

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника
 Отделение Электроэнергетики и электротехники
 Профиль Электропривод и автоматика

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Проектирование электропривода погружного центробежного насоса для добычи нефти в осложнённых условиях на основе технологии циклической эксплуатации скважин

УДК 62-83.001.63:622.276.53

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4А1	Погодаев Евгений Евгеньевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Глазырин Александр Савельевич	д.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сотникова Анна Александровна	—		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

И.о. руководителя ОЭЭ ИШЭ	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко Александр Сергеевич	к.т.н.		

Результаты обучения
профессиональные и общекультурные компетенции
по основной образовательной программе подготовки бакалавров
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»,
Электропривод и автоматика

Код результата	Результат обучения	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные</i>		
Р 1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа электропривода и автоматике.	Требования ФГОС (ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОК-4, ОПК-2, ОПК-3), <i>CDIO Syllabus</i> (1.1), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р 2	Уметь формулировать задачи в области электропривода и автоматике, анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.	Требования ФГОС (ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3), <i>CDIO Syllabus</i> (2.1), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р 3	Уметь проектировать электропривод и автоматику.	Требования ФГОС (ОК-3, ПК-3, ПК-4, ПК-9), <i>CDIO Syllabus</i> (4.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р 4	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния электрооборудования, объектов электропривода и автоматике интерпретировать данные и делать выводы.	Требования ФГОС (ОПК-2, ОПК-3, ПК-1, ПК-2, ПК-5, ПК-12, ПК-14, ПК-15), <i>CDIO Syllabus</i> (2.2), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р 5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области электропривода и автоматике.	Требования ФГОС (ОПК-2, ПК-11, ПК-13, ПК-18), <i>CDIO Syllabus</i> (4.5), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р 6	Иметь практические знания принципов и технологий электротехнической отрасли, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.	Требования ФГОС (ПК-4, ПК-5, ПК-6, ПК-7, ПК-8, ПК-9, ПК-16, ПК-17), <i>CDIO Syllabus</i> (4.6), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<i>Универсальные</i>		
Р 7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной де-	Требования ФГОС (ПК-20, ПК-19, ПК-21), <i>CDIO Syllabus</i> (4.3,

Код результата	Результат обучения	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	ятельностью в области электропривода и автоматике.	4.7, 4.8), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р 8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в области электропривода и автоматике.	Требования ФГОС (ОК-5, ОПК-1, ПК-2), <i>CDIO Syllabus</i> (3.2, 4.7), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р 9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области электропривода и автоматике.	Требования ФГОС (ОК-6), <i>CDIO Syllabus</i> (3.1), Критерий 5 АИОР (п. 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р 10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, ОК-2, ОК-5, ОК-6), <i>CDIO Syllabus</i> (2.5), Критерий 5 АИОР (п. 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р 11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области электропривода и автоматике с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.	Требования ФГОС (ОК-4, ОК-8, ОК-9, ПК-3, ПК-4, ПК-10), <i>CDIO Syllabus</i> (4.1), Критерий 5 АИОР (п. 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р 12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области электропривода и автоматике.	Требования ФГОС (ОК-7, ОК-8), <i>CDIO Syllabus</i> (2.6), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

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

Инженерная школа энергетики
Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Отделение Электроэнергетики и электротехники
Профиль Электропривод и автоматика

УТВЕРЖДАЮ:
И.о. руководителя ОЭЭ ИШЭ

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г4А1	Погодаеву Евгению Евгеньевичу

Тема работы:

Электропривод установки центробежного насоса для добычи нефти в осложнённых условиях на основе технологии циклической эксплуатации скважин	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	02.02.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является модель электропривода установки электроцентробежного насоса с параметрами</p> <ul style="list-style-type: none">• Номинальная мощность 45 кВт;• Номинальное фазное напряжение 808 В;• Синхронная частота вращения 3000 об/мин.
--	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Выбор погружного электрооборудования и согласование его параметров. 2. Проверка работоспособности выбранного оборудования. 3. Составление системы дифференциальных уравнений и структурной схемы математической модели погружного асинхронного двигателя. 4. Исследование переходных режимов при прямом пуске электроцентробежного насоса без преобразователя частоты. 5. Составление функциональной схемы частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением. 6. Исследование переходных режимов при частотном пуске электроцентробежного насоса без задатчика интенсивности и с задатчиком.
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Графики переходных режимов асинхронного электродвигателя. Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением.</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Ассистент Сотникова Анна Александровна</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Кандидат экономических наук, доцент Мелик-Гайказян Мария Вигеновна</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Все разделы выпускной квалификационной работы написаны на русском языке.</p>	

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Глазырин Александр Савельевич	Д.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4А1	Погодаев Евгений Евгеньевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСО-
СБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г4А1	Погодаев Евгению Евгеньевичу

Инженерная школа	ИШЭ	Отделение	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление	13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

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

1. Стоимость человеческих ресурсов технического проекта (ТП)	В техническом проекте были задействованы 2 человека (руководитель, дипломник). Оклады определялись в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	16% накладные расходы, 30% районный коэффициент.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений	Отчисления по страховым взносам – 30% от ФОТ.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности разработки ТП	Выявление потенциальных потребителей технического проекта, анализ конкурентных технических решений.
2. Планирование работы и формирование сметы технического проекта	Формирование плана и графика разработки: определение структуры работ, определение трудоемкости работ, разработка графика Ганта. Формирование сметы затрат на научное исследование: материальные затраты, полная заработная плата, отчисления на социальные цели, накладные расходы.
3. Определение ресурсосберегающей эффективности технического проекта	Определение ресурсоэффективности проекта.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. График Ганта
2. График проведения и бюджет ТП
3. Определение ресурсоэффективности проекта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2019
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян Мария Вигеновна	К.Э.Н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4А1	Погодаев Евгений Евгеньевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г4А1	Погодаев Евгению Евгеньевичу

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение (НОЦ)	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является установка электроприводного погружного насоса. Рабочей зоной является скважина месторождения. Область применения – скважинная нефтедобыча.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования) правовые нормы трудового законодательства. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных факторов	Выявленные вредные факторы производственной среды: повышенное содержание паров нефти и газа в воздухе; недостаточное освещение рабочего места; неблагоприятные метеорологические условия; повышенный уровень шума.
2.2. Анализ выявленных опасных факторов	Выявленные опасные факторы производственной среды: расположение рабочего места на значительной высоте; повышенное значение напряжения в электрической цепи; подвижные части производственного оборудования; пожароопасность.
3. Экологическая безопасность:	При добыче нефти происходит загрязнение атмосферы, поверхностных водотоков, подземных вод, недр и почвы. Защита окружающей среды возлагается на производство при дальнейшем внедрении и применении данной методики.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Наиболее вероятной ЧС являются: пожар, взрыв или авария на рабочем месте.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сотникова Анна Александровна	–		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4А1	Погодаев Евгений Евгеньевич		

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

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение Электроэнергетики и электротехники
 Профиль Электропривод и автоматика

Период выполнения (осенний / весенний семестр 2018/2019 учебного года)
 Форма представления работы:

Бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2019
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
27.01.2019	Литературный обзор	2
19.02.2019	Расчёт и выбор электродвигателя	3
04.04.2019	Согласование погружного оборудования	2
18.03.2019	Расчет и построение механических характеристик	4
28.03.2019	Моделирование силового канала ПЧ-АД	2
04.04.2019	Моделирование различных пусков ЭЦН	3
08.04.2019	Разработка функциональной схемы	4
17.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	5
23.05.2019	Социальная ответственность	5
27.05.2019	Оформление работы	10
29.05.2019	Итого	40

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Глазырин Александр Савельевич	д.т.н		

СОГЛАСОВАНО:

И.о. руководителя ОЭЭ ИШЭ	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко Александр Сергеевич	к.т.н.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 94 с., 35 рисунков, 19 таблиц, 15 источников.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, скалярное управление, установка электроцентробежного насоса, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, преобразователь частоты.

Объектом исследования является частотно-регулируемый электропривод установки электроцентробежного насоса 6.0 УЭЦН 5 – 30 – 2500.

Цель работы – разработка частотно-регулируемого электропривода установки электроцентробежного насоса 6.0 УЭЦН 5 – 30 – 2500 и исследование его поведения при различных условиях пуска.

В результате исследования был разработан частотно-регулируемый электропривод установки электроцентробежного насоса УЭЦН 5 – 30 – 2500.

Достигнутые технико-эксплуатационные показатели: полностью соответствующие заданию.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2016 на листах белой бумаги формата А4 с помощью программных средств Matlab, Microsoft Excel.

Оглавление

Реферат	9
Введение.....	14
1. Установка электроприводного центробежного насоса. Назначение, устройство, принцип действия, технические и эксплуатационные характеристики	15
1.1. Назначение	15
1.2. Функциональное устройство УЭЦН.....	15
1.2.1. Центробежный насос (ЦН)	17
1.2.2. Погружной электродвигатель (ПЭД).....	18
1.2.3. Гидрозащита электродвигателя	19
1.2.4. Газосепаратор.....	19
1.2.5. Кабельная линия установки ЭЦН	19
1.2.6. Оборудование устья скважины	20
1.2.7. Станция управления	21
1.2.8. Трансформатор	21
2. Выбор погружного оборудования.....	22
2.1. Методика подбора УЭЦН	22
2.1.1. Выбор насосной установки по величине планируемого дебита и напора.	23
2.1.2. Выбор погружного электродвигателя (ПЭД) и гидрозащиты.	25
2.1.3. Подбор кабельной линии.	26
2.2. Определение параметров Т – образной схемы замещения погружного асинхронного электродвигателя	29
2.3. Проверка адекватности расчётных параметров двигателя.....	33
2.4. Расчет естественных характеристик электродвигателя.....	33
2.4.1. Расчёт естественной механической характеристики.....	33
2.4.2. Расчёт естественной электромеханической характеристики.....	35
2.4.3. Оценка достоверности расчетных характеристик двигателя.....	37
2.4.4. Механическая характеристика насоса.....	38
3. Выбор наземного оборудования.....	39
3.1. Выбор закона частотного регулирования	39

3.2. Методика подбора наземного оборудования.....	39
3.2.1. Выбор трансформатора.....	39
3.2.2. Выбор станции управления	40
4. Расчёт статических характеристик системы ПЧ – ПЭД при частотном регулировании	42
4.1. Расчёт вольт-частотной характеристики ПЧ	42
4.2. Механические характеристики системы ПЧ – ПЭД при законе регулирования $U1f12 = const$	42
4.3. Электромеханические характеристики системы ПЧ – ПЭД при законе регулирования $U1f12 = const$	45
5. Частотно-регулируемый электропривод УЭЦН со скалярным управлением.....	48
5.1. Определение параметров звеньев структурной схемы двигателя.....	52
5.2. Моделирование частотно-регулируемого погружного асинхронного электропривода центробежного насоса со скалярным управлением	57
5.2.1. Прямой пуск электропривода без преобразователя частоты.....	57
5.2.2. Прямой пуск электропривода с преобразователем частоты, но без датчика интенсивности	58
5.2.3. Прямой пуск электропривода с преобразователем частоты и датчиком интенсивности.....	58
5.2.4. Имитационное исследование электропривода насоса для различных заданий частоты.....	59
6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	62
6.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности разработки технического проекта.....	62
6.1.1. Выявление потенциальных потребителей технического проекта.....	62
6.1.2. Анализ конкурентных технических решений	63
6.2. Планирование работ по техническому проекту	65
6.2.1. Определение структуры работ в рамках технического проекта.....	65
6.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ	67
6.2.3. Разработка графика проведения технического проекта	67
6.3. Смета технического проекта	69

6.3.1. Полная заработная плата исполнителей темы.....	69
6.3.2. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	71
6.3.3. Накладные расходы.....	71
6.3.4. Формирование сметы затрат технического проекта.....	72
6.4. Определение ресурсосберегающей эффективности технического проекта.....	72
7. Социальная ответственность	75
7.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	75
7.2. Производственная безопасность	76
7.2.1. Анализ выявленных вредных производственных факторов.....	77
7.2.2. Анализ опасных производственных факторов	79
7.3. Мероприятия по устранению опасных и вредных факторов	84
7.4. Экологическая безопасность	85
7.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях (ЧС)	87
Заключение	88
Conclusion.....	89
Список использованных источников	90
Приложения	92

Обозначения и сокращения

- АД – асинхронный двигатель;
- АИН – автономный инвертор напряжения;
- ГД – гидрозащита;
- ГЖС – газо-жидкостная смесь;
- ЗИС – задатчик интенсивности скорости;
- ЗП – заработная плата;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- НКТ – насосно-компрессорные трубы;
- ОК – обсадная колонна;
- ПЧ – преобразователь частоты;
- ПЧН – преобразователь «частота-напряжение»;
- ПЭД – погружной электродвигатель;
- СУЭП – системы управления электроприводом;
- ТМПН – трансформатор маслonaполненный с естественной циркуляцией масла для скважинных нефтяных насосов;
- УЭЦН – установка электроцентробежного насоса;
- ФНУ – формирователь напряжений управления;
- ШИМ – широтно-импульсная модуляция
- ЭД – электродвигатель;
- ЭЦН – электроцентробежный насос.

Введение

В данном дипломе рассматривается установка электроприводного центробежного насоса, предназначенная для добычи сырой нефти из скважин месторождений с глубины от 500 до 4000 м. УЭЦН является следующим шагом развития штанговых насосных установок и во многом превосходят их. Установки ЭЦН обладают меньшими габаритами и большей энергоэффективностью. При подключении к погружному двигателю системы управления с преобразователем частоты, увеличивается также срок службы установки.

В дипломе проведена работа по исследованию влияния преобразователя частоты на работу установки. Рассчитываются и строятся естественные механические и электромеханические характеристики выбранного электродвигателя, также механическая характеристика нагруженного механизма (центробежного насоса), затем выбирается станция управления, рассчитываются и строятся искусственные характеристики при различных частотах и напряжениях.

После приведён расчёт и построение имитационной модели установки ЭЦН и моделирование её работы при различных режимах.

Экономическая часть представлена расчётом трудозатрат инженера и руководителя, оценкой экономической эффективности технического проекта и возможной его перспективности.

В данной работе также охарактеризовано влияние установки на экологическую безопасность, оценены риски трудовой деятельности человека при работе вблизи установки и приведены нормы безопасности и здоровья.

1. Установка электроприводного центробежного насоса. Назначение, устройство, принцип действия, технические и эксплуатационные характеристики

1.1. Назначение

УЭЦН (установки электроприводных центробежных насосов) относятся к бесштанговым насосным установкам. Они предназначены для откачки жидкости с большой глубины, где штанговые работать уже не могут в силу слишком большого веса колонны металлических штанг. УЭЦН имеют большую мощность, так как у них отсутствует длинная механическая связь между приводом и насосом. Из-за этого насос откачивает большие объёмы пластовой жидкости. В следствии чего УЭЦН применяют и на меньших глубинах. В Российской Федерации установками погружных центробежных насосов оснащено более 35% всех нефтяных скважин и добывается около 70% всей нефти.

1.2. Функциональное устройство УЭЦН

Установка ЭЦН состоит из:

1) Центробежный насос

Центробежный насос представляет из себя несколько секционную, многометровую конструкцию (в зависимости от необходимого напора) с диаметром от 70 до 170 мм, каждая секция которого состоит из множества вращающихся лопастных колёс, насаженных на общий вал и закреплённых в металлическом корпусе.

2) Погружной электродвигатель (ПЭД)

Это асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, заполненный диэлектрическим маслом. Может состоять из нескольких секций в зависимости от необходимой мощности.

3) Гидрозащита электродвигателя

Назначение состоит в защите двигателя от попадания пластовой жидкости. Состоит из компенсатора и протектора или только протектора. Отделяет двигатель, заполненный маслом, от насоса, заполненного пластовой жидкостью, и при этом передаёт вращающий момент от двигателя к насосу.

4) Газосепаратор

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

5) Кабельная линия

Передаёт электрическую энергию от станции управления и трансформатора к погружному электродвигателю. Состоит из двух частей: круглый кабель идёт от клеммной коробки на поверхности до нижних секций насосно-компрессорных труб (НКТ), плоский кабель соединяет погружной электродвигатель с круглым кабелем.

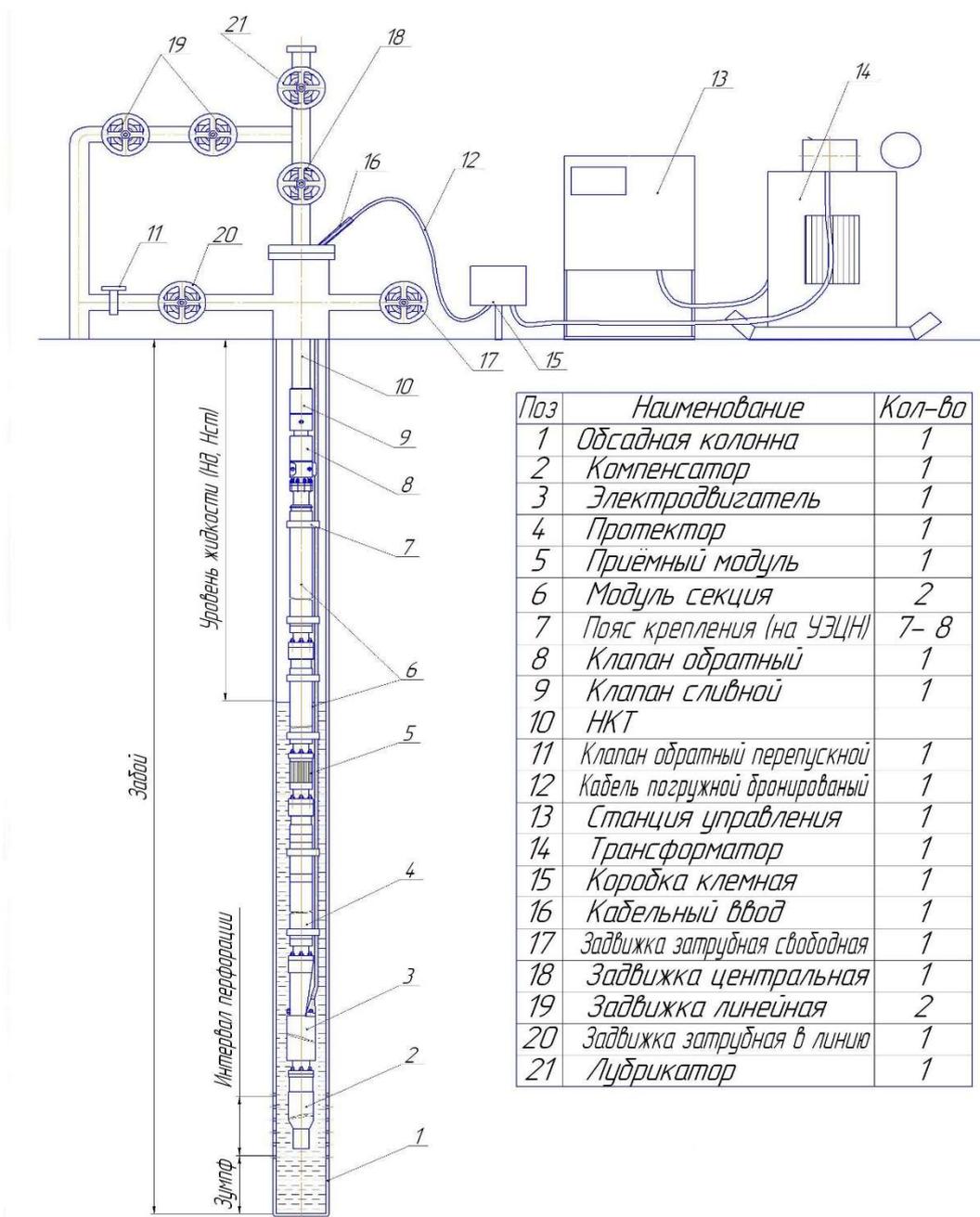


Рис. 1 Устройство УЭЦН

6) Оборудование устья скважины

Обеспечивает подвеску НКТ, герметизацию устья, подачу пластовой жидкости, регулирование режима эксплуатации.

7) Станция управления (СУ)

Станция управления осуществляет управление установкой ЭЦН контроль и слежение за её работой, а также защиту от различных аномальных режимов работы.

8) Трансформатор

Повышающий трансформатор располагается схематично между станцией управления и электродвигателем и подаёт повышенное напряжение на ПЭД. Также компенсирует потерю напряжения на кабельной линии.

1.2.1. Центробежный насос (ЦН)

Рабочий орган насоса – ступень насосная, бывает с цилиндрическими или наклонно-цилиндрическими лопатками (рис. 2). Центробежный насос состоит из большого количества ступеней, объединённых вместе в одну секцию. Рабочие колёса (ступени) насажены на вал и вращаются совместно.

Сама по себе одна ступень не даёт достаточного напора (от 3 до 6 метров) из-за малого диаметра рабочего колеса, поэтому ступени объединяют в секции, а секции в структуру. Секции соединяют друг с другом по несколько штук за раз, что даёт заметную прибавку к напору.

Материалы рабочих колёс бывают разного вида, но все они направлены на увеличение сопротивляемости механическим примесям в пластовой жидкости. По износостойкости конструкцию можно разделить на: износостойкую, обычную, повышенной износостойкости. Износостойкое исполнение позволяет откачивать жидкость с содержанием механических примесей до 0.5 г/л.



Рис. 2 Ступень электроцентробежного насоса

При работе насоса на рабочее колесо действуют осевые силы, а при наличии в пластовой жидкости механических примесей осевые силы значительно увеличиваются. Воспринимают эти усилия в насосных установках осевые опоры.

1.2.2. Погружной электродвигатель (ПЭД)

Погружной электродвигатель предназначен для приведения в движение центробежный насос. В основном это асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором малого диаметра, сопоставимого с диаметром насоса. По мощности АД могут быть различными, от 30 кВт до 500 кВт.

Конструкция представлена на рис. 3.

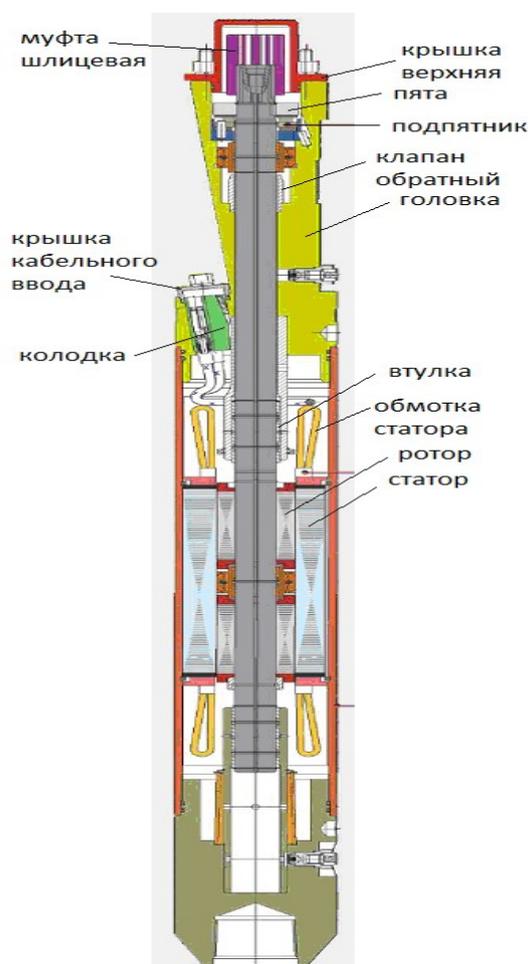


Рис. 3 Погружной электродвигатель

Так как у двигателя большая мощность, но малый диаметр, то необходимо увеличить его длину. В основном погружные двигатели имеют длину от трёх, пяти метров.

Погружные электродвигатели бывают секционного типа, то есть состоят из двух секций, каждая из аналогично по устройству односекционному двигателю.

Погружные двигатели конструируются специально для работы в высоко температурной среде. Некоторые в термостойком исполнении могут работать в среде с температурой до 150°C.

ПЭД состоит из статора, ротора, узла токоввода, головки и основания.

