

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

---

Институт - Энергетический  
Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
Кафедра - Электропривода и электрооборудования  
Профиль подготовки – Энергосберегающие режимы электрических источников питания, комплексов и систем

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Разработка регулируемого электропривода погружного насосного агрегата для откачки попутного нефтяного газа</b>

УДК 62-83-523 622 276 53

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Перебаскин Назар Геннадьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭПЭО	Ланграф Сергей Владимирович	К.Т.Н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Наталия Геннадьевна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский Анатолий Григорьевич	К.Т.Н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭПЭО	Дементьев Юрий Николаевич	К.Т.Н.		

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП  
13.04.02«Электроэнергетика и электротехника»**

<b>Код ре- зультата</b>	<b>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</b>
<b>Универсальные компетенции</b>	
P1	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками</i> как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	<i>Использовать</i> на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	<i>Использовать</i> представление о методологических основах <i>научного познания и творчества</i> , роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением <i>современных информационных технологий</i> , синтезировать и критически резюмировать информацию.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Ставить и <i>решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.
P7	Выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Проводить инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы</i> электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	<i>Осваивать новое</i> электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Разрабатывать рабочую <i>проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять <i>оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.

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

---

Институт - Энергетический  
Направление подготовки – Электроэнергетика и электротехника  
Кафедра – Электропривода и электрооборудования

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      \_\_\_\_\_ (Дата)      Ю.Н. Дементьев  
(Ф.И.О.)

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

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5Б	Перебаскину Назару Геннадьевичу

Тема работы:

<b>Разработка регулируемого электропривода погружного насосного агрегата для откачки попутного нефтяного газа</b>	
Утверждена приказом директора Энергетического института (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы: (дата)	
---	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b> <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>Установка электроцентробежного насоса (УЭЦН). УЭЦН должна иметь производительность <math>Q = 700 \text{ м}^3 / \text{сут}</math> КПД насоса <math>\eta = 70\%</math> ; Потребное давление <math>P = 14.5 \text{ МПа}</math> Диаметр колонны <math>D = 176 \text{ мм}</math> Выполнить математическое и имитационное моделирование электропривода УЭЦН.</p>
--	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования; содержательная, концептуальная, математическая структурная модель; разработка алгоритма решения задачи; выбор программного обеспечения; индивидуальные; дополнительные разделы, подлежащие разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Теоретические сведения о технологии откачки ПНГ;  Математическая модель электропривода насосного агрегата;  Имитационное моделирование системы электропривода в программной среде Matlab Simulink.</p>
--	---

<b>Перечень графического материала</b>	
--	--

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Кузьмина Н.Г., старший преподаватель
«Социальная ответственность»	Дашковский А.Г., к.т.н., доцент
«Английский язык»	Баластов А.В., старший преподаватель

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭПЭО	Ланграф Сергей Владимирович	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Перебаскин Н.Г.		

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация на тему «Разработка регулируемого электропривода насосного агрегата для откачки попутного нефтяного газа» состоит из текстового документа из 101 страниц, 50 рисунков, 15 таблиц, 21 источник использованной литературы, 3 приложения.

Ключевые слова: попутный нефтяной газ, электроцентробежный насос, асинхронный двигатель, преобразователь частоты, энергоэффективность.

Целью данной работы является проведение расчета и исследование режимов работы электропривода насосного агрегата для откачки попутного нефтяного газа.

В процессе исследования использовались как специальное программное обеспечение (MATLAB Simulink, Mathcad), так и стандартные программы (Microsoft Office).

В результате исследования были осуществлены расчет и имитационное моделирование погружного электродвигателя, преобразователя частоты, механической системы электропривода, предельных характеристик, произведен выбор электрического оборудования, соответствующий условиям технического задания.

В организационно - экономической части выполнено планирование проектных работ, расчет сметы затрат на проектирование. С позиции финансовой и ресурсной эффективности выбран рациональный вариант решения поставленной в магистерской работе технической задачи.

В разделе производственной и экологической безопасности рассмотрены техника безопасности, производственная санитария, пожарная безопасность технологического процесса.

Выпускная квалификационная работа оформлена в текстовом редакторе Microsoft Office Word 2013 и представлена в распечатанном виде на листах формата А4.

## Оглавление

Введение .....	8
1 Технология откачки ПНГ .....	10
1.1 Обзор электропривода насосного агрегата в применяемой технологии	12
1.2 Установка электроцентробежного насоса.....	13
1.3 Разработка кинематической схемы электропривода УЭЦН .....	15
2 Расчет и выбор основного силового оборудования регулируемого электропривода.....	21
2.1 Расчет и выбор ЭЦН.....	21
2.2 Расчет и выбор погружного электродвигателя .....	22
2.3 Расчет и выбор типа сечения кабеля .....	23
2.4 Расчет и выбор станции управления .....	24
2.5 Расчет аппаратов защиты.....	27
2.6 Принципиальная электрическая схема управления ПЭД .....	27
3 Расчет статических и динамических характеристик для разомкнутой системы электропривода.....	29
3.1. Расчет естественных электромеханической и механической характеристик электропривода .....	29
3.2 Расчет механической характеристики производственного механизма ..	36
3.3 Расчет искусственных характеристик системы «преобразователь- двигатель» .....	37
3.3.1 Расчет и построение искусственных характеристик системы преобразователь-двигатель с IR-компенсацией .....	40
4 Моделирование частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением в имитационной среде Matlab Simulink .....	44
4.1 Имитационная модель силового канала электропривода .....	44
4.2 Настройка модуля компенсации скольжения .....	52
4.3 Настройка модуля IR-компенсации .....	55
4.4 Ограничение тока электродвигателя .....	57
4.5 Сравнение энергетических показателей частотно-регулируемого электропривода .....	59
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	64

5.1 Планирование работ технического проекта.....	64
5.1.1 Смета затрат на научное исследование .....	66
5.1.2 Материальные затраты.....	66
5.1.3 Затраты на амортизацию.....	66
5.1.4 Основная заработная плата исполнителей темы .....	67
5.1.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	68
5.1.6 Прочие затраты.....	69
5.1.7 Накладные расходы.....	69
5.2 Определение экономической эффективности проекта .....	70
6 Социальная ответственность .....	72
6.1 Анализ выявленных вредных факторов .....	72
6.1.1 Микроклимат .....	72
6.1.2 Шум и вибрация .....	74
6.1.3 Вредные вещества .....	75
6.1.4 Анализ выявленных опасных факторов .....	76
6.1.5 Экологическая безопасность .....	82
6.1.6 Защита в чрезвычайных ситуациях .....	83
6.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	83
6.2.1 Организация рабочего места.....	84
Заключение .....	86
Публикации .....	88
Список использованных источников .....	89
Приложение 1 .....	91
Приложение 2 .....	92
Приложение 3 .....	100

## **Введение**

Попутный нефтяной газ (ПНГ) – смесь различных газообразных углеводородов, растворенных в нефти которые выделяются в процессе добычи и перегонки [1]. Технология откачки ПНГ, на сегодняшний день, является весьма актуальной задачей, способствующей решению проблемы утилизации ПНГ, помимо этого она позволяет понизить давление в затрубном пространстве скважины, тем самым повышая приток скважинной продукции [2].

Электропривод – это электромеханическая система, состоящая из преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса. Современный этап развития привода характеризуется массовым переходом от нерегулируемого электропривода к регулируемому [12].

Насосы и насосное оборудование являются неотъемлемой частью производства в нефтедобывающей отрасли. По объемам добычи нефти наиболее широко зарекомендовала себя установка электроцентробежного насоса (УЭЦН). Электромеханическим преобразователем в данной установке служит погружной асинхронный электродвигатель. Однако, эффективное управление ими представляет собой довольно сложную задачу и требует создания специальных систем управления [3].

Автоматизация управления позволяет осуществлять регулирование скорости при заданной программе в функции пути, времени или нагрузки, регулирование ускорения и замедления, перераспределение нагрузки, точную остановку, защиту от перегрузки, разноса, неправильного начального положения и т.п. Применение автоматизации (даже частичной) увеличивает



надёжность и точность работы электропривода, повышает производительность машин в целом [12].

При использовании регулируемых электроприводов решается задача поддержания определенного значения технологического параметра, например, регулирование подачи скважинной продукции в насосных установках.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка регулируемого электропривода погружного насосного агрегата, удовлетворяющего техническим условиям и требованиям.

## **1 Технология откачки ПНГ**

Попутный нефтяной газ (ПНГ) – является ценным углеводородным компонентом, выделяющимся из добываемых, транспортируемых и перерабатываемых, содержащих углеводороды, минералов на всех стадиях инвестиционного цикла жизни до реализации готовых продуктов конечному потребителю [2].

По данным Министерства природных ресурсов и экологии РФ, из ежегодно добываемого в России ПНГ, лишь 26% направляется в переработку, 47% идет на нужды промыслов либо списывается на технологические потери и 27% сжигается в факелах. Помимо экономических убытков, утилизация ПНГ приводит к значительным выбросам твердых загрязняющих веществ и ухудшению экологической обстановки в нефтепромысловых районах [1].

Постановлением Правительства Российской Федерации от 08.01.2012 (протокол №7, пункт 2) по принятию мер для предотвращения загрязнения атмосферного воздуха выбросами загрязняющих веществ и сокращении эмиссии парниковых газов, образующихся при сжигании попутного нефтяного газа, установлен целевой показатель сжигания ПНГ на факельных установках на 2012 и последующие годы в размере не более 5% от объема, добытого ПНГ. Так, при сжигании ПНГ на факельных установках более 5%, плата за выбросы вредных веществ, образующихся при этом, рассчитывается как за сверхлимитное загрязнение и при расчете к нормативам платы принимается дополнительный коэффициент [1].

Утилизацию ПНГ необходимо проводить, как с точки зрения экологической безопасности, так и с точки зрения экономической эффективности, потому как, при добыче скважинной продукции, в затрубном пространстве скапливается нежелательное количество газосодержания, которое, создавая дополнительное давление, препятствует повышению притока скважинной продукции. Избыток газосодержания на приеме скважинного насоса приводит к снижению подачи скважинной продукции и КПД установки, так как присутствие эмульгированного газа увеличивает

объем смеси, проходящей через первые рабочие ступени насоса, и забирает часть энергии, подводимой к валу насоса, расходуя ее на сжатие газовых пузырьков и полное их растворение в нефти.

Откачка ПНГ производится с помощью простой, но эффективной технологии [1,2], которая наглядно изображена на рисунке 1.

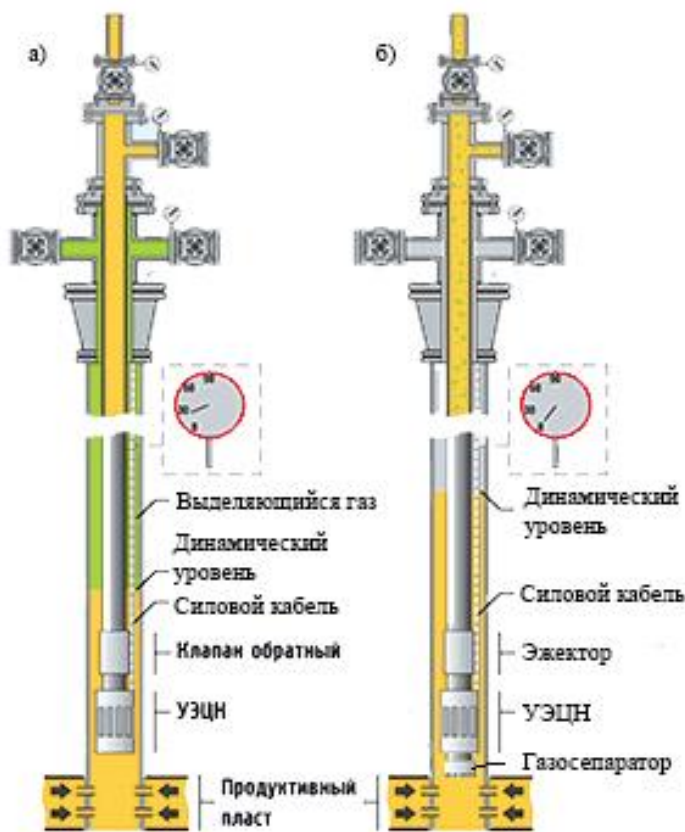


Рисунок 1 – Схема работы технологии по откачке ПНГ

а) – без применения технологии; б) – с применением технологии

Технология подразумевает использование в качестве насосного агрегата – установку электроцентробежного насоса (УЭЦН). На рисунке 1а представлена скважинная установка, которая не предназначена для откачки ПНГ, видно, что в такой системе динамический уровень скважинной продукции намного ниже чем на рисунке 1б, это обусловлено влиянием ПНГ который находится в затрубном пространстве (на рисунке выделен зеленым цветом). В данном случае скважинная продукция будет поступать на прием насоса, но с меньшим притоком. Проходя через насос, скважинная продукция поступает в насосно-компрессорные трубы (НКТ) и подымается на верх к

устью скважины, после чего подается на нефтеперерабатывающие станции. Рассмотрим рисунок 1б, на котором изображена схема с использованием технологии откачки ПНГ из затруба и частичной откачки газа из забоя скважины, путем сепарации. На входе УЭЦН располагается газосепаратор, гидравлически связанный с затрубным пространством через обратный клапан. Функция его заключается в том, чтобы осуществлять подачу скважинной продукции без излишнего содержания газа. Путем сепарации, через клапан, газ попадает в затрубное пространство, в котором уже изначально содержится ПНГ. Откачка ПНГ, непосредственно из затрубного пространства, осуществляется с помощью специального устройства – эжектора, который создает в насосно-компрессорных трубах (НКТ) область более низкого давления по сравнению с затрубным пространством, что способствует откачке ПНГ. После этого скважинная продукция и откаченный ПНГ смешиваются в НКТ и поступают в выкидную линию. Динамический уровень повышается, следовательно, приток скважинной продукции увеличивается [4].

