

$$\Delta P(f_1 = 50 \text{ Гц}) = \Delta M_{\text{с.дв}} + I_1^2 R_1 + I_2'^2 \cdot R_2' = 17,77 \text{ кВт.} \quad (56)$$

$$\Delta P(f_1 = 40 \text{ Гц}) = \Delta M_{\text{с.дв}} + I_1^2 R_1 + I_2'^2 \cdot R_2' = 13,21 \text{ кВт.} \quad (57)$$

$$\Delta P(f_1 = 30 \text{ Гц}) = \Delta M_{\text{с.дв}} + I_1^2 R_1 + I_2'^2 \cdot R_2' = 9,779 \text{ кВт.} \quad (58)$$

$$\Delta P(f_1 = 20 \text{ Гц}) = \Delta M_{\text{с.дв}} + I_1^2 R_1 + I_2'^2 \cdot R_2' = 7,021 \text{ кВт.} \quad (59)$$

$$\Delta P(f_1 = 10 \text{ Гц}) = \Delta M_{\text{с.дв}} + I_1^2 R_1 + I_2'^2 \cdot R_2' = 4,589 \text{ кВт.} \quad (60)$$

$$\Delta P(f_1 = 5 \text{ Гц}) = \Delta M_{\text{с.дв}} + I_1^2 R_1 + I_2'^2 \cdot R_2' = 3,423 \text{ кВт.} \quad (61)$$

Кроме того, при частотном регулировании появляются потери, связанные с возникновением токов и напряжений высших гармоник. Процессы коммутации полупроводниковых вентилях обуславливают не синусоидальность токов и напряжений, которые в общем случае содержат спектр различных гармоник, определяемый количеством управляемых вентилях в схемах с естественной коммутацией и частотной коммутации при импульсном управлении. Однако расчёт по данным формулам даст лишь приближенное значение потерь энергии [15].

## 4 Динамические характеристики уэцн

### 4.1 Имитационная модель АД в неподвижной системе координат

Моделирование АД производится согласно модели двухфазной имитационной модели. При этом принимаются следующие допущения [6]:

1. Пренебрегаем потерями в стали, т.е. явлениями гистерезиса и вихревыми токами;
2. Применение математической модели нефтепгружного кабеля, состоящей из одного элементарного четырехполюсника, недопустимо для более сложных задач, таких как диагностика места повреждения кабеля и т.д. Применение модели с практически бесконечным числом четырехполюсников не является целесообразным. Поэтому, с разрешения преподавателя, было принято решение, что вопросы влияния длинного кабеля на ПЭД в данной работе не рассматривать, так как представленный комплексный проект является учебным проектом средней сложности. [19]
3. Не учитываем насыщение магнитопровода (насыщение может быть учтено косвенно путем использования так называемых «насыщенных» параметров, то есть параметров, определяемых при состоянии насыщения);
4. Пренебрегаем неравномерностью воздушного зазора между телом ротора и статора и изменением магнитной проводимости, обусловленной наличием пазов при относительном перемещении сердечников;
5. Пренебрегаем высшими пространственными гармониками магнитного поля, то есть распределение магнитного поля каждой из обмоток вдоль окружности ротора и статора принято синусоидальным;
6. Считаем, что статор и ротор имеют симметричные трехфазные обмотки. Обмотка ротора приведена к числу витков обмотки статора, то есть число витков обмотки статора и ротора одинаково.

Система дифференциальных уравнения для исследуемой модели неподвижной системе координат  $\alpha$  и  $\beta$  в операторной форме приводится ниже [4]:

$$\begin{cases} u_{1\alpha} = R_{1\beta} \cdot (T_{1\beta} \cdot p + 1) \cdot i_{1\alpha} - \frac{R_2' L_m}{L_2'^2} \cdot \psi_{2\alpha} - \frac{L_m}{L_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}, \\ u_{1\beta} = R_{1\beta} \cdot (T_{1\beta} \cdot p + 1) \cdot i_{1\beta} - \frac{R_2' L_m}{L_2'^2} \cdot \psi_{2\beta} + \frac{L_m}{L_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}, \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \psi_{2\alpha} - L_m \cdot i_{1\alpha} + \frac{L_2'}{R_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}, \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \psi_{2\beta} - L_m \cdot i_{1\beta} - \frac{L_2'}{R_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}, \\ M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2'} \cdot z_p \cdot (\psi_{2\alpha} \cdot i_{1\beta} - \psi_{2\beta} \cdot i_{1\alpha}), \\ \omega = \frac{1}{J \cdot p} \cdot (M_{\text{эм}} - M_c), \end{cases}$$

где  $i_{1\alpha}(t), i_{1\beta}(t), u_{1\alpha}(t), u_{1\beta}(t)$  – компоненты пространственных векторов мгновенного значения тока и напряжения статора в системе координат  $\alpha$  и  $\beta$ ,

$\psi_{2\alpha}(t), \psi_{2\beta}(t)$  – компоненты пространственных векторов мгновенного значения потокацепления ротора в системе координат  $\alpha$  и  $\beta$ ,  $J, z_p, \omega(t), M_c(t), M_{\text{эм}}(t)$  – момент инерции, число пар полюсов, мгновенное значение угловой скорости вращения, мгновенное значение момента нагрузки, мгновенное значение электромагнитного момента,

$R_\beta, L_\beta, K_r, A_r$  – коэффициенты для расчета динамики, полученные ранее.

Определим приближенное значение момента инерции ПЭД:

$$J_{\text{дв}} = 646 \cdot (58 \cdot 10^{-3})^2 = 2,173 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где  $r$  – наружный радиус ПЭД,  $m$  – масса ПЭД.

Имитационная модель, построенная по данной системе уравнений, собрана в программном продукте n MATLAB и представлена на рис. 4.1. Механическая система реализована в блоке и представлена на рис. 4.2. Нагрузка при этом неактивная, т.к. в задании не требуется реализация реактивной нагрузки (нет задания реверса). На рис. 4.3. показан блок для расчета действующего значения тока статора.

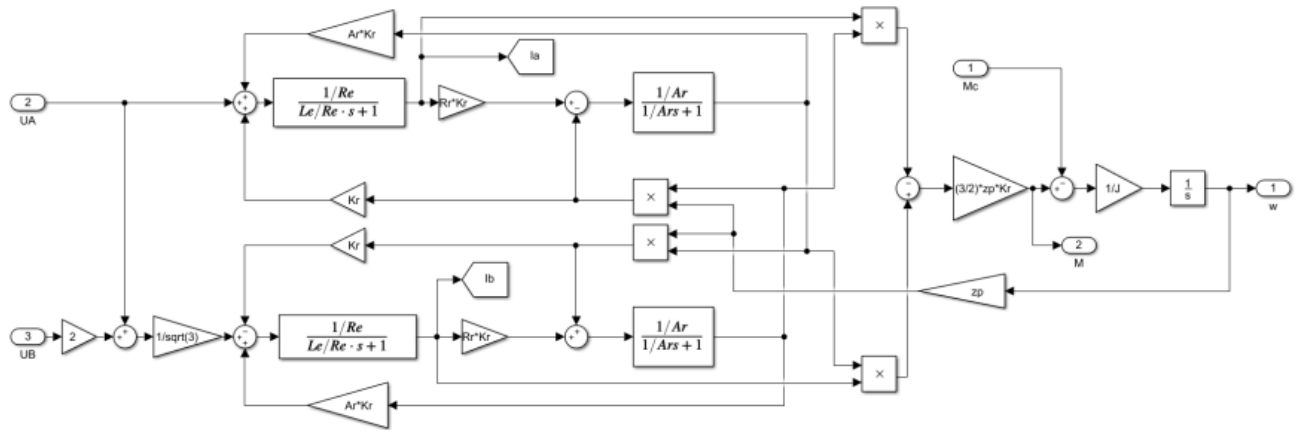


Рис. 4.1 Имитационная модель АД в неподвижной системе координат  $\alpha$  и  $\beta$

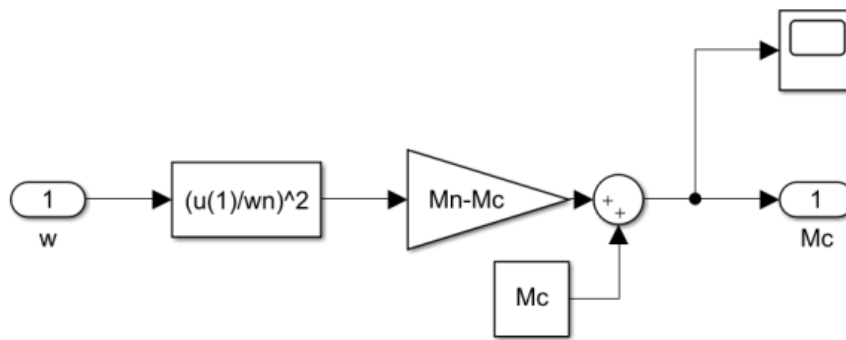


Рис. 4.2 Имитационная модель механической нагрузки

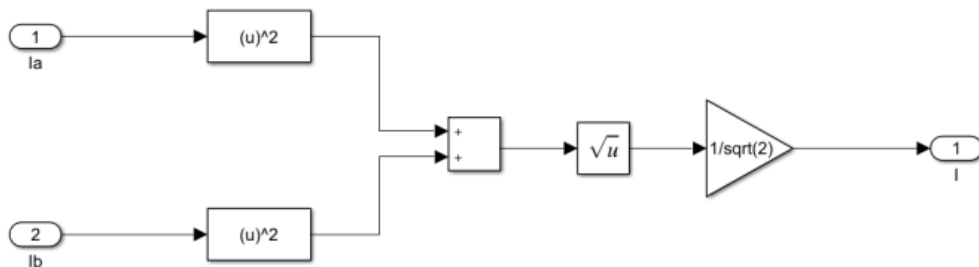


Рис. 4.3 Блок вычисления действующего значения тока статора

Входные данные для моделирования, реализованы в файле расширения mlx (Live Script).