Статор и ротор представляют из себя магнитопроводы, набранные из листов электротехнической стали. В пазы статора уложена обмотка (в качестве проводника используется медные провода) и соединена в звезду. Ротор короткозамкнутый с медными проводниками. Вал ротора изготовлен полым, чтобы была возможность циркуляции масла.

В головке располагается упорный подшипник, воспринимающий осевые усилия. Внизу двигателя находится основание, в котором установлен фильтр масла.

Узел токоввода состоит из электроизоляционной колодки и кабельной муфты, предназначен для подключения кабеля к двигателю.

1.2.3. Гидрозащита электродвигателя

По конструктивному исполнению гидрозащита подразделяется на однокорпусную (бескомпенсаторного типа) и двухкорпусную. Однокорпусная гидрозащита состоит из протектора, который устанавливается между электродвигателем и насосом. Двухкорпусная гидрозащита состоит из протектора и компенсатора, компенсатор присоединяется к нижнему фланцу электродвигателя.

Компенсатор состоит из головки, корпуса и герметично закрепленной на опоре диафрагмы. Полость за диафрагмой сообщается с пространством скважины через отверстие в нижней части корпуса, что позволяет выравнивать давление в электродвигателе и скважине. Перепускной клапан закрывает или открывает отверстие, через которое происходит сообщение полостей компенсатора и электродвигателя. Основная функция компенсатора – это компенсировать температурные расширения и потери масла при эксплуатации электродвигателя.

1.2.4. Газосепаратор

Газосепаратор обеспечивает снижение содержания газа путем сепарации пластовой жидкости, при этом большая часть свободного газа отделяется от жидкости и направляется в затрубное пространство.

При большом содержании газа в пластовой жидкости насос работает неустойчиво, с колебаниями насосных параметров. Что способствует повышению вибрации и выходу из строя центробежного насоса.

1.2.5. Кабельная линия установки ЭЦН

Назначение кабельной линии состоит в передачи электрической энергии от системы управления к погружному электродвигателю.

Кабельная линия должна иметь хорошую проводимость, обладать малыми потерями на большой длине, обладать высокими диэлектрическими свойствами изоляции.

Она состоит из двух частей:

- Основной кабель
- Удлинитель

Основной кабель круглого сечения крепится на НКТ специальными зажимами. Проходит от клеммной коробки на поверхности до нижней части НКТ.

Удлинитель – плоский кабель, соединяет основной кабель с погружным электродвигателем. Проходит рядом с насосом. Удлинитель имеет плоскую конструкцию, чтобы обеспечить выбор насоса большего диаметра, а значит и более высоких рабочих показателей.

1.2.6. Оборудование устья скважины

На скважину устанавливается специализированное оборудование, которое необходимо для выведения сырья из скважины в линию переработки, забора газа из затрубного пространства, герметизации устья, подвески труб НКТ.

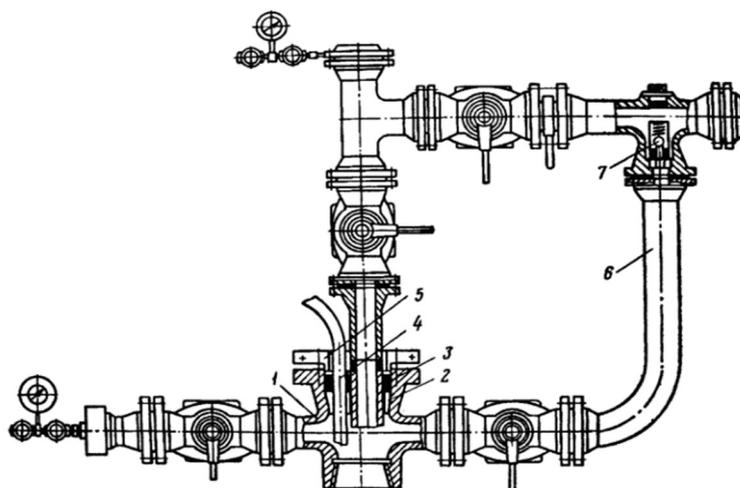


Рис. 4 Схема оборудования устья скважины при эксплуатации ее ЭЦН:

- 1 – крестовина, 2 – разъемный вкладыш, 3 – уплотнение, 4 – кабель,
5 – разъемный фланец, 6 – труба, 7 – обратный клапан

Оборудование состоит из:

- Крестовины с разъемным конусом
- Уплотнение
- Разъемный фланец
- Задвижек

- Обратный клапан
- Труба обратного клапана

Колонна НКТ крепится к разъёмному конусу, который в свою очередь монтируется на крестовине и герметизируется уплотнением. В разъёмном конусе есть отверстие для вывода электрического кабеля.

Обратный клапан предназначен для спуска в затрубное пространство излишек пластовой жидкости по трубе обратного клапана.

1.2.7. Станция управления

Станция управления – это комплекс высоковольтной электронной и электрической аппаратуры, находящейся в герметичном, влаго- и пылезащищённом корпусе.

Станция управления предназначена для управления погружным электродвигателем, пуском, регулированием скорости, торможением. А также для мониторинга состояния самого электродвигателя и центробежного насоса.



Рис. 5 Станции управления «Электон»

В дальнейшем выбирается станция управления «Электон – 05».

Серия «Электон – 05» предназначена для управления трёхфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым или фазным ротором или трёхфазным погружным вентильным двигателем, а также обеспечивает их защиту.

1.2.8. Трансформатор

Трансформатор предназначен для преобразования (повышения) питающего напряжения, компенсации потерь в кабельной линии и подачи напряжения к погружному электродвигателю.

Трансформаторы серии ТМПН специально предназначены для эксплуатации совместно с погружными электродвигателями и центробежными насосами.

Аппараты имеют прямоугольный корпус с гофрированными стенками.



Рис. 6 Общий вид трансформатора ТМПН

Крышка содержит пробку для заливки масла, слив производится внизу конструкции.

Схема внутреннего строения позволяет изменять давление в баке при помощи гофрированных стенок.

Трансформаторы данного типа функционируют при температуре окружающей среды от -45 до $+40^{\circ}\text{C}$. Влажность воздуха не должна превышать 80%.

Трансформаторы выпускаются на номинальную мощность первичной обмотки 0,38 кВт.

2. Выбор погружного оборудования

2.1. Методика подбора УЭЦН

Подбор оборудования осуществляется исходя из параметров скважины и химико-физического состава пластовой жидкости.

Типоразмер центробежного насоса и погружного электродвигателя должен соответствовать внутреннему диаметру обсадной колонны, или быть меньше.

Чтобы обеспечить необходимый напор и подачу нужно учитывать давление пластовой жидкости на приёме насоса, загазованность и обводнённость водоэмульсионной смеси. А также температуру и вязкость перекачиваемой жидкости.

2.1.1. Выбор насосной установки по величине планируемого дебита и напора.

Выбор насосной установки производится с учетом необходимого дебита, напора, типоразмер ЭЦН, по каталожным данным.

Таблица 1 – Технические требования

Подача (дебит)	30 м ³ /сут
Напор	2500 м
типоразмер ЭЦН	6Б (130 мм)

Выбираем насос ЭЦН5-30-2550.

Таблица 2 – Характеристики насоса

Подача (дебит)	30 м ³ /сут
Напор	2550 м
типоразмер	5 (92 мм)
Количество ступеней	534
Длина секций	5+5+3+3
Количество секций	4
Расположение осевой опоры	в насосе
Содержание КВЧ	1000 мг/л
КПД при заданном напоре	44%
Номинальная мощность	19,59 кВт
Максимальная мощность в рабочем диапазоне	22,94 кВт

Характеристики насоса Новомет ВНН5-30-2551 (534)

Частота: 2910 об./мин – 50,0 Гц

Плотность рабочей жидкости: 1000,0 кг/м³

Развиваемое давление: 25.03 МПа

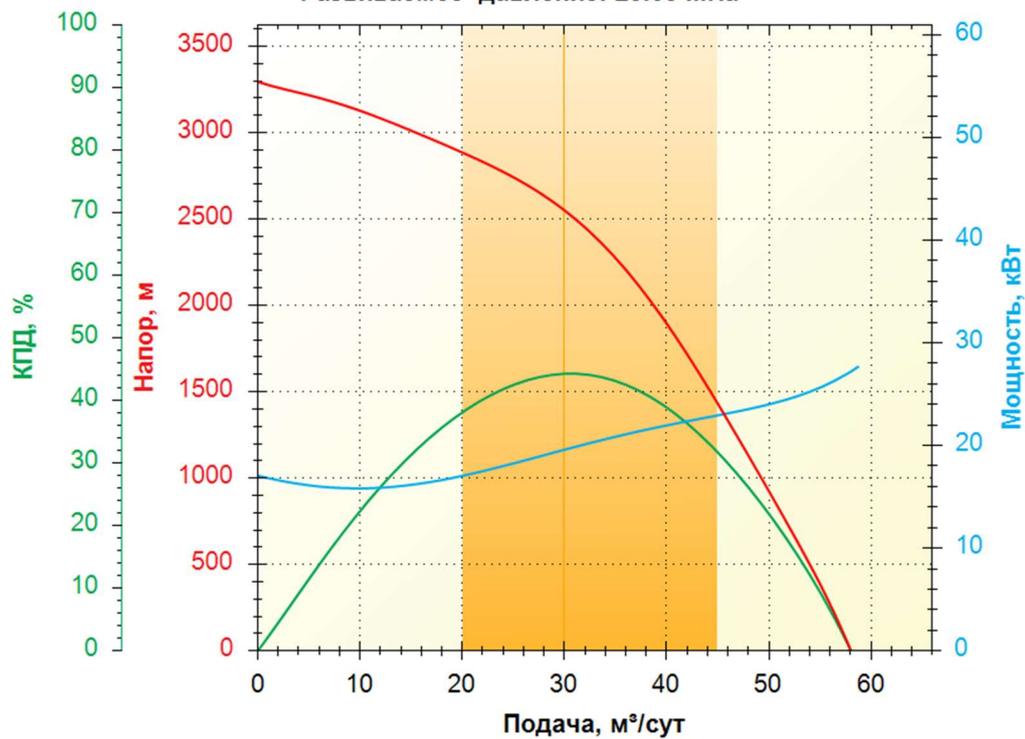


Рис. 7

Напорная характеристика насоса Новомет ВНН5-30 (534)

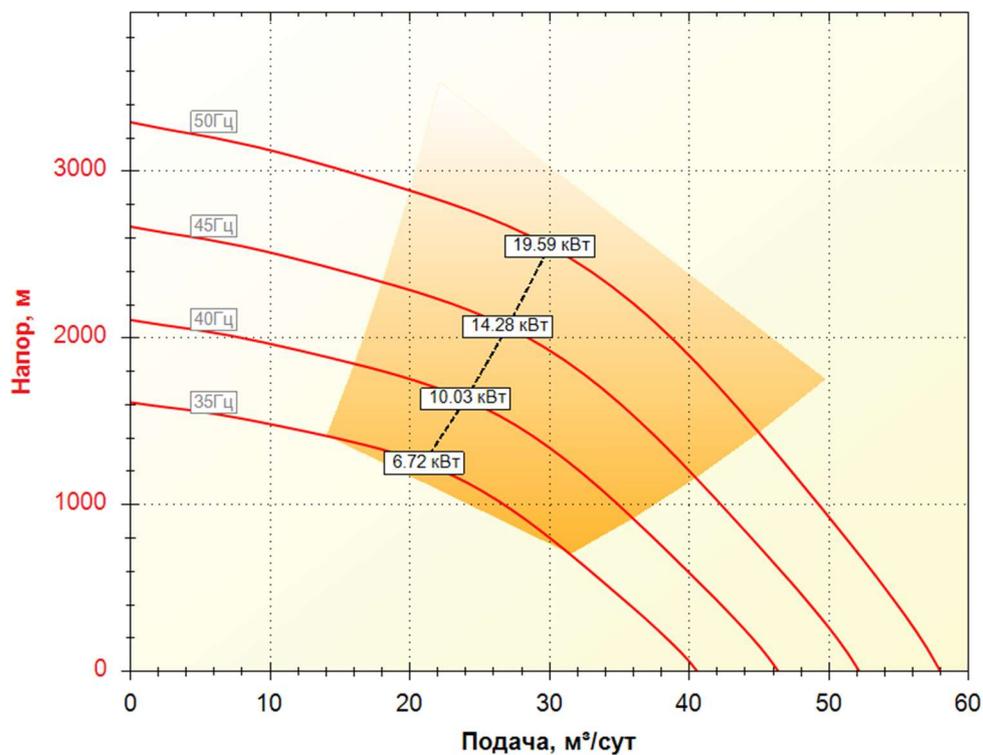


Рис. 8

2.1.2. Выбор погружного электродвигателя (ПЭД) и гидрозащиты.

По максимальной потребляемой мощности насоса, диаметру эксплуатационной колонны, температуре пластовой жидкости подбирается двигатель необходимого исполнения, мощности и габарита.

Следует учесть, что работа установки предполагается при большей частоте 60 Гц, поэтому двигатель необходимо выбирать с учётом роста потребляемой мощности насоса. При увеличении частоты потребляемая мощность насоса растёт в кубической зависимости, а мощность двигателя растёт линейно.

При подборе двигателя так же учитывается потребляемая мощность гидрозащиты и газосепаратора, принимаем потребляемую мощность гидрозащиты и газосепаратора при частоте 50 Гц $P_{Г50} = 3$ кВт.

Находим потребляемую мощность насоса при 60 Гц:

$$P_{Нас60} = \left(\frac{60}{50}\right)^3 \cdot P_{Нас50} = \left(\frac{60}{50}\right)^3 \cdot 22,94 = 39,64 \text{ кВт}$$

Находим потребляемую мощность гидрозащиты и газосепаратора при 60 Гц:

$$P_{Г60} = \left(\frac{60}{50}\right)^3 \cdot P_{Г50} = \left(\frac{60}{50}\right)^3 \cdot 3 = 5,184 \text{ кВт}$$

Потребляемая мощность установки:

$$P_{у60} = P_{Нас60} + P_{Г60} = 39,64 + 5,184 = 44,824 \text{ кВт}$$

Из каталожных данных выбираем двигатель ПЭДТН 50-117.

Таблица 3 – Технические характеристики ПЭДТН 45-117

Тип электродвигателя	ПЭДН 45 - 117
Номинальная мощность, кВт	45
Номинальное напряжение, В	1400
Номинальный ток, А	26
КПД, %	84,4
$\cos \phi$, о.е.	0,846
Скольжение, %	3,8
Минимальный диаметр скважин, мм	123
Скорость охлаждающей жидкости не менее, м/с	0,08
Количество секций	1
Установочная длина, мм	4865
Масса, кг	335
Синхронная частота вращения, об/мин	3000
Максимальная температура охлаждающей жидкости, °С	120
Максимальная температура обмотки двигателя, °С	170

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.

Используя программу Novomet ESP Calculator, проверим максимальную потребляемую мощность насоса в рабочем диапазоне:

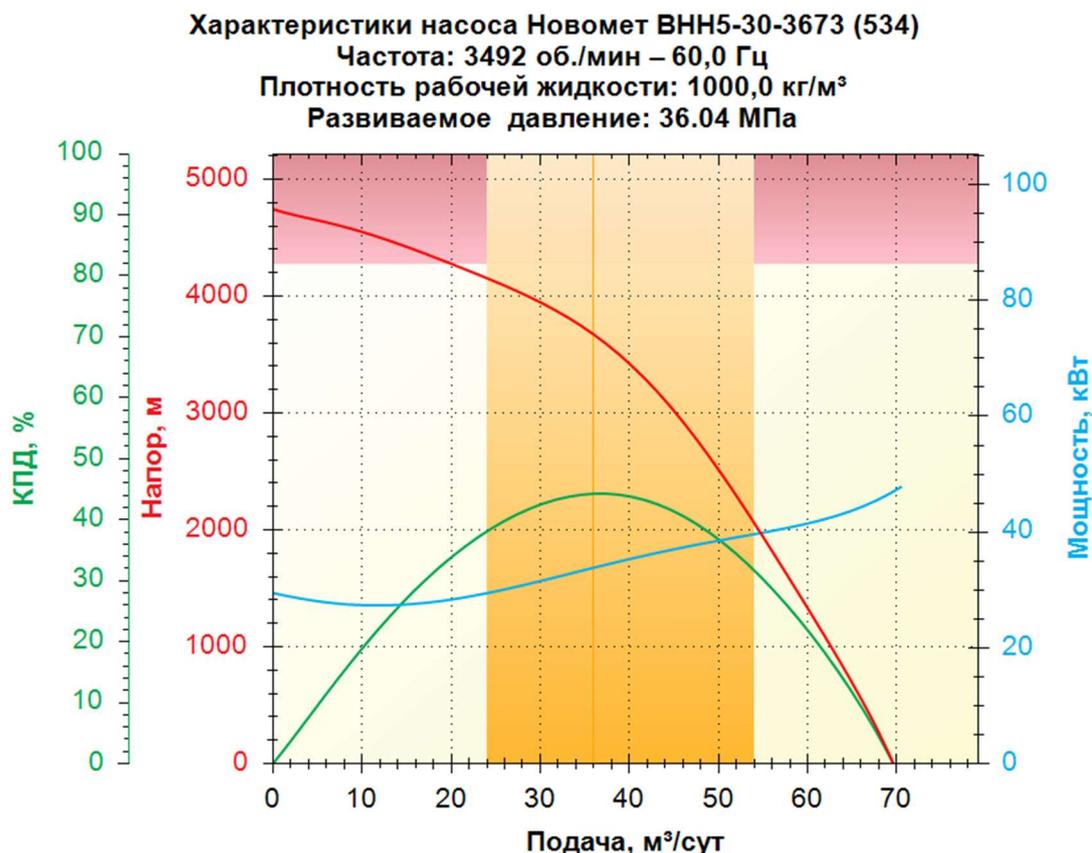


Рис. 9

Как видно из графика потребляемая мощность насоса при частоте 60 Гц равна 39 кВт, что соответствует расчётным данным.

2.1.3. Подбор кабельной линии.

При выборе кабеля следует определить:

- площадь сечения жилы кабеля;
- тип кабеля;
- 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.

Длина кабельной линии подбирается исходя из глубины спуска ПЭД в скважину с учетом расстояния от устья до ТМПН (газоотделительной коробки).

Длина удлинителя подбирается таким образом, чтобы сросток удлинителя с основным кабелем находился минимум на 2-3 м выше ловильной головки насоса, а также по допустимым токовым нагрузкам и температуре скважинной среды.

Удлинитель или термостойкая вставка подбирается по температуре скважинной жидкости, проходящей по НКТ и допустимым токовым нагрузкам, которые представлены на рисунках 10 и 11.

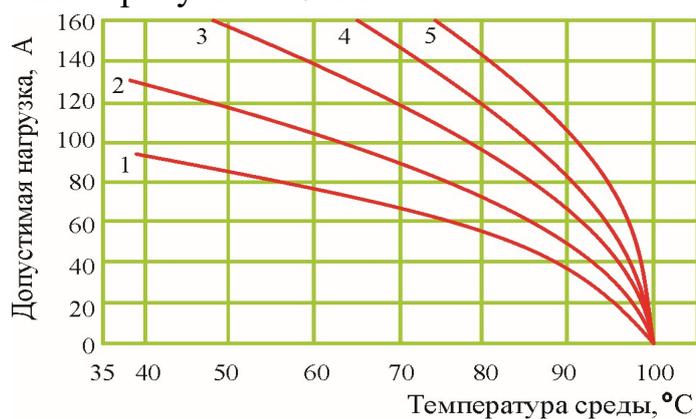


Рис. 10 Зависимости допустимых токов кабеля КРБП от температуры пластовой жидкости (смеси жидкости и газа). Цифрами обозначены сечения кабеля, мм²: 1 - 10, 2 - 16, 3 - 25, 4 - 35, 5 – 50.

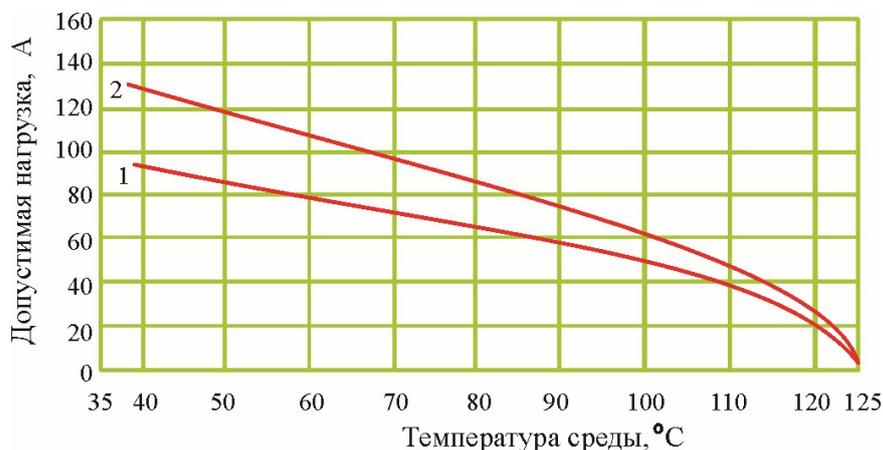


Рис. 11 Зависимости допустимых токов кабеля КРБПТ от температуры пластовой жидкости (смеси жидкости и газа). Цифрами обозначены сечения кабеля, мм²: 1 - 10, 2 – 16.

Выбираем кабель ориентируясь на:

Сечение жилы кабеля:

$$S = \frac{I_H}{i} = \frac{26}{5} = 5.2 \text{ мм}^2$$

где

$I_H = 26 \text{ А}$ – номинальный ток электродвигателя;

$i = 5 \text{ А/мм}^2$ – плотность рабочего тока в кабеле.

Электрическое сопротивление в кабеле на единицу длины:

$$R = \rho_{\text{меди}} \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_{20})) \cdot \frac{1}{S} =$$
$$= 0,0175 \cdot (1 + 0,004 \cdot (92 - 20)) \cdot \frac{1}{5,2} = 4,33 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м}$$

где

$\rho_{\text{меди}} = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ – удельное сопротивление меди;

$\alpha = 0,004 \text{ 1/}^\circ\text{С}$ - температурный коэффициент для меди;

$T = 92 \text{ }^\circ\text{С}$ - температура жидкости у приёма насоса;

$T_{20} = 20^\circ\text{С}$.

Общая длина кабеля:

$$L_K = 2600 \text{ м}$$

Тогда потери мощности в кабеле равны:

$$\Delta P_K = 3 \cdot I_H^2 \cdot R \cdot L_K = 3 \cdot 26^2 \cdot 4,33 \cdot 10^{-3} \cdot 2600 \cdot 10^{-3} = 22.8 \text{ Вт}$$

Выбираем кабель КПБК 3*10;

Максимальный наружный диаметр – 29 мм;

Номинальная длина кабеля – 2600 м.

2.2. Определение параметров Т – образной схемы замещения погружного асинхронного электродвигателя

Таблица 4 – Технические данные двигателя

Напряжение двигателя фазное, В $U_{1\text{фн}}$	808,29
Синхронная частота вращения, об/мин n_0	3000
Мощность двигателя, кВт $P_{\text{двн}}$	45
Скольжение при номинальной нагрузке, % s_n	3,8
КПД при номинальной нагрузке, % η_n	84,4
Коэффициент мощности при номинальной нагрузке $\cos\varphi_n$	0,846
Кратность максимального момента m_k	1,9
Кратность пускового момента m_n	1,0
Кратность минимального момента m_m	0,9
Кратность пускового тока $k_{\text{идв}}$	7,0
Число пар полюсов Z_p	1
Момент инерции двигателя, кг · м ² $J_{\text{дв}}$	0,027

Для инженерных расчетов асинхронного двигателя используют Т-образную схему замещения (рис. 12).