Исходя из этого можно сделать вывод о том, что разрабатываемый электропривод для откачки ПНГ является актуальной задачей, позволяющей снизить выбросы вредных веществ в атмосферу, а также повысить экономическую эффективность при добыче скважинной продукции.

### **1.1 Обзор электропривода насосного агрегата в применяемой технологии**

Насосы являются основными исполнительными элементами в нефтедобывающей отрасли.

Насос – гидравлическая машина, преобразующая механическую энергию приводного двигателя в энергию потока жидкости, служащая для перемещения и создания напора жидкостей всех видов, механической смеси жидкости с твёрдыми веществами или сжиженных газов. Разность давлений жидкости на выходе из насоса и присоединённом трубопроводе обуславливает её перемещение [3].

В технологии откачки ПНГ применяется насосный способ эксплуатации скважины. На сегодняшний день, большая часть электроприводов, применяемых в данной области, не подразумевает использование регулирования с помощью специальных устройств. Это обусловлено простотой и дешевизной эксплуатации насосного агрегата. В следствие этого, электродвигатели работают на предельных характеристиках и подвержены скорому выходу из строя. Насосная установка не требует большого диапазона регулирования, и регулирование подачи скважинной продукции осуществляется с помощью дросселирования задвижек, которые установлены на устье скважины. При дросселировании, КПД установки значительно уменьшается и этот способ является крайне неэффективным с точки зрения энергопотребления. Сравнение энергоэффективности нерегулируемого электропривода насосного агрегата и электропривода, управление которого осуществляется с помощью преобразователя частоты подробно приведены в главе 4.4. Выбор преобразователя частоты, как устройства управления двигателем, обусловлен обеспечением необходимой энергоэффективностью и надежностью. Исходя из существующей проблемы, можно сделать вывод, о том, что применение частотно-регулируемого электропривода в технологии нефтедобычи, и в частности, откачки ПНГ из затрубного пространства, является актуальным решением [6].

## **1.2 Установка электроцентробежного насоса**

УЭЦН – установка электроцентробежного насоса является погружной бесштанговой насосной установкой лопастного типа. Скважины, оборудованные УЭЦН, уступают по количеству скважинам на которых используются установки штанговых глубинных насосов (ШГН), но зато по объемам добычи нефти, УЭЦН находится вне конкурентной борьбы. Порядка 80% всей нефти в России добываются с помощью бесштанговой насосной установкой – УЭЦН [3].

Установка погружного центробежного насоса (рисунок 2) состоит из погружного агрегата, который включает в себя многоступенчатый электроцентробежный насос 3, гидрозащиту 2 и электродвигатель 1. Он спускается в скважину на колонне НКТ 5, кабеля 4, арматуры устья 6, станции управления 7 и питающего трансформатора 8.

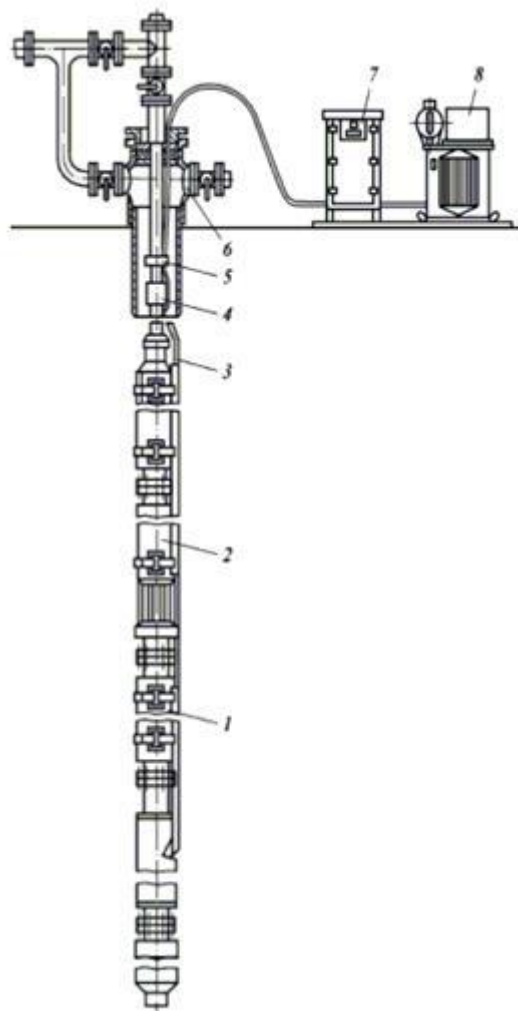


Рисунок 2 – Схема установки электроцентробежного насоса

Электроэнергия подается по кабелю от питающего трансформатора и станции управления на погружной электродвигатель. Электродвигатель приводит во вращения электроцентробежный насос. Вал электродвигателя связан с валом электроцентробежного насоса через шпоночные соединения. Выше насоса устанавливается обратный шаровой клапан, который облегчает пуск установки после простоя, а также предотвращает обратное вращение

ротора электродвигателя которое возникает под воздействием столба жидкости в колонне НКТ при остановках.

Работа насоса заключается в создании центробежной силы, которая возникает при воздействии лопастей рабочего колеса на жидкость. Центробежные силы отбрасывают жидкость от центра колеса к периферии. В следствии этого в центральной части колеса создается разрежение, а на периферии повысится давление, в результате чего жидкость из насоса начнёт поступать в напорный трубопровод и, одновременно, из всасывающего трубопровода. начнёт поступать в насос. Таким образом, осуществляется непрерывная подача жидкости центробежным насосом из всасывающего в напорный трубопровод [3].

### 1.3 Разработка кинематической схемы электропривода УЭЦН

Кинематическая схема (рисунок 3) представляет собой последовательность передачи движения от двигателя через передаточный механизм к рабочему органу – насосному агрегату.

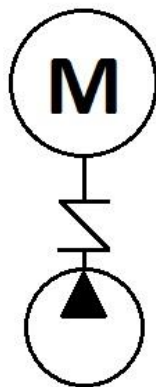


Рисунок 3 – Кинематическая схема электропривода УЭЦН

Рассмотрим более детально конструкции основных узлов установки скважинных центробежных насосов. ЭЦН подразделяется по исполнению на обычное, износостойкое. Электроцентробежный насос являет собой набор большого количества рабочих колес и направляющих агрегатов. Рабочие колеса установлены на валу, который опирается на подшипники; находящиеся совместно с направляющими аппаратами внутри корпуса (рисунок 4).

Рабочие колеса 7 соединены с валом 3 посредством шпоночного соединения 6 и имеют возможность независимого осевого перемещения вдоль вала. В корпусе 4 установлены аппараты 5, поджатые гайкой в верхней части. Данная конструкция позволяет обеспечивать передачу осевого усилия направляющему аппарату.

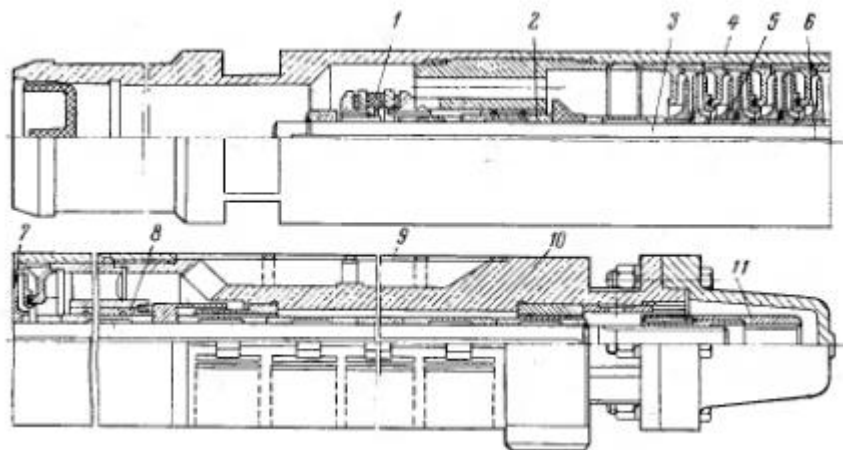


Рисунок 4 – Скважинный центробежный насос

После передачи усилия, вал разгружается от осевой нагрузки и передает лишь крутящий момент. Через текстолитовую шайбу 3 передается осевое усилие от колеса 1 к направляющему аппарату 2 (рисунок 5), образуя с опорной поверхностью аппарата пару трения, удовлетворительно работающую в пластовой жидкости [3].

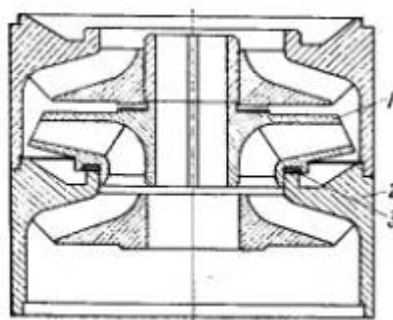


Рисунок 5 – Рабочее колесо центробежного насоса

При работе насоса часть осевого давления от колес, возникающее вследствие действия давления жидкости на торец вала создаваемое им также и из-за отложения солей, коррозии металла и наличия сил трения передается к валу. Осевое усилие принимается осевой опорой 1 скольжения, которая



располагается в верхней части корпуса. Сверху и снизу установлены радиальные опоры 2 и 8. Вал насоса соединяется с валом протектора гидрозащиты электродвигателя с помощью шлицевого соединения 10. Пластовая жидкость попадает в насос через сетчатый фильтр 9, который располагается в нижней части корпуса, и, пройдя ступени насоса по осевому каналу, выходит из внутренней полости корпуса во внутреннюю поверхность колонны насосно-компрессорных труб [2].

Погружной электродвигатель (рисунок 6) представляет из себя трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, внутренняя полость которого заполняется маслом. Он состоит из корпуса 12, внутри которого расположены статор и ротор, вал 11, установленный на подшипниках, упорный подшипник при этом размещен в головной части состоящий из пяты 3 и подпятника 4. Статор собирают из отдельных чередующихся секций – магнитных 8 и немагнитных 9. Ротор состоит из пакета электротехнической стали 10. Радиальные подшипники скольжения располагаются в немагнитных секциях 7. Обмотка статора уложена в пазы статора, а медные стержни роторной короткозамкнутой обмотки уложены в специальные пазы «белочьей клетки». В колодке кабельного ввода 5 соединяются обмотки статора. Колодка располагается в головке 2.