При использовании блока расчета действующего значения тока статора становится удобнее анализ осциллограмм.

Для оценки адекватности математической модели накидываем номинальный момент в момент времени 4 с. Получим переходные характеристики угловой скорости вращения (рис. 4.4), тока статора (рис. 4.5), электромагнитного момента (рис. 4.6) и динамическую механическую характеристику (рис. 4.7).

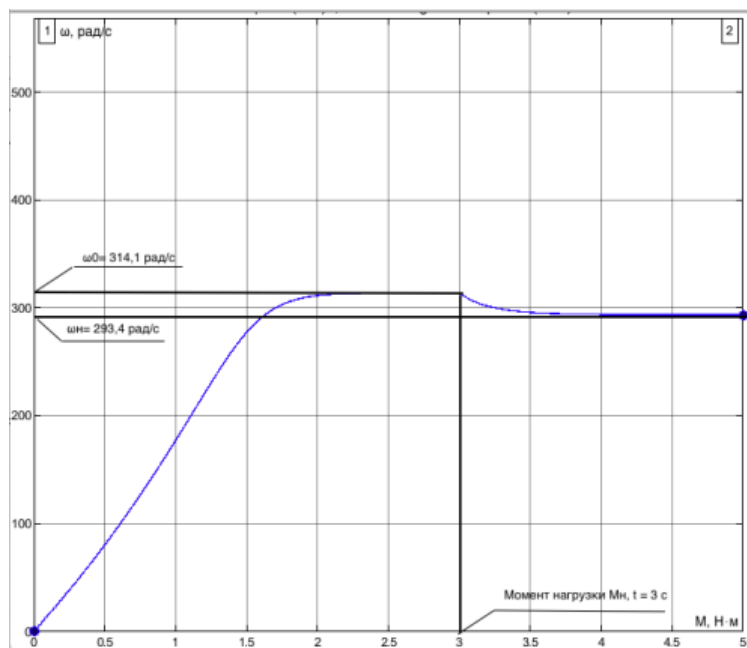


Рис. 4.4 Переходный процесс угловой скорости вращения при пуске вхолостую и последующим набросом нагрузки

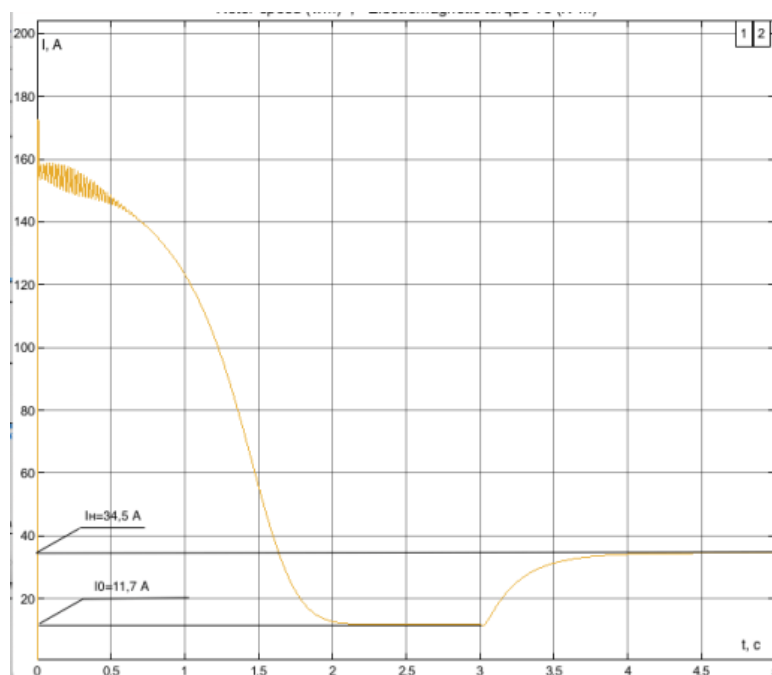


Рис. 4.5 Переходный процесс тока статора при пуске вхолостую и последующим набросом нагрузки



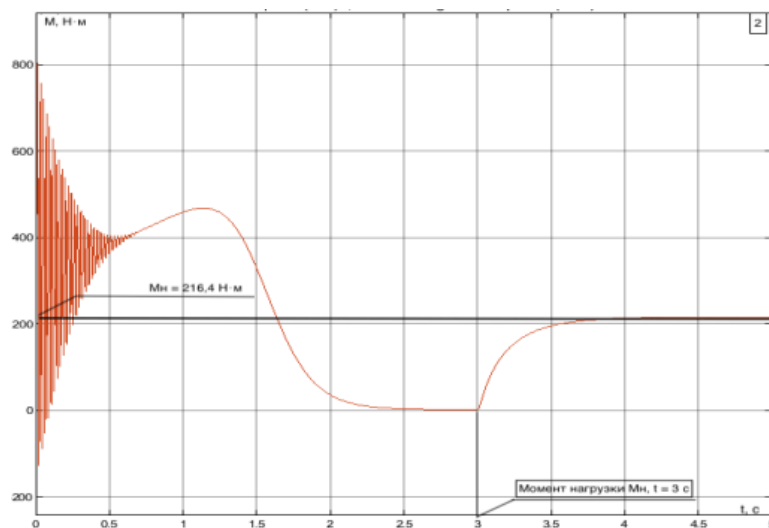


Рис. 4.6 Переходный процесс электромагнитного момента при пуске вхолостую и последующим набросом нагрузки

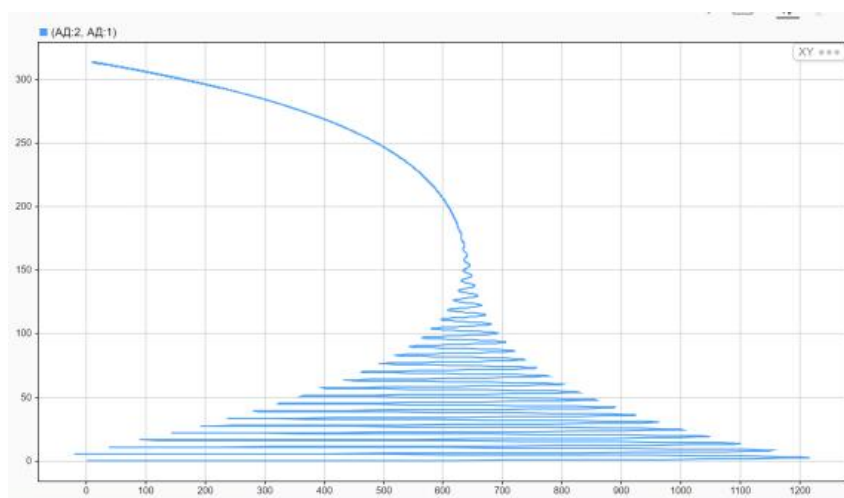


Рис. 4.7 Динамическая механическая характеристика при пуске вхолостую и последующим набросом нагрузки

По переходным характеристикам видно, что параметры двигателя выходят на номинальные параметры, кроме тока статора и критического момента, которые имеют некоторое отличие. Делается вывод, что имитационная модель адекватна. По динамической механической характеристике наблюдаются колебания момента при пуске, а также выход характеристики на точку  $(0, \omega_0)$  – холостой ход, затем выход на номинальные параметры.

## 4.2 Исследование прямого пуска АД от сети

Для исследования прямого пуска АД от сети приводится модель на рис. 4.8. Получаются переходные характеристики угловой скорости вращения, тока статора, электромагнитного момента и динамическая механическая характеристика на рис. 4.9-4.11.