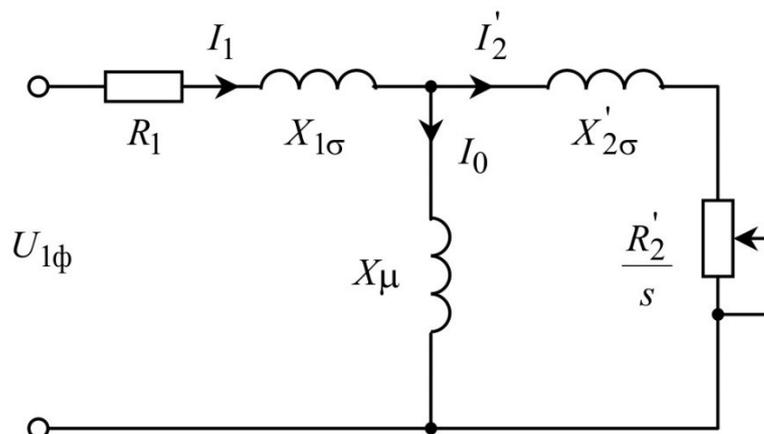


Рис. 12 Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Схема содержит:

R'_2 – приведенное активное сопротивление обмотки ротора к обмотке статора;

R_1 – активное сопротивление обмотки статора;

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

$U_{1\text{ф}}$ – фазное напряжение на статоре двигателя;

I_1 – ток статора;

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

I'_2 – приведенный ток ротора к статору;

I_0 – ток холостого хода;

X_μ – индуктивное сопротивление контура намагничивания.

Уравнения асинхронного двигателя:

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

$$\bar{E}_m + j \cdot X'_2 \cdot \bar{I}'_2 + R'_2 \cdot \frac{\bar{I}'_2}{s} = 0$$

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

Векторная диаграмма токов и напряжений (рисунок 13).

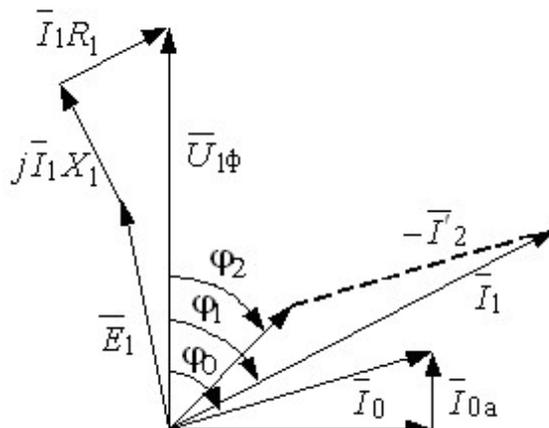


Рис. 13 Векторная диаграмма АД

Находим дополнительные параметры асинхронного двигателя [1].

Синхронная угловая частота вращения двигателя:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{60} = \frac{\pi \cdot 3000}{30} = 314,159 \text{ рад/с}$$

Номинальная частота вращения двигателя:

$$n_H = (1 - s_H) \cdot n_0 = (1 - 0,038) \cdot 3000 = 2886 \text{ об/мин}$$

Номинальная угловая частота вращения двигателя:

$$\omega_H = \frac{2\pi \cdot n_H}{60} = \frac{\pi \cdot 2886}{30} = 302,22 \text{ рад/с}$$

Номинальный ток двигателя:

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1\phi H} \cdot \cos\varphi \cdot \eta_H} = \frac{45000}{3 \cdot 808,29 \cdot 0,846 \cdot 0,844} = 26 \text{ А}$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_{дв.н} = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{45000}{302,22} = 148,9 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Коэффициент загрузки двигателя, принимаем $p_z = 0,75$. [1]

Коэффициент полезного действия двигателя при частичной нагрузке, принимаем $\eta_z = 0,844$. [1]

Коэффициент мощности при частичной нагрузке, принимаем $\cos\varphi_z = 0,8$.

[1]

Ток статора двигателя при частичной нагрузке [1]:

$$I_{1z} = \frac{p_z \cdot P_H}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos\varphi_z \cdot \eta_z} = \frac{0,75 \cdot 45000}{3 \cdot 808,29 \cdot 0,8 \cdot 0,844} = 20,61 \text{ А}$$

Параметры схемы замещения определяем по методике, предложенной в [1].

Ток холостого хода двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1z}^2 - \left(\frac{p_z \cdot I_{1\text{н}} \cdot (1 - s_H)}{1 - p_z \cdot s_H}\right)^2}{1 - \left(\frac{p_z \cdot (1 - s_H)}{1 - p_z \cdot s_H}\right)^2}} = \sqrt{\frac{20,61^2 - \left(\frac{0,75 \cdot 26 \cdot (1 - 0,038)}{1 - 0,75 \cdot 0,04}\right)^2}{1 - \left(\frac{0,75 \cdot (1 - 0,038)}{1 - 0,75 \cdot 0,038}\right)^2}} = 10,76 \text{ А}$$

Определим критическое скольжение:

$$s_k = s_H \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} = 0,038 \cdot \frac{1,9 + \sqrt{1,9^2 - [1 - 2 \cdot 0,038 \cdot 2,4 \cdot (1,9 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,038 \cdot 2,4 \cdot (1,9 - 1)} = 0,162$$

где

$m_k = 1,9$ – кратность максимального момента;

β – коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статора и ротора, значение которого находится в диапазоне $0,6 \div 2,5$, для двигателей с малым значением номинального скольжения следует выбирать $\beta \geq 1$, а для двигателей с повышенным скольжением - $\beta \leq 1$. Примем $\beta = 2,4$.

Коэффициент, характеризующий соотношение $\frac{X_\mu + X_{1\sigma}}{X_\mu}$, равен:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\text{н}}} = 1 + \frac{10,76}{2 \cdot 7 \cdot 26} = 1,03,$$

где

$k_i = 7$ – кратность пускового тока двигателя.

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора:

$$R'_2 = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot m_k \cdot P_H \cdot C_1^2 \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_k}\right)} = \frac{3 \cdot 808,29^2 \cdot (1 - 0,038)}{2 \cdot 1,9 \cdot 45000 \cdot 1,03^2 \cdot \left(2,4 + \frac{1}{0,162}\right)} = 1,212 \text{ Ом}$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = R'_2 \cdot \beta \cdot C_1 = 1,212 \cdot 2,4 \cdot 1,03 = 2,996 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_{\text{кн}} = R'_2 \cdot \gamma \cdot C_1 = 1,212 \cdot 5,687 \cdot 1,03 = 7,1 \text{ Ом},$$

где

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k}\right)^2 - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,162}\right)^2 - 2,4^2} = 5,687 - \text{коэффициент, характери-}$$

зующий соотношение индуктивного сопротивления короткого замыкания и приведённого активного сопротивления ротора.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в номинальном режиме:

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{\text{кн}} = 0,42 \cdot 7,1 = 2,982 \text{ Ом}$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния в номинальном режиме:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2\pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{2,982}{2\pi \cdot 50} = 9,49 \text{ мГн}$$

Приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора в номинальном режиме:

$$X'_{2\sigma} = 0,58 \cdot \frac{X_{\text{кн}}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{7,1}{1,03} = 4 \text{ Ом}$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2\pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{4}{2\pi \cdot 50} = 12,73 \text{ мГн}$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания (главное индуктивное сопротивление):

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{701,39}{10,76} = 65,18 \text{ Ом},$$

где

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} - I_{1\text{фн}} \cdot R_1)^2 + (U_{1\text{фн}} \cdot \sin \varphi_{\text{н}} - I_{1\text{фн}} \cdot X_{1\sigma})^2} = \\ &= \sqrt{(808,29 \cdot 0,846 - 26 \cdot 2,996)^2 + (808,29 \cdot 0,533 - 26 \cdot 2,982)^2} = \\ &= 701,39 \text{ В} - \text{ЭДС ветви намагничивания, наведённая потоком воздушного зазора (главным полем), в номинальном режиме.} \end{aligned}$$

Результирующая индуктивность цепи намагничивания:

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2\pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{65,18}{2\pi \cdot 50} = 0,207 \text{ Гн.}$$

2.3. Проверка адекватности расчётных параметров двигателя

Рассчитываем номинальный электромагнитный момента двигателя:

$$\begin{aligned} M_{\text{эм.н}}^* &= \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s_{\text{н}} \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_{\text{н}}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s_{\text{н}} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = \\ &= \frac{3 \cdot 808,29^2 \cdot 1,212}{314,159 \cdot 0,038 \cdot \left[7,1^2 + \left(2,996 + \frac{1,212}{0,038} \right)^2 + \left(\frac{2,996 \cdot 1,212}{0,038 \cdot 65,18} \right)^2 \right]} = \\ &= 156,7 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{эм.н}}^{**} &= \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_{\mu}}{L_{\mu} + L'_{2\sigma}} \cdot \Psi_{2\text{н}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\text{н}}^2 - I_0^2} = \\ &= \frac{3}{2} \cdot 1 \cdot \frac{0,207}{0,207 + 12,73 \cdot 10^{-3}} \cdot 3,15 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{26^2 - 10,76^2} = 149 \text{ Н} \cdot \text{м}, \end{aligned}$$

где

$$\Psi_{2\text{н}} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_{\mu} = \sqrt{2} \cdot 10,76 \cdot 0,207 = 3,15 \text{ Вб};$$

$z_p = 1$ – число пар полюсов двигателя.

Должны выполняться условия:

$$M_{\text{дв.н}} < M_{\text{эм.н}}^* \leq 1,1 \cdot M_{\text{дв.н}}; \quad M_{\text{эм.н}}^{**} \approx M_{\text{эм.н}}^*$$

Имеем:

$$M_{\text{дв.н}} = 148,9 < M_{\text{эм.н}}^* = 156,7 \leq 1,1 \cdot M_{\text{дв.н}} = 1,1 \cdot 149,2 = 163,79;$$

$$M_{\text{эм.н}}^{**} = 149 \text{ Нм} \approx M_{\text{эм.н}}^* = 156,7 \text{ Нм}.$$

Условия выполняются, значит найденные параметры являются приемлемыми.

2.4. Расчет естественных характеристик электродвигателя

2.4.1. Расчёт естественной механической характеристики

Рассчитываем естественную механическую характеристику $M(s)$ электродвигателя для частоты $f_{1\text{н}} = 50$ Гц:

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}$$

где M – электромагнитный момент двигателя.

По результатам расчёта строим естественную механическую характеристику (рис. 14) в программной среде Microsoft Excel, где значения угловой скорости вращения двигателя:

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s), \text{ рад/с.}$$

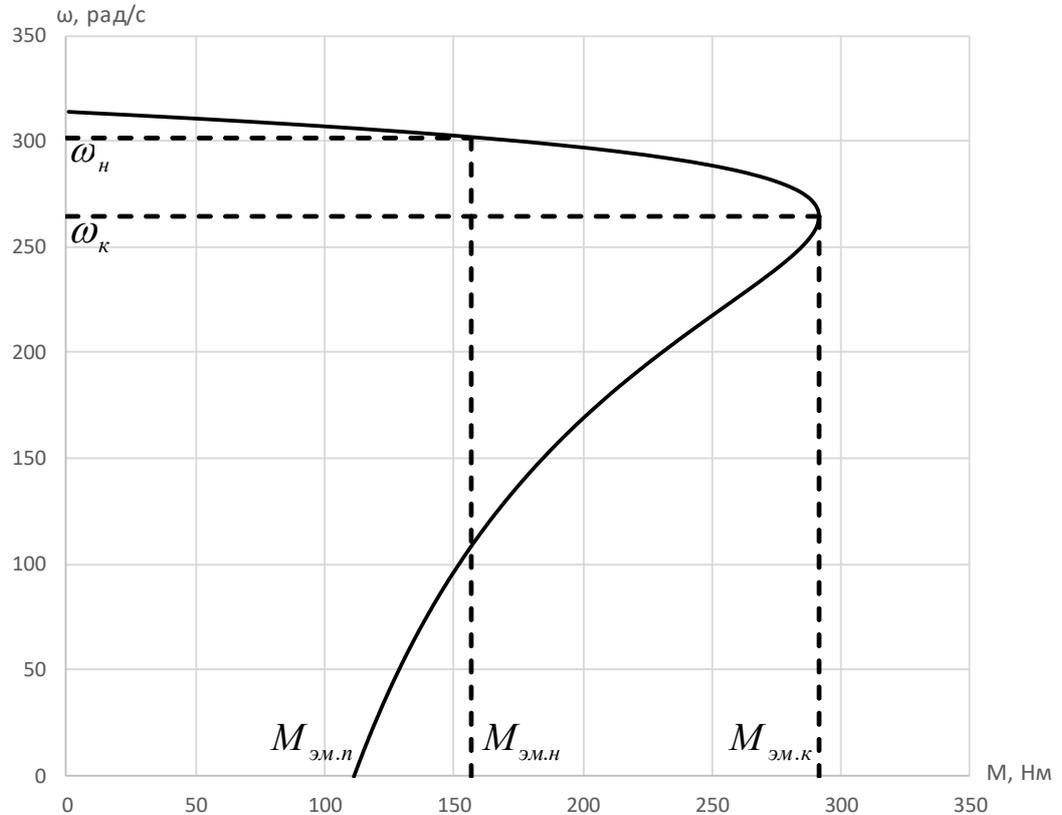


Рис. 14 Естественная механическая характеристика двигателя

Номинальный электромагнитный момент равен:

$$M_{эм.н} = \frac{3 \cdot U_{1фн}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s_n \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_n} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s_n \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 808,29^2 \cdot 1,212}{314,159 \cdot 0,038 \cdot \left[7,1^2 + \left(2,996 + \frac{1,212}{0,038} \right)^2 + \left(\frac{2,996 \cdot 1,212}{0,038 \cdot 65,18} \right)^2 \right]} =$$

$$= 156,7 \text{ Нм}$$

Критическое скольжение:

$$s_k = R'_2 \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_1}{X_\mu} \right)^2}{R_1^2 + X_{кн}^2}} = 1,212 \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{2,996}{65,18} \right)^2}{2,996^2 + 7,1^2}} = 0,1574$$

Максимальный (критический) электромагнитный момент:

$$M_{\text{эм.к}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left[R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{\text{кн}}^2) \cdot \left(1 + \left(\frac{R_1}{X_\mu} \right)^2 \right)} \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 808,29^2}{2 \cdot 314,159 \cdot \left[2,996 + \sqrt{(2,996^2 + 7,1^2) \cdot \left(1 + \left(\frac{2,996}{65,18} \right)^2 \right)} \right]} =$$

$$= 291,25 \text{ Нм}$$

Пусковой момент:

$$M_{\text{эм.п}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + (R_1 + R'_2)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{X_\mu} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 808,29^2 \cdot 1,212}{314,159 \cdot \left[7,1^2 + (2,996 + 1,212)^2 + \left(\frac{2,996 \cdot 1,212}{65,18} \right)^2 \right]} = 111 \text{ Нм.}$$

2.4.2. Расчёт естественной электромеханической характеристики

Рассчитываем естественную электромеханическую характеристику $I_1(s)$ электродвигателя для частоты $f_{1\text{н}} = 50$ Гц:

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

где

$I_1 = I_{1\text{ф}}$ – действующее значение фазного тока двигателя, А;

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\text{фн}}}{\sqrt{X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_\mu} \right)^2}} - \text{приведённый к обмотке}$$

статора ток ротора, А;

$$I_0 = \frac{U_{1\text{фн}}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2}} = \frac{808,29}{\sqrt{2,996^2 + (2,982 + 65,18)^2}} = 11,847 \text{ А}$$

– действующее значение тока холостого хода;

$$\sin \varphi_2 (s) = \frac{X_{\text{КН}}}{\sqrt{X_{\text{КН}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_\mu}\right)^2}}$$

По результатам расчёта строим электромеханическую характеристику $\omega(I_1)$ (рис. 15), где значения угловой скорости вращения двигателя:

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s), \text{ рад/с.}$$

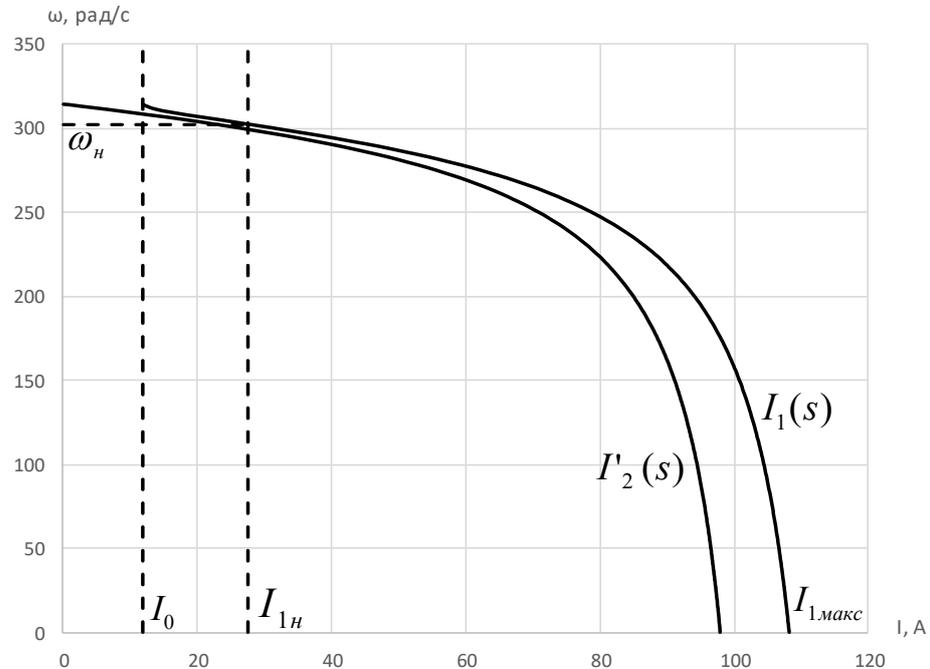


Рис. 15 Естественные электромеханические характеристики статора и ротора

Рассчитаем номинальный ток статора:

$$I'_2(s_H) = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{X_{\text{КН}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s_H \cdot X_\mu}\right)^2}} =$$

$$= \frac{808,29}{\sqrt{7,1^2 + \left(2,996 + \frac{1,212}{0,038}\right)^2 + \left(\frac{2,996 \cdot 1,212}{0,038 \cdot 65,18}\right)^2}} = 22,682 \text{ A}$$

$$\sin \varphi_2 (s_H) = \frac{X_{\text{КН}}}{\sqrt{X_{\text{КН}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s_H \cdot X_\mu}\right)^2}} =$$

$$= \frac{7,1}{\sqrt{7,1^2 + \left(2,996 + \frac{1,212}{0,038}\right)^2 + \left(\frac{2,996 \cdot 1,212}{0,038 \cdot 65,18}\right)^2}} = 0,199$$

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

$$= \sqrt{11,847^2 + 22,682^2 + 2 \cdot 11,847 \cdot 22,682 \cdot 0,199} = 27,6 \text{ A}$$

Рассчитаем максимальный (пусковой) ток статора:

$$I'_2(s=1) = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{X_{KH}^2 + (R_1 + R'_2)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{X_\mu}\right)^2}} =$$

$$= \frac{808,29}{\sqrt{7,1^2 + (2,996 + 1,212)^2 + \left(\frac{2,996 \cdot 1,212}{65,18}\right)^2}} = 97,933 \text{ A}$$

$$\sin \varphi_2(s=1) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{X_{KH}^2 + (R_1 + R'_2)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{X_\mu}\right)^2}} =$$

$$= \frac{7,1}{\sqrt{7,1^2 + (2,996 + 1,212)^2 + \left(\frac{2,996 \cdot 1,212}{65,18}\right)^2}} = 0,86$$

$$I_1(s=1) = I_{1\text{макс}} = \sqrt{I_0^2 + I_2^2(s=1) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2(s=1) \cdot \sin \varphi_2(s=1)} =$$

$$= \sqrt{11,847^2 + 97,933^2 + 2 \cdot 11,847 \cdot 97,933 \cdot 0,86} = 108,29 \text{ A}$$

2.4.3. Оценка достоверности расчетных характеристик двигателя

В результате расчета естественных характеристик двигателя получены следующие параметры для их характерных точек:

$$s_H = 3,8\%; \quad s_K = 15,74\%; \quad I_{1H} = 27,6 \text{ A}; \quad I_{1\text{макс}} = 108,29 \text{ A};$$

$$M_{\text{эм.н}} = 156,7 \text{ Нм}; \quad M_{\text{эм.макс}} = 291,25 \text{ Нм}; \quad M_{\text{эм.п}} = 111 \text{ Нм};$$

$$\frac{I_{1\text{макс}}}{I_{1H}} = \frac{108,29}{27,6} = 3,92; \quad \frac{M_{\text{эм.макс}}}{M_{\text{эм.н}}} = \frac{291,25}{156,7} = 1,86; \quad \frac{M_{\text{эм.п}}}{M_{\text{эм.н}}} = \frac{111}{156,7} = 0,71 \text{ Нм.}$$

Справочные и расчетные параметры двигателя:

$$s_H = 3,8\%; \quad I_{\text{дв.н}} = 26 \text{ A}; \quad M_{\text{дв.н}} = 148,9 \text{ Нм}$$

$$\frac{I_{\text{дв.макс}}}{I_{\text{дв.н}}} = 7; \quad \frac{M_{\text{дв.макс}}}{M_{\text{дв.н}}} = 1,9; \quad \frac{M_{\text{дв.п}}}{M_{\text{дв.н}}} = 1.$$

2.4.4. Механическая характеристика насоса

Момент от сил трения на валу электродвигателя можно принять постоянным и равным:

$$M_{\text{с.дв}} = M_{\text{эм.н}} - M_{\text{дв.н}} = 156,7 - 148,9 = 7,8 \text{ Нм.}$$

Для центробежного насоса характерен вентиляторный тип нагрузки, поэтому статический момент сопротивления на валу двигателя $M_c(\omega)$ будет изменяться в зависимости от скорости вращения двигателя в соответствии с выражением [3]:

$$M_c(\omega) = M_{\text{с.дв}} + (M_{\text{с.макс}} - M_{\text{с.дв}}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{дв.н}}} \right)^3 =$$

$$= 7,8 + (157,6 - 7,8) \cdot \left(\frac{\omega}{302,22} \right)^3,$$

где

$M_{\text{с.макс}} = M_{\text{эм.н}} = 157,6 \text{ Нм}$ – момент нагрузки при номинальной скорости вращения.

Механические характеристики насоса, приведены на рис. 16.

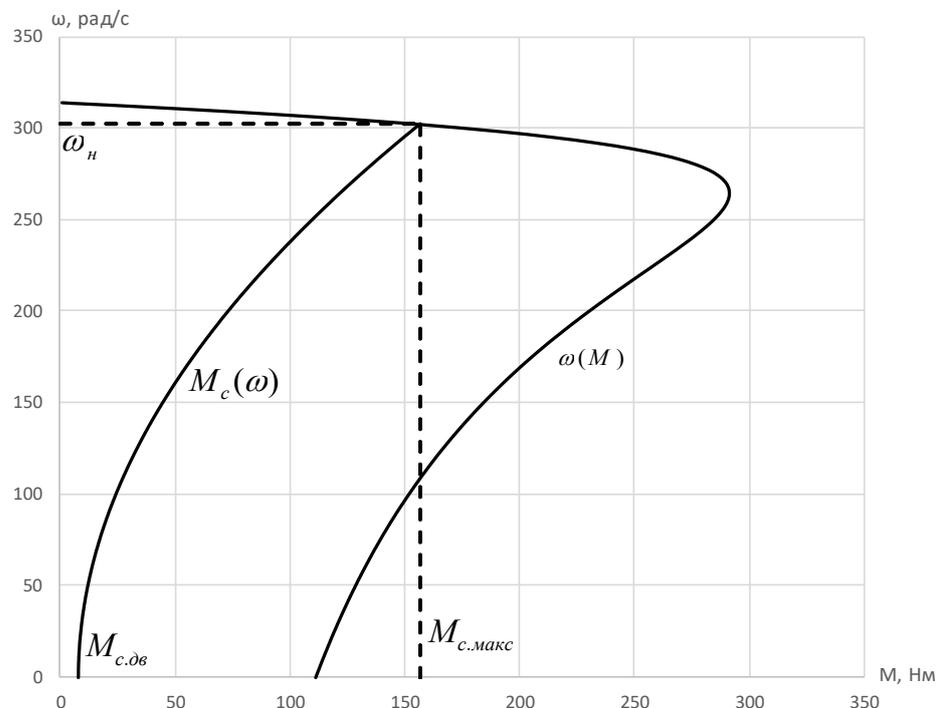


Рис. 16 Механическая характеристика двигателя $\omega(M)$ и вентиляторной нагрузки $M_c(\omega)$

Проанализировав характеристики двигателя ПЭДН – 45 – 117 и насоса ЭЦН5-30-2550 можно сделать вывод, что двигатель обеспечивает необходимый момент для пуска и работы установки.