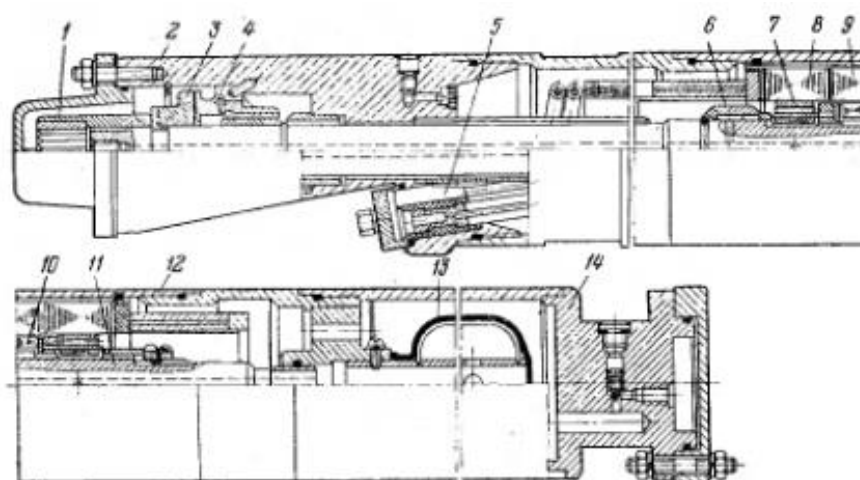


Рисунок 6 – Погружной электродвигатель

Установленная на валу турбина 6, предназначена для циркуляции масла внутри электродвигателя. Вращаясь, она заставляет масло двигаться между ротором и статором, в специальных отверстиях набора статора, проходит через фильтр 13, который располагается в нижней части вала. Масло выполняет несколько функций: смазывает подшипники и отводит тепло от источника нагрева к корпусу. Корпус, в свою очередь, охлаждается пластовой жидкостью.

С помощью фланцевого соединения в основании насоса 14 устанавливается компенсатор гидрозащиты, соединяемый с корпусом электродвигателя. С валом протектора соединяется вал электродвигателя с помощью муфты 1, а верхняя часть корпуса электродвигателя соединяется с протектором фланцевым соединением. Протектор выполняет функции гидравлической защиты электродвигателя от пластовой жидкости и обеспечивает, при изменении температуры, компенсацию изменения объема масла. Протектор устанавливается между насосом и погружным электродвигателем. Конструкцию протектора рассмотрим на примере гидрозащиты типа Г (рисунок 7) [3].

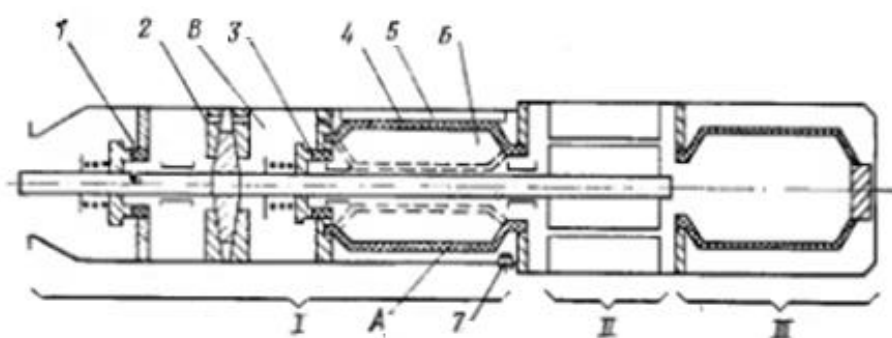


Рисунок 7 – Гидрозащита ПЭД

Протектор состоит из компенсатора объема масла III, который расположен ниже электродвигателя II, разделительной камеры с эластичной диафрагмой 4, вала с торцевыми уплотнениями и опорной пятой 2. Работа протектор осуществляется следующим образом: во внутренней полости (А) располагается масло малой вязкости, к примеру, трансформаторное, которым

заполняется погружной двигатель. Эта полость сообщается с полостью (В) компенсатора объема масла через объем электродвигателя. Гибкий элемент передает давление окружающей среды в полость (Б). Объем компенсатора уменьшается по мере расходования масла объемом. Когда происходит увеличение объема масла, в результате нагрева, объем компенсатора увеличивается. Масло, для смазки упорного подшипника, находится в полости (В). Упорный подшипник воспринимает осевую нагрузку от вала насоса. Выше и ниже пяты располагаются торцевые уплотнители: нижний — герметизирует внутреннюю полость (В), соединенную с электродвигателем, а верхний — позволяет предотвратить вытекание масла, которое в свою очередь смазывает опорный подшипник. По мере израсходования масла из полости (Б) в полость (А), поступает скважинная жидкость, через клапан 7, где отстаивается и разделяется на нефть и воду. После полного израсходования масла, нефть, поступающая в полость (В) через отверстия и трубку 5, будет смазывать подшипники вала протектора. На входе УЭЦН устанавливают газосепаратор который отделяет излишки газа и направляет их в затрубное пространство. На рисунке 8 представлена конструкция такого устройства [3].

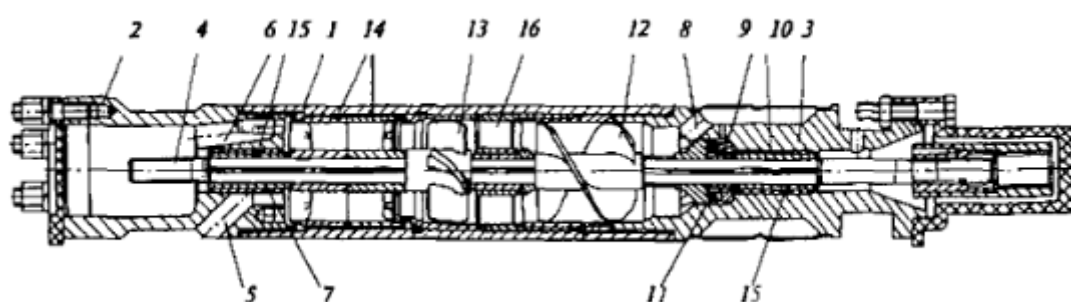


Рисунок 8 – Газосепаратор

Газосепаратор состоит из трубного корпуса 1 с головкой 2, основания 3 с приемной сеткой вала 4 с располагающимися на нем рабочими органами. В головке выполнены две группы перекрестных каналов, 5,6 для газа и жидкости и установлена втулка радиального подшипника 7. В основании размещены закрытая сеткой полость с каналами 8 для приема газожидкостной смеси, подпятник 9 и втулка 10 радиального подшипника. На валу размещены

пяты 11, шнек 12, осевое рабочее колесо 13 с суперкавитирующим профилем лопастей, сепараторы 14 и втулки радиальных подшипников 15. В корпусе размещены направляющая решетка и гильзы.

На рисунке 9 представлена схема устьевого эжектора.

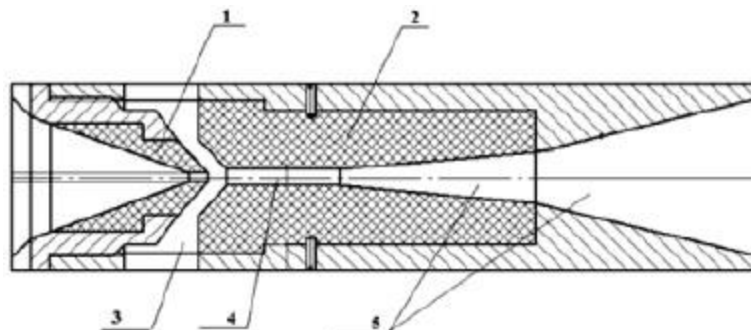


Рисунок 9 – Эжектор

Скважинная продукция под давлением поступает в сопло 1, в то время как в приемной камере 3 создается разрежение и под действием более высокого давления происходит закачка газа, далее скважинная продукция и газ из затрубья смешиваются в камере 4, и через камеру расширения подаются в НКТ [3].

## 2 Расчет и выбор основного силового оборудования регулируемого электропривода

Силовое электрооборудование – это устройства, которые предназначены для приема, учета и распределения электрической энергии, оборудование, обеспечивающее управления электроэнергией и контроль над ней.

Расчет необходимых параметров скважины и дальнейший выбор мощности насосного агрегата основан на [5,6].

### 2.1 Расчет и выбор ЭЦН

Необходимо подобрать ЭЦН с исходными данными приведенными в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для выбора ЭЦН

Потребное давление насоса $P$ , МПа	Производительность $Q$ , м <sup>3</sup> /сут	Диаметр Колонны $D$ , мм	КПД насоса $\eta_n$ , %
14,5	700	176	70

Определяем мощность насоса:

$$P_H = \frac{P \cdot Q}{\eta_n \cdot 24 \cdot 3600} \quad (2.1)$$

$$P_H = \frac{14.5 \cdot 10^6 \cdot 700}{0.7 \cdot 24 \cdot 3600} = 167.8 \text{ кВт}$$

Выбираем насос GN5180 который производит фирма REDA. Данный тип насоса удовлетворяет необходимым требованиям представленных в таблице 1. В таблице 2 представлены технические характеристики выбранного насоса [7].



Рисунок 10 – Общий вид электроцентробежного насоса

Таблица 2 – Технические характеристики насоса GN5180

Марка насоса	Общий диаметр, мм	Дебит м <sup>3</sup> /сут	Точка наивысшей эффективности м <sup>3</sup> /сут	Мощность кВт
GN5180	137	520 - 880	730	180

## 2.2 Расчет и выбор погружного электродвигателя

Определение мощности погружного двигателя:

$$P_{\text{пэд}} = \frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{пэд}}} \quad (2.2)$$

$$P_{\text{пэд}} = \frac{168.8 \cdot 10^3}{0.85} = 197.4 \text{ кВт}$$

Из отечественных производителей требуемым параметрам соответствует погружной электродвигатель производства ОАО «Алнас».

Погружные маслonaполненные трехфазные асинхронные с короткозамкнутым ротором двухполюсные электродвигатели применяются в качестве электромеханического исполнительного устройства для центробежных насосов в нефтегазодобывающей отрасли.

Наиболее подходящий по параметрам погружной электродвигатель ЭДСТ220–117М [8] представлен на рисунке 11.



Рисунок 11 – Погружной электродвигатель ЭДСТ220–117М

Технические характеристики погружного электродвигателя представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики ЭДСТ220–117М

Тип ПЭД	Номинальная мощность, кВт	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	КПД %	cosφ	Скольжение %	Момент на валу Кгс*м
ЭДСТ220-117М6	220	2700	64	84,0	0,84	5,5	1,8

Погружные электродвигатели этой серии соответствуют высокому качеству и надежности, позволяя эксплуатировать их в суровых условиях

### 2.3 Расчет и выбор типа сечения кабеля

Выбор питающего кабеля осуществляется на основе расчета [10].

Определяем сечение жилы кабеля:

$$S = \frac{I_{\text{раб}}}{i} \quad (2.3)$$

$$S = \frac{64}{5} = 10.8 \text{ мм}^2$$

где  $I_{\text{раб}}$  – номинальный ток выбранного электродвигателя, А;  $i = 5 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$  – плотность рабочего тока в кабеле.

По номинальному току электродвигателя выбирается необходимое сечение кабельной жилы.

Определяем потери мощности в кабеле:

$$R = \rho_{\text{меди}} \cdot (1 + \alpha T \cdot (T - T_{20})) \cdot \frac{1}{S} \quad (2.4)$$

$$R = 0.0175 \cdot (1 + 0.004 \cdot (58.226 - 20)) \cdot \frac{1}{10.8} = 1.462 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$$

где  $\rho_{\text{меди}}$  – удельное сопротивление меди,  $\text{Ом} \cdot \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}$ ;  $\alpha T$  – температурный коэффициент для меди;  $T_{20} = 20^\circ \text{C}$ .

Общая длина кабеля:

$$L_K = L_{\text{подв}} + 100 = 1466 \text{ м}; \quad (2.5)$$

Рассчитаем потери в кабеле:

$$\Delta P_K = 3 \cdot I_{\text{раб}}^2 \cdot R \cdot L_K \cdot 10^{-3} \quad (2.6)$$

$$\Delta P_K = 3 \cdot 69^2 \cdot 1.462 \cdot 10^{-3} \cdot 1466 \cdot 10^{-3} = 30.6 \text{ Вт}$$

Выберем кабель марки КПБП-90 сечением 13,3 мм<sup>2</sup> от компании «Камский кабель» [11].

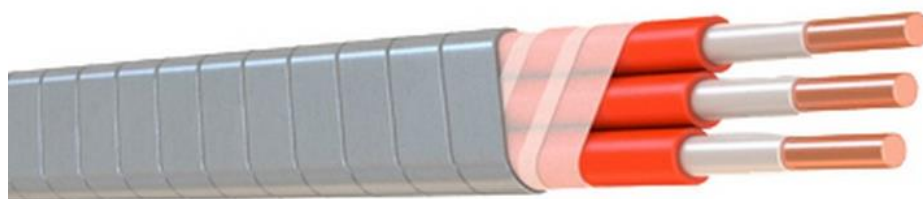


Рисунок 12 – Силовой кабель марки КПБП-90

Данный тип кабеля специально предназначен для электропитания погружных электродвигателей на максимальное рабочее напряжение переменного тока 3300 В частоты 50 Гц.