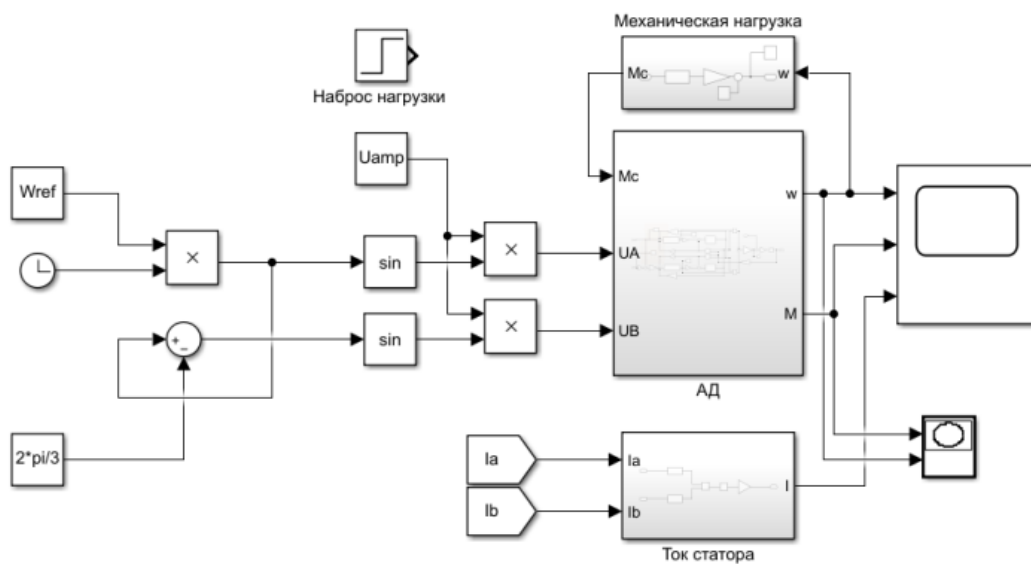


Рис. 4.8 Угловая скорость вала при прямом пуске АД

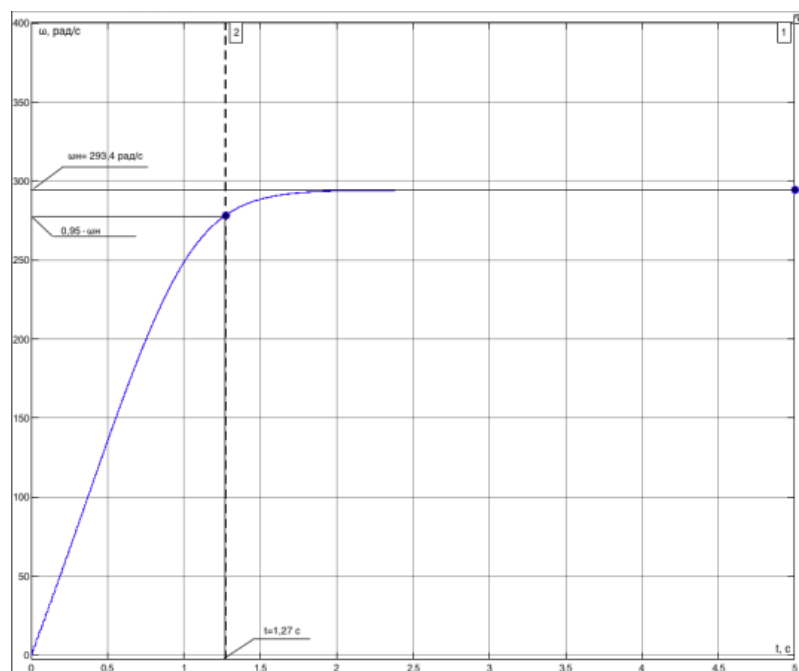


Рис. 4.9 Угловая скорость вала при прямом пуске АД

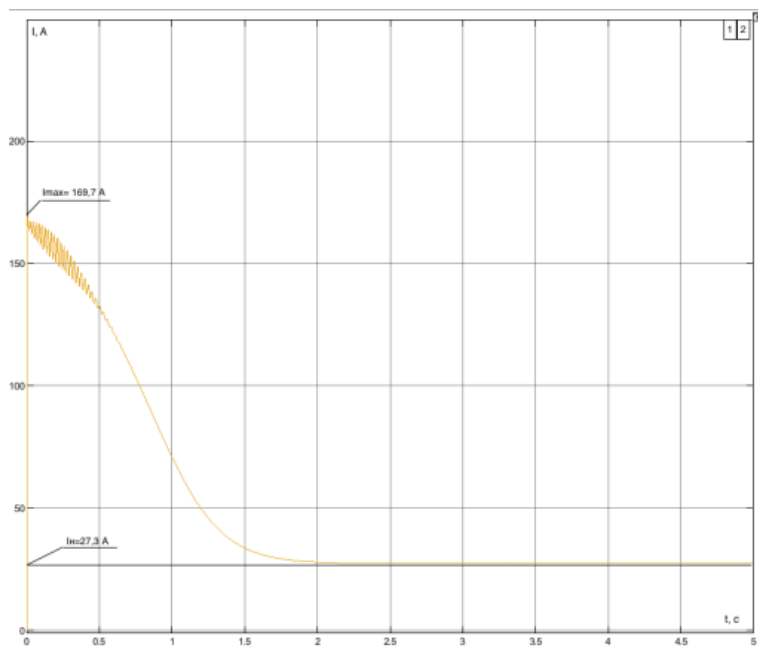


Рис. 4.10 Момент двигателя при прямом пуске АД

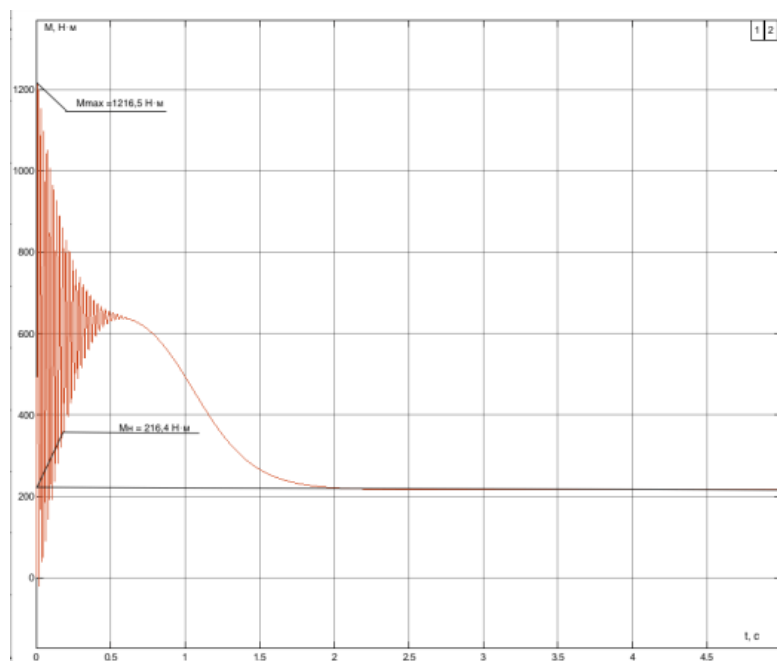


Рис. 4.11 Ток статора двигателя

Наблюдаем, что АД вышел на номинальные параметры, время переходного процесса  $t_{пп} = 1.27\text{c}$  без перерегулирования, бросок тока  $I_{max} = 169.7\text{ A}$ , бросок момента  $M_{max} = 1216.5\text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Показатели качества прямого пуска сводятся в таблицу 4.1

Таблица 4.1 – Показатели качества прямого пуска АД

$t_{пп}, \text{c}$	$\omega_{уст}, \text{рад/с}$	$I_{max}, \text{A}$	$I_{уст}, \text{A}$	$M_{max}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$M_{уст}, \text{Н}\cdot\text{м}$
1.27	293.4	169.7	27.3	1216.5	216.4

Таким образом известны основные показатели качества при прямом пуске АД от сети, что позволит произвести сравнительный анализ при пуске с ПЧ и задатчиком интенсивности.

### 4.3 Исследование разомкнутой системы ПЧ АД при пуске и торможении

Имитационная модель ПЧ с ЗИ приводится на рисунке 4.12. ЗИ ограничивает изменение выходной частоты, чтобы избежать сильных переходных процессов [1]. Также в системе ПЧ-АД присутствует  $IR$ -компенсация для стабильной работы на низких частотах. Закон изменения частоты и переходный процесс угловой скорости вращения представлены на рис. 4.13. Переходные процессы тока и момента представлены на рис. 4.14. Изменение линейного напряжения при изменении частоты приведено на рис. 4.15. Динамическая механическая характеристика при пуске и торможении – на рис. 4.16.

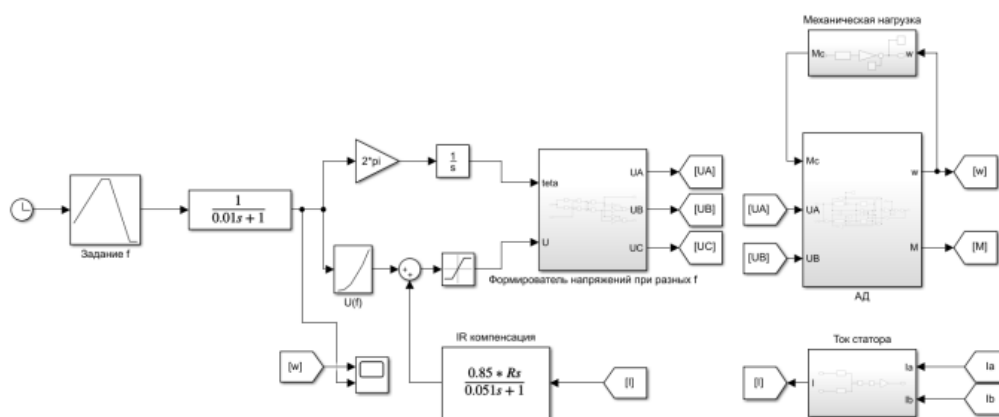


Рис. 4.12 Имитационная модель системы ПЧ-АД с ЗИ

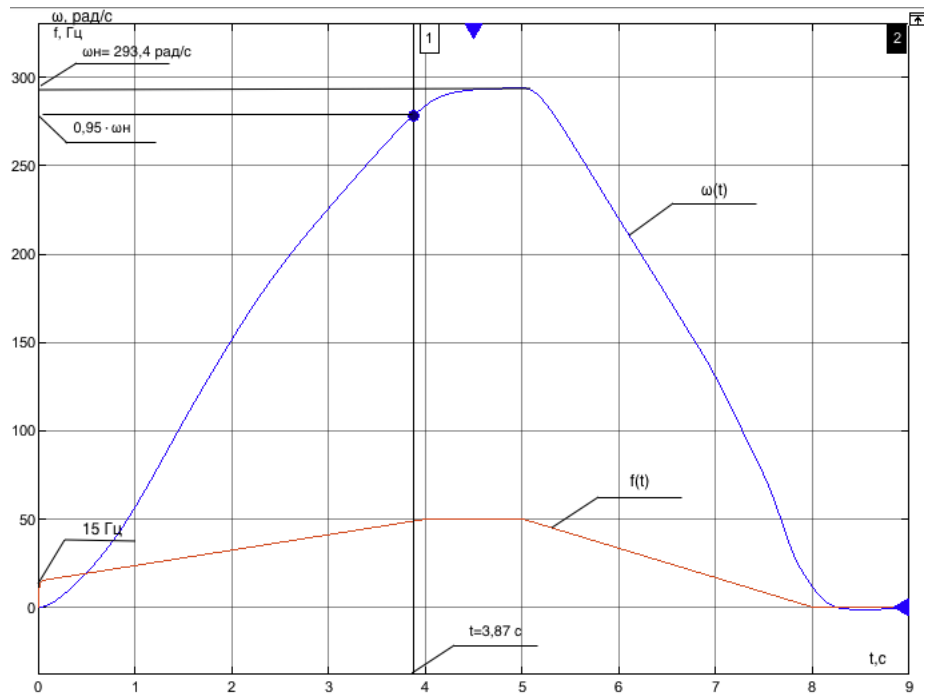


Рис. 4.13 Переходный процесс угловой скорости вращения при пуске и торможении системы ПЧ-АД с ЗИ