Эквивалентный момент инерции электропривода принимаем [4]:

$$J_{\text{э}} = 1,2 \cdot J_{\text{дв}} = 1,2 \cdot 0,027 = 0,0324 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

3. Выбор наземного оборудования

3.1. Выбор закона частотного регулирования

В скалярном управлении используются два закона:

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} \text{ – линейный закон управления;}$$

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const} \text{ – квадратичный закон управления.}$$

Для регулируемых электроприводов центробежных насосов и вентиляторов используется квадратичная зависимость напряжения от частоты. За счёт большего снижения напряжения двигателя при уменьшении частоты достигается уменьшение потребляемой электроприводом энергии. [1]

3.2. Методика подбора наземного оборудования

3.2.1. Выбор трансформатора

Для питания погружных электроприводных центробежных насосов добычи нефти применяются трансформаторы типа ТМПН.

По номинальной мощности выбранного двигателя вычисляется необходимая мощность трансформатора.

Минимально допустимая мощность ТМПН рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{тр}} = P_{\text{дв.н}} \cdot k = 45000 \cdot 1,6 = 72 \text{ кВа,}$$

где

$$P_{\text{дв.н}} = 45 \text{ кВт} \text{ – мощность погружного электродвигателя;}$$

$$k = 1,6 \text{ – постоянный коэффициент.}$$

Выбираем ТМПН из таблицы (Приложение 1) ТМПН – 100/3 – УХЛ 1.

Выбирается нужная ступень напряжения на трансформаторе (необходимая отпайка ТМПН должна находиться в середине диапазона переключений, для того чтобы была возможность поднять напряжение при возникновении нестандартных ситуаций, например, «заклинивание»), для чего ориентиро-

точно определяется необходимое напряжение на выходе трансформатора с учётом потерь напряжения в кабельной линии по формуле:

$$U_{\text{ст.тр}} = \frac{f}{50} \cdot U_{\text{дв.н}} + \Delta U,$$

где

$U_{\text{дв.н}} = 1400$ В – номинальное линейное напряжение ПЭД;

ΔU – потери напряжения в кабельной линии;

f – предполагаемая рабочая частота питающего напряжения.

Потери напряжения в кабельной линии приведены в таблице приложения 2.

Расчёт ведём как для кабеля с медными жилами сечением $3 \cdot 16$ мм².

Для номинального тока ПЭД $I_{\text{дв.н}} = 26$ А и температуры пластовой жидкости $70 - 90$ °С на 1000 м длины кабеля потери напряжения составят 57 В.

Тогда найдём потери напряжения на всей длине кабельной линии:

$$\Delta U = \frac{\text{табл. знач.} \cdot L_{\text{к}}}{1000} = \frac{57 \cdot 2600}{1000} = 148,2 \text{ В},$$

где

$L_{\text{к}} = 2600$ м – общая длина кабеля.

Найдём напряжение ступени трансформатора при 60 Гц:

$$U_{\text{ст.тр}} = \frac{f}{50} \cdot U_{\text{дв.н}} + \Delta U = \frac{60}{50} \cdot 1400 + 148,2 = 1828,2 \text{ В}$$

Так как в трансформаторе ТМПН – 100/3 – УХЛ 1 максимальная ступень регулирования ниже по напряжению чем нам необходимо (см. приложение 1), то заменяем трансформатор на ТМПН – 125/3 – УХЛ 1 и выбираем ступень регулирования с напряжением:

$$U_{\text{ст.тр}} = 1840 \text{ В}.$$

Таблица 5 – Характеристики трансформатора ТМПН – 125/3 – УХЛ 1

Номинальная мощность, кВа	Количество ступеней регулирования	Номинальное напряжение ВН, В	Потери, Вт		Напряжение к.з., %
			Х.х.	К.з.	
125	36	1540	440	2100	5,5

3.2.2. Выбор станции управления

Через номинальный ток двигателя и коэффициент трансформации ТМПН вычисляется максимальный ток на первичной обмотке трансформатора. По максимальному току на первичной обмотке подбирается станция управления. В зависимости от потребляемой мощности ПЭД подбирается СУ.

Для ПЭДТН 45-117 из Приложения 5 выбираем СУ с частотным регулированием «Электон-05» 630.

Таблица 6 – Основные характеристики СУ «Электон-05» 630

Номинальный ток первичной силовой цепи, А	630
Номинальная мощность преобразователя (при 380 В), кВА	410
Номинальное напряжение питания, В	380 (50±1Гц)
Диапазон отклонения питающего напряжения от ном. значения, %	-50...+25
Температурный диапазон, °С	-60...+40
Диапазон изменения частоты, Гц	3,5...80±1%
Несущая частота преобразователя, кГц	2,5...10
Габаритные размеры, мм	1973x1204x1208
Масса, кг	805



Рис. 17 Станция управления Электон-05 (вид спереди)

4. Расчёт статических характеристик системы ПЧ – ПЭД при частотном регулировании

4.1. Расчёт вольт-частотной характеристики ПЧ

Вольт-частотная характеристика преобразователя при законе регулирования $U_1/f_1^2 = const$, рассчитывается по выражению [1]:

$$U_1(f_1) = U_{1\phiн} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1н}}\right)^2 = 808.29 \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2.$$

Характеристика приведена на рис. 18.

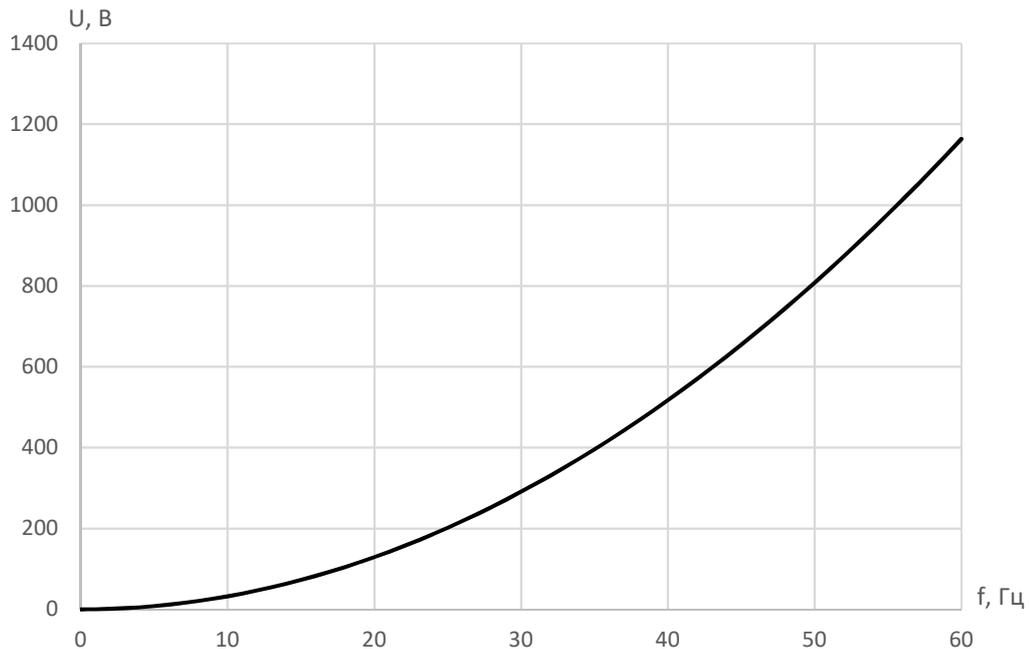


Рис. 18 Вольт-частотная характеристика ПЧ

Максимальная частота инвертора, соответствующая номинальной рабочей скорости двигателя $\omega_{дв.н} = 302,22$ рад/с, равна $f_{и.макс} = f_{1н} = 50$ Гц. [1] Для обеспечения пусковой характеристики двигателя принимаем минимальную частоту инвертора $f_{и.мин} = 10$ Гц.

4.2. Механические характеристики системы ПЧ – ПЭД при законе регулирования $U_1/f_1^2 = const$

Механические характеристики $\omega(M)$ разомкнутой системы преобразователь частоты – погружной электродвигатель при законе регулирования $U_1/f_1^2 = const$ для ряда выбранных значений выходной частоты инвертора: $f_{1.1} = 50$ Гц; $f_{1.2} = 40$ Гц; $f_{1.3} = 30$ Гц; $f_{1.4} = 20$ Гц; $f_{1.5} = 10$ Гц – рассчитываются с помощью программы Microsoft Excel по выражениям:

$$M(s, f_1) = \frac{3 \cdot U_1^2(f_1) \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot s \cdot \left[\left(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_\mu \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot U_1^2(f_1) \cdot 1,212}{314,159 \cdot \frac{f_1}{50} \cdot s \cdot \left[\left(7,1 \cdot \frac{f_1}{50} \right)^2 + \left(2,996 + \frac{1,212}{s} \right)^2 + \left(\frac{2,996 \cdot 1,212}{s \cdot 65,18 \cdot \frac{f_1}{50}} \right)^2 \right]}$$

где

$$U_1(f_1) = U_{1\Phi H} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 = 808,29 \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^2 ;$$

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

По результатам расчёта строим механические характеристики (рис. 19).

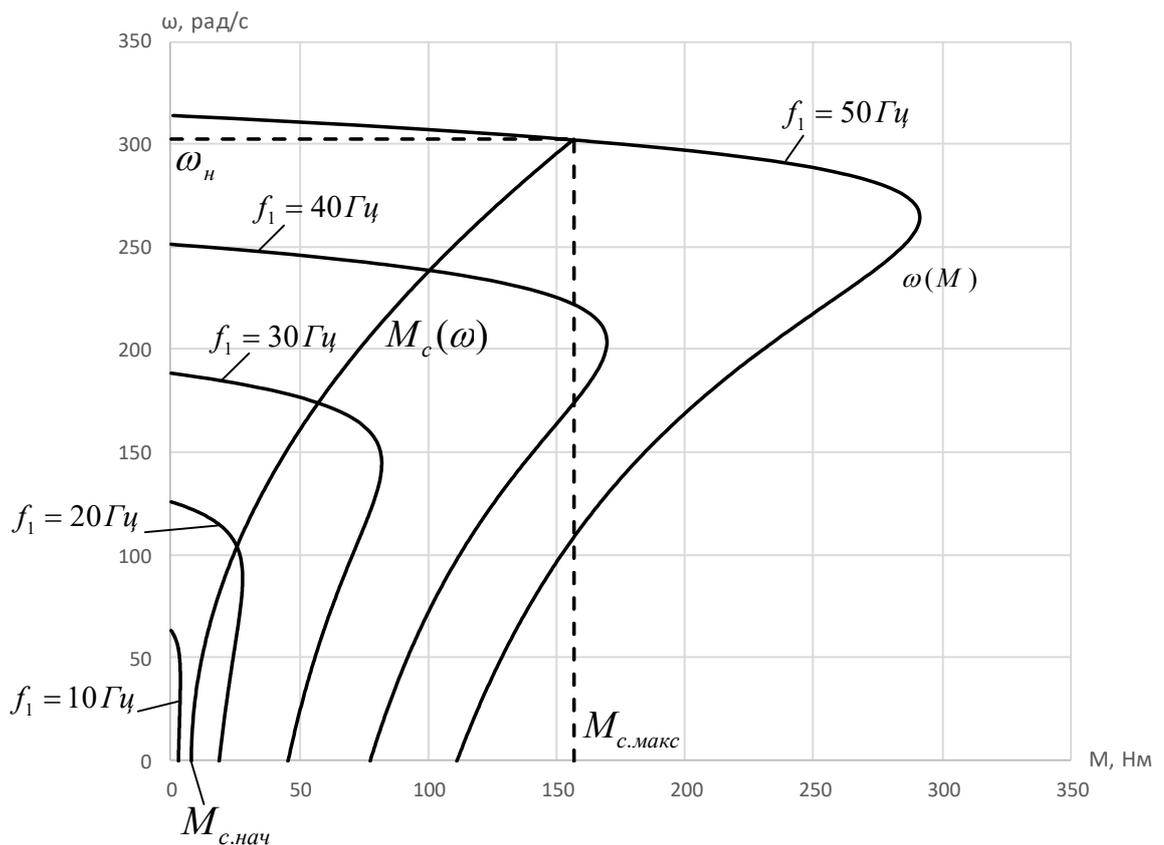


Рис. 19 Механические характеристики системы ПЧ – ПЭД при законе регулирования $U_1/f_1^2 = const$

После анализа характеристик можно сделать вывод, что при частоте 10 Гц пусковой момент двигателя меньше, чем начальный момент нагрузки, а, значит, пуск электропривода обеспечить не получится.

Для обеспечения двукратного пускового момента экспериментально подбираем параметры начального участка вольт-частотной характеристики преобразователя. Окончательно для расчёта выбраны следующие параметры: $U_{1\text{нач}} = 45 \text{ В}$, $f_{1\text{нач}} = 10 \text{ Гц}$.

В результате вольт-частотная характеристика представлена зависимостью:

$$U_1(f_1) = U_{1\text{нач}} + (U_{1\text{фн}} - U_{1\text{нач}}) \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2.$$

Зависимость $U_1(f_1)$ приведена на рис. 20.

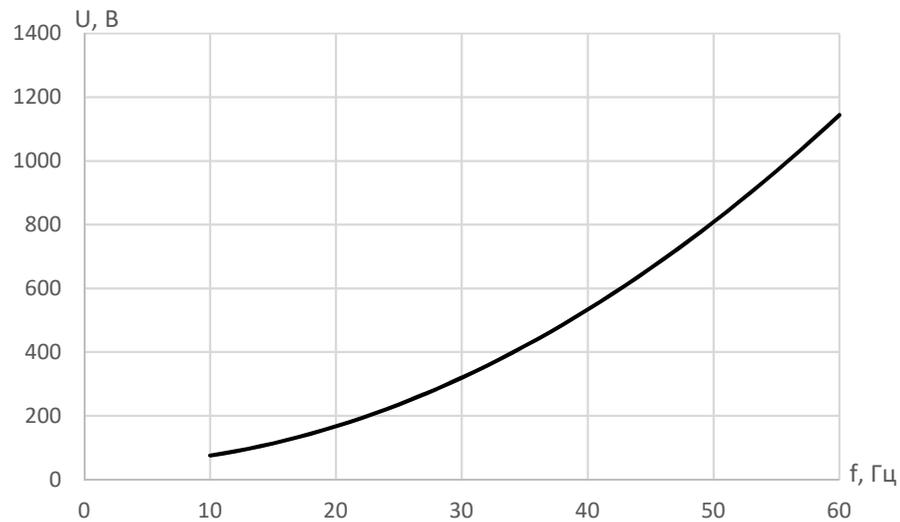


Рис. 20 Вольт-частотная характеристика ПЧ, изменяющаяся по закону:

$$U_1(f_1) = U_{1\text{нач}} + (U_{1\text{фн}} - U_{1\text{нач}}) \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2$$

Механические характеристики системы ПЧ – ПЭД, рассчитанные с учётом выбранной настройки вольт-частотной характеристики, представлены на рис. 21.

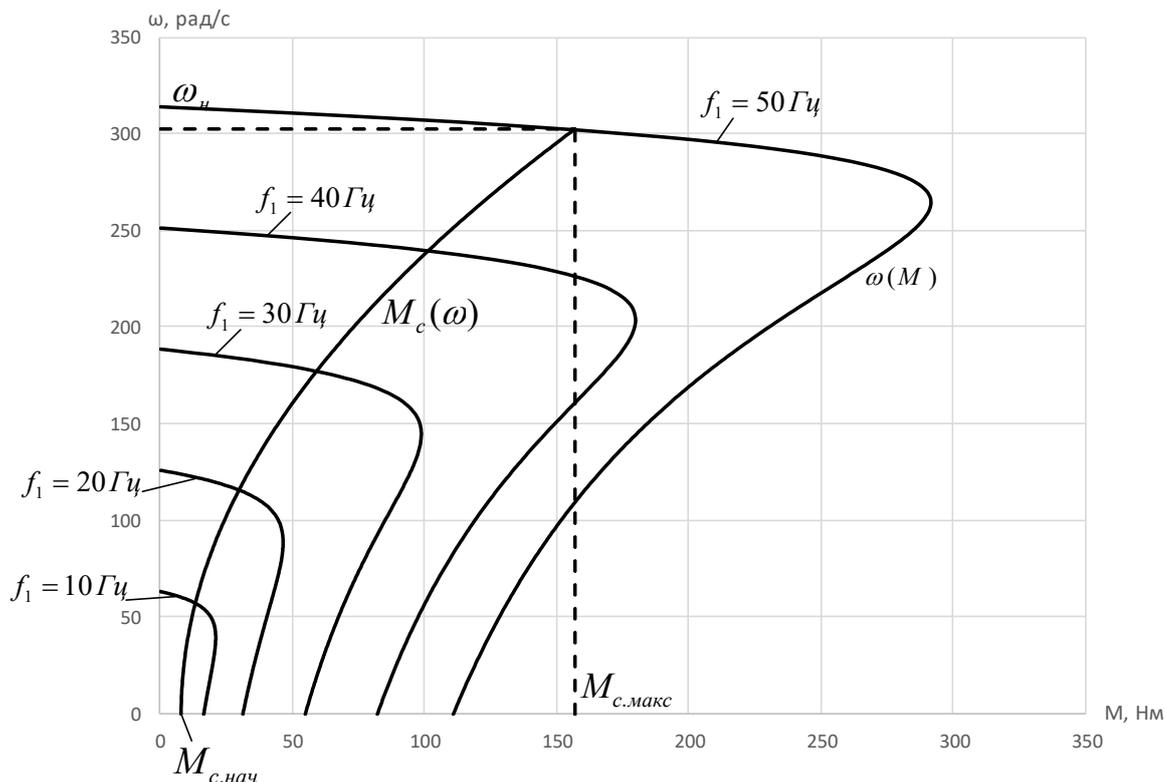


Рис. 21 Механические характеристики системы ПЧ – ПЭД при настройке на вольт-частотную характеристику: $U_1(f_1) = U_{1нач} + (U_{1фн} - U_{1нач}) \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2$

На данной характеристике при частоте 10 Гц пусковой момент двигателя превышает начальное сопротивление механизма более чем в 2 раза:

$$M_{п.10Гц} = 16,7 \text{ Нм};$$

$$\frac{M_{п.10Гц}}{M_{с.нач}} = \frac{16,7}{7,8} = 2,14.$$

Таким образом получится обеспечить пуск электропривода при минимальной частоте 10 Гц.

4.3. Электромеханические характеристики системы ПЧ – ПЭД при законе регулирования $U_1/f_1^2 = const$

Электромеханические характеристики $\omega(I)$ разомкнутой системы преобразователь частоты – погружной электродвигатель при законе регулирования $U_1/f_1^2 = const$ для ряда выбранных значений выходной частоты инвертора: $f_{1.1} = 50$ Гц; $f_{1.2} = 40$ Гц; $f_{1.3} = 30$ Гц; $f_{1.4} = 20$ Гц; $f_{1.5} = 10$ Гц – рассчитываются с помощью программы Microsoft Excel по выражениям:

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

$$I'_2(s, f_1) = \frac{U_1(f_1)}{\pm \sqrt{\left(X_{\text{кн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_\mu \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}}\right)^2}} =$$

$$= \frac{U_1(f_1)}{\pm \sqrt{\left(7,1 \cdot \frac{f_1}{50}\right)^2 + \left(2,996 + \frac{1,212}{s}\right)^2 + \left(\frac{2,996 \cdot 1,212}{s \cdot 65,18 \cdot \frac{f_1}{50}}\right)^2}};$$

$$I_0(f_1) = \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2}} = \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{2,996^2 + (2,982 + 65,18)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2}};$$

$$\sin \varphi_2(s, f_1) = \frac{X_{\text{кн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}}{\pm \sqrt{\left(X_{\text{кн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_\mu \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}}\right)^2}} =$$

$$= \frac{7,1 \cdot \frac{f_1}{50}}{\pm \sqrt{\left(7,1 \cdot \frac{f_1}{50}\right)^2 + \left(2,996 + \frac{1,212}{s}\right)^2 + \left(\frac{2,996 \cdot 1,212}{s \cdot 65,18 \cdot \frac{f_1}{50}}\right)^2}},$$

где

$$U_1(f_1) = U_{1\text{нач}} + (U_{1\text{фн}} - U_{1\text{нач}}) \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2 = 45 + (808,29 - 45) \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2 ;$$

$$\omega(s, f_1) = \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \cdot (1 - s) = 314,159 \cdot \frac{f_1}{50} \cdot (1 - s).$$

По результатам расчёта строим семейство электромеханических характеристик $\omega(I_1)$ системы ПЧ – ПЭД (рис. 22).

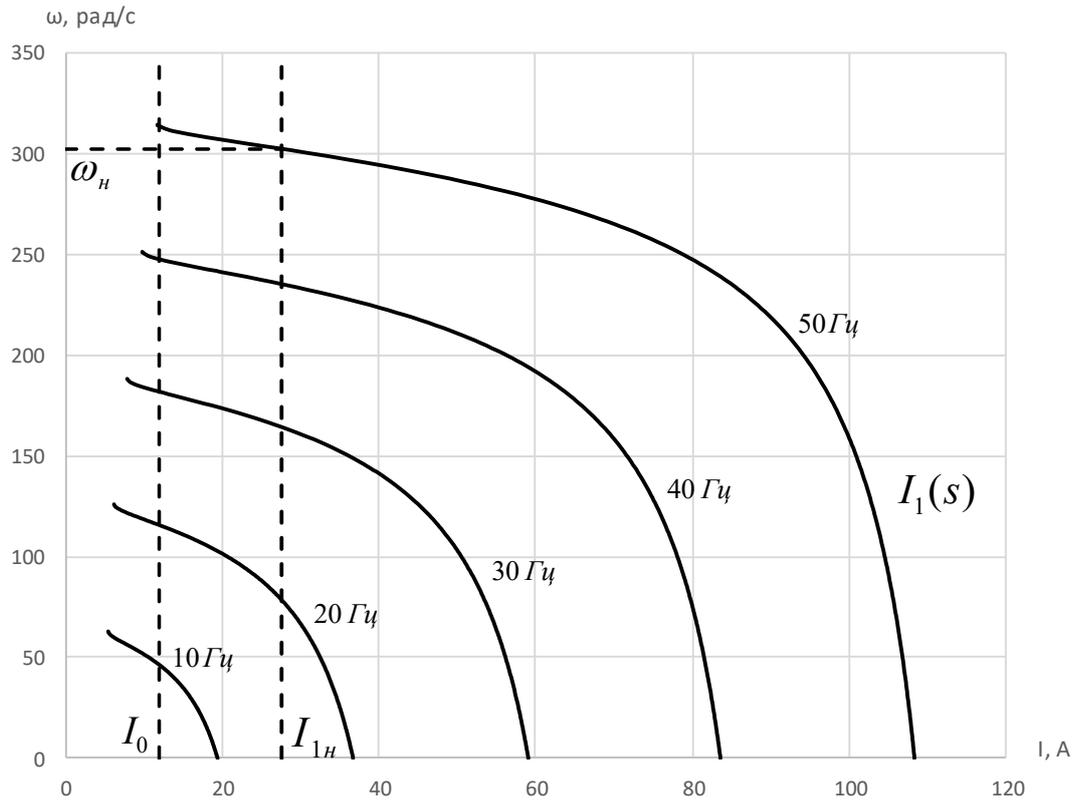


Рис. 22 Искусственные электромеханические характеристики системы ПЧ - ПЭД при настройке на вольт-частотную характеристику:

$$U_1(f_1) = U_{1\text{нач}} + (U_{1\text{фн}} - U_{1\text{нач}}) \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2$$

5. Частотно-регулируемый электропривод УЭЦН со скалярным управлением

Функциональная схема электропривода изображена на рис. 23.