## 2.4 Расчет и выбор станции управления

Преобразователь частоты (ПЧ) применяется для осуществления плавного пуска электродвигателя и регулирования скорости, благодаря созданию на выходе преобразователя параметров питающей сети заданной частоты и напряжения. Преобразователь частоты включает в свою силовую цепь два основных устройства – выпрямитель и инвертор. С помощью этих устройств происходит двойное преобразование электрической энергии: сначала выпрямитель преобразует переменный ток в постоянный и подается на вход инвертора, а инвертор, уже преобразует из постоянного в переменный с необходимыми заданными параметрами. Обратим внимание на продукцию Чебоксарского электроаппаратного завода, который предлагает модульный тип исполнения преобразователей частоты в широких диапазонах работы. К тому же данное комплектное устройство обладает высокой надежностью и не требует дополнительных затрат на монтаж основного оборудования [12].



Мощность преобразователя:

$$S_u = \frac{S_{\text{дв}}}{\eta_{\text{дв}}} \quad (2.7)$$

$$S_u = \frac{311.8 \cdot 10^3}{0.84} = 371.2 \text{ кВА}$$

где  $S_{\text{дв}}$  – полная мощность двигателя и находится как:

$$S_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{дв}}}{\eta_{\text{дв}} \cdot \cos \varphi} \text{ кВА} \quad (2.8)$$

$$S_{\text{дв}} = \frac{220 \cdot 10^3}{0.84 \cdot 0.84} = 311.8 \text{ кВА}$$

$\eta_{\text{дв}}$  – КПД двигателя.

Максимальный ток фазы:

$$I_{\text{и.макс}} = \frac{S_u}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}}} \quad (2.9)$$

$$I_{\text{и.макс}} = \frac{372 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 3818} = 56.2 \text{ А}$$

где  $S_u$  – полная мощность инвертора;

$U_{\text{л}}$  – линейное напряжение.

Рассчитаем мощность трансформатора, обеспечивающего питание двигателя. Он должен быть подобран таким образом, чтобы он не влиял на изменения параметров работы электродвигателя [10].

При расчете полной мощности трансформатора учитывается полная мощность, потребляемая электродвигателем для питания двигателя, а также учитываются потери, которые возникают в кабельной линии:

$$S_{\text{ТР}} = \Delta P_{\text{К}} + \frac{P_{\text{ПЭД}}}{\eta_{\text{ПЭД}} \cdot \cos \varphi} \quad (2.10)$$

$$S_{TP} = 30.6 + \frac{220 \cdot 10^3}{0.84 \cdot 0.84} = 312 \text{ кВА}$$

На основе расчетных данных выбираем преобразователь частоты ВЧРП-ТМ [9], технические данные которого представлены в таблице 4 а общий вид комплектного устройства показан на рисунке 13.

Таблица 4 – Технические характеристики преобразователя частоты ВЧРП-ТМ

Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Ориентированная мощность двигателя, кВт	Выходная мощность преобразователя, кВА
70	3000	273	360



Рисунок 13 – Преобразователь частоты ВЧРП-ТМ

Данный тип преобразователей генерирует малое количество гармонических составляющих в питающую сеть и в цепь асинхронной машины, в связи с этим установка не нуждается в дополнительных технических мероприятиях в цепи электроснабжения таких как установка фильтров гармоник и синус фильтров.

## 2.5 Расчет аппаратов защиты

Выбор автоматического выключателя должен быть выполнен исходя из условий [10]:

$$I_{расц} \geq I_{дл}, I_{дл} \geq I_{н.ЭП} = 56.2A, \quad (2.11)$$

где  $I_{дл}$  - длительный ток

$$I_{кз} \geq 1,25I_{кр} = 1,25 \cdot 281 = 352A, \quad (2.12)$$

где  $I_{кр} = I_n = 281A$  - критический ток,  $I_{кз}$  - ток короткого замыкания

Плавкие предохранители выбираются исходя из расчета:

$$I_{ВС} \geq I_{н.ЭП} \quad (2.13)$$

где  $I_{ВС}$  - ток плавкой вставки;

где  $I_{н.ЭП}$  - номинальный ток электроприемника.

## 2.6 Принципиальная электрическая схема управления ПЭД

На рисунке 14 представлена принципиальная электрическая схема погружного электродвигателя, которая составлена на основе рассчитанного оборудования.

Блок комплектно устройства – это универсальный частотно-регулируемый преобразователь, который на выходе оснащен силовым повышающим трансформатором. Силовая полупроводниковая часть состоит из выпрямительного моста и инвертора. В данных преобразовательных устройствах используются высоконадежные элементы, которые гарантируют коэффициент мощности в 95% в следствии этого не требуются дополнительные устройства, повышающие качество электроэнергии. Питание осуществляется через сеть 0,4 кВ. На входе ВЧРП установлена защита – автоматический выключатель и предохранители [9].

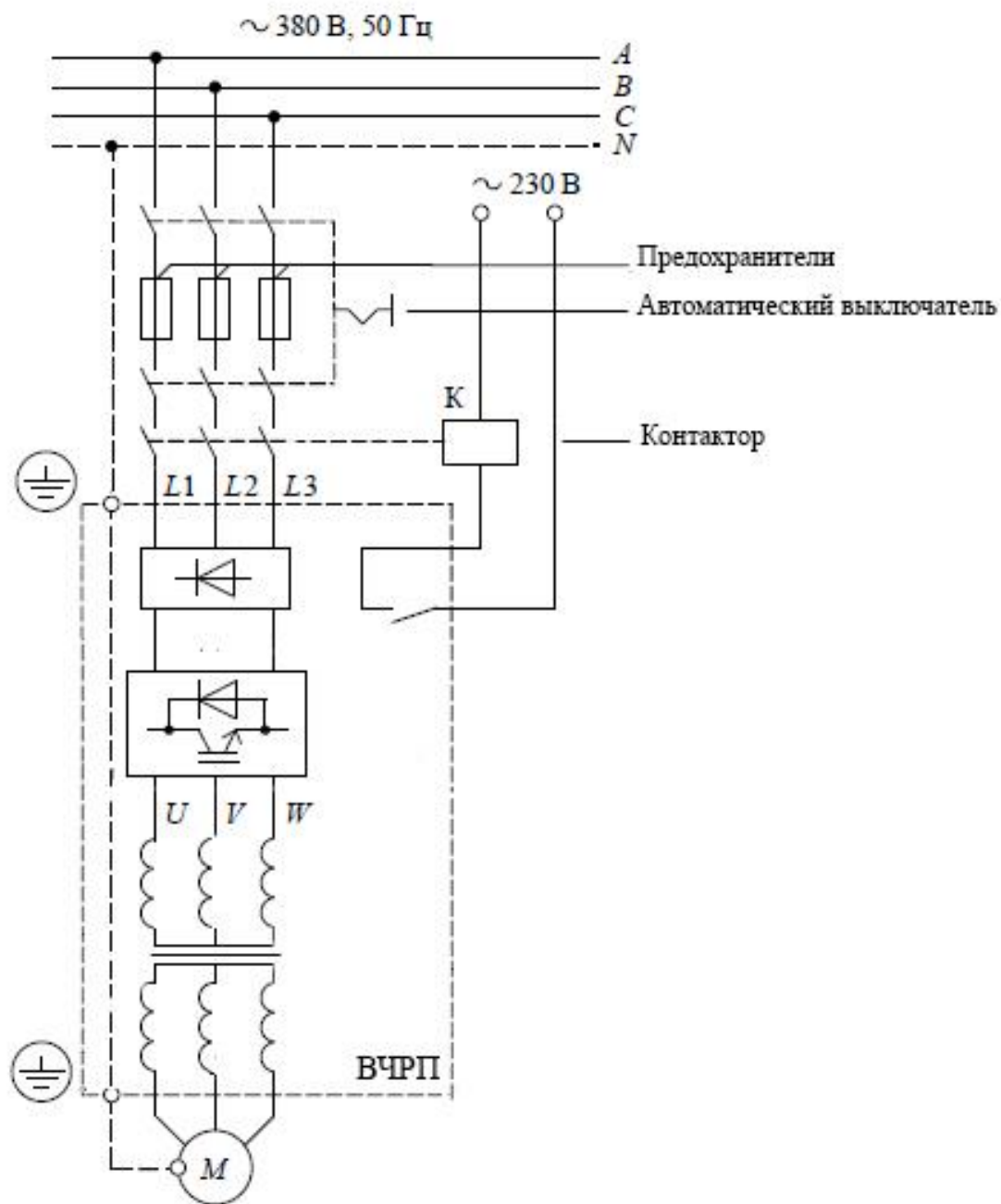


Рисунок 14 – Принципиальная электрическая схема электропривода

### 3 Расчет статических и динамических характеристик для разомкнутой системы электропривода

Под статическими характеристиками чаще всего подразумеваются электромеханическая и механическая характеристика.

Механическая характеристика – это зависимость угловой скорости вращения вала от электромагнитного момента  $M$  (или от момента сопротивления  $M_c$ ). Механические характеристики являются очень удобным и полезным инструментом при анализе статических и динамических режимов электропривода.

Электромеханическая характеристика – это зависимость угловой скорости вращения вала  $\omega$  от тока  $I$ .

Динамическая характеристика электропривода – это зависимость между мгновенными значениями двух координат электропривода для одного и того же момента времени переходного режима работы [13].

#### 3.1. Расчет естественных электромеханической и механической характеристик электропривода

Для расчета электромеханических и механических характеристик асинхронного двигателя необходимо воспользоваться его математической моделью, которая в общем случае представляется различными схемами замещения [13]. Наиболее простой и удобной для инженерных расчетов АД является Т-образная схема замещения (рисунок 15).

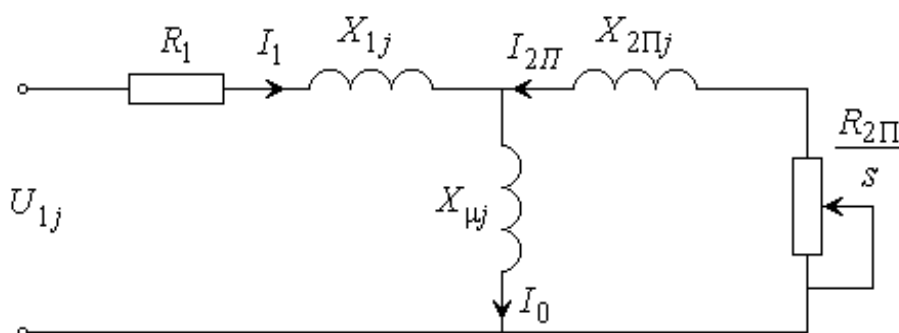


Рисунок 15 - Схема замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} \quad (3.1)$$

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot 3000}{30} = 314.2 \text{ рад/с.}$$

Номинальная частота вращения двигателя

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1-s) \cdot \omega_0 \quad (3.2)$$

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1-0.055) \cdot 314.2 = 296.8 \text{ рад/с.}$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_{\text{дв.н}}} \quad (3.3)$$

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{220 \cdot 10^3}{296.8} = 741 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Номинальное фазное напряжение и номинальный фазный ток статора

$$U_{1\phi\text{н}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{2}} \quad (3.4)$$

$$U_{1\phi\text{н}} = \frac{3818}{\sqrt{2}} = 2700 \text{ В}$$

$$I_{1\phi\text{н}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\phi\text{н}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} \quad (3.5)$$

$$I_{1\phi\text{н}} = \frac{220 \cdot 10^3}{3 \cdot 2700 \cdot 0.84 \cdot 0.84} = 38.5 \text{ А}$$

Из формулы Клосса определяем соотношение, которое необходимо для расчета критического скольжения:

$$s_k = s_H \frac{k_{MAX} + \sqrt{(k_{MAX})^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta (k_{MAX} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta (k_{MAX} - 1)} \quad (3.6)$$

$$s_k = 0.055 \frac{1.4 + \sqrt{1.4^2 - [1 - 2 \cdot 0.055 \cdot 1 \cdot (1.4 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0.055 \cdot 1 \cdot (1.4 - 1)} = 0.138$$

где  $k_{MAX}$  - перегрузочная способность АД,

$\beta = R_1 / (C_1 \cdot R_2')$  - значение коэффициента  $\beta$  находится в диапазоне 0,6 – 2,5, поэтому в первом приближении принимаем  $\beta = 1$ .