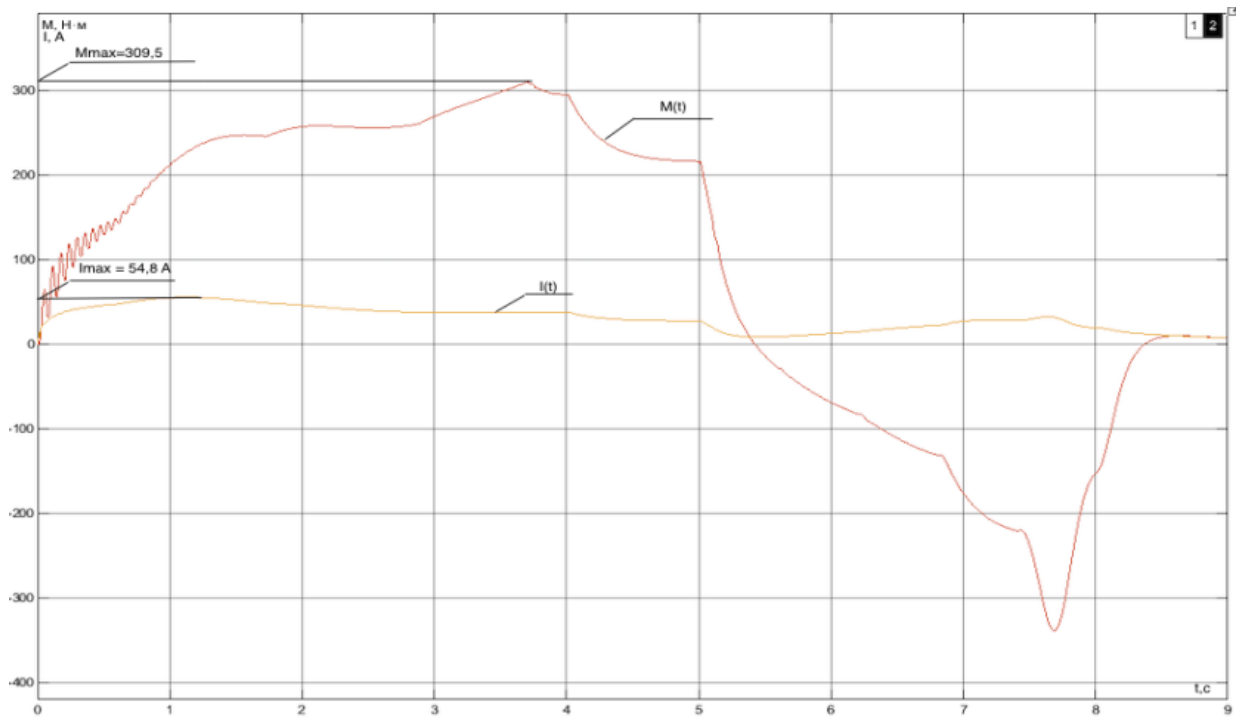


Рис. 4.14 Переходный процесс тока статора и электромагнитного момента при пуске и торможении системы ПЧ-АД с ЗИ

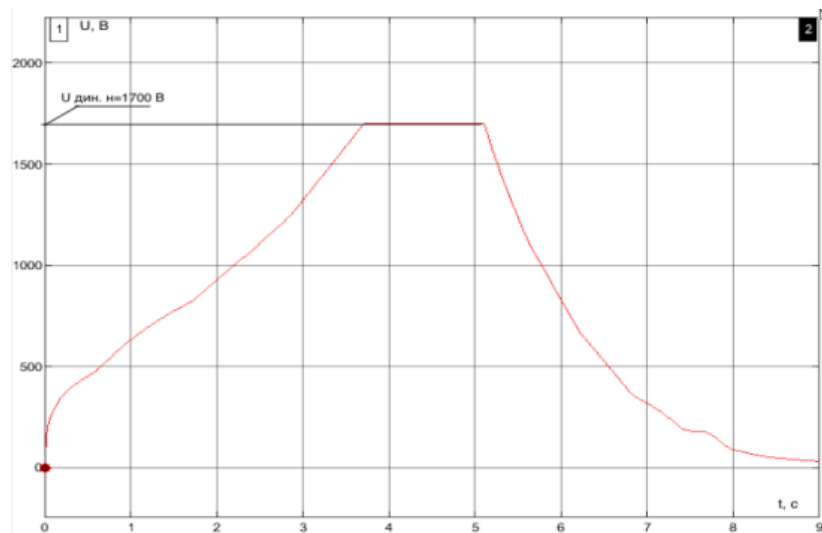


Рис. 4.15 Изменение линейного напряжения при пуске и торможении системы ПЧ-АД с ЗИ

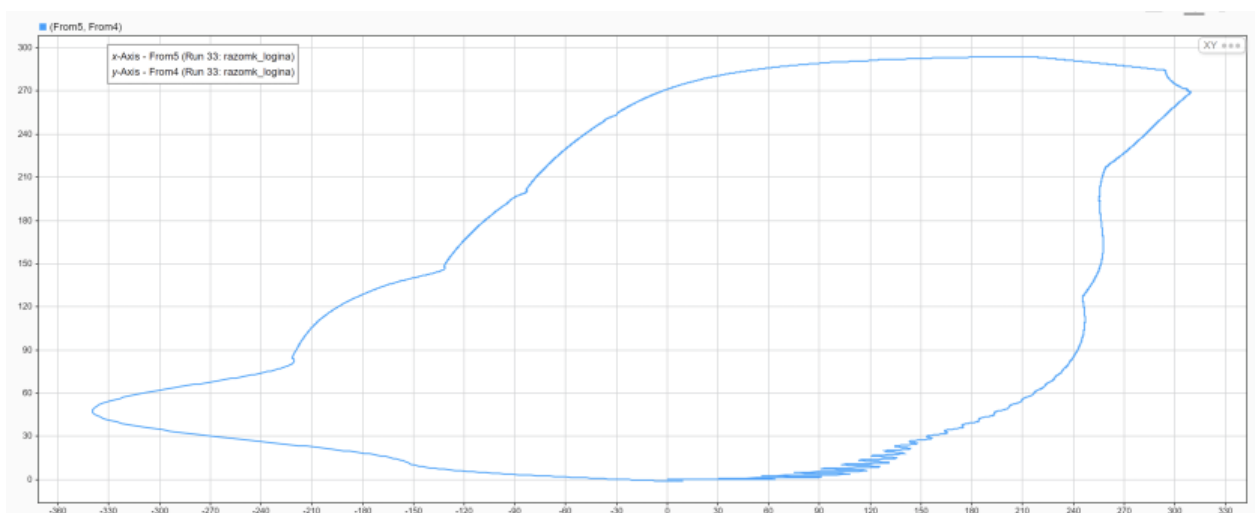


Рис. 4.16 Динамическая механическая характеристика системы ПЧ-АД с ЗИ при пуске и торможении

В системе ПЧ-АД с помощью ЗИ увеличили время переходного процесса, тем самым удалось уменьшить броски по моменту и току статора. Пуск начинается с частоты 15 Гц, т.к. по заданию требуется обеспечить диапазон регулирования не менее  $D\omega = 1-5$  (видно по статической механической характеристике рис. 3.9). По переходному процессу напряжения (рис. 4.15) видно активное влияние  $IR$ -компенсации на ее амплитуду при низких частотах. Также по рис. 4.17 видно, что при моделировании без  $IR$ -компенсации торможение не удается выполнить (в определенный момент времени торможение выполнялось выбегом). Процесс торможения начинался с 6 секунды началом изменения частоты с 50 Гц до 0 Гц, по рис. 4.14 видно, что момент становится отрицательным (тормозным). Торможение фиксируем по нулевому значению скорости при задании частоты 0 Гц. Динамическая

механическая характеристика ясно отражает броски момента при пуске и последующем торможении.

#### 4.4 Проектирование и исследование замкнутой системы ПЧ-АД по угловой скорости

Замкнутая система ПЧ-АД по угловой скорости была изучена при рассмотрении структурной схемы на рис. 1.4. Реализация данной схемы в MATLAB представлена на рис. 4.17.