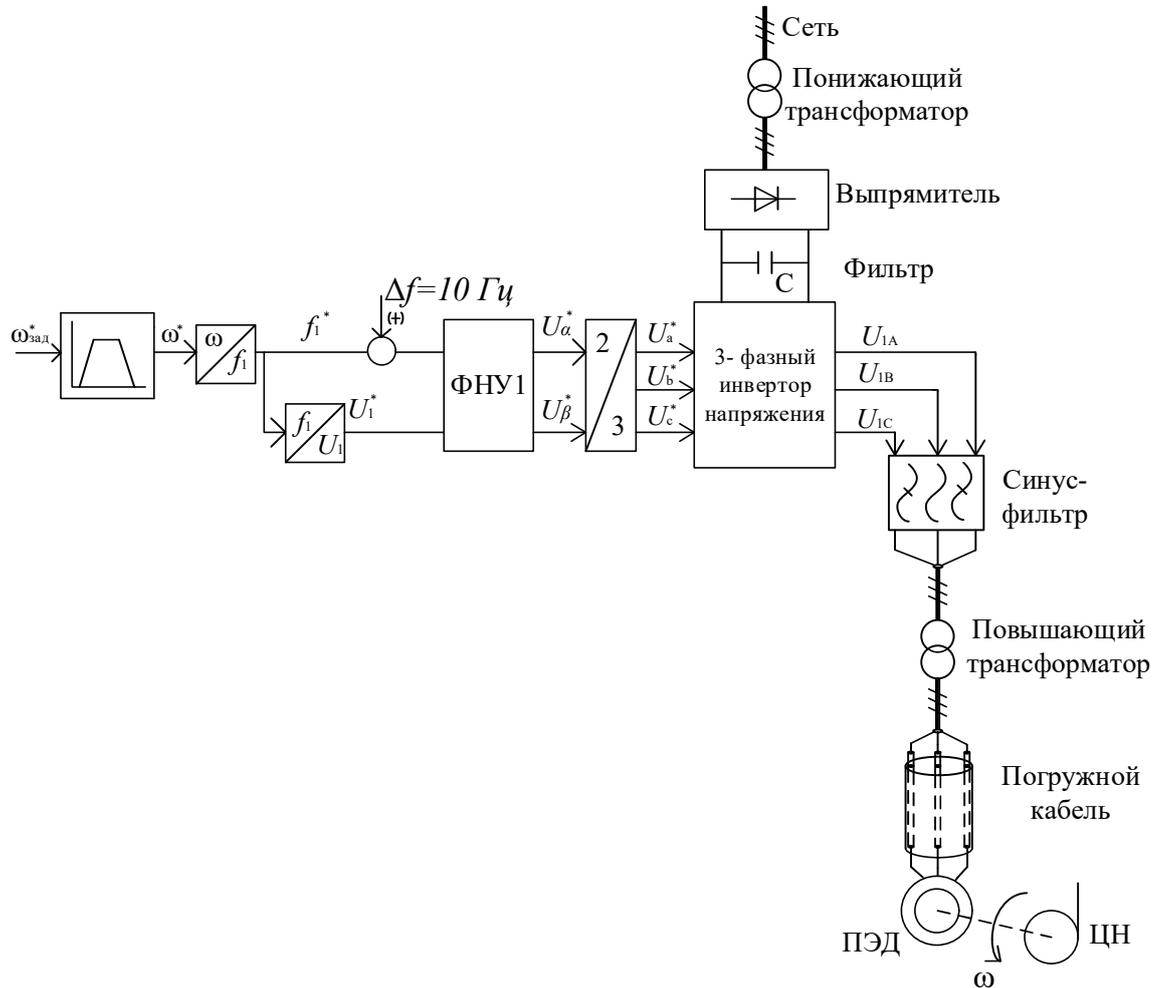


Рис. 23 Функциональная схема УЭЦН

Система уравнений, описывающих работу асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе α, β имеет вид [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{1\alpha}}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\alpha} - \frac{R_{1\beta}}{\sigma \cdot L_1} \cdot I_{1\alpha} + \frac{R'_2 \cdot L_\mu}{\sigma \cdot L_1 \cdot L'_2{}^2} \cdot \Psi_{2\alpha} + \frac{L_\mu}{\sigma \cdot L_1 \cdot L'_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ \frac{dI_{1\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\beta} - \frac{R_{1\alpha}}{\sigma \cdot L_1} \cdot I_{1\beta} + \frac{R'_2 \cdot L_\mu}{\sigma \cdot L_1 \cdot L'_2{}^2} \cdot \Psi_{2\beta} - \frac{L_\mu}{\sigma \cdot L_1 \cdot L'_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} = -\frac{R'_2}{L'_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + \frac{R'_2 \cdot L_\mu}{L'_2} \cdot I_{1\alpha} - z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} = -\frac{R'_2}{L'_2} \cdot \Psi_{2\beta} + \frac{R'_2 \cdot L_\mu}{L'_2} \cdot I_{1\beta} + z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_\mu}{L'_2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \Psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}); \\ J_3 \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{эм}} - M_c. \end{array} \right.$$

где

$U_{1\alpha} = U_{1m} \cdot \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t)$ – косинусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси α ортогональной неподвижной системы координат α, β , В;

$U_{1\beta} = U_{1m} \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t)$ – синусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси β ортогональной неподвижной системы координат α, β , В;

$U_{1m} = \sqrt{2} \cdot U_1$ – амплитудное значение фазного напряжения статорной обмотки, В;

U_1 – действующее значение фазного напряжения статорной обмотки, В;

f_1 – частота напряжения статора, Гц;

$I_{1\alpha}, I_{1\beta}$ – составляющие тока статора (фазные токи обмотки статора) в системе координат α, β , А;

$\Psi_{2\alpha}, \Psi_{2\beta}$ – составляющие потокосцепления ротора в системе координат α, β , Вб;

$M_{\text{эм}}$ – электромагнитный момент двигателя, Нм;

M_c – момент статического сопротивления на валу двигателя, включая собственный момент сопротивления двигателя, Нм.;

$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 \cdot L'_2}$ – коэффициент рассеяния;

J_3 – эквивалентный момент инерции электропривода, кг · м².

В операторной форме записи система уравнений принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1\alpha} = R_{1\beta} \cdot (T_{1\beta} p + 1) \cdot I_{1\alpha} - \frac{R'_2 \cdot L_\mu}{L_2^2} \cdot \Psi_{2\alpha} - \frac{L_\mu}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ U_{1\beta} = R_{1\alpha} \cdot (T_{1\alpha} p + 1) \cdot I_{1\beta} - \frac{R'_2 \cdot L_\mu}{L_2^2} \cdot \Psi_{2\beta} - \frac{L_\mu}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ 0 = (T_2 p + 1) \cdot \Psi_{2\alpha} - L_\mu \cdot I_{1\alpha} + \frac{L_2}{R'_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ 0 = (T_2 p + 1) \cdot \Psi_{2\beta} - L_\mu \cdot I_{1\beta} + \frac{L_2}{R'_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_\mu}{L'_2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \Psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}); \\ \omega = \frac{1}{J_\beta \cdot p} \cdot (M_{\text{эм}} - M_c). \end{array} \right.$$

где

$$R_{1\beta} = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_\mu^2}{L'_2}; \quad T_{1\beta} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{1\beta}}; \quad T_2 = \frac{L'_2}{R'_2}.$$

Структурная схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и вентиляторной нагрузкой приведена на рис. 24.

Входные параметры напряжения переменного тока – фазные напряжения статорных обмоток двухфазного АД:

$$U_{1\alpha} = U_{1m} \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t); \quad U_{1\beta} = U_{1m} \cdot \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t).$$

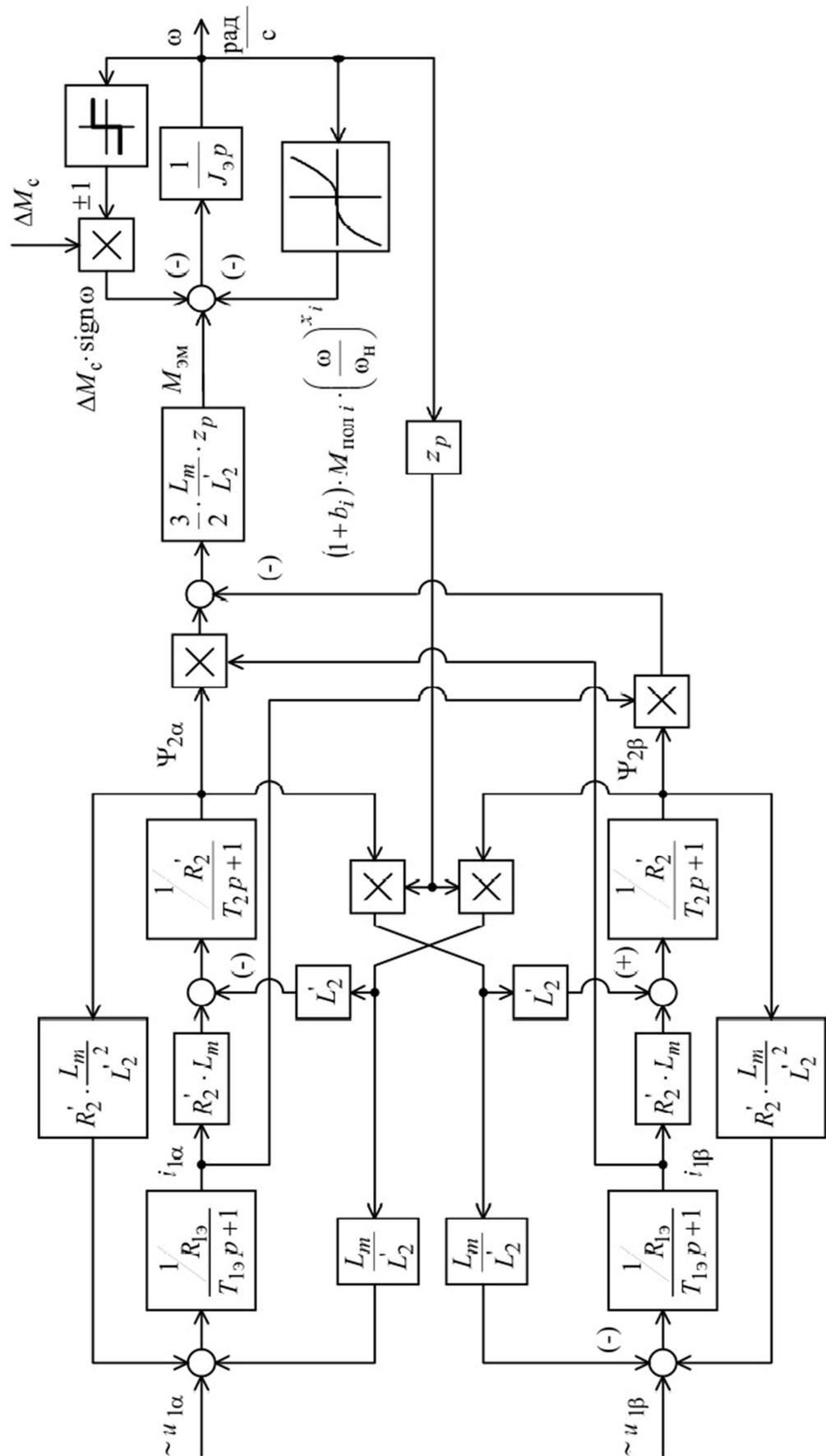


Рис. 24 Структурная схема АД с КР с вентиляторной нагрузкой

5.1. Определение параметров звеньев структурной схемы двигателя

Эквивалентные индуктивности обмоток:

статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_\mu = 9.49 \cdot 10^{-3} + 0,207 = 0,21649 \text{ Гн};$$

ротора

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_\mu = 12.73 \cdot 10^{-3} + 0,207 = 0.21973 \text{ Гн.}$$

Коэффициент рассеяния:

$$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 \cdot L'_2} = 1 - \frac{0,207^2}{0,21649 \cdot 0,21973} = 0,099.$$

Эквивалентное сопротивление:

$$R_{1\sigma} = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_\mu^2}{L'_2{}^2} = 2,996 + 1,212 \cdot \frac{0,207^2}{0,21973^2} = 4,072 \text{ Ом.}$$

Электромагнитные постоянные времени:

$$T_{1\sigma} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{1\sigma}} = \frac{0,099 \cdot 0,21649}{4,072} = 0,0053 \text{ с}; \quad T_2 = \frac{L'_2}{R'_2} = \frac{0,21973}{1,212} = 0,1813 \text{ с.}$$

Для исследования процессов при частотном регулировании в самом электродвигателе и системе ПЧ – ПЭД используем метод имитационного моделирования. В качестве среды моделирования используем программную среду MatLAB/Simulink.

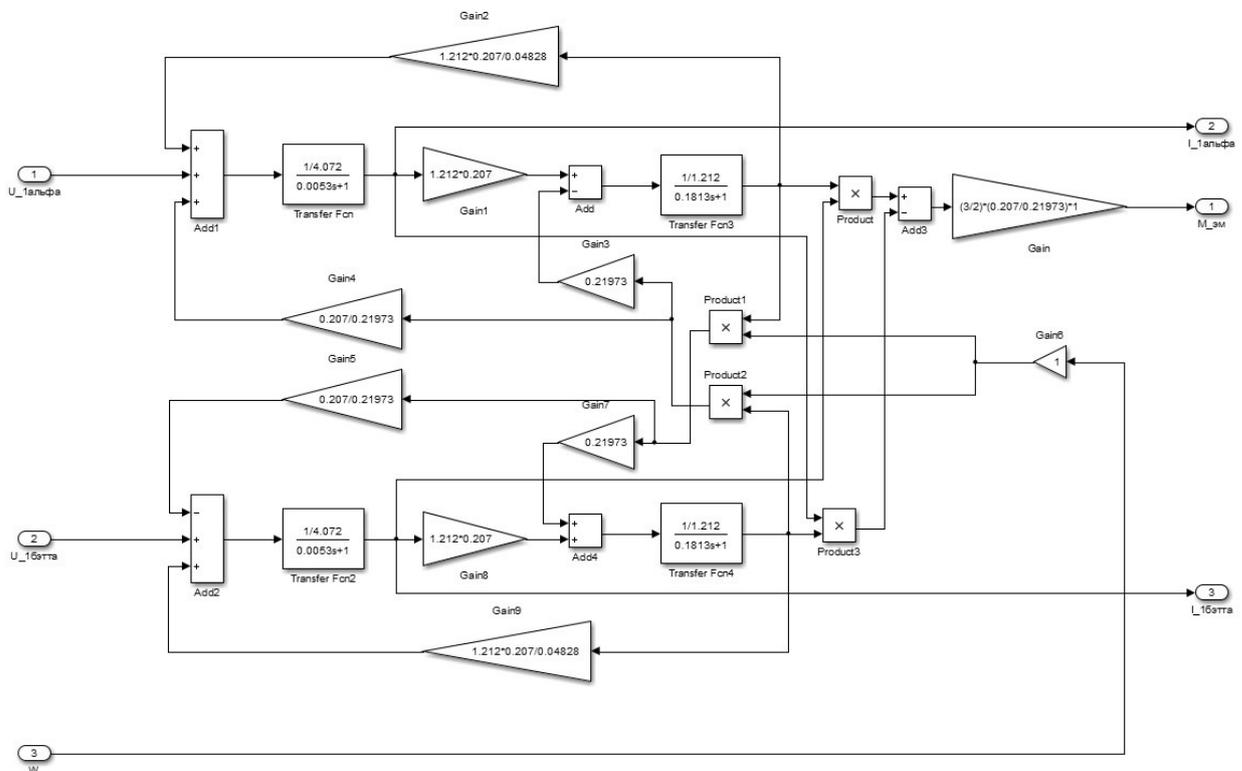


Рис. 25 Имитационная модель двухфазного АД с КР в программной среде MatLAB/Simulink

Собираем схему силового канала электропривода с двухфазным асинхронным двигателем в неподвижной системе координат.

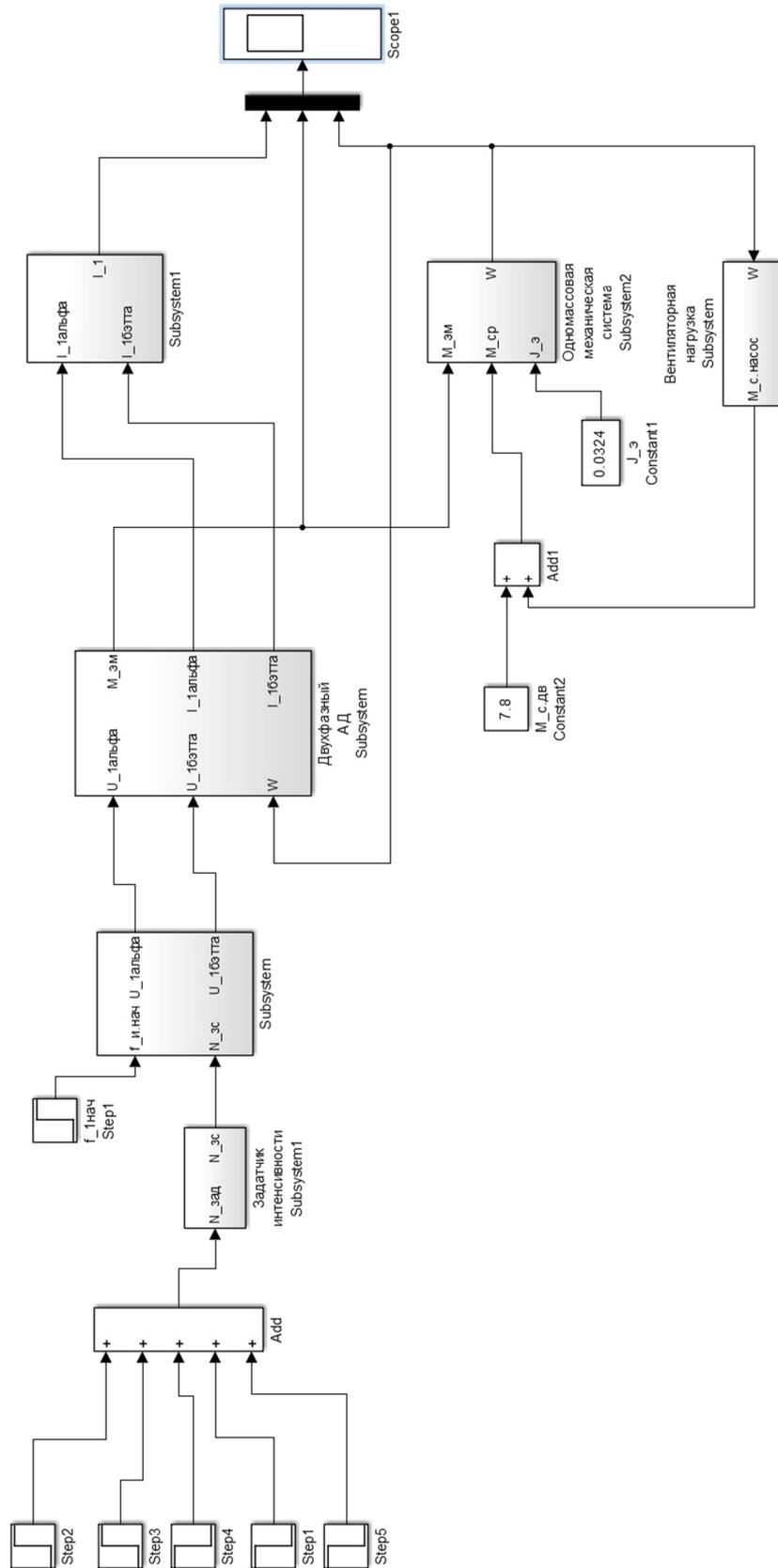


Рис. 26 Имитационная модель силового канала электропривода со скалярным управлением

В состав схемы входят блоки:

- Двухфазный асинхронный двигатель
- Одномассовая механическая система
- Вентиляторная нагрузка
- Формирователь напряжений управления
- Задатчик интенсивности

Эти блоки представлены далее на рисунках 29 – 33.

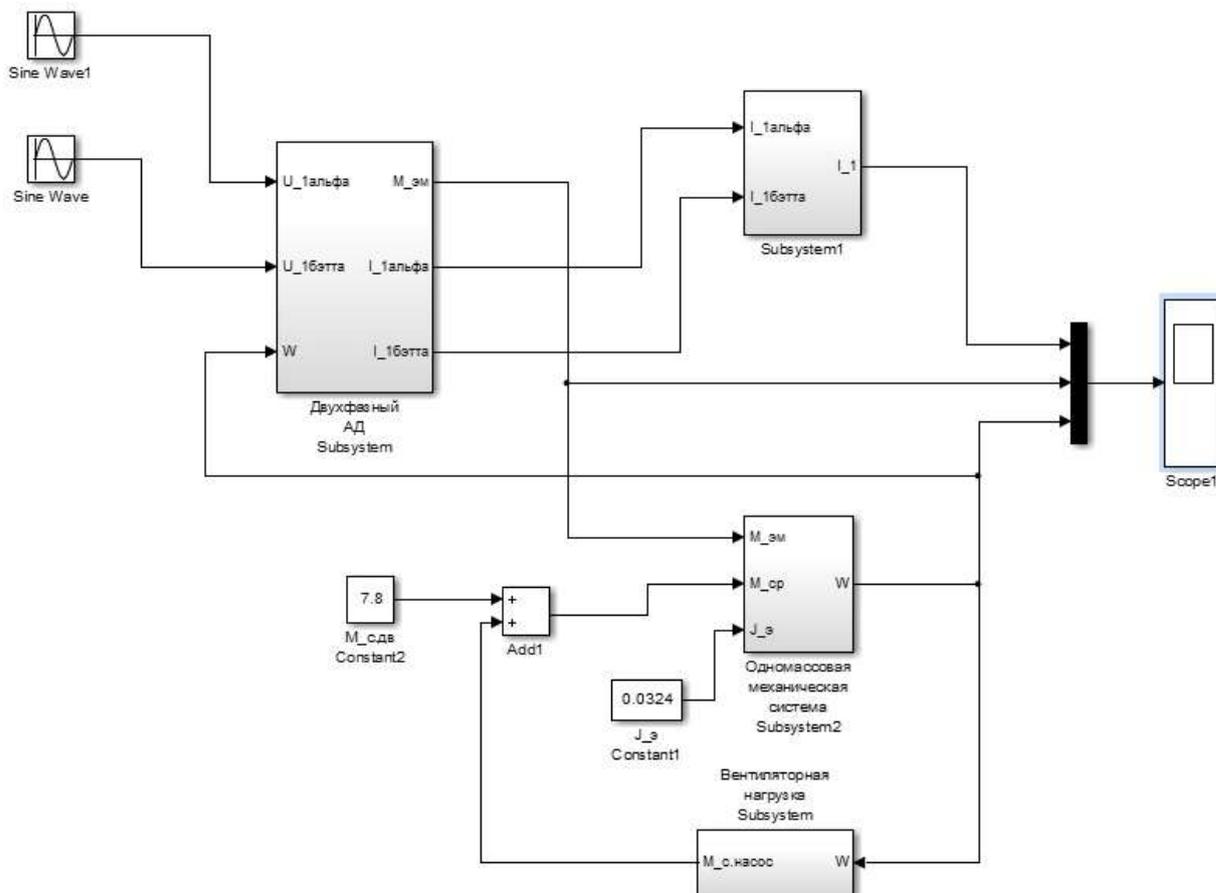


Рис. 27 Имитационная модель двухфазного асинхронного двигателя с одномассовой механической системой и вентиляторной нагрузкой