Для расчета приведенных сопротивлений цепей ротора и статора необходимо найти коэффициенты:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} \quad (3.7)$$

$$C_1 = 1 + \frac{7.2}{2 \cdot 6 \cdot 38.5} = 1.016$$

$$A_1 = m U_{1\phi}^2 (1 - s_H) / (2 \cdot C_1 \cdot k_{MAX} \cdot P_H) \quad (3.8)$$

$$A_1 = \frac{3 \cdot 2700^2 (1 - 0.055)}{2 \cdot 1.016 \cdot 1.4 \cdot 220 \cdot 10^3} = 33.033.$$

Тогда активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = A_1 / (\beta + 1 / s_k) \cdot C_1 \quad (3.9)$$

$$R_2' = \frac{33.033}{\left(1 + \frac{1}{0.138}\right) \cdot 1.016} = 3.949 \text{ Ом}$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2\pi f_{1H}} \quad (3.10)$$

$$L'_{2\sigma} = \frac{0.5}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.001592 \text{ Гн}$$

Активное сопротивление статорной обмотки можно определить по следующему выражению:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta \quad (3.11)$$

$$R_1 = 1.016 \cdot 3.949 \cdot 1 = 4.011 \text{ Ом}$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2\pi f_{1H}} \quad (3.12)$$

$$L_{1\sigma} = \frac{12.073}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.038 \text{ Гн}$$

Определим параметр  $\gamma$ , который позволит найти индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_{кз}$  :

$$\gamma = \sqrt{(1/s_k^2) - \beta^2} \quad (3.13)$$

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{0.138^2}\right) - 1^2} = 7.167$$

Тогда значение индуктивного сопротивления КЗ равно:

$$X_{кз} = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 \quad (3.14)$$

$$X_{кз} = 7.167 \cdot 1.016 \cdot 3.949 = 28.744 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной, может быть рассчитано:

$$X'_{2H} = 0.58 \cdot X_{кз} / C_1 \quad (3.15)$$



$$X'_{2H} = 0.58 \cdot \frac{28.744}{1.016} = 16.415 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки может быть определено по следующему выражению:

$$X_{1H} = 0.42 \cdot X_{KH} \quad (3.16)$$

$$X_{1H} = 0.42 \cdot 28.744 = 12.073 \text{ Ом}$$

По найденным значениям переменных  $C_1$ ,  $R'_2$ ,  $R_1$  и  $X_K$  определим критическое скольжение:

$$s_K = \frac{C_1 R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2}} \quad (3.17)$$

$$s_K = \frac{1.016 \cdot 3.949}{\sqrt{3.949^2 + 28.744^2}} = 0.138$$

ЭДС ветви намагничивания, наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1j} \cdot \cos \phi_{1H} - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1j} \cdot \sin \phi_{1H} + X_{1H} \cdot I_{1H})^2} \quad (3.18)$$

$$E_1 = \sqrt{(2700 \cdot 0.84 - 4.011 \cdot 38.5)^2 + (2700 \cdot 0.543 + 12.073 \cdot 38.5)^2} = 2338 \text{ В}$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания:

$$X_{\mu H} = E_1 / I_0 \quad (3.19)$$

$$X_{\mu H} = \frac{2338}{7.2} = 323.2 \text{ Ом}$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре, создаваемым суммарным действием токов статора (индуктивность контура намагничивания)

$$L_{\mu H} = \frac{X_{\mu H}}{2\pi f_{1H}} \quad (3.20)$$

$$L_{\mu H} = \frac{323.2}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 1.029 \text{ Гн}$$

Электромеханическая характеристика АД, определяется зависимостью приведенного тока ротора от скольжения:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}} \quad (3.21)$$

где  $U_1$  - фазное напряжение обмоток статора асинхронного двигателя;

Задаваясь значениями скольжения можно рассчитать соответствующее значение тока и воспользовавшись формулой

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

получить соответствующее значение угловой скорости.

Полагая, что ток намагничивания двигателя имеет полностью реактивный характер, выражение для электромеханической характеристики, описывающей зависимость тока статора от скольжения, запишется следующим образом:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)} \quad (3.22)$$

Задаваясь скольжением  $s$  рассчитываем естественные электромеханические характеристики АД, приведенные на рисунке 16.

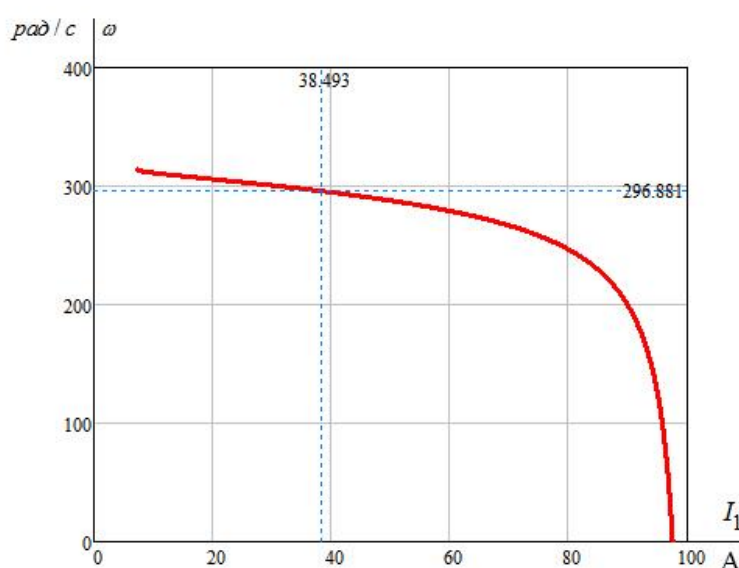


Рисунок 16 – Естественные электромеханические характеристики

Механическую характеристику асинхронного двигателя можно рассчитать по следующему выражению:

$$M(s) = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_0 s \left[ X_{KH}^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 \right]} \quad (3.23)$$

Механическая характеристика асинхронного двигателя имеет критический момент и критическое скольжение, которые определяются по следующим формулам:

$$M_K = \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2} \right]} \quad (3.24)$$

$$M_K = \frac{3 \cdot 2700^2}{2 \cdot 314.2 \cdot 1.016 \cdot \left[ 4.011 + \sqrt{(4.011^2 + 28.744^2)} \right]} = 1054 \text{ Нм},$$

Задаваясь скольжением  $s$  рассчитываем естественную механическую характеристику АД, приведенную на рисунке 17.

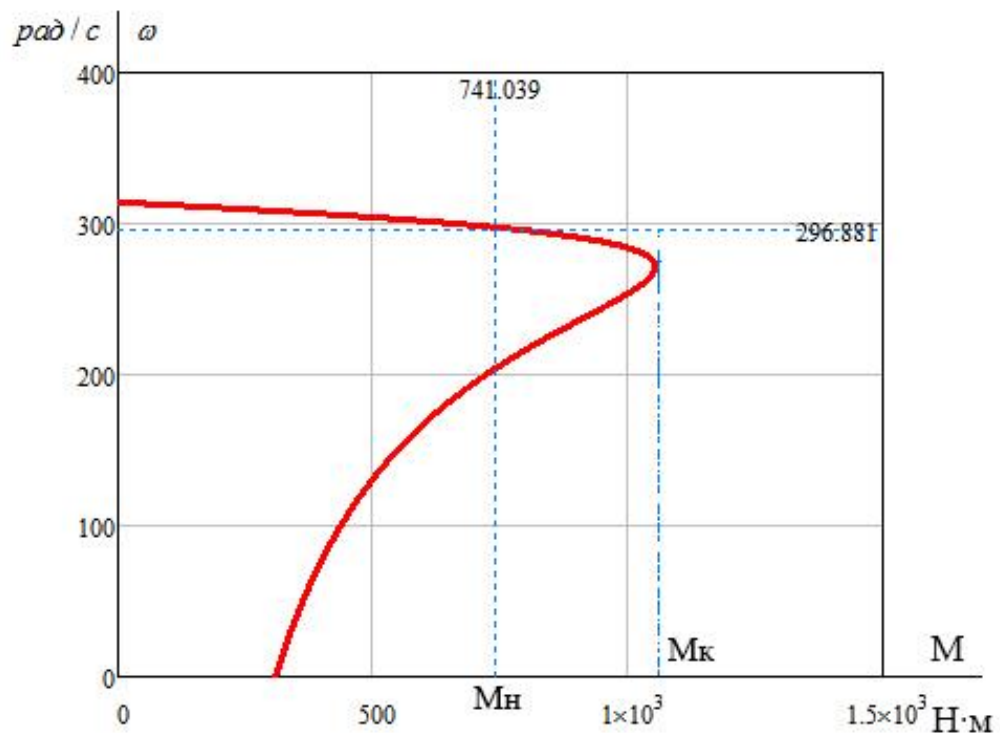


Рисунок 17 – Механическая характеристика АД

### 3.2 Расчет механической характеристики производственного механизма

Механическая характеристика производственного механизма есть зависимость момента сопротивления  $M_c$  механизма от его угловой скорости:

$$M_c = f(\omega)$$

Нагрузка в виде центробежного насоса относится к типу нелинейно-возрастающей механической характеристике производственного механизма. И описывается следующим уравнением:

$$M_c = M_0 + k \cdot \omega^x \quad (3.25)$$

где  $M_0$  – момент сопротивления от сил трения в движущих частях производственного механизма;

$k$  – коэффициент пропорциональности;

$x$  – показатель степени, при движении в жидкостях  $x=3$ .

Найдем коэффициент пропорциональности:

$$k = \frac{M_n - M_0}{\omega^3} \quad (3.26)$$

где  $M_0 = 0.075M_n$

$$k = \frac{741 - 51.8}{296.8^3} = 2.6 \cdot 10^{-5}$$

Тогда механическая характеристика механизма будет равна:

$$M_c = M_0 + k \cdot \omega^3 = 51.8 + 2.6 \cdot 10^{-5} \cdot 296.8^3 = 741.098$$

На рисунке 18 приведена механическая характеристика двигателя и характеристика полного момента сопротивления на валу

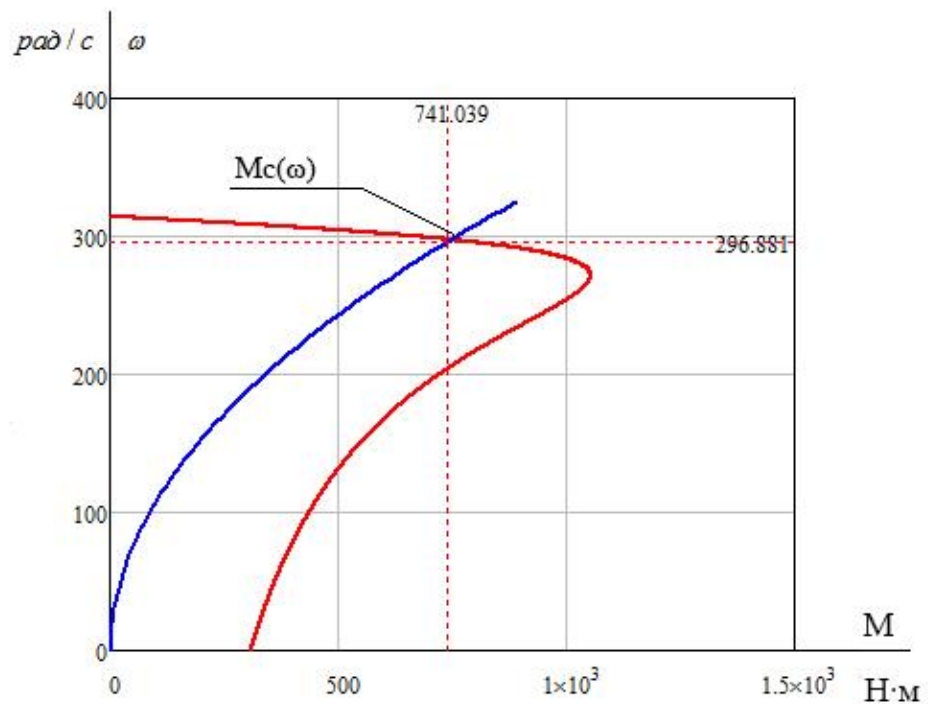


Рисунок 18 – Механическая характеристика двигателя и характеристика полного момента сопротивления на валу

### 3.3 Расчет искусственных характеристик системы «преобразователь- двигатель»

Механизмы по типу нагрузки, относящие к нелинейно-возрастающим, как правило, не требуют широкого диапазона регулирования и не требуют обеспечения высокой кратности пускового и максимального моментов, в качестве законов регулирования  $U/f$  могут быть выбраны законы

$$\frac{U_1}{f_1} = const;$$

$$\frac{U_1}{f_1^2} = const.$$

Так как повышение энергоэффективности электропривода является приоритетной задачей то, следовательно, выбираем второй закон управления.