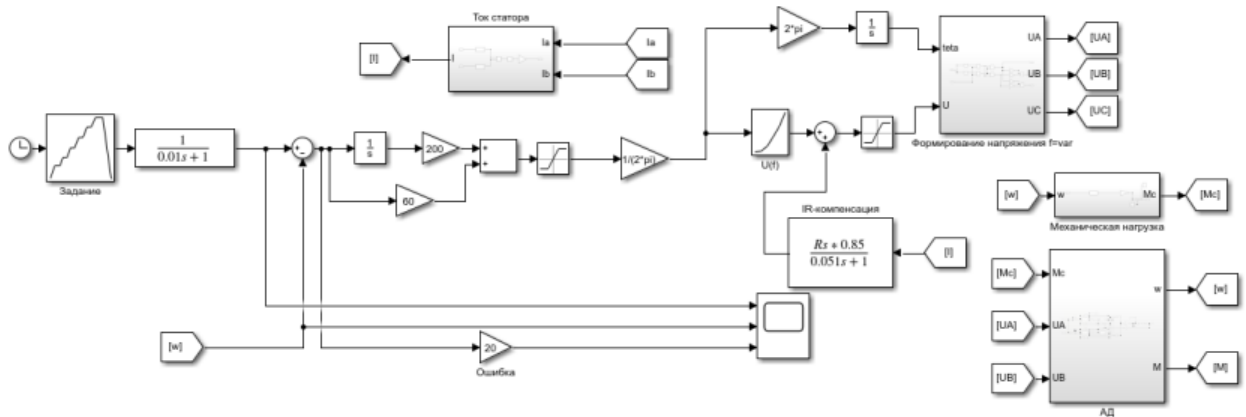


Рис. 4.17. Имитационная модель замкнутой системы ПЧ-АД по угловой скорости

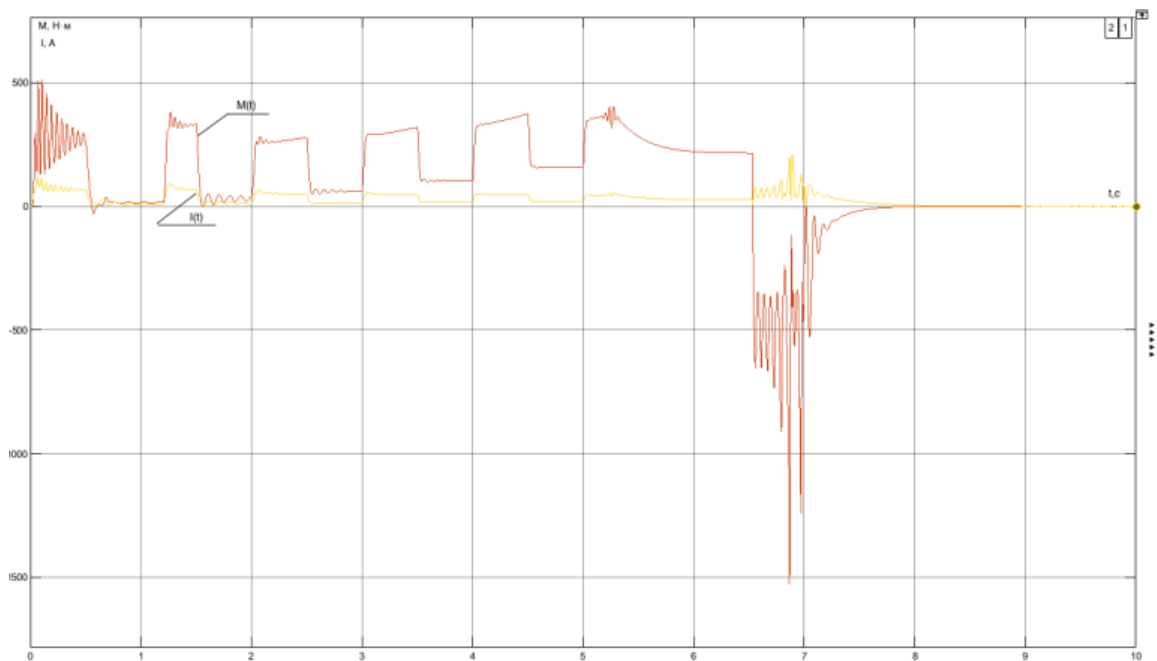


Рис. 4.18. Переходный процесс тока и момента в замкнутой системе ПЧ-АД

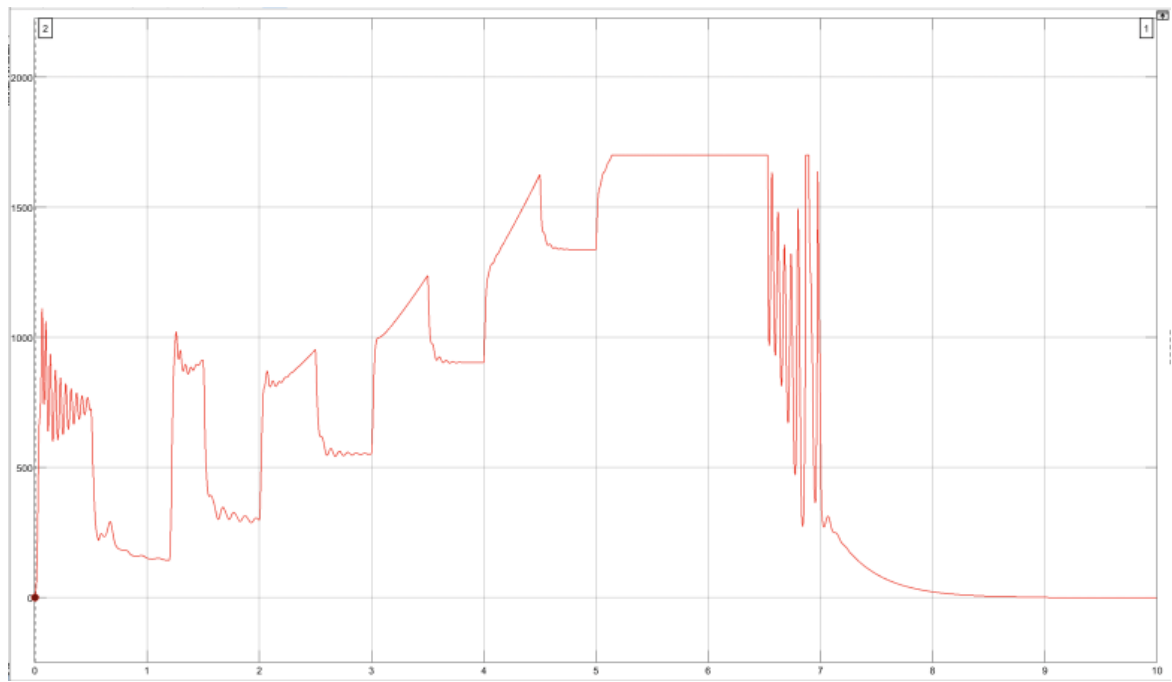


Рис. 4.19. Переходный процесс линейного напряжения замкнутой системы ПЧ-АД

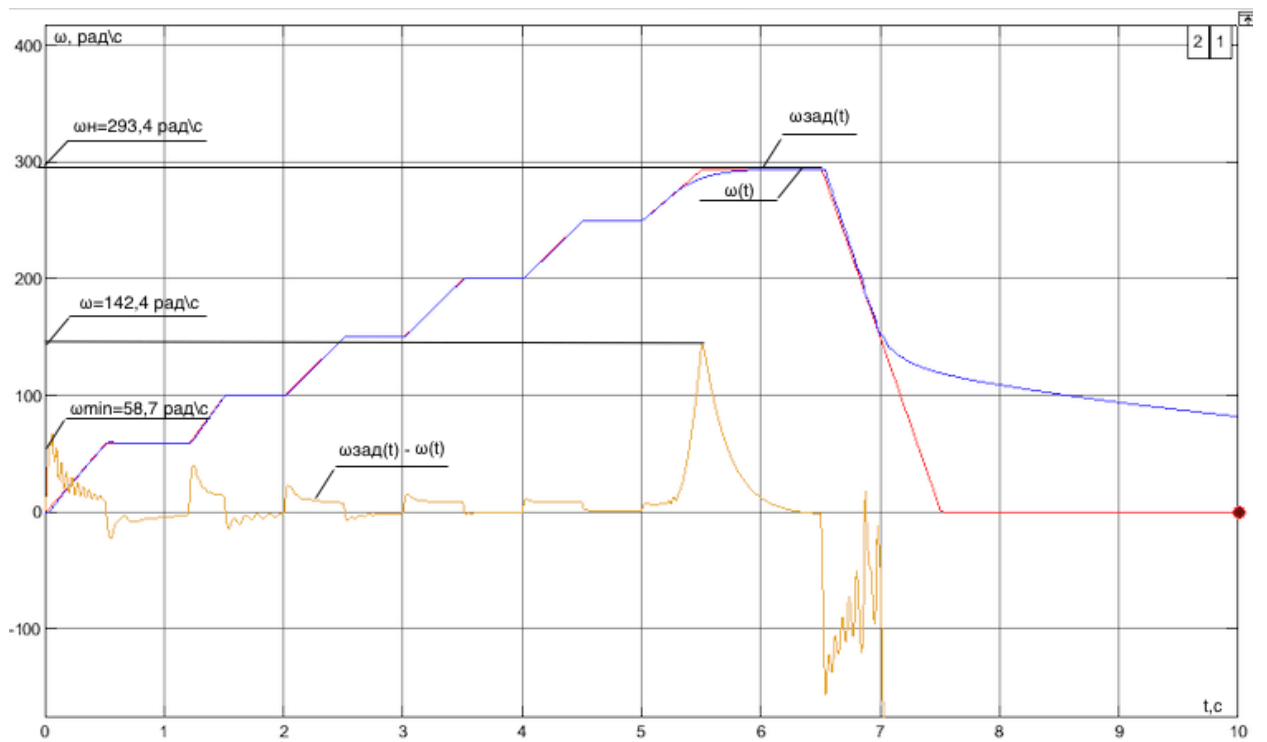


Рис. 4.20. Переходный процесс линейного напряжения замкнутой системы ПЧ-АД



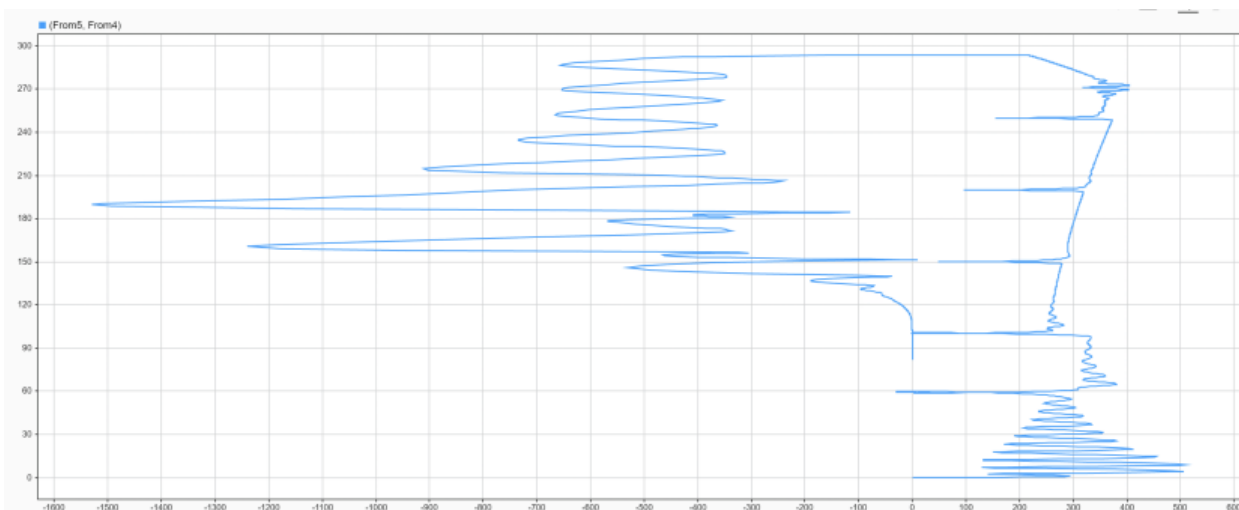


Рис. 4.21. Динамическая механическая характеристика замкнутой системы ПЧ-АД

Анализируя рис. 4.21. можно сказать, что двигатель работает при всем необходимом диапазоне регулирования. Ввиду интенсивности задания скорости, видны броски по моменту и току при переходе от одной «ступеньки» скорости к другой на рис. 4.18. *IR*-компенсация велика при низких скоростях (видно по амплитуде напряжения на рис. 4.19), затем интенсивность снижается. Ошибки по скорости возникают при переходах от одного значения скорости к другой, и она максимальна (5 рад/с) при переходе на номинальную скорость и торможении двигателя. В дальнейшем, в статике ошибка снижается до допустимой величины. Торможение идет с момента времени 6,5 с протяженностью 1,5 с. На динамической механической характеристике рис 4.21. видны все колебания момента при пуске и броски при переходе на другие скорости, также видна динамика при торможении.

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

### **Введение**

В настоящее время разработка электроприводов играет важную роль в области высокотехнологической и ресурсоэффективной продукции. Однако перспективность научного исследования не определяется только его техническими параметрами, но и коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности становится необходимым условием для поиска финансирования и коммерциализации научного проекта. Разработчики должны уметь представить состояние и перспективы своих исследований, учитывая факторы, такие как востребованность продукта на рынке, его цена, бюджет научного проекта и сроки выхода на рынок.

Целью раздела "Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение" в данной работе является проектирование и создание конкурентоспособных разработок и технологий в области электроприводов, которые отвечают современным требованиям ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение данной цели предполагает решение следующих задач:

1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований по проектированию электропривода для установки электроприводного центробежного (УЭЦН).
2. Определение возможных альтернативных подходов к проектированию электропривода, удовлетворяющих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.
3. Планирование научно-исследовательских работ, включая оценку ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности разработки электропривода УЭЦН.

Эта дипломная работа направлена на разработку электропривода для установки электроприводного центробежного с учетом требований финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Такой подход обеспечит конкурентоспособность разработки и соответствие современным требованиям в области энергоэффективности, экологической устойчивости и экономической эффективности.

## 5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

### 5.1.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности разработки проекта

С помощью анализа конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, мы можем провести оценку эффективности научной разработки и определить ее направление для будущего развития. В данном контексте представлена оценочная карта конкурентных технических решений, которая поможет нам в проведении анализа.

Анализ конкурентных технических решений с использованием оценочной карты, приведенной ниже, позволит нам сравнить различные параметры и факторы, влияющие на ресурсоэффективность и ресурсосбережение каждой технологии. Это позволит нам принять обоснованные решения и определить оптимальное направление для дальнейшего развития проекта по проектированию установки электроцентробежного насоса с учетом аспектов ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Метод циклической эксплуатации может быть применен на различных управляемых электроприводах для скважинной нефтедобычи малодебитных скважин. Как и любой проект, он должен быть конкурентоспособным. Для этого проведем сравнение. Результаты сравнения приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнительный анализ