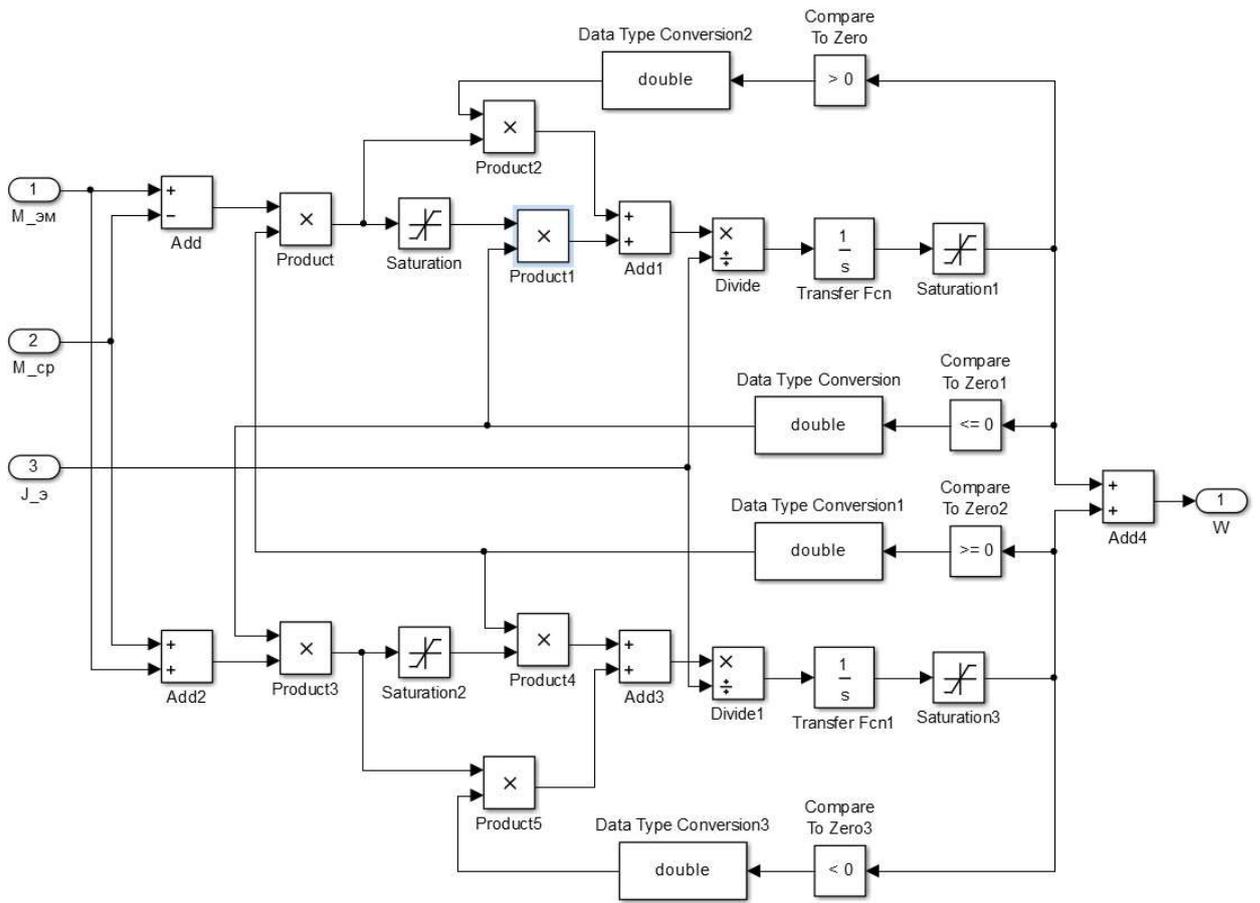


Рис. 28 Имитационная модель одномассовой механической системы

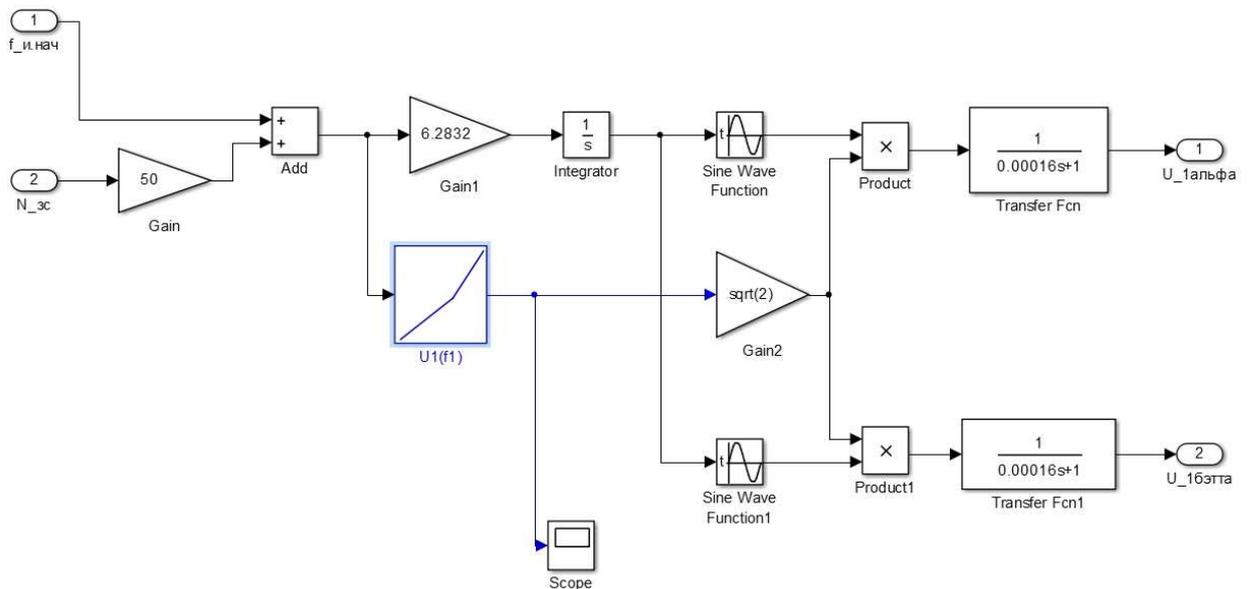


Рис. 29 Имитационная модель формирователя напряжений управления

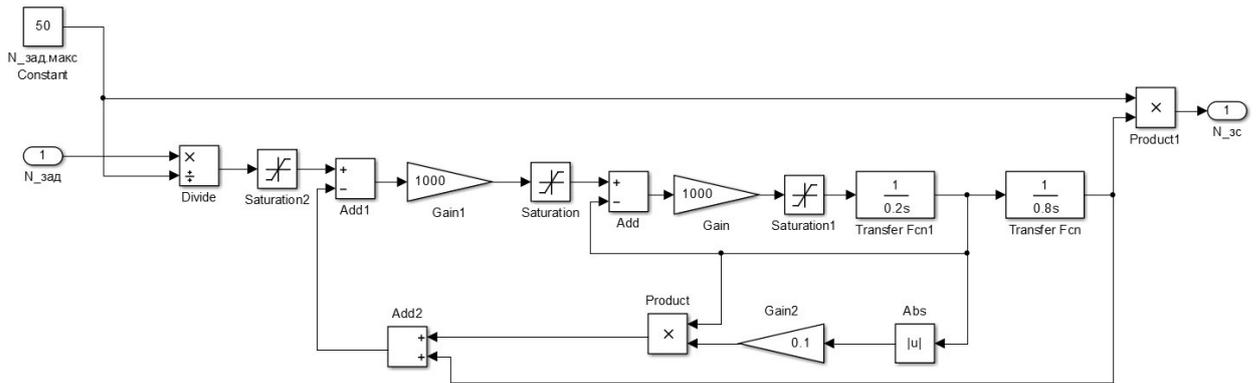


Рис. 30 Имитационная модель датчика интенсивности с S-образной выходной характеристикой

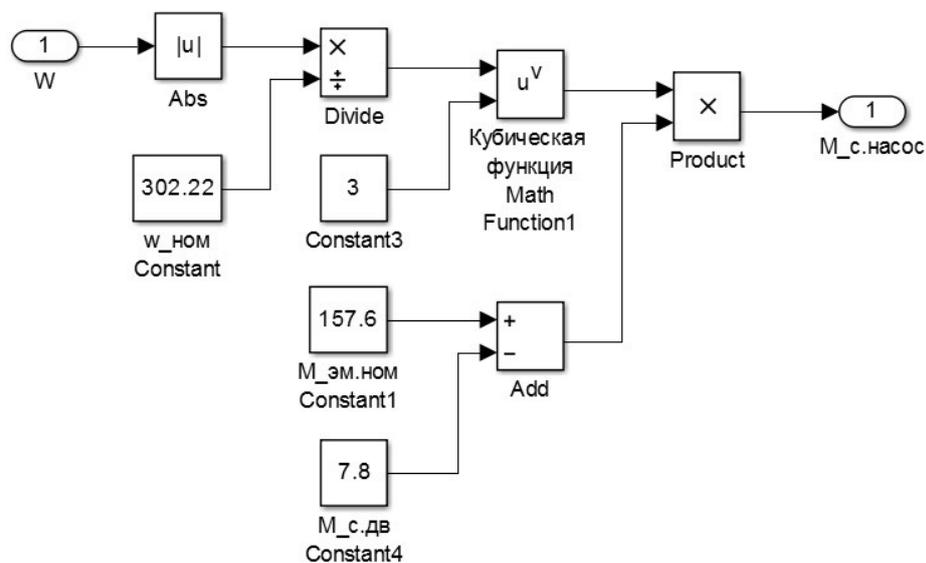


Рис. 31 Имитационная модель вентиляторной нагрузки

Вольт частотная характеристика задается в блоке ФНУ тремя точками и представлена в таблице

$$U_{1j}(f_{1j}) = U_{1нач} + (U_{1фн} - U_{1нач}) \cdot \left(\frac{f_{1j}}{f_{1н}}\right)^2 ;$$

$$U_{11}(f_{11}) = 45 + (808,29 - 45) \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^2 = 808,29 \text{ В};$$

$$U_{12}(f_{12}) = 45 + (808,29 - 45) \cdot \left(\frac{35}{50}\right)^2 = 419,01 \text{ В};$$

$$U_{13}(f_{13}) = 45 + (808,29 - 45) \cdot \left(\frac{10}{50}\right)^2 = 75,532 \text{ В}.$$

Таблица 7 – Параметры вольт-частотной характеристики преобразователя

$f_1, \text{Гц}$	10	35	50
$U_1, \text{В}$	75,532	419,01	808,29

Постоянная времени преобразователя:

$$T_{и} = \frac{1}{f_{in}} = \frac{1}{6250} = 0,00016 \text{ с},$$

где $f_{in} = 6250$ Гц – начальная частота инвертора.

5.2. Моделирование частотно-регулируемого погружного асинхронного электропривода центробежного насоса со скалярным управлением

Сравним три способа пуска погружного электродвигателя и выявим какой способ наиболее благоприятен для УЭЦН. Сравним будем:

1. Прямой пуск электропривода без преобразователя частоты;
2. Прямой пуск электропривода с преобразователем частоты, но без датчика интенсивности;
3. Прямой пуск электропривода с преобразователем частоты и датчиком интенсивности.

5.2.1. Прямой пуск электропривода без преобразователя частоты

Моделирование в программной среде Matlab Simulink пуска без преобразователя частоты представлено на рисунке 34.

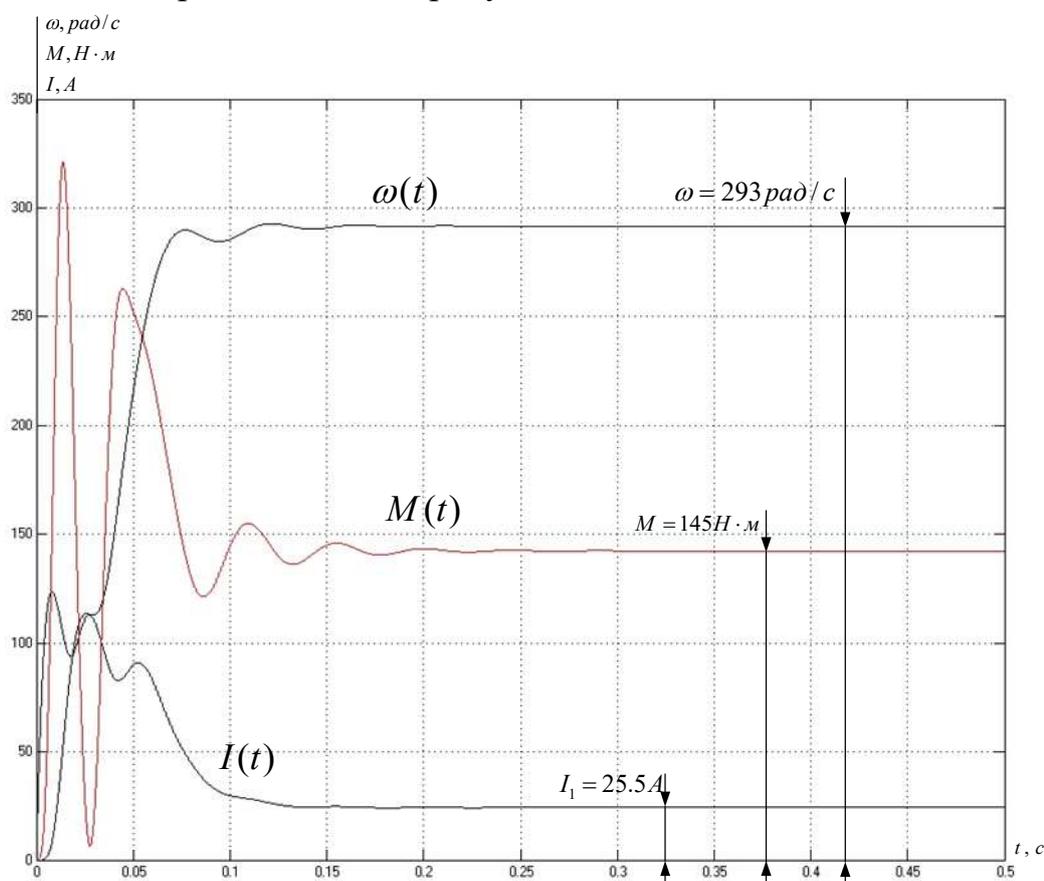


Рис. 32 Имитация прямого пуска электропривода

5.2.2. Прямой пуск электропривода с преобразователем частоты, но без датчика интенсивности

Моделирование в программной среде Matlab Simulink пуска с преобразователем частоты, но без датчика интенсивности представлено на рисунке

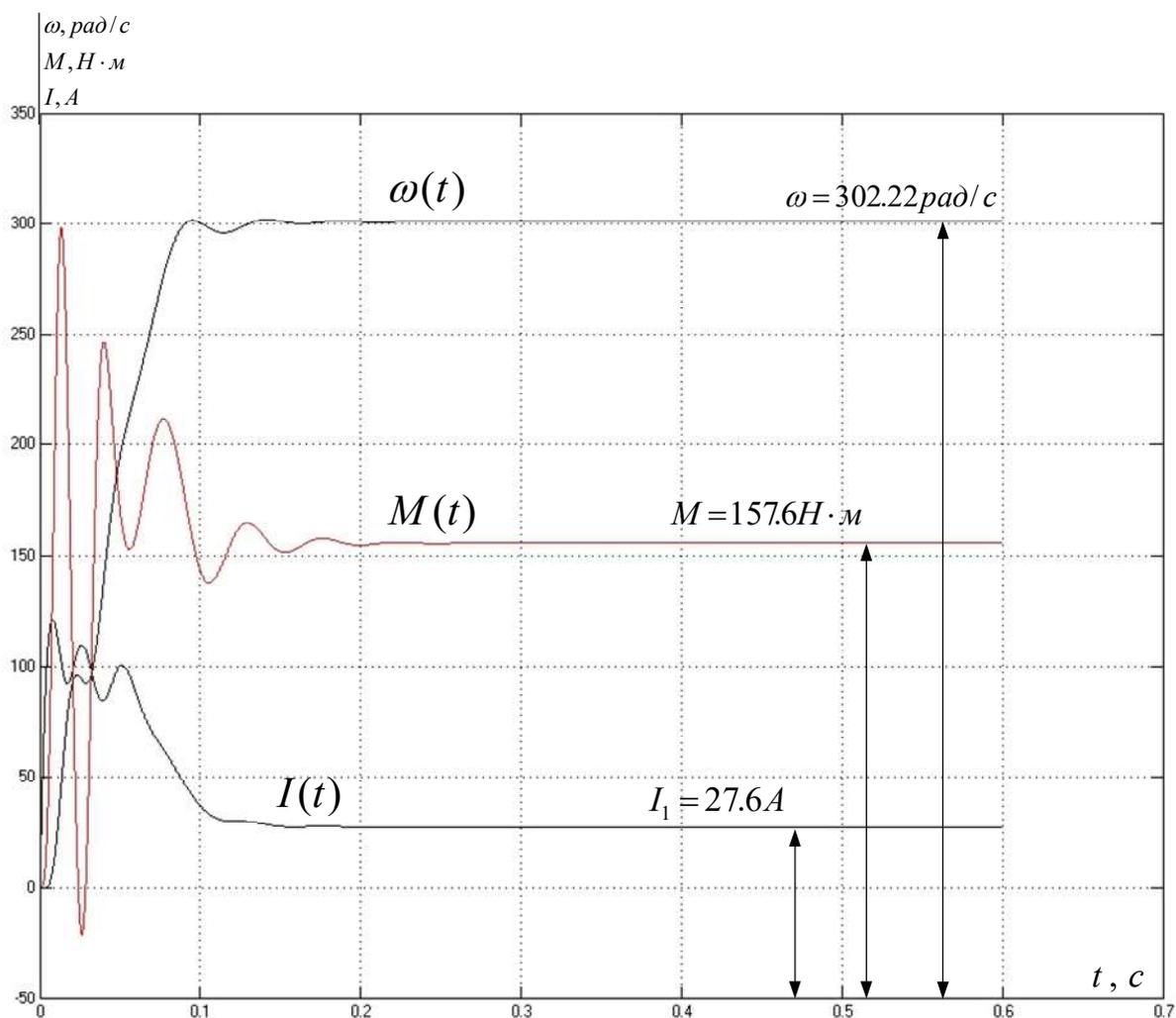


Рис. 33 Имитация пуска электропривода без датчика интенсивности

5.2.3. Прямой пуск электропривода с преобразователем частоты и датчиком интенсивности

Моделирование в программной среде Matlab Simulink пуска с преобразователем частоты и датчиком интенсивности представлено на рисунке 36.

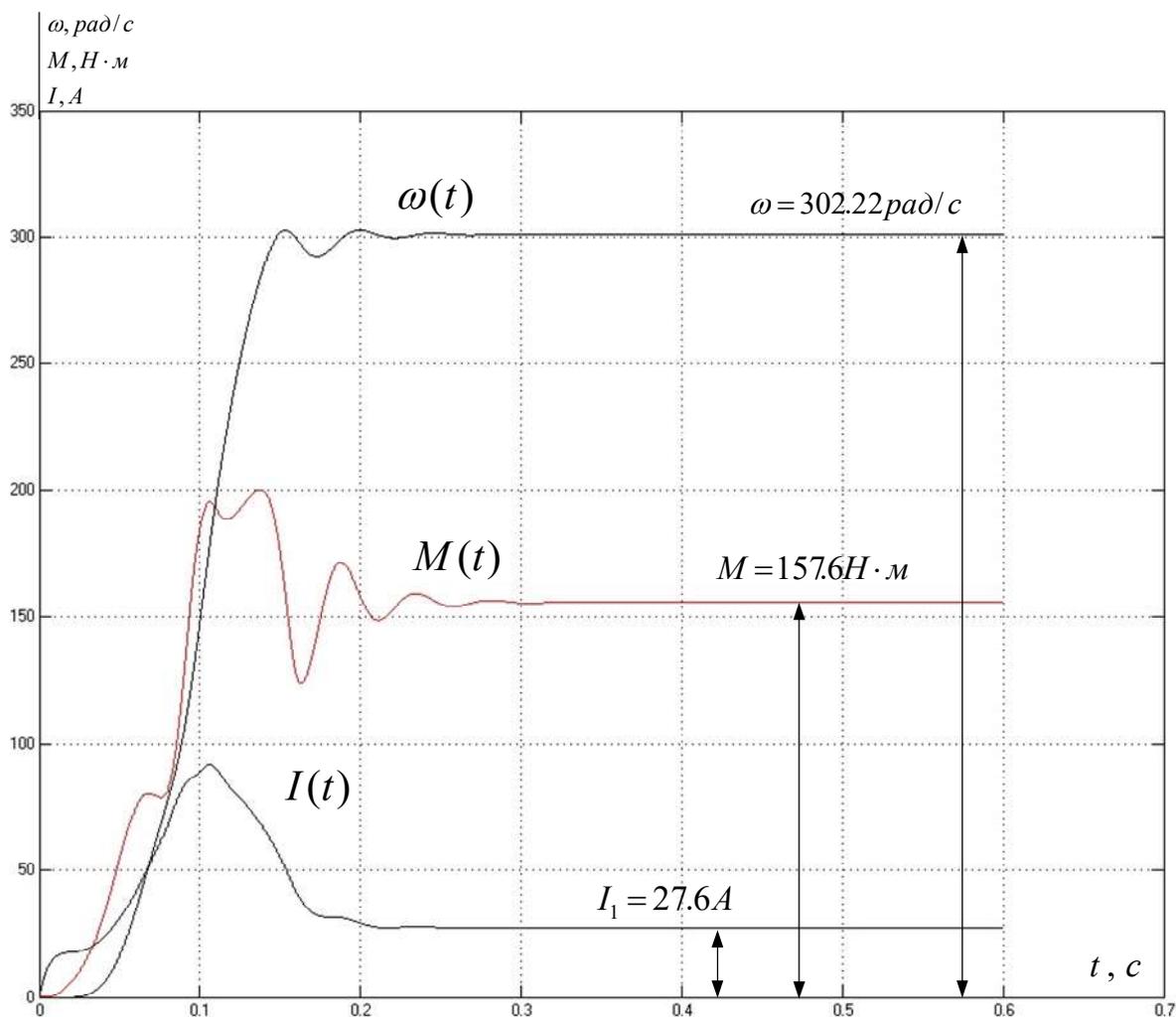


Рис. 34 Имитация прямого пуска электропривода с ПЧ и датчиком интенсивности

5.2.4. Имитационное исследование электропривода насоса для различных заданий частоты

В процессе имитационных исследований рассмотрим следующие режимы работы системы электропривод – насос:

- пуск электропривода на минимальную рабочую скорость;
- пуск электропривода с минимальной рабочей скорости на максимальную;
- торможение электропривода с максимальной скорости до минимальной;
- останов электропривода.

В качестве примера рассмотрена обработка электроприводом насоса следующего цикла:

- 1) пуск на минимальную частоту $f_{и.мин} = 10$ Гц;
- 2) работа на минимальной частоте;

- 3) переход на минимальную рабочую частоту ($f_{и} = 35$ Гц);
- 4) работа на минимальной рабочей частоте;
- 5) переход на номинальную рабочую частоте насоса ($f_{р.макс} = 50$ Гц);
- 6) работа на номинальной частоте;
- 7) торможение до минимальной рабочей скорости ($f_{и} = 35$ Гц);
- 8) работа на минимальной рабочей скорости;
- 9) переход на минимальную частоту $f_{и.мин} = 10$ Гц;
- 10) работа на минимальной частоте;
- 11) останов электропривода.

Временные характеристики отработки электроприводом насоса с законом регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ и настройкой вольт-частотной характеристики в соответствии с таблицей 7 приведены на рисунке 37.