Рассчитываем вольт-частотную характеристику по следующему выражению:

$$U_1(f_1) = U_{1\phi} \cdot \left( \frac{f_1}{f_{1n}} \right)^2 \quad (3.27)$$

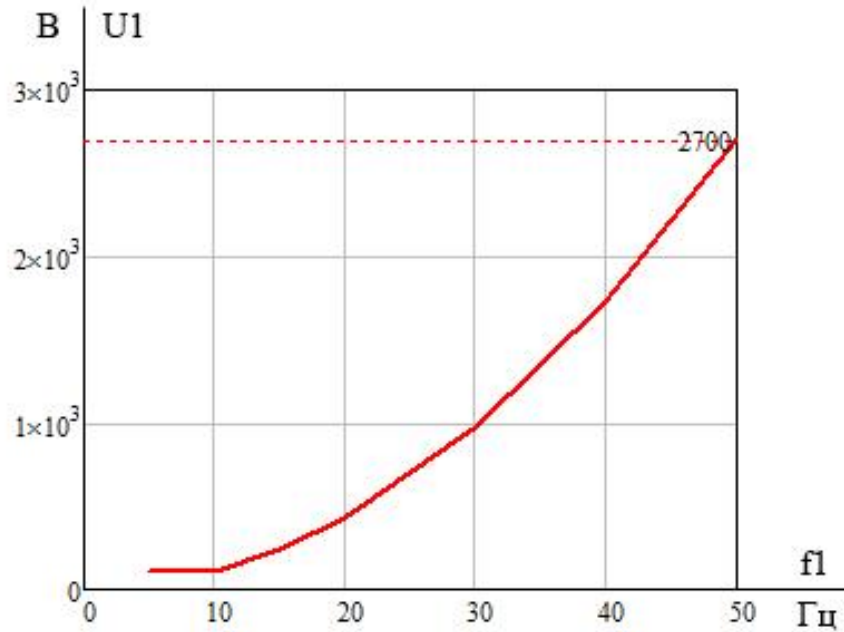


Рисунок 19 – Вольт частотная характеристика преобразователя

Механические характеристики разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель при выбранном законе регулирования для ряда выбранных значений выходной частоты в интервале от 5 до 50 Гц рассчитываются следующим образом:

$$M(s, f_1) = \frac{3U_1^2(f_1)R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1n}} \cdot s \cdot \left[ \left( X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1n}} \right)^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{1n}} \right)^2 \right]} \quad (3.28)$$

где 
$$U_1(f_1) = U_{1\phi} \cdot \left( \frac{f_1}{f_{1n}} \right)^2$$

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

По результатам расчета построено семейство механических характеристик системы преобразователь–двигатель при изменении частоты питающей сети, которые представлены на рисунке 20.

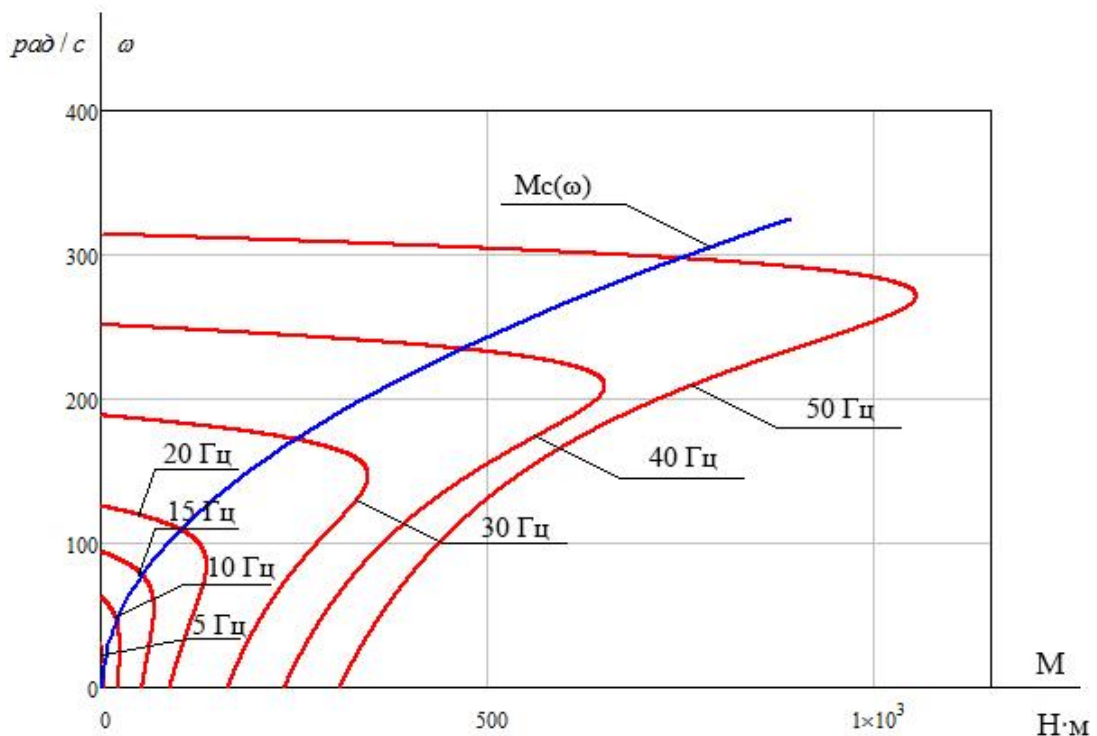


Рисунок 20 – Механические характеристики системы преобразователь- двигатель

Анализируя приведенные выше характеристики, делаем вывод о том, что при данном законе регулирования не удастся обеспечить нормальную работу электропривода при частоте ниже 20 Гц.

Перед нами стоит задача обеспечить пуск электродвигателя при частоте 5 Гц, осуществить разгон при частоте 25 Гц и в конечном итоге выход на номинальную частоту вращения 50 Гц. Следовательно, необходимо произвести настройку вольт-частотной характеристики.

Настройка вольт-частотной характеристики осуществляется с помощью выражения:

$$U_1(f_1) = U_{1нач} + (U_{1фн} - U_{1нач}) \cdot \left( \frac{f_1}{f_{1н}} \right)^2 \quad (3.29)$$

Для осуществления пуска при начальной частоте 5 Гц, примем добавку по напряжению  $U_{1нач} = 70B$ , для частоты 25 Гц введем добавку  $U_{2нач} = 50B$ , тогда механические характеристики с учетом настройки вольт-частотной характеристики будут иметь вид как показано на рисунке 21.

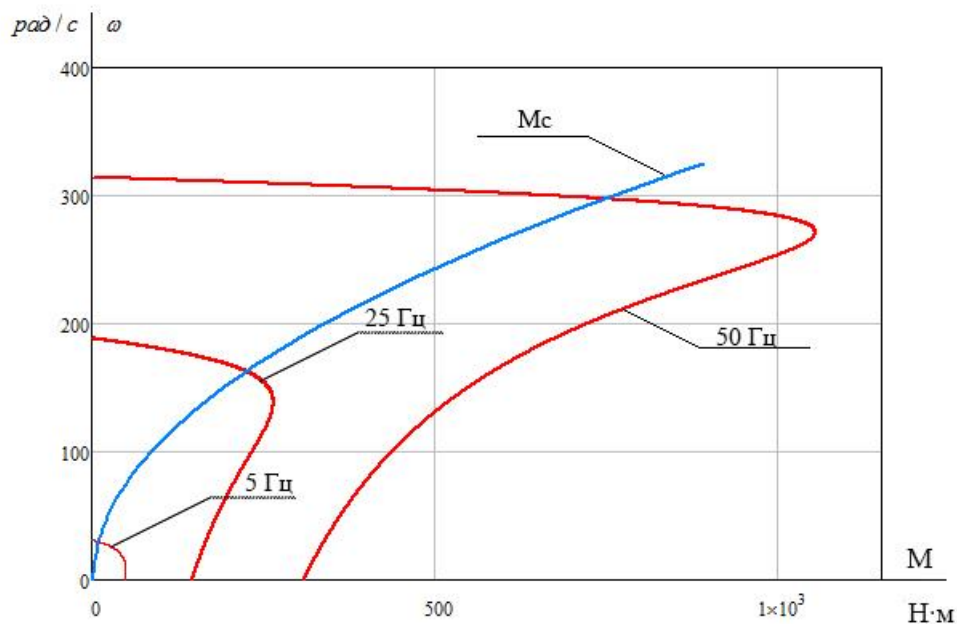


Рисунок 21 – Механические характеристики с учетом настройки вольт-частотной характеристики

### 3.3.1 Расчет и построение искусственных характеристик системы преобразователь-двигатель с IR-компенсацией

Электромеханические характеристики с применением IR-компенсации, определяющие зависимость приведенного тока ротора от скольжения, рассчитываются по следующим выражениям:

$$I'_{2n}(s) = \frac{U_{1n}}{\sqrt{\left(R_{1эквN} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1n}^2 + \left(\frac{R_{1эквN} \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu n} \cdot f_{1n}}\right)^2}}; \quad (3.30)$$

где  $R_{1эквN}$  – эквивалентные значения сопротивления статора с учетом коэффициента IR-компенсации, которое находится через:

$$R_{1эквN} = R_1 \cdot (1 - K_{KMn})$$

$K_{KMn}$  – коэффициент IR-компенсации, которые принимаются для значения при разных частотах и равны  $K_{KM1} = 0.25$ ,  $K_{KM2} = 0.5$ ,  $K_{KM3} = 0.5$

Параметры питающей сети принимаются с учетом настройки вольт-частотной характеристики, которые были рассчитаны ранее по выражению (3.28).



Электромеханическая характеристики приведенного значения тока в фазе обмотки ротора от скольжения приведены на рисунке 22.

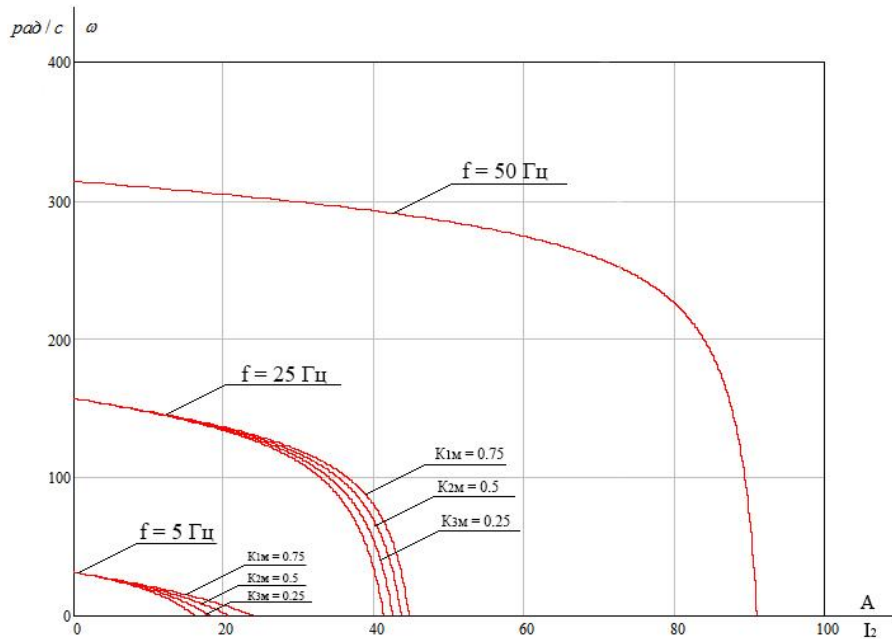


Рисунок 22 – Электромеханическая характеристика приведенного значения тока ротора от скольжения

Далее построим зависимости тока статора от скольжения, рассчитав их по следующему выражению:

$$I_{1n}(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_{2n}(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{2n}(s) \cdot \sin \left[ \frac{X_{кн} \cdot f_{1n}}{\sqrt{\left( R_{1эквN} + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1n}^2}} \right]} \quad (3.31)$$