Параметр оценки	Периодическая эксплуатация скважины УЭЦН с нерегулируемым приводом	Циклическая эксплуатация скважины УЭЦН с регулируемым приводом
Стоимость установки	средняя	высокая (имеется ПЧ)
Пуск установки	С ударной нагрузкой	Без ударной нагрузки (мягкий пуск)
Количество добытой нефти	100%	Не ниже 95%
Межремонтный период	100%	140% - 280%
Расход электроэнергии	100% или больше	Минимально возможный (работа при максимальном КПД)

Как видно, метод циклической эксплуатации скважин более дорогостоящий из-за наличия в составе УЭЦН системы управления с ПЧ (преобразователем частоты), количество добытой нефти возможно меньше. Однако данный метод позволяет значительно увеличить время между ремонтом установки за счёт меньших ударных нагрузок при пуске и работе. А так как установка взаимодействует только со скважинной жидкостью при работе, то она работает на максимально возможном для неё КПД, а, значит, тратит минимальное количество энергии.

Таким образом метод циклической эксплуатации скважин экономически более эффективный при длительной эксплуатации.

### 5.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Данный анализ помогает методом сравнения оценить сильные и слабые стороны рассматриваемых погружных насосных установок, чтобы наиболее обосновано выбрать установку для дальнейшего проектирования. Наиболее часто один вариант не может обладать сразу всеми техническими и экономическими показателями в высшей степени, поэтому данный анализ позволяет выбрать тот вариант, который в целом обладает наивысшей конкурентоспособностью.

Для того чтоб провести оценку конкурентоспособности нужно рассмотреть два вида наиболее конкурентоспособных установок это:

установка УЭЦН без преобразователя частоты;

установка УЭЦН с преобразователем частоты.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле [15]:

$$K = \sum(B_i \cdot B_i),$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

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

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

В настоящее время на российском рынке представлено множество станций управления устройствами погружных электронасосов на тиристорном принципе.

Таблица 5.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес Критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Изготовитель 1	Изготовитель 2	K1	K2
1	2				
<b>Показатели оценки качества разработки</b>					
1. Энергоэффективность	0.07	95	94	6.65	6.58
2. Помехоустойчивостью	0.1	90	90	9	9
3. Надежность	0.04	90	87	3.6	3.48
4. Унифицированность	0.08	90	88	7.2	07.04
5. Уровень материалоемкости разработки	0.05	97	95	4.85	4.75
6. Уровень шума	0.04	82	80	3.28	3.2
7. Безопасность	0.01	90	90	0.9	0.9
8. Потребность в ресурсах памяти	0.03	90	85	2.7	2.55
9. Функциональная мощность(предоставляемые возможности)	0.03	95	85	2.85	2.55
10. Простота эксплуатации	0.04	98	98	3.92	3.92
11. Качество интеллектуального интерфейса	0.06	96	90	5.76	5.4
12. Ремонтопригодность	0.05	100	100	5	5
<b>Показатели оценки коммерческого потенциала разработки</b>					
13. Конкурентоспособность продукта	0.04	90	88	3.6	3.52
14. Уровень проникновения на рынок	0.04	70	67	2.8	2.68
15. Перспективность рынка	0.08	95	95	7.6	7.6
16. Цена	0.1	65	75	6.5	7.5
17. Послепродажное обслуживание	0.02	90	90	1.8	1.8
18. Финансовая эффективность научной разработки	0.05	78	75	3.9	3.75
19. Срок выхода на рынок	0.04	71	60	2.84	2.4
20. Наличие сертификации разработки	0.03	80	80	2.4	2.4
Итого	1			87.15	86.02

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что у обоих производителей баллы выше 85, что говорит о том, что оба имеют перспективы

практического применения, но проект Станция управления серии Электрон-07 имеет более высокую прикладную ценность, и его балл составляет 87,15. Сравнивая их, можно обнаружить, что Станция управления серии Электрон-07 имеет большее преимущество в следующих аспектах:

Функциональная мощность; Качество интеллектуального интерфейса; Срок выхода на рынок. Это означает, что станция управления серии «Электрон-5» более современная и интеллектуальная. Преимущество станции управления УЭЦН в том, что она дешевле и экономичнее. Однако из-за раннего дизайна он не такой умный, как первый. Но все они могут реализовать управление плавным пуском электроцентробежного насосного устройства, и предприятие может выбрать их в соответствии с конкретными потребностями в производственных условиях.