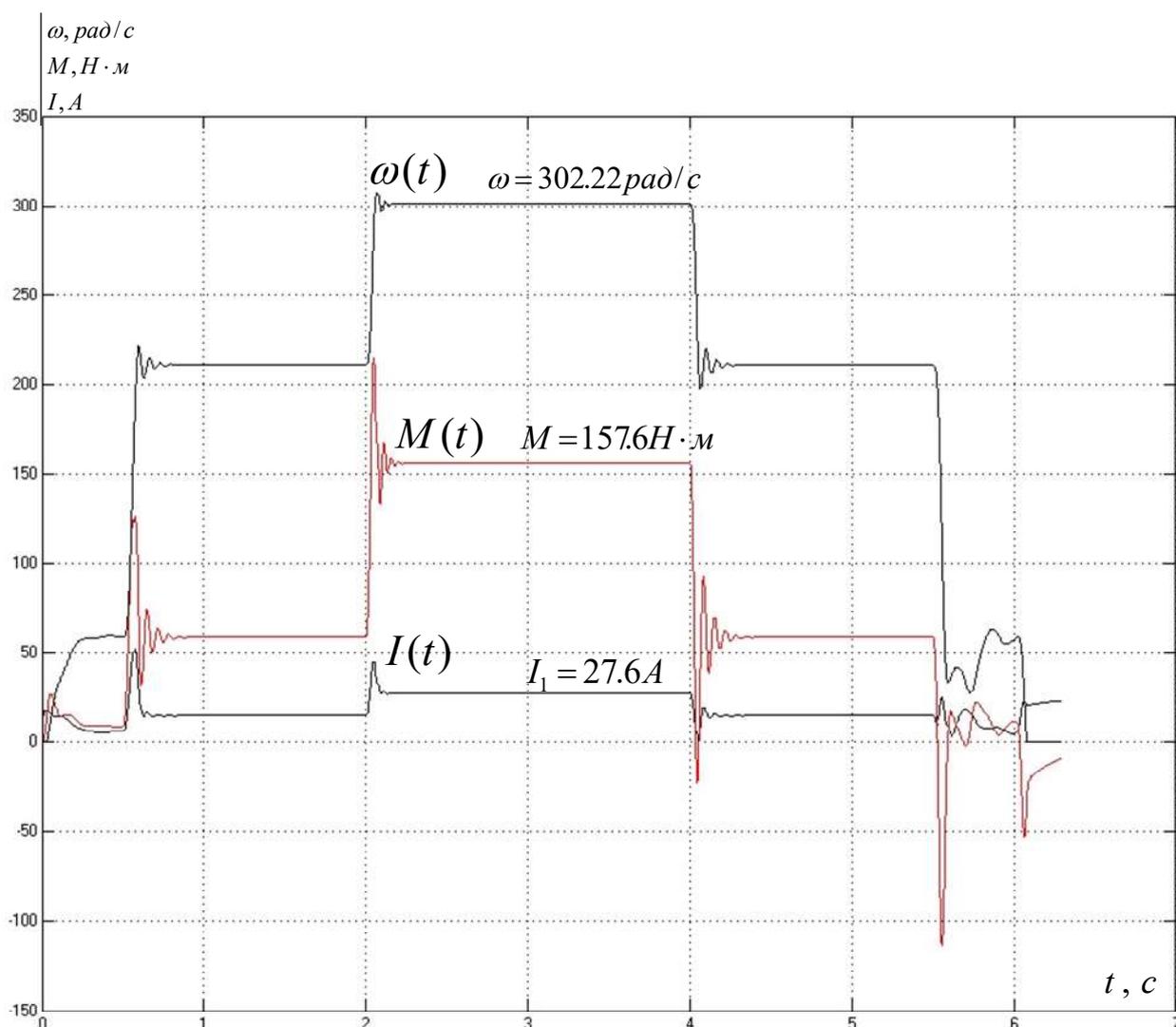


Рис. 35 Имитационное исследование

Вывод:

По характеристике можно сказать, что броски тока и момента при переходе с одной частоты на другую не столь велики как при прямом пуске электропривода, а, значит, частотное регулирование обеспечивает более плавный выход на режим номинальной работы.

Время пуска и электрического торможения электропривода определяется и может быть изменено путём выбора значения постоянной времени задатчика скорости.

6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В данной работе ведется разработка и проверка метода циклической эксплуатации установки электроприводного центробежного насоса для скважинной нефтедобычи.

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

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

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

6.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности разработки технического проекта

Оценка потенциала и перспективности ТП включает в себя:

- Выявление потенциальных потребителей технического проекта
- Анализ конкурентных технических решений

6.1.1. Выявление потенциальных потребителей технического проекта

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

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 8.

Таблица 8 – 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.

6.1.2. 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 ЭЦН без преобразователя частоты;
- установка ЭЦН с преобразователем частоты.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле [15]:

$$K = \sum B_i \cdot \text{Б}_i$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

Б_i – балл i -го показателя.

Критериями оценки установок являются:

А – Мощность;

Б – Номинальное напряжение;

В – Сохранение механической прочности;

Г – Наличие плавного пуска;

Д – КПД.

Характеристики выбранных установок оцениваются по пятибалльной шкале экспертами. Сравнение представлено в оценочной карте (таблица 9).

Таблица 9 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентно-способность	
		УЭЦН без ПЧ	УЭЦН с ПЧ	УЭЦН без ПЧ	УЭЦН с ПЧ
Мощность при 50 и 60 Гц	0,1	5	5	0,5	0,5
Номинальное напряжение при 50 и 60 Гц	0,1	5	4	0,5	0,4
Сохранение мех. прочности	0,2	3	5	0,6	1
Наличие плавного пуска	0,3	2	4	0,6	1,2
КПД	0,3	3	4	0,9	1,2
Итого	1	18	22	3,1	4,3

Таблица 10 – Определение коэффициента весомости по методу парного сравнения

Оцениваемые параметры	Оцениваемые параметры					Σ, расчет веса критерия
	А	Б	В	Г	Д	
А	-	1	0	0	0	1/10=0,1
Б	0	-	1	0	0	1/10=0,1
В	1	0	-	0	1	2/10=0,2
Г	1	1	1	-	0	3/10=0,3
Д	1	1	0	1	-	3/10=0,3
Итого	3	3	2	1	1	10

В ходе результата анализа конкурентных технических решений можно сделать вывод, что наибольшим преимуществом обладают установки электроприводных центробежных насосов с преобразователем частоты.

6.2. Планирование работ по техническому проекту

Планирование осуществляется в следующем порядке:

- Определение структуры работ в рамках технического проекта
- Определение трудоемкости выполнения работ
- Разработка графика проведения технического проекта

6.2.1. Определение структуры работ в рамках технического проекта

Составляем перечень этапов и работ в рамках проведения технического проекта, проводим распределение исполнителей по видам работ.

1. Составление и утверждение технического задания

Руководитель проекта составляет техническое задание по выбранной теме, утверждает его у заведующего отделением электроэнергетики и электротехники.

2. Подбор и изучение материалов по теме

Инженер подбирает материал (учебники, статьи, публикации, патенты) по технической теме проекта, уточняет его состав у руководителя проекта, ознакомливается с материалом и проясняет непонятные вопросы с руководителем.

3. Описание объекта автоматизации

После изучения материала в целом инженер описывает конкретный объект, в данном случае установку электроприводного центробежного насоса (УЭЦН), согласовывает с руководителем.

4. Календарное планирование работ по теме

Руководитель составляет календарный план технического проекта.

5. Описание метода циклической эксплуатации УЭЦН

Основываясь на изученном материале, инженер описывает метод эксплуатации нефтяной скважины установкой электроприводного центробежного насоса.

6. Технические расчёты УЭЦН

Для реализации метода проводятся технические расчёты, подбираются центробежный насос, двигатель, система управления с преобразователем частоты, трансформатор, кабельная линия. Расчёты согласовываются с руководителем.

7. Проверка метода циклической эксплуатации УЭЦН с помощью математической модели

На основе расчётов инженер строит математическую модель в среде MATLAB Simulink и согласовывает её с руководителем.

8. Оценка эффективности полученных результатов

Руководитель оценивает полученные результаты и, если они неудовлетворительные, требует коррекции модели.

9. Техничко-экономические расчеты

Инженер экономическую рентабельность технического проекта. Согласовывает результат с руководителем.

10. Вопросы безопасности и экологичности проекта

Инженер проводит оценку безопасности и экологичности технического проекта. Согласовывает результат с руководителем.

11. Составление отчета

Инженер компоует все расчёты и модели в один отчёт.

12. Проверка ВКР руководителем

Окончательная проверка ВКР руководителем.

13. Подготовка к защите ВКР

Инженер готовится к защите под руководством руководителя.

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

6.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула [15]:

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

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

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

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

6.2.3. Разработка графика проведения технического проекта

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

Все рассчитанные значения трудоёмкости сводим в таблицу 11.

Таблица 11 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в днях	
	t_{\min} , чел-дни		t_{\max} , чел-дни		$t_{ожі}$, чел-дни		Руководитель	Инженер
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер		
Составление и утверждение технического задания	1		1		1		1	
Подбор и изучение материалов по теме		10		20		14		14
Описание объекта автоматизации		3		4		4		4
Календарное планирование работ по теме	1		1		1		1	
Описание метода циклической эксплуатации УЭЦН		10		20		14		14
Технические расчёты УЭЦН		11		21		15		15

Проверка метода циклической эксплуатации УЭЦН с помощью математической модели		4		8		6		6
Оценка эффективности полученных результатов	1		1		1		1	
Технико-экономические расчеты		5		8		7		7
Вопросы безопасности и экологичности проекта		3		7		5		5
Составление отчета		1		2		2		2
Проверка ВКР руководителем	1		1		1		1	
Подготовка к защите ВКР		2		3		3		3

На основе таблицы 11 строим календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках технического проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования.

Таблица 12 – Календарный план-график проведения ТП по теме

Вид работ	Исполнители	Раб. дн.	Продолжительность выполнения работ											
			март			апрель			май			июнь		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1		
Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1	■											
Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	14	■	■	■									
	Руководитель	1			■									
Описание объекта автоматизации	Инженер	4			■	■								
	Руководитель	1			■									
Календарное планирование работ по теме	Руководитель	1			■									
Описание метода циклической эксплуатации УЭЦН	Инженер	14			■	■	■	■						
	Руководитель	1					■							
Технические расчёты УЭЦН	Инженер	15					■	■	■	■				
	Руководитель	1							■					
Проверка метода циклической эксплуатации УЭЦН с помощью математической модели	Инженер	6							■	■				
	Руководитель	1								■				
Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	1								■				
Технико-экономические расчеты	Инженер	7								■	■	■		
	Руководитель	1									■			
Вопросы безопасности и экологичности проекта	Инженер	5									■	■		
	Руководитель	1										■		
Составление пояснительной записки	Инженер	2										■	■	
Проверка ВКР	Руководитель	1											■	
Подготовка к защите ВКР	Инженер	3											■	■
	Руководитель	2												■

Исходя из диаграммы продолжительности работ, определяется участие каждого специалиста рабочей группы в разработке проекта: руководитель 13 дней, дипломник 70 дней. Общая продолжительность выполнения ТП составила 74 рабочих дня.

6.3. Смета технического проекта

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

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

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

6.3.1. Полная заработная плата исполнителей темы

Полная заработная плата включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением ТП, и дополнительную заработную плату [15]:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп},$$

где

$З_{осн}$ – основная заработная плата;

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($З_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле [15]:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p,$$

где

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

T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн. (согласно таблице 11).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле [15]:

$$З_{дн} = \frac{З_m + З_{р.к}}{F_d},$$

где

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

$З_{р.к}$ – доплата с учётом районного коэффициента (30%), руб.;

F_d – количество рабочих дней в месяце, раб. дн.

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 13.

Таблица 13 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	$Z_{p.k.}$, руб.	Зарплата месячная, руб.	$Z_{дн.}$, руб.	Раб. дн.	$Z_{осн.}$, руб.
Руководитель	33664	10099	43764	1683	13	21879
Инженер	12300	3690	15990	615	70	43050
Итого $Z_{осн.}$, руб.						64929

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле [15]:

- для руководителя $Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 21879 = 3282$ руб.,
- для инженера $Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,12 \cdot 43050 = 5166$ руб.,

где

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

Расчёт полной заработной платы сведён в таблицу 14.

Таблица 14 – Расчёт полной заработной платы

Исполнители	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Полная заработная плата, руб.
Руководитель	21879	3282	25161
Инженер	43050	5166	48216
Итого	64929	8448	73377

6.3.2. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы [15]:

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

где

$k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов в размере 30%.

Отчисления во внебюджетные фонды составят:

$$Z_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot 73377 = 22013 \text{ руб.}$$

6.3.3. 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 составляет 16% от стоимости проекта и определяется исходя из соотношения:

$$\frac{Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + Z_{\text{внеб}}}{Z_{\text{накл}}} = \frac{84\%}{16\%}$$

Тогда накладные расходы равны:

$$Z_{\text{накл}} = \frac{Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + Z_{\text{внеб}}}{84\%} \cdot 16\%$$
$$Z_{\text{накл}} = \frac{73377 + 22013}{84\%} \cdot 16\% = 18170 \text{ руб.}$$

6.3.4. Формирование сметы затрат технического проекта

Рассчитанная величина затрат технического проекта (темы) является основной для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку технической продукции.

Определение сметы затрат на технический проект приведен в таблице 15.

Таблица 15 – Расчет сметы затрат ТП

Наименование статьи	Сумма, руб.	Структура затрат, %
1. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	64929	57,18
2. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	8448	7,44
3. Отчисления во внебюджетные фонды	22013	19,38
4. Накладные расходы	18170	16
5. Смета затрат ТП	113560	100

6.4. Определение ресурсосберегающей эффективности технического проекта

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

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

где

I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

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

Для определения ресурсоэффективности проекта рассмотрим следующие критерии:

- Производительность труда – это показатель, характеризующий результативность труда, или количество продукции за время. Для метода циклической эксплуатации УЭЦН этот показатель может упасть не более чем на 5 % при кратковременной эксплуатации, однако при длительной эксплуатации, за счёт увеличения межремонтного периода, он останется неизменным или возрастет;

- Удобство эксплуатации – это возможность лёгкой настройки, монтажа и демонтажа оборудования. Удобство монтажа и демонтажа в сравнении с

оборудованием без преобразователя частоты ничем не отличается. Однако система управления с преобразователем частоты помогает пользователю качественнее управлять погружным электродвигателем и решать такие вопросы как: пуск и торможение, изменение режима работы установки, расклинивание насоса, определяет состояние насоса и погружного электродвигателя;

- Помехоустойчивость оборудования – это способность оборудования выполнять свои функции при наличии помех, создаваемых внешней средой. Системы управления погружным электродвигателем имеют в своём составе необходимые фильтры, которые предотвращают чрезмерное отклонение управляющего сигнала;

- Энергосбережение – это экономия электрической энергии. Метод циклической эксплуатации скважины подразумевает выбор оборудования с большим КПД, а также режимы работы оборудования обеспечивают минимальный расход электроэнергии во всём диапазоне регулирования. В составе преобразователя частоты есть звено постоянного тока, которое способствует уменьшению реактивной составляющей нагрузки, а, значит, снижению потерь в линиях электропередач;

- Надежность оборудования – это длительный эксплуатационный ресурс. Надежность характеризуется наличием в составе системы управления преобразователя частоты, который обеспечивает плавный пуск и останов центробежного насоса, что в свою очередь значительно уменьшает ударные нагрузки на насос и увеличивает межремонтный период;

- Материалоёмкость – это показатель расхода ресурсов для работы в номинальном режиме. Материалоёмкость обеспечивается подбором высокопроизводительного оборудования для сокращения энергопотребления, а также уменьшения габаритов оборудования (насоса, двигателя, трансформатора) за счёт увеличения частоты вращения центробежного насоса.

Оценки по каждому критерию были получены экспертным путём.

Все критерии оценки ресурсоэффективности сведены в таблицу 16.

Таблица 16 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Установка ЭЦН без преобразователя частоты	Установка ЭЦН с преобразователем частоты
1. Производительность труда пользователя	0,25	5	5
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	3	5
3. Помехоустойчивость	0,1	4	4
4. Энергосбережение	0,15	4	5
5. Надёжность	0,25	3	4
6. Материалоёмкость	0,15	3	4
Итого:	1,00	3,75	4,5

Рассчитываем показатель ресурсоэффективности:

для установки ЭЦН без преобразователя частоты

$$I_{pi} = 0,25 \cdot 5 + 0,1 \cdot 3 + 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,25 \cdot 3 + 0,15 \cdot 3 = 3,75$$

для установки ЭЦН с преобразователем частоты

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

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

Таким образом, применение метода циклической эксплуатации УЭЦН на частотно-регулируемых электроприводах является наиболее эффективным и ресурсосберегающим.

7. Социальная ответственность

Введение

Место работы оператора находится на кустовой площадке нефтегазового промысла на открытом воздухе при любых погодных условиях и в любое время года. Из-за непрерывности нефтедобывающего производства он работает в ночные смены, в выходные и праздничные дни.

Объектом исследования является установка электроприводного центробежного насоса (УЭЦН), предназначенная для скважинной добычи нефтяного сырья. Сам насос с двигателем находится на глубине от нескольких сот метров до нескольких километров. От него к поверхности идут насосно-компрессорные трубы (НКТ) и электрический кабель. На поверхности находятся: оборудование устья скважины, станция управления, трансформатор, клеммная коробка, устройство для подъема и опускания скребка.

7.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Первостепенное значение при охране труда и техники безопасности при эксплуатации УЭЦН уделяется соблюдению «Правил безопасности при эксплуатации электроустановок».

На кустах скважин в местах расположения станций управления и наземных силовых кабельных линий, находящихся под высоким напряжением, вывешены предупреждающие таблички согласно правилам безопасности. Для предотвращения не санкционированного доступа в силовые шкафы, обеспечивающие электроснабжение погружного оборудования, последние снабжены запорными устройствами. Доступ к обслуживанию силовых частей наземного оборудования УЭЦН имеют только специально обученные и имеющие группы допуска не ниже 4-й по электробезопасности специалисты организаций, обслуживающих данное оборудование.

Время отдыха и рабочее время регламентируются графиком работы на вахте, который утверждается работодателем с учетом мнения выборного органа первичной профсоюзной организации в порядке, установленном статьей 372 ТК РФ для принятия локальных нормативных актов, и доводится до сведения работников не позднее чем за два месяца до введения его в действие [8].

Для работников, выезжающих в районы крайнего Севера и приравненные к ним местности:

- устанавливается районный коэффициент и выплачиваются процентные надбавки к заработной плате в порядке и размерах, которые предусмотрены для лиц, постоянно работающих в районах Крайнего Севера и приравненных к ним местностях;
- предоставляется ежегодный дополнительный оплачиваемый отпуск в порядке и на условиях, которые предусмотрены для лиц, постоянно работающих;
- в районах крайнего Севера – 24 календарных дня, в местностях, приравненных к районам крайнего севера, - 16 календарных дней.

7.2. Производственная безопасность

Таблица 17 – Опасные и вредные факторы при эксплуатации УЭЦН

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разра- ботка	Изго- товле-	Эксплу- атация	
1. Повышенное содержание вредных веществ в воздухе			+	ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
2. Недостаточная освещённость рабочей зоны			+	СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение»
3. Превышение уровня шума			+	ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности.
4. Неблагоприятные метеорологические условия			+	ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
5. Механические опасности			+	ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы.
6. Давление в системах работающих механизмов			+	ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы.
7. Поражение электрическим током			+	ПУЭ ГОСТ 12.1.019-2009 Система стан-

				дартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура защит.
8. Пожаро- и взрыво-опасность			+	Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности"

7.2.1. Анализ выявленных вредных производственных факторов

1. Повышенное содержание вредных веществ в воздухе

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

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

Коллективные средства защиты - устройства, препятствующие появлению человека в опасной зоне. Индивидуальной защиты: очки, защитные маски, противогазы.

2. Недостаточная освещённость рабочей зоны

Освещённость объектов нефтяной промышленности должна удовлетворять СНиП 4156 – 86 «Санитарные правила для нефтяной промышленности».

Освещенность рабочих мест должна быть равномерной и исключать возникновение слепящего действия осветительных приспособлений на работающих. Производство работ в неосвещенных местах не разрешается.

Во всех производственных помещениях, кроме рабочего, необходимо предусматривать аварийное освещение, а в зонах работ в ночное время на открытых площадках - аварийное или эвакуационное освещение.

Светильники аварийного и эвакуационного освещения должны питаться от независимого источника. Вместо устройства стационарного аварийного и

эвакуационного освещения разрешается применение ручных светильников с аккумуляторами.

Освещённость рабочей зоны установки ЭЦН должна быть не ниже 30 лк согласно СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение».

3. Превышение уровня шума на рабочем месте

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

Таблица 18 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест согласно ГОСТ 12.1.003-83

№пп	Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
5	Выполнение всех видов работ (за исключением перечисленных в п.п. 1-4 и аналогичных им) на постоянных рабочих местах в производственных помещениях и на территории предприятий	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

4. Неблагоприятные метеорологические условия

Работающие в холодное время года на открытом воздухе или в закрытых необогреваемых помещениях обеспечиваются комплектом средств индивидуальной защиты от холода с учетом климатического региона. Во избежание локального охлаждения работники обеспечиваются рукавицами, обувью, головными уборами, имеющими соответствующую теплоизоляцию. При тем-

пературе воздуха ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ должна обеспечиваться защита лица и верхних дыхательных путей.

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

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

В целях нормализации теплового состояния температура воздуха в местах обогрева должна поддерживаться на уровне $21\text{-}25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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

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

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

Во избежание переохлаждения работникам не следует во время перерывов в работе находиться на холоде в течение более 10 мин. При температуре воздуха до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и не более 5 мин. при температуре воздуха ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

7.2.2. Анализ опасных производственных факторов

1. Механические опасности

Механические опасности могут возникнуть у любого объекта, способного причинить человеку травму в результате неспровоцированного контакта объекта или его частей с человеком. Риск подвергнуться такому контакту наблюдается при взаимодействии человека с объектом в трудовом процессе и при случайном прохождении человека в пределах действия объекта в опасной зоне оборудования. Опасная зона - это пространство, в котором возможно действие на работающего опасного и (или) вредного производственного фактора.

Механические опасности на объекте представляют собой движущиеся машины и механизмы, незащищенные подвижные элементы производствен-

ного оборудования, передвигающиеся изделия; заготовки, материалы, разрушающиеся конструкции, острые кромки, стружка, заусенцы и шероховатости на поверхности заготовок, инструментов и оборудования, а также падение предметов с высоты.

2. Давление в системах работающих механизмов

К обслуживанию сосудов, работающих под давлением, допускаются лица, достигшие 18 лет, обученные в учебных заведениях, аттестованные комиссией с участием инспектора Ростехнадзора и имеющие удостоверения на право обслуживания сосудов с указанием наименования, рабочих параметров рабочей среды сосудов, к обслуживанию которых они допущены.

Персонал, обслуживающий сосуды, должен быть ознакомлен под роспись с руководством по эксплуатации сосудов предприятий изготовителей, так же со схемами включения сосудов с указанием источника давления, параметров, рабочей среды арматуры, контрольно – измерительных приборов, средств автоматического управления, предохранительных и блокирующих устройств.

Персонал обязан периодически в течение смены:

- осматривать закрепленные за ними сосуды, обращать внимание на состояние сварных заклепочных соединений, запорной и запорно – регулируемой арматуры, кранов слива конденсата;
- осматривать контрольно-измерительные приборы, предохранительные устройства и указания уровня жидкости, убедиться в их исправности
- убеждаться в отсутствии пропуска воздуха в соединениях элементов сосуда и трубопроводов;
- следить за давлением в сосуде, заметив опасность, угрожающую работникам, необходимо принять меры по ее незамедлительному устранению.

Порядок проверки исправности обслуживаемых сосудов и относящихся к ним оборудованию в рабочем состоянии:

- оператор обязан проводить проверку предохранительных клапанов путем принудительного открытия;
- оператор обязан проводить проверку манометров посадкой стрелки на нуль с помощью трехходового крана;
- оператор обязан проводить проверку в течение смены исправность сосудов путем внешнего осмотра, исправность запорной арматуры, манометров и предохранительных клапанов;
- обо всех этих операциях аппаратчик должен делать запись в сменном журнале.

3. Поражение электрическим током

Электрооборудование должно иметь исправную взрывозащиту, проходить техническое обслуживание и текущие ремонты согласно графика ППР с записью в «Журнале осмотра взрывозащищенного оборудования», который храниться у мастеров цеха. В журнале указываются виды проведенных работ, с подписями их производивших. Работы, выполняемые на кустовых площадках, должны проводиться искробезопасным инструментом.