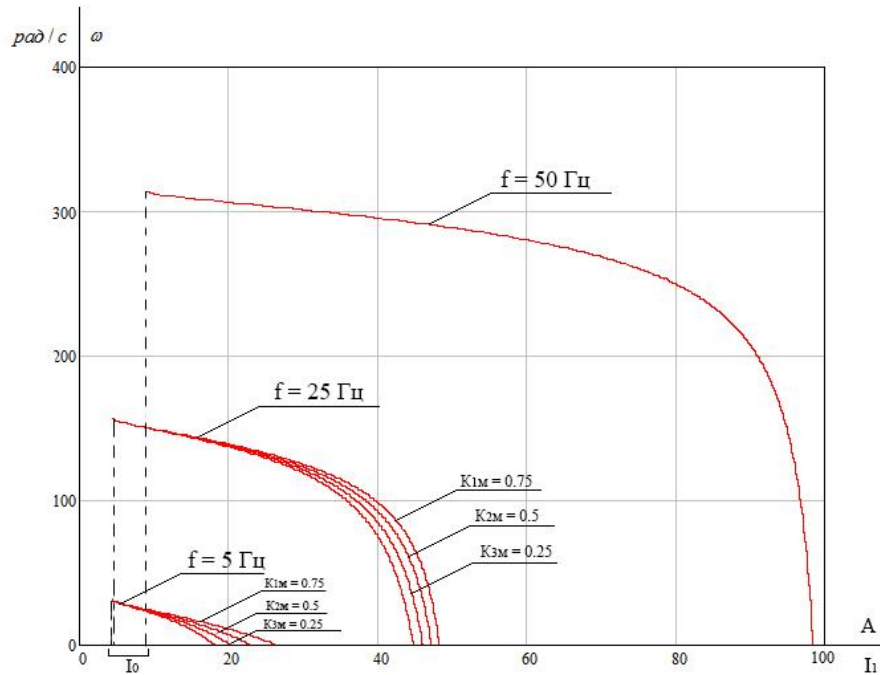


Рисунок 23 – Зависимость тока статора от скольжения с применением IR-компенсации

Рассчитаем и построим искусственные механические характеристики с применением IR-компенсации по выражению (3.32).

$$M_1(s) = \frac{3 \cdot U_{1nN}^2 \cdot R'_2}{\omega_n \cdot s \cdot \left[ X_{кн}^2 \cdot f_{1n}^2 + \left( R_{1эвкN} + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_{1эвкN} \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu n} \cdot f_{1n}} \right)^2 \right]}; \quad (3.32)$$

Расчет искусственных механических характеристик производится с учетом настройки вольт-частотной характеристики (3.28). Рассчитанная искусственная механическая характеристика представлена на рисунке 24.

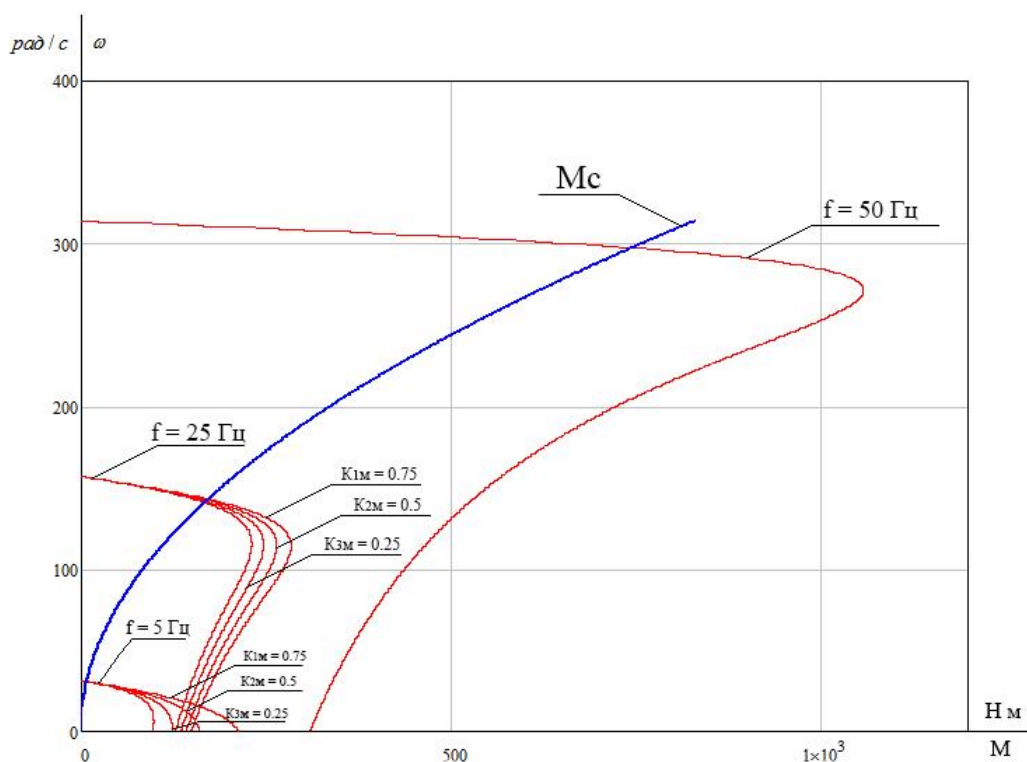


Рисунок 24 – Искусственная механическая характеристика с применением ИР-компенсации

Анализ полученных данных, позволяет сделать вывод о том, что рассчитанные искусственные характеристики позволяют обеспечить оптимальные режимы работы электропривода насосного агрегата. Благодаря настройке вольт-частотной характеристике двигатель имеет запас по электромагнитному моменту даже при минимальной питающей частоте  $f = 5$  Гц. В купе с применением ИР-компенсации искусственная механическая характеристика стала более жесткой и работа электропривода более энергоэффективной, это обусловлено компенсацией падения напряжения в обмотках электродвигателя, полученный эффект особенно заметен на малых частотах питающего напряжения.

## **4 Моделирование частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением в имитационной среде Matlab Simulink**

MATLAB Simulink – это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов, строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы.

### **4.1 Имитационная модель силового канала электропривода**

Силовой канал электропривода погружного насосного агрегата включает в себя следующие функциональные составляющие:

- преобразователь частоты;
- трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
- механическая система.

На рисунке 25 представлена структурная схема силового канала электропривода. Схема двигателя реализована на базе структурной схемы двухфазного асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$ .

Схема имеет следующие обозначения:

1 – Формирователь фазных напряжений, который выполняет функции преобразователя с помощью которого осуществляется управление двигателем;

2 – двухфазный асинхронный двигатель в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$ , имитирующий работу асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором;

3 – одностепенная механическая система, имитирующая нагрузку.

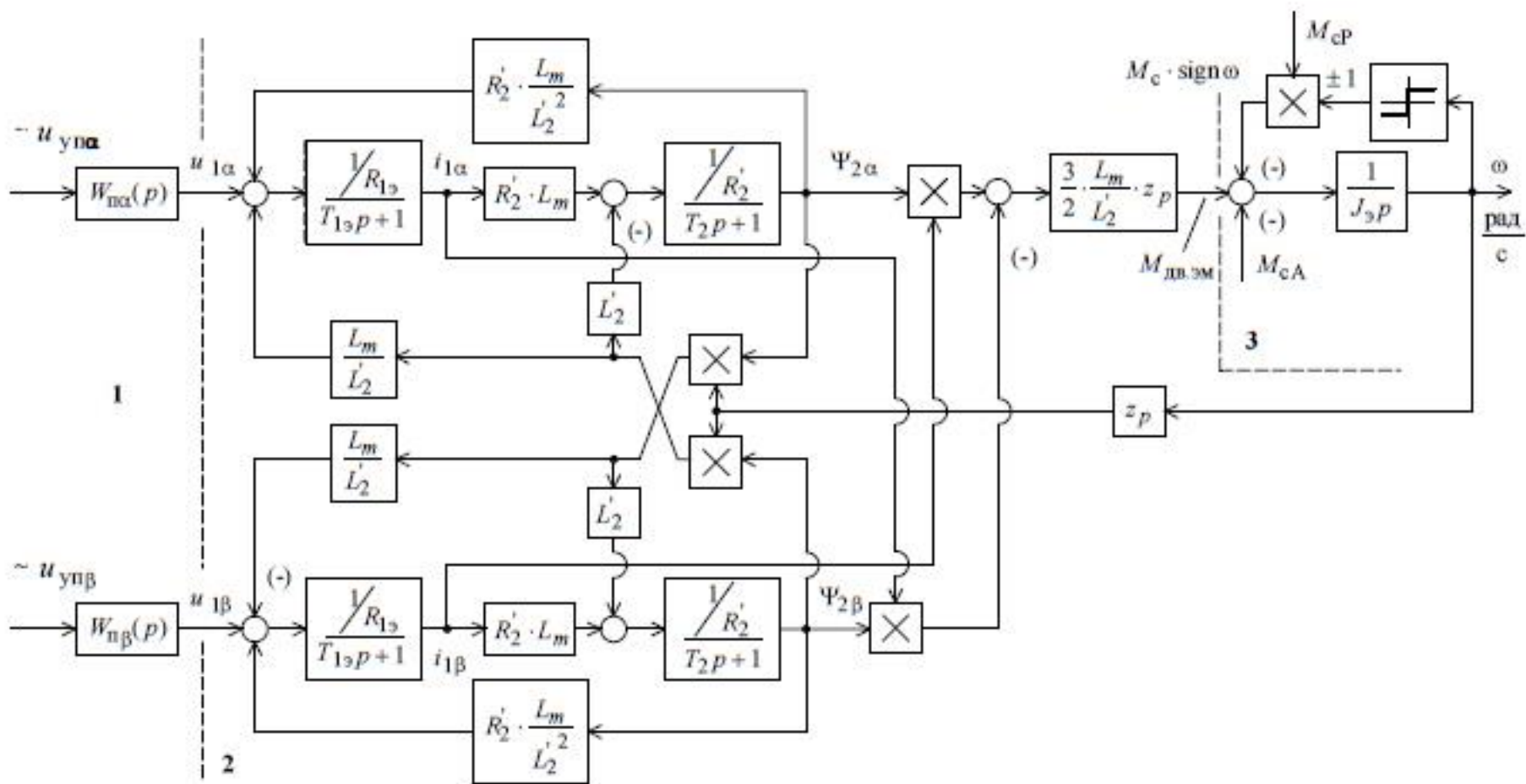


Рисунок 25 – Структурная схема силового канала электропривода в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$ .

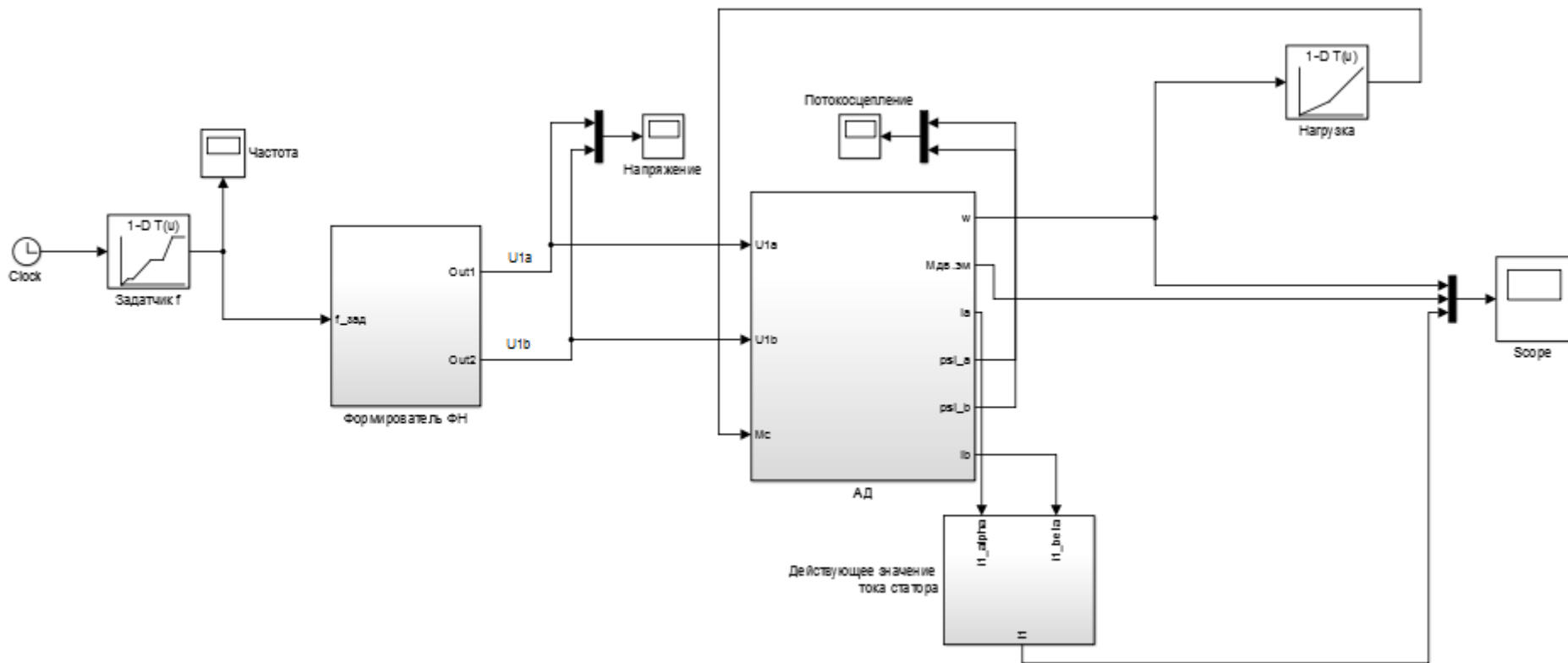


Рисунок 26 – Имитационная модель силового канала электропривода с нелинейно-возрастающей нагрузкой