### 5.1.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ используется для компактного описания ситуации, в рамках которой предстоит разрабатывать и реализовывать проект, а также позволяет оценить сильные и слабые стороны разработки, возможные угрозы со стороны внешней среды.

«S» и «W» относятся к состоянию компании, а «O» и «Т» к внешнему окружению организации.

Внутренняя среда проекта включает работников, занятых в проекте, способ или технология осуществления проекта, имеющиеся материально-вещественные и информационные ресурсы.

Внешняя среда может быть определена как множество сил и субъектов, которые оказывают непосредственное или опосредованное влияние на проект.

На первом этапе опишем сильные и слабые стороны проекта, выявим возможности и угрозы для реализации.

Результат данного этапа представим в виде таблицы 5.3.

Таблица 5.3 – Матрица SWOT

	<p><b>Сильные стороны:</b></p> <p>С1. Востребованность на рынке.</p> <p>С2. Энергоэффективность проекта.</p> <p>С3. Высокий срок службы системы.</p> <p>С4. Универсальность проекта.</p> <p>С5. Возможность множества регулировок.</p> <p>С6. Встроенные защиты от различных аварийных ситуаций.</p>	<p><b>Слабые стороны:</b></p> <p>Сл1. Высокая стоимость разработки.</p> <p>Сл2. Отсутствие финансирования.</p> <p>Сл3. Отсутствие специалистов в области токарного дела.</p> <p>Сл4. Высокий срок выхода на рынок.</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p>В1. Развитие технологий в данной отрасли.</p> <p>В2. Появления дополнительного спроса среди иностранных компаний.</p>		

<p>В3. Снижение стоимости комплектующих.</p> <p>В4. Повышение стоимости конкурентных разработок.</p>		
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Развитая конкуренция технологий производства.</p> <p>У2. Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукта.</p> <p>У3. Экономическая, политическая и экологическая ситуация в стране, влияющая на спрос.</p> <p>У4. Несвоевременное финансирование.</p>		

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

При построении интерактивных матриц используются следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта;

Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности;

У – угрозы;

«+» – соответствие;

«-» – несоответствие.

Построенная интерактивная матрица представлена в таблицах 5.4 и 5.5.

Таблица 5.4 – Интерактивная матрица возможностей проекта

Сильные стороны проекта							
Возможности		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	B1	+	+	+	+	+	-
	B2	+	+	+	+	0	+
	B3	-	-	-	-	-	-
	B4	-	+	+	0	+	+
Слабые стороны проекта							
Возможности		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4		
	B1	-	-	-	-		
	B2	-	-	-	-		
	B3	0	0	-	-		
	B4	-	+	+	+		

Таблица 5.5 – Интерактивная матрица угроз проекта

Сильные стороны проекта							
Угр ОЗЫ		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	У1	+	0	-	-	0	0
	У2	+	+	+	+	-	+
	У3	-	-	-	-	-	-
	У4	+	+	+	+	0	+
Слабые стороны проекта							
Угр ОЗЫ		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4		
	У1	+	+	+	+		
	У2	+	0	+	+	0	
	У3	-	+	+	+		
	У4	+	+	-	-	+	

Составим итоговую таблицу (табл.5.6) по результатам анализа интерактивных матриц проекта.

Таблица 5.6. – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны:</p> <p>C1. Востребованность на рынке.</p> <p>C2. Энергоэффективность проекта.</p> <p>C3. Высокий срок службы системы.</p> <p>C4. Универсальность проекта.</p> <p>C5. Возможность множества регулировок.</p> <p>C6. Встроенные защиты от различных аварийных ситуаций.</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл1. Высокая стоимость разработки.</p> <p>Сл2. Отсутствие финансирования.</p> <p>Сл3. Отсутствие специалистов в области токарного дела.</p> <p>Сл4. Высокий срок выхода на рынок.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Развитие технологий в данной отрасли.</p> <p>В2. Появления дополнительного спроса среди иностранных компаний.</p> <p>В3. Снижение стоимости комплектующих.</p> <p>В4. Повышение стоимости конкурентных разработок.</p>	<p>V1C1C2C3C4C5</p> <p>V2C1C2C3C4C6</p> <p>V4C2C3C5C6</p>	<p>V4Cл2Cл3Cл4</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Развитая конкуренция технологий производства.</p>	<p>У1C1</p> <p>У2C1C2C3C4C6</p> <p>У4C1C2C3C4C6</p>	<p>У1Cл1Cл2Cл3Cл4</p> <p>У2Cл1Cл3</p> <p>У3Cл2Cл3Cл4</p> <p>У4Cл1Cл2Cл4</p>



<p>У2. Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукта.</p> <p>У3. Экономическая, политическая и экологическая ситуация в стране, влияющая на спрос.</p> <p>У4. Несвоевременное финансирование.</p>		
--	--	--

Подводя итоги анализа видно следующее: разработка обладает большим количеством сильных сторон и возможностей, но в то же время имеет и ряд угроз. Надежность, энергоэффективность и универсальность будут помогать продвижению на рынке.

## 5.2 Планирование выполнения работ по проекту

### 5.2.1 Структура работ в рамках проектной работы

Планирование комплекса выполняемых работ осуществляется в следующем порядке:

1. Определение структуры работ в рамках НИ.
2. Определение участников каждой работы.
3. Установление продолжительности работ.
4. Построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований сформирована рабочая группа в количестве двух человек: руководителя и инженера.

Перечень этапов и работ, а также распределение исполнителей по видам работ приведен в таблице 5.7.

Таблица 5.7. – Перечень этапов, работ и распределение при проектировании

№	Содержание работ	Должность исполнителя
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
3	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
5	Проведение теоретических расчётов и обоснований	Инженер
6	Построение моделей	Инженер
7	Выбор электрооборудования	Инженер

8	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, инженер
9	Вопрос социальной ответственности	Инженер
10	Вопрос финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Инженер
11	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель
12	Оформление пояснительной записки	Инженер

### 5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения работ

Трудовые затраты как правило образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важно определить трудоемкость работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, так как зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Для определения среднего значения трудоемкости используется следующая формула:

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

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

$t_{min\ i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистичная оценка), чел.-дн.;

$t_{max\ i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистичная оценка), чел.-дн.

Пример расчета ожидаемого значения трудоемкости для нескольких этапов:

$$t_{ож\ 1} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4 \text{ чел. -дн.}; \quad (62)$$

$$t_{ож\ 3} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8 \text{ чел. -дн.} \quad (63)$$

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определим продолжительность каждой из них в рабочих днях  $T_p$ , учитывая параллельность выполнения работ исполнителями, по формуле:

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{ч_i},$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн., округляется до ближайшего большего целого;

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

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

Результаты вычисления трудоемкости сведены в таблицу 5.6.

Построим график проведения НИ в форме диаграммы Ганта – горизонтального ленточного графика, на котором работы по теме представляются отрезками, характеризующими даты начала и окончания выполнения.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов переведем в календарные дни, для чего воспользуемся следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

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

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения работы в рабочих днях;

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

В свою очередь коэффициент календарности определяется по формуле:

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

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

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

$T_{\text{вых}}$  – количество праздничных дней в году.

Определим коэффициент календарности:

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 66} = 1,22. \quad (64)$$

Тогда, например, продолжительность работы в календарных днях:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} = 4 \cdot 1,22 = 4,88 \approx 5 \text{ дн.} \quad (65)$$

Рассчитанные календарные дни по каждой работе, округленные до целого числа, сведены в таблицу 5.6.

Таблица 5.8– Временные показатели выполнения проектной работы.

Название работы	Трудоемкость работ, чел.-дн.						Длительность работ в рабочих днях, $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях, $T_{ki}$
	$t_{min}$		$t_{max}$		$t_{ож}$			
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер		
Составление и утверждение технического задания	1	–	2	–	1,4	–	2	3
Подбор и изучение материалов по теме	–	5	–	7	–	5,8	6	8
Выбор направления исследований	2	2	4	4	2,8	2,8	2	3
Календарное планирование работ по теме	3	–	5	–	3,8	–	4	5
Проведение теоретических расчётов и обоснований	–	11	–	15	–	12,6	13	16
Построение моделей	–	5	–	8	–	6,2	7	9
Выбор электрооборудования	–	2	–	4	–	2,8	3	4
Оценка эффективности полученных результатов	3	3	5	5	3,8	3,8	2	3
Вопрос социальной ответственности	–	4	–	15	–	8,4	9	11
Вопрос финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения	–	4	–	8	–	5,6	6	8
Определение целесообразности проведения ОКР	2	2	4	4	2,8	2,8	2	3
Оформление пояснительной записки	–	5	–	7	–	5,8	6	8

На основе табл. 5.8. строится календарный план-график для максимального по длительности исполнения работ с разбивкой по месяцам и декадам.

Таблица 5.9 – Календарный план график

№	Наименование работ	Исполнители	Количество дней	Продолжительность выполнения													
				Февраль			Апрель			Май			Июнь				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1				
1	Составление и утверждение технического задания	НР	3		■												
2	Подбор и изучение материалов по теме	И	8		■	■											
3	Выбор направления исследований	НР, И	3			■											
4	Календарное планирование работ по теме	НР	5			■	■										
5	Проведение теоретических расчётов и обоснований	И	16				■	■	■	■							
6	Построение моделей	И	9					■	■	■							
7	Выбор электрооборудования	И	4							■							
8	Оценка эффективности полученных результатов	НР, И	3							■	■						
9	Вопрос социальной ответственности	И	11								■	■	■				
10	Вопрос финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения	И	8									■	■	■			
11	Определение целесообразности проведения ОКР	НР, И	3												■	■	
12	Оформление пояснительной записки	И	8													■	■

■ – Инженер (И)      ■ – Научный руководитель (НР)

### 5.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

#### 5.3.1 Основная заработная плата исполнителей темы

Данная статья включает основную заработную плату работников, занятых выполнением НТИ, и дополнительную заработную плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп},$$

где  $З_{осн}$  – основная ЗП;

$З_{доп}$  – дополнительная ЗП (12-20% от  $З_{осн}$ ).