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

Средства защиты от поражения электрическим током:

1) Перчатки (Защитные перчатки должны быть широкими и не менее 35 см в длину, чтобы их было удобно надевать поверх шерстяных перчаток, а сами они покрывали кисть и часть руки.)

2) Обувь (Галоши и ботинки предназначаются для защиты от земного и шагового напряжений.)

3) Подставки (Подставки делают из стекла, фарфора или металла, металл нельзя использовать для соединения, минимальный размер — 0,75×0,75 м.)

4) Указатели (Для проверки техники с рабочим напряжением менее 500 Вольт.)

5) Щиты (Щиты для временных ограждений электрических установок делают из промасленного дерева или текстолита.)

4. Пожаро- и взрывоопасность

В связи с тем, что при ликвидации возникших осложнений при добыче и перекачке нефти, могут выделяться взрывоопасные, пожароопасные и токсичные вещества, (нефть, сероводород, природный газ, меркаптаны, диэмульгаторы, различные реагенты и горюче-смазочные вещества) в соответствии со СНиП 2.09.04.87 данное производство отнесено к классу В-1Г и В-1.

Пожаробезопасность кустовых площадок должна обеспечиваться рядом противопожарных мероприятий [8]:

- сооружения размещены на площадке с соблюдением противопожарных расстояний между ними;
- выполнена молниезащита, защита оборудования и трубопроводов от электрической и электромагнитной индукции;
- кустовые площадки обеспечены осветительной аппаратурой во взрывозащищенном исполнении;

- используемое технологическое электрооборудование принято во взрывозащищенном исполнении, соответствует категории и зоне взрывоопасности площадок;
- объем КИПиА позволяет держать под контролем технологический процесс добычи нефти и закачки воды в пласт;
- предусмотрена предаварийная звуковая и световая сигнализация при отклонении технологических параметров от нормы;
- ведется контроль воздушной среды в помещении замерной установки с сигнализацией загазованности и включением аварийной вентиляции при необходимости;
- на кустовых площадках предусмотрен контроль воздушной среды газоанализаторами;
- дыхательные клапаны подземных емкостей оснащены встроенными огнепреградителями;
- конструкция насосных агрегатов подземных емкостей и объем защит обеспечивает нормальную его работу и автоматический останов агрегата при возникновении условий, нарушающих безопасность;
- согласно РД 39-22-113-78 «Временные правила защиты от статического электричества на производственных установках и сооружениях нефтяной и газовой промышленности» опасность действия статического электричества устраняется тем, что специальными мерами создается утечка электрических зарядов, предотвращая накопление энергии заряда выше уровня $0,4\text{А} \cdot \text{мин}$;
- все металлические и электропроводные неметаллические части технологического оборудования заземляются. Заземляющее устройство для защиты от статического электричества объединены с заземляющими устройствами электрооборудования;
- основные потребители электроэнергии – электродвигатели технологического оборудования и освещение территории кустовых площадок относятся по надежности электроснабжения ко II категории.

Для взрывоопасных помещений, площадок наружных помещений проведена классификация по категориям взрывопожарной опасности, определены границы взрывоопасных зон (таблица 19).

Основные причины пожаров на производстве:

- Не соблюдение техники безопасности;
- Неосторожное обращение с огнем;
- Неудовлетворительное состояние электротехнических устройств и нарушение правил их монтажа и эксплуатации;
- Нарушения режимов технологических процессов;

- Неисправность отопительных приборов и нарушение правил их эксплуатации.

Для устранения очагов возгорания территории, где проводятся работы, должны быть оснащены первичными средствами пожаротушения, например, пожарный щит, в состав которого входят следующие компоненты:

1. Ломы (для вскрытия дверей, окон и других конструкций);
2. Багры пожарные, крюки с деревянной рукояткой (для разборки и растаскивания горящих конструкций);
3. Вилы, лопаты (штыковые и совковые);
4. Емкости для воды и ящики для песка (для хранения средств тушения);
5. Ведра и ручные насосы (для транспортировки воды);
6. Кошма, асбестовое полотно (для накрытия очага возгорания);

В каждом здании должен устанавливаться оповещатель пожарный работающий в комплексе с системой сигнализации. Это одно из технических средств пожарной сигнализации. Оно предназначается для оповещения людей о возникновении очага возгорания. В качестве сигнала может применяться свет, звук, речевое сообщение.

Таблица 19 – Взрывопожарная и пожарная опасность производственных зданий, помещений и наружных сооружений

Наименование помещений, наружных установок и оборудования	Категория взрывопожарной и пожарной опасности по НПБ 105-03	Классификация взрывоопасных зон по ПУЭ			Границы взрывоопасной зоны
		Класс зоны	Категория и группа взрывоопасных смесей	По ПБ 08-624-03	
Устье нефтедобывающей скважины	Ан	В-1г	ПА-Т1 ПА-Т3	0 1	Зона В-1г до 3 м (ПУЭ) по горизонтали и вертикали от скважины Зона 0 (ПБ) 1,5м радиусом вокруг скважины Зона 1 (ПБ) 1,5м радиусом от зоны 0

Общие требования пожарной безопасности на объектах нефтедобычи

1. Работники допускаются к работе на объекте только после прохождения обучения мерам пожарной безопасности. Обучение работников мерам пожарной безопасности осуществляется путём проведения противопожарного инструктажа и прохождения пожарно – технического минимума;

2. Вся территория производственных объектов должна постоянно содержаться в чистоте и порядке. Мусор и другие отходы должны убираться, места разлива горючих жидкостей должны засыпаться сухим песком;

3. Запрещается курение на территории вахтового посёлка, в общежитиях, столовой, бане, на территории и в помещениях взрывопожароопасных объектов. Курить только в отведенных местах для курения;

4. Въезд на территорию объектов нефтедобычи техники допускается только по разрешению инженерно-технического работника, ответственного за этот объект. При этом автотранспорт, тракторы и другие агрегаты должны быть оборудованы глушителями с искрогасителями;

5. Запрещается применять для освещения факелы, свечи, керосиновые фонари и другие источники открытого огня;

6. Отогрев замерзшей аппаратуры, арматур, трубопроводов, задвижек разрешается горячей водой или паром;

7. Нагревательные приборы, не оснащенные автоматикой, оставлять без присмотра запрещено;

8. Автоцистерны, находящиеся под наливом и сливом горючих жидкостей, должны быть присоединены к заземляющему устройству. Проводник необходимо присоединять к корпусу автоцистерны при помощи болтов для обеспечения надежного контакта;

9. По окончании работы ответственные за пожарную безопасность осматривают помещения, территорию. Закрывают на замок помещения, которые работают не в круглосуточном режиме.

7.3. Мероприятия по устранению опасных и вредных факторов

Для устранения повышенного содержания вредных веществ в воздухе приняты меры: устранение нарушения герметичности фланцевых соединений, проверка механической прочности фонтанной арматуры, проверка давления в арматуре, проверка и замена предохранительных и регулирующих клапанов.

Мерами по устранению недостаточной освещённости рабочей зоны являются: установка дополнительных источников света в рабочей зоне, снабжение работников индивидуальными осветительными приборами.

Для изменения шумового фактора в рабочей зоне принимаются следующие меры: замена оборудования или ограждение оборудования корпусом с шумоподавлением, снабжение работников индивидуальными средствами защиты.

Мерами устранения неблагоприятных метеорологических условий являются: снабжение работников индивидуальными средствами защиты, соблюдение режима работы при неблагоприятных метеорологических условиях.

Для предотвращения механического воздействия на работника принимаются следующие меры: ограждение открытого механизма, замена открытого механизма на механизм в закрытом исполнении, снабжение работника индивидуальными средствами защиты.

Для предотвращения воздействия давления в системах работающих механизмов на работника принимаются следующие меры: проверка неисправностей фонтанной арматуры, замена неисправного оборудования, соблюдение техники безопасности при работе с оборудованием под давлением.

Мероприятия по устранению возможного воздействия электрического тока на работника: соблюдение техники безопасности при взаимодействии с электрическим оборудованием, снабжение работников индивидуальными средствами защиты, ограничение доступа к высоковольтному оборудованию, замена неисправного оборудования.

Меры предотвращения пожаров и взрывов: соблюдение техники безопасности, ограничение доступа к взрывоопасным объектам, соблюдение норм и правил пожарной безопасности.

7.4. Экологическая безопасность

Основными типами антропогенных воздействий на природу, изменение природы под их влиянием, являются:

- нефтяное загрязнение окружающей среды вследствие несовершенства технологии, аварийных разливов и несоблюдение природо - охранных требований;
- загрязнение атмосферы при сгорании газа в факелах и потери через негерметичное оборудование в районе компрессорной станции, при авариях на газа- и нефтепроводах;
- загрязнение природной среды промышленными и бытовыми отходами;
- развитие отрицательных физико-геологических процессов в зоне строительства и эксплуатации объектов (изменение поверхностного стока, заболачивание, подтопление, развитие оврагов, оползней, эрозии, активизация криогенных процессов на участках распространения многолетне - мерзлых пород, засоление выходом сеноманских вод);
- значительное изъятие земель и изменение баланса земельного фонда за счет сельскохозяйственных и лесохозяйственных предприятий.

Для предотвращения последствий загрязнения окружающей среды недропользователю рекомендуются следующие мероприятия:

- закрытая система сбора и транспорта нефти. Автоматическое отключение насосов, перекачивающих нефть, при падении давления в трубопроводе и установка запорной арматуры для отключения участка трубопровода в случае его порыва;
- в случае аварийной ситуации локализация разливов осуществляется следующим образом; при средних аварийных разливах - путем установления барьеров из земли с устройством защитных экранов, предотвращающих интенсивную пропитку барьера нефтью; локализация больших объемов разлитой нефти производится с помощью отрывных траншей;
- площадки размещения технологического оборудования выполнены из сборных бетонных плит и ограждены бордюрным камнем и имеют дождеприемные колодцы, через которые загрязненные дождевые стоки и разлившаяся при аварии жидкость стекает в закрытую сеть производственно-дождевой канализации в очистные сооружения при УПСВ с последующей утилизацией в систему ППД;
- по периметру площадки куста предусмотрено обвалование, необходимо устройство приустьевых площадок для сбора возможных утечек с сальников фонтанной арматуры и загрязненного поверхностного стока, со сбросом в дренажно-канализационную емкость, с дальнейшей закачкой в систему нефтесбора;
- на каждой скважине разрабатывается организационный план ликвидации аварий, который позволит правильно организовать работу во время аварии и уменьшит возможное отрицательное воздействие на компоненты окружающей среды.

При возникновении аварийных ситуаций запланированы ликвидационные мероприятия, реализуемые в следующей последовательности:

- ликвидировать источник разлива нефти;
- оценить объем происшедшего разлива и оптимальный способ его ликвидации;
- локализовать нефтяной разлив и предотвратить его дальнейшее распространение;
- собрать и вывезти собранную с почвы, болотной и водной поверхности нефть на комплексный пункт сбора продукции скважин или ближайший пункт утилизации.

7.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях (ЧС)

Основными источниками ЧС и ЧС техногенного характера на территории нефтяного месторождения являются:

- аварии в результате ГНВП (газонефтеводопроявление) на кустовой площадке добывающих скважин;
- аварии в результате разгерметизации РВС (резервуар вертикальный стальной) для нефти на территории ДНС (дожимной насосной станции);
- аварии в результате разгерметизации (порыв/прокол) нефтесборных трубопроводов, выкидных линий и магистрального нефтепровода.

Для исключения разгерметизации оборудования, предупреждения аварийных выбросов и разливов опасных веществ, обеспечения максимальных условий безопасности производства и обслуживающего персонала, снижения вредности производства в проекте предусмотрены следующие технические решения:

- емкостная аппаратура с нефтепродуктами оснащена дыхательными и предохранительными клапанами с огнепреградителями, арматурой с ручным и дистанционным приводом и сигнализаторами предельного верхнего уровня;
- технологическое оборудование оснащено необходимыми предохранительными клапанами для защиты оборудования от превышения давления;
- предусмотрены дренажные емкости, для опорожнения технологических аппаратов и трубопроводов;
- технологические процессы ведутся в закрытых аппаратах, исключая возможность образования взрывоопасной смеси;
- полная герметизация технологического процесса подачи и перекачки нефтепродуктов;
- монтаж и испытание трубопроводов предусмотрены в соответствии с требованиями РД 39-132-94, СП 34-116-97 и ПБ 03-585-03 «Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов» и СНиП 3.05.05-84 «Технологическое оборудование и технологические трубопроводы»;
- на наружную поверхность подземных трубопроводов наносится защитное покрытие усиленного типа.

Заключение

В выпускной квалификационной работе был проведён расчёт и анализ установки электроприводного центробежного насоса с преобразователем частоты. Был выбран центробежный насос (ЭЦН5-30-2550) по параметрам скважины, рассчитана его потребляемая мощность. Затем по мощности насосной установки выбирался погружной электродвигатель (ПЭДН 45-117).

Для дальнейшего анализа была рассчитана Т-образная схема замещения асинхронного электродвигателя и построены его естественные механические и электромеханические характеристики.

Выбрана станция управления с преобразователем частоты Электон-05-630. В качестве закона управления, для преобразователя частоты выбран закон регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$.

По выбранному вольт-частотному закону построены искусственные механические и электромеханические характеристики. Так как станция управления позволяет регулирование частоты от 3,5 Гц и выше, была выбрана начальная частота инвертора $f_{\text{и.нач}} = 10$ Гц.

При построении выяснилось, что пусковой момент двигателя при 10 Гц не может превысить двукратно начальный момент сопротивления и обеспечить запуск насосной установки. Поэтому решено было добавить напряжение на начальном этапе пуска.

Далее была построена имитационная модель системы ПЧ – ПЭД без обратной связи и на её основе проводился анализ различных режимов работы насосной установки.

В экономической части произведена оценка затрат на проектирование. Смета затрат составляет 113560 р. Также проведена оценка ресурсосберегающей эффективности проекта (она составила 4,5 баллов).

В разделе безопасности и экологичности проанализированы опасные и вредные производственные факторы, даны практические рекомендации по технике безопасности и производственной санитарии.

Conclusion

In the final qualifying work, the calculation and analysis of the installation of an electrically driven centrifugal pump with a frequency converter was carried out. A centrifugal pump was selected by well parameters, its power consumption was calculated. Then, the submersible electric motor was selected according to the power of the pumping unit.

For further analysis, a T-shaped equivalent circuit of an asynchronous electric motor was calculated and its natural mechanical and electromechanical characteristics were built.

Control station with Electon-05-630 frequency converter is selected. The control law for the frequency converter is selected as the control law.

According to the selected volt-frequency law, artificial mechanical and electromechanical characteristics were constructed. Since the control station allows frequency control from 3.5 Hz and above, the initial frequency of the inverter $f_{(i.nach)} = 10$ Hz was chosen.

When building it turned out that the starting torque of the engine at 10 Hz cannot exceed twice the initial moment of resistance and ensure the launch of the pump unit. Therefore, it was decided to add voltage at the initial stage of start-up.

Next, a simulation model of a frequency converter system was built - an asynchronous motor without feedback, and on its basis an analysis of various operating modes of the pumping unit was carried out.

Список использованных источников

1. 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.
2. Способ кратковременной эксплуатации скважин погружной насосной установки с электроприводом (способ Кузьмичёва): патент Рос. Федерация №2293176, заявл. 02.09.2005, опубл. 10.02.2007 Бюл. №4.
3. Бочарников В. Ф. Погружные скважинные центробежные насосы с электроприводом: учебное пособие. — Тюмень; Издательство «Вектор Бук», 2003. – 336 с.
4. Башарин А. В. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов. / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982 г., 392 с.
5. Чернышёв А.Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие / А.Ю. Чернышёв, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышёв; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.
6. Ланграф С.В. Асинхронный электропривод: методическое пособие. – Томск, 2003. 48 с.
7. СНиП 4156-86 «Санитарные правила для нефтяной промышленности».
8. Петров А.Я. «Особенности правового регулирования труда работников нефтегазовой отрасли», (Трудовое право, 2008, №5).
9. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.
10. ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно- гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».
11. ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности.
12. ППБ 01-93* Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.
13. ПУЭ Правила устройства электроустановок. Издание седьмое.
14. Программная среда Novomet ESP calculator // НОВОМЕТ- калькулятор ЭЦН URL: <http://www.novomet.ru/rus/products/software/esp-calculator>.
15. Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-

методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина, З.В. Криницына; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.

Приложения

Приложение 1. Технические характеристики трансформаторов серии ТМПН

Технические характеристики трансформаторов серии ТМПН в овальном баке с расширителем

Тип трансформатора	Номен. мощность, кВ·А	Схема и группа соединения обмоток	Кол-во ступеней регулирования	Номинальное напряжение ВН, В	Напряжение, В (ток, А) ступеней регулирования	Потери, Вт		Напря- жение к.з., %, не более	Размеры, мм				Масса, кг		
						х.з.	к.з.		Л	В	Н	А	А ₁	масла	полная
ТМПН-63/1-УХЛП	63	Y _п /Y-0	10	611	675(53,9)-643(56,6)-611(59,5)-584(59,5)-549(59,5)-517(59,5)-483(59,5)-455(59,5)-423(59,5)-391(59,5)	240	128	5,5	1140	570	1370	500	480	153	500
				856	1023(35,6)-982(37)-941(38,7)-900(40,4)-856(42,5)-824(42,5)-781(42,5)-739(42,5)-698(42,5)-657(42,5)										
				921	1143(31,8)-1106(32,9)-1069(34)-1032(35,3)-995(36,6)-958(38)-921(39,5)-884(39,5)-847(39,5)-810(39,5)-773(39,5)-736(39,5)-699(39,5)-662(39,5)-625(39,5)-588(39,5)-551(39,5)-514(39,5)-477(39,5)-440(39,5)										
ТМПН-100/3-УХЛП	100	Y _п /Y-0	5	1170	736(78,4)-708(78,4)-681(78,4)-649(78,4)-620(78,4)-592(78,4)-562(78,4)-530(78,4)-502(78,4)-475(78,4)										
				844	958(60,3)-920(62,8)-882(65,5)-844(68,4)-810(68,4)-782(68,4)-747(68,4)-709(68,4)-671(68,4)-633(68,4)										
				1250	1170(49,4)-1108(49,4)-1045(49,4)-983(49,4)-920(49,4) 1690(34,2)-1646(35,1)-1602(36)-1558(37,1)-1514(38,1)-1470(39,3)-1426(40,5)-1382(41,8)-1338(43,2)-1294(44,6)-1250(46,2)-1206(46,2)-1162(46,2)-1118(46,2)-1074(46,2)-1030(46,2)-986(46,2)-942(46,2)-898(46,2)-854(46,2)-810(46,2)-766(46,2)-722(46,2)-678(46,2)-634(46,2)	290	197	5,5	1200	800	1400	550	480	190	660
ТМПН-125/3-УХЛП	125	Y _п /Y-0	36	1540	1610(35,9)-1525(35,9)-1440(35,9)-1355(35,9)-1270(35,9) 2210(26,1)-2095(27,6)-1980(29,2)-1865(29,2)-1750(29,2) 2500(28,9)-2440(29,6)-2380(30,3)-2320(31,1)-2260(31,9)-2200(32,8)-2140(33,7)-2080(34,7)-2020(35,7)-1960(36,8)-1900(38)-1840(39,2)-1780(40,5)-1720(42)-1660(43,5)-1600(45,1)-1540(46,9)-1480(46,9)-1420(46,9)-1360(46,9)-1300(46,9)-1240(46,9)-1180(46,9)-1120(46,9)-1060(46,9)-1000(46,9)-940(46,9)-880(46,9)-820(46,9)-760(46,9)-700(46,9)-640(46,9)-580(46,9)-520(46,9)-460(46,9)-400(46,9)	440	2100	5,5	1250	825	1550	550	550	245	820

Приложение 2. Потери напряжения на 1000 м кабельной линии

Потери напряжения в кабеле с медными жилами сечением 3х16 мм., В (на 1000 метров)				Потери напряжения в кабеле с медными жилами сечением 3х21 мм., В (на 1000 метров)				Потери напряжения в кабеле с медными жилами сечением 3х25 мм., В (на 1000 метров)				Потери напряжения в кабеле с медными жилами сечением 3х33 мм., В (на 1000 метров)			
А	Пластовая температура, °С														
	40-60	70-90	> 100		40-60	70-90	> 100		40-60	70-90	> 100		40-60	70-90	> 100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
4,6	28	32	35	14,6	21	24	27	14,6	18	20	23	14,6	13	16	17
18	34	39	44	18	26	30	33	18	22	25	28	18	17	19	21
21	40	46	51	21	31	35	39	21	26	29	33	21	19	22	25
22	42	48	53	22	32	37	41	22	27	31	34	22	20	23	26
24	46	53	58	24	35	40	45	24	29	34	37	24	22	26	28
25	48	55	61	25	37	42	46	25	31	35	39	25	23	27	29
26	50	57	63	26	38	43	48	26	32	36	40	26	24	28	31
27	51	59	66	27	39	45	50	27	33	38	42	27	25	29	32
28	53	61	68	28	41	47	52	28	34	39	44	28	26	30	33
29	55	64	70	29	42	48	54	29	35	41	45	29	27	31	34
30	57	66	73	30	44	50	56	30	37	42	47	30	28	32	35
32	61	70	78	32	47	53	59	32	39	45	50	32	29	34	38
33	63	72	80	33	48	55	61	33	40	46	51	33	30	35	39
34	65	74	83	34	50	57	63	34	42	47	53	34	31	36	40
35	67	77	85	35	51	58	65	35	43	49	54	35	32	37	41
36	69	79	87	36	53	60	67	36	44	50	56	36	33	38	42
37	70	81	90	37	54	62	69	37	45	52	58	37	34	39	43
38	72	83	92	38	55	63	71	38	46	53	59	38	35	40	45
39	74	85	95	39	57	65	72	39	48	54	61	39	36	41	46
40	76	88	97	40	58	67	74	40	49	56	62	40	37	43	47
41	78	90	100	41	60	68	76	41	50	57	64	41	38	44	48
42	80	92	102	42	61	70	78	42	51	59	65	42	39	45	49
43	82	94	104	43	63	72	80	43	53	60	67	43	40	46	51
44	84	96	107	44	64	73	82	44	54	61	68	44	41	47	52
47	90	103	114	47	69	78	87	47	57	66	73	47	43	50	55
48	91	105	117	48	70	80	89	48	59	67	75	48	44	51	56
49	93	107	119	49	72	82	91	49	60	68	76	49	45	52	58
51	97	112	124	51	74	85	95	51	62	71	79	51	47	54	60
53	101	116	129	53	77	88	98	53	65	74	82	53	49	56	62
55	105	120	134	55	80	92	102	55	67	77	86	55	51	58	65
56	107	123	136	56	82	93	104	56	68	78	87	56	52	60	66
57	109	125	138	57	83	95	106	57	70	80	89	57	52	61	67
58	110	127	141	58	85	97	108	58	71	81	90	58	53	62	68
59	112	129	143	59	86	98	110	59	72	82	92	59	54	63	69
60	114	131	146	60	88	100	111	60	73	84	93	60	55	64	70
61	116	134	148	61	89	102	113	61	75	85	95	61	56	65	72

Приложение 3. Подбор СУ с частотным регулированием в зависимости от номинальной мощности ПЭД

Модель СУ с частотным регулированием «Электрон-05»	Полная выходная мощность СУ, кВА.	Номинальная мощность подключаемого двигателя общепромышленного исполнения, кВт	Номинальная мощность подключаемого ПЭД при 50 Гц, кВт.	Номинальная мощность подключаемого ПЭД при 70 Гц, кВт.
32	20	до 15	-	-
63	40	до 30	-	-
160	100	до 75	до 32	-
250	160	до 110	до 70	до 25
400	260	до 200	до 125	до 45
630	410	до 315	до 180	до 63
800	520	до 400	до 250	до 90
1000	650	до 500	до 320	до 110
1200	780	до 625	до 400	до 140
1800	1150	до 800	до 500	до 180