Основная ЗП рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p,$$

где  $З_{осн}$  – основная ЗП одного работника;

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

(табл. 5.10);

$З_{дн}$  – среднедневная ЗП работника, руб.

Среднедневная ЗП рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d},$$

где  $З_m$  – месячный должностной оклад работника, руб;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (табл. 5.10).

Таблица 5.10 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	118	118
Потери рабочего времени	28	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	219	199

Месячный должностной оклад работника:

$$З_m = З_{тс} \cdot k_p,$$

где  $З_{тс}$  – ЗП по тарифной ставке, руб.;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3.

Рассчитаем ЗП работников по приведенным выше формулам:

Для руководителя:

$$З_{\text{м}} = 54900 \cdot 1,3 = 71370 \text{ руб.} \quad (66)$$

$$З_{\text{дн}} = \frac{71370 \cdot 10,4}{199} = 3729,89 \text{ руб.} \quad (67)$$

$$З_{\text{осн}} = 3729,89 \cdot 13 = 48488,6 \text{ руб.} \quad (68)$$

Для инженера:

$$З_{\text{м}} = 17000 \cdot 1,3 = 22100 \text{ руб.} \quad (69)$$

$$З_{\text{дн}} = \frac{22100 \cdot 10,4}{219} = 1049,5 \text{ руб.} \quad (70)$$

$$З_{\text{осн}} = 1049,5 \cdot 54 = 56672,9 \text{ руб.} \quad (71)$$

Таблица 5.11. – Расчет основной заработной платы

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	118	118
Потери рабочего времени	28	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	219	199

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

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot З_{\text{осн}},$$

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

Тогда отчисления во внебюджетные фонды составляют:

$$З_{\text{внеб рук}} = 0,302 \cdot 48488,6 = 14643,5 \text{ руб.} \quad (72)$$

$$Z_{\text{внеб инж}} = 0,302 \cdot 56672,9 = 17115,2 \text{ руб.} \quad (72)$$

Сведем полученные данные в таблицу 5.12.

Таблица 5.12 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная ЗП, руб.
Руководитель	48488,6
Инженер	56672,9
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,302
Итого, руб.	
Руководитель	14643,5
Инженер	17115,2

### 5.3.3 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:

$$Z_{\text{накл}} = \sum (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{внеб}}) \cdot k_{\text{нр}}$$

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

Величину коэффициента накладных расходов примем равной 16%.

Сумма накладных расходов равна:

$$Z_{\text{накл}} = (48488,6 + 56672,9 + 14643,5 + 17115,2) \cdot 0,16 = 21907,2 \text{ руб.} \quad (73)$$

### 5.3.4 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат технического проекта является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку проекта. Определение суммы затрат на технический проект приведено в таблице 5.13.

Таблица 5.13 – Формирование бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Доля, %
1. Затраты по основной ЗП	105161,5	66,2
2. Отчисления во внебюджетные фонды	31758,8	20
3. Накладные расходы	21907,2	13,8



4. Бюджет затрат НТИ	158827,5	100
----------------------	----------	-----

### 5.3.5 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Рассчитаем интегральный показатель ресурсоэффективности объекта исследования по формуле:

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

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

$a_i$  – весовой коэффициент разработки;

$b_i$  – бальная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Параметрами сравнения будут:

1. Производительность
2. Долговечность
3. Настройка
4. Надежность
5. Энергоэффективность

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проведем в форме таблицы 5.13:

Таблица 5.13. – Интегральный показатель ресурсоэффективности

Критерий	Вес критерия	
Производительность	0,3	4
Долговечность	0,3	5
Надежность	0,2	5
Энергоэффективность	0,1	4
Настройка	0,1	5
ИТОГО	1	

$$I_p = 0,3 \cdot 4 + 0,3 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 = 4,6$$

По принятой пятибалльной шкале проект имеет достаточно высокое значение ресурсоэффективности, что означает высокую эффективность использования технического проекта.

Таким образом, можно сделать вывод, что данный спроектированный электрический привод для установки электроцентробежного насоса для скважной добычи нефти эффективен для применения с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе разработки проекта по проектированию УЭЦН были тщательно изучены основные принципы работы и конструктивные особенности данного оборудования, а также проведен анализ технологических процессов, в которых оно может быть применено. Были выполнены расчеты необходимых параметров и выбраны оптимальные решения для создания эффективной системы добычи нефти и газа.

Были подобраны подходящие компоненты для привода УЭЦН с целью обеспечения требуемого дебита и напора. В результате был выбран центробежный насос ЭЦНМ 5А-250-1400, способный обеспечить подачу в объеме 300 м<sup>3</sup>/сут и напор величиной 1100 м.

Для обеспечения требуемого номинального режима работы насоса был выбран односекционный погружной электродвигатель ПЭДМТ 63-103. Трансформатор ТМПН-300/3 был выбран для питания этого электродвигателя.

В качестве комплекса управления и защиты была выбрана станция управления Электрон-05А ПЧ-ТТПТ-250-380-50-УХЛ1, включающая частотный преобразователь. Нефтепогружной кабель типа КПБК 3х35 ТУ 16.505.129-2002 был рассчитан и выбран для питания погружной части УЭЦН.

Также было разработано устройство защиты от обрыва и перекоса фаз. Получили механические и электромеханические характеристики асинхронного двигателя. Основным законом управления для частотного преобразователя был выбран закон регулирования  $U1/f12=const$ . Кроме того, были получены и изучены модели прямого пуска ПЭД от сети, а также пуска и торможения с использованием запускового устройства.

Выполнение данного проекта позволило приобрести профессиональные навыки и умения в расчете параметров погружного электродвигателя, выборе насоса, подборе электрооборудования и систем управления

## Список литературы

1. Ковалев А.Ю. Электротехнологические установки для нефтедобычи: монография / А.Ю. Ковалев, Е.М. Кузнецов, В.В. Аникин. – Омск: Минобрнауки России, ОмГТУ, Нижневартовский академический институт прикладной энергетики, 2015. – 160 с.
2. Ивановский В.Н., Дарищев В.И., Сабиров А.А. и др. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В.Н. Ивановский [и др.]. – М.: «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2002. – 824 с.
3. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373. с.: ил.
4. Удут Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов: учебное пособие. Ч.8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин; Томский политехнический университет. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 648 с.
5. Иванковский В.Н., Пекин С.С., Сабиров А.А. Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти / В.Н. Ивановский [и др.]. – М.: «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2002. – 256 с.
6. Каталог продукции ООО «ИРЗ ТЭК». Оборудование для топливно-энергетического комплекса. – Ижевск, 2020.
7. Галикеев И.А. Эксплуатация месторождений нефти в осложненных условиях / И.А. Галикеев, В.А. Насыров, А.М. Насыров. – Ижевск: ООО «Парацельс Принт», 2015. – 354 с.
8. Белоусенко И.В., Шварц Г.Р., Великий С.Н. и др. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике нефтегазовой промышленности / И.В. Белоусенко [и др.]. – М.: Недра – Бизнесцентр, 2007. – 478 с.
9. ГОСТ Р 56830-2015 Нефтяная и газовая промышленность. Установки скважинных электроприводных лопастных насосов. Общие технические требования (с Изменением № 1). – М.: Стандартинформ, 2016. – 189 с
10. Каталог продукции Новомет. Каталог погружного оборудования УЭЦН. – Пермь, 2011

11. Каталог продукции Schlumberger. Каталог погружного оборудования УЭЦН TPS-Line. – Тюмень, 2015.
12. Кабели установок погружных электронасосов. ТУ 3542-045-10995863-2014. Введ. 2014-05-05.
13. ООО «Камский кабель». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kamkabel.ru/>, свободный. – Загл. с экрана.
14. ЗАО «Электон». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elekton.ru/index.shtml>, свободный. – Загл. с экрана.
15. Каталог продукции ООО «ИРЗ ТЭК». Оборудование для топливноэнергетического комплекса. – Ижевск, 2020.
16. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. – Л.:«Энергия», 1976 – 248с.: ил.
17. Волович, Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 210300 Радиотехника в УрФО / Г. И. Волович. - 3-е изд., - Москва : ДМК Пресс, Москва : Додэка-XXI, 2015. - 528 с. : ил. - (Схемотехника).
18. Промышленная электроника «Терра электроника». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tomsk.terraelectronica.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
19. Денисенко Д.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 608 с.: ил.
20. Пейтон Дж.А., Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях – М.: БИНОМ, 1994. – 352 с.: ил.
21. Техническая документация. Техническая документация на микросхему HCPL-788J [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/001/DOC001001039.pdf>
22. Сигма-дельта АЦП [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://we.easyelectronics.ru/blog/Theory/2551.html>

23. Техническая документация. Техническая документация на микросхему HCPL-316J [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/652/DOC005652393.pdf>

24. Помогаев Ю.М., Ломакин М.И., Лакомов И.В. Современные устройства защиты погружных электродвигателей. – Воронеж: Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе, 2019. – С. 225-231.

25. Пустоветов М.Ю. Опыт разработки синус-фильтра для силовой схемы частотно-регулируемого асинхронного электропривода – Томск: Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов, 2014 – № 4 – С. 87-95.

26. Электропривод переменного тока: учебное пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.

27. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока – ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008.– 298 с.