Входными величинами на входе структурной схемы являются фазные напряжения статорных обмоток, двухфазного АД, которые описываются следующими выражениями:

$$U_{1\alpha}(t) = U_{1m} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t) \quad (4.1)$$

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

В имитационной среде Matlab Simulink выполним построение модели силового канала электропривода. Для начала, построим модель асинхронного двигателя (рисунок 27), параметры которой находятся следующим образом:

Эквивалентные индуктивности обмоток:

– статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_{\mu} \quad (4.2)$$

$$L_1 = 0.038 + 1.029 = 1.067 \text{ Гн}$$

– ротора

$$L_2 = L_{2\sigma} + L_{\mu} \quad (4.3)$$

$$L_2 = 0.052 + 1.029 = 1.081 \text{ Гн}$$

Коэффициент рассеяния:

$$\sigma = 1 - \frac{L_{\mu}^2}{L_1 \cdot L_2} \quad (4.4)$$

$$\sigma = 1 - \frac{1.029^2}{1.067 \cdot 1.081} = 0,082$$

Эквивалентное сопротивление:

$$R_{\mathcal{G}} = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_{\mu}^2}{L_2} \quad (4.5)$$

$$R_{\mathcal{G}} = 4.011 + 3.949 \cdot \frac{1.029^2}{1.081^2} = 7.589 \text{ Ом}$$





напряжений с номинальными параметрами, его модель приведена на рисунке 28.

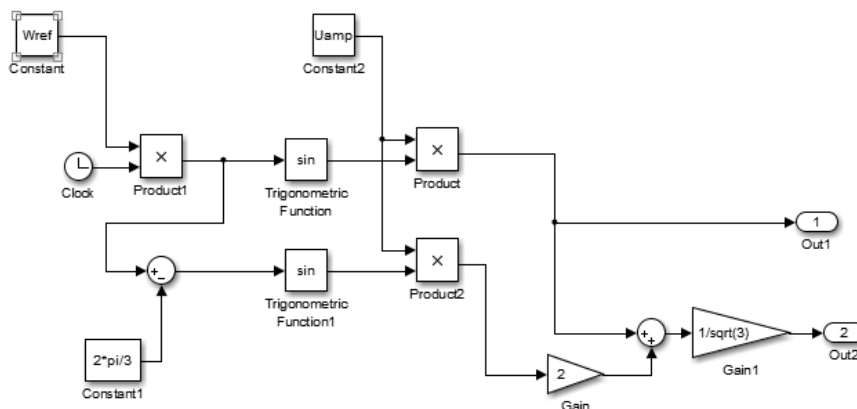


Рисунок 28 – Имитационная модель формирователя фазных напряжений при номинальных параметрах питающей сети

С помощью m-файла обозначим необходимые параметры (рисунок 29) для работы приведенной имитационной модели.

```

1      %Параметры силового канала электропривода
2      f=50;
3      Rs=4.011;
4      Rr=3.949;
5      Ls_ =0.038;
6      Lr_ =0.052;
7      Lm=1.029;
8      p=2;
9      J=0.071;
10     Ls=Ls_+Lm;
11     Lr=Lr_+Lm;
12     zp=p/2;
13
14     Kr=Lm/Lr;
15     Re=Rs+Rr*Kr^2;
16     Le=Ls-Lm^2/Lr;
17     Uamp=3807;
18     Ar=Rr/Lr;
19     Wref=2*pi*f;
20     %
21     knf=50;
22     T=0.000125;
23     Ti1=0.5;
24     Ti2=1.5;
25     k=0.0167;

```

Рисунок 29 – Параметры m-файла имитационной модели

Для проверки работы модели произведем пуск двигателя при номинальных параметрах питающей сети и выполним наброс нагрузки. Результаты моделирования приведены на рисунке 30.

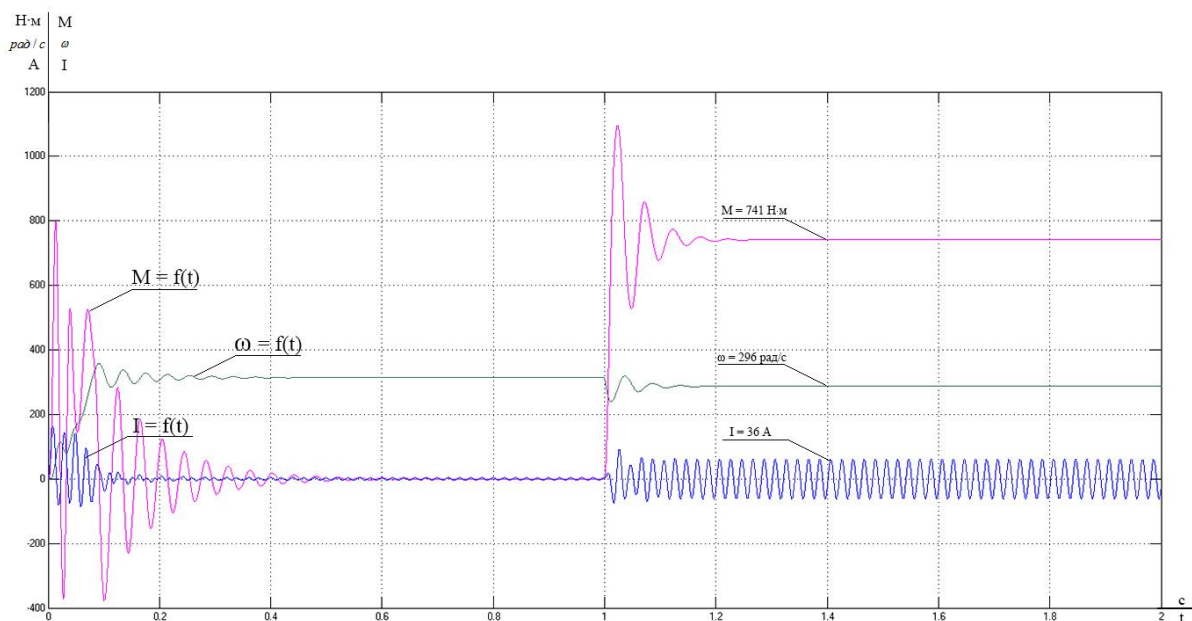


Рисунок 30 – Переходных характеристик  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$  при прямом пуске под нагрузкой

В результате полученных переходных характеристик можно сделать вывод о том, что имитационная модель работает адекватно – номинальные параметры электродвигателя совпадают с полученными параметрами при расчете естественных характеристик путем математического расчета (глава 3).

Для имитации работы преобразователя частоты внесем возможность регулирования параметров по вольт-частотной характеристике. Подсистема блока формирования фазных напряжений указана на рисунке 31.

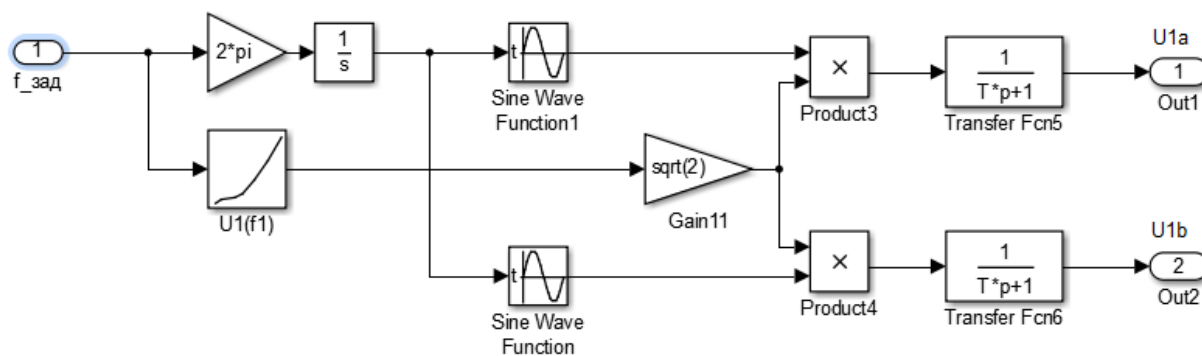


Рисунок 31 – Имитационная модель формирователя фазных напряжений

На вход формирователя фазных напряжений подается сигнал с датчика интенсивности, который реализуется с помощью блок Lookup Table. Настройка данного блока осуществляется исходя из значений, полученных при расчете вольт-частотной характеристики.

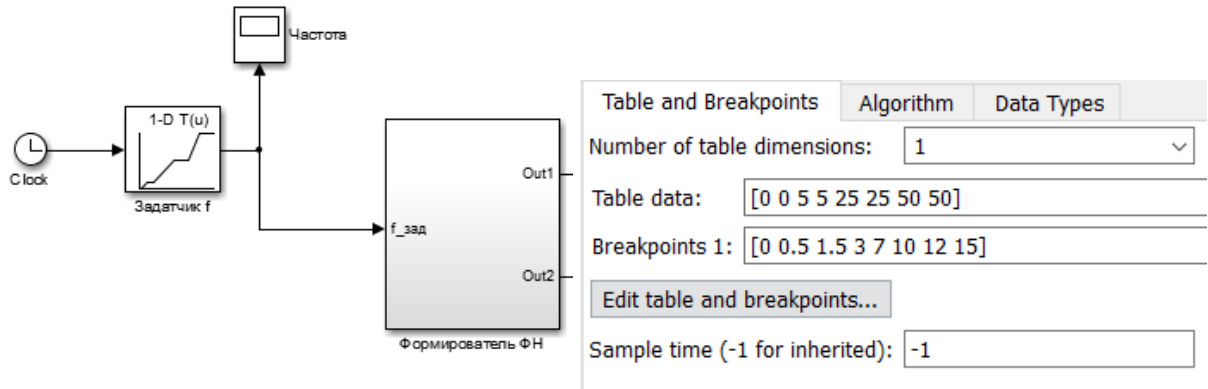


Рисунок 32 – Задатчик интенсивности с параметрами настроек

По принципу блока задатчика интенсивности, с помощью блока Lookup Table реализуется нагрузка электропривода (рисунок 29). Параметры нагрузки берутся из рассчитанной механической характеристик полной нагрузки на валу двигателя (глава 3.2).

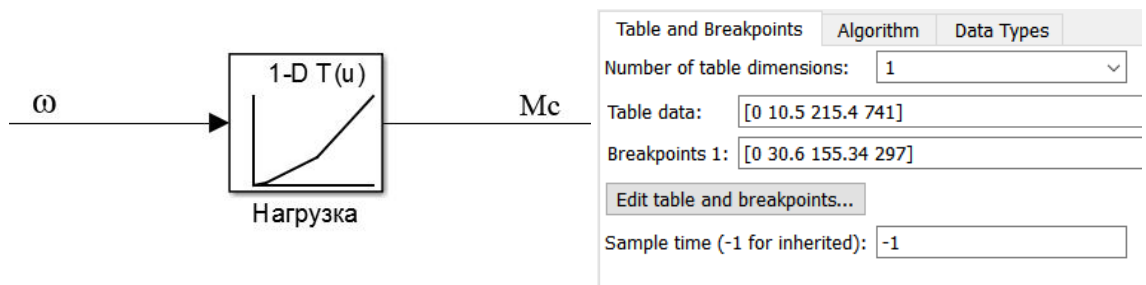


Рисунок 33 – Блок нагрузки с параметрами настроек

На рисунке 34 представлены переходные процессы  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$  при определенном цикле работы погружного агрегата. Пуск двигателя осуществляется при частоте 5 Гц (I), далее идет разгон при частоте 25 Гц (II), после этого осуществляется выход на номинальную частоту 50 Гц (III). После номинальной работы УЭЦН, осуществляется переход на минимальную частоту (IV) и полная остановка агрегата (V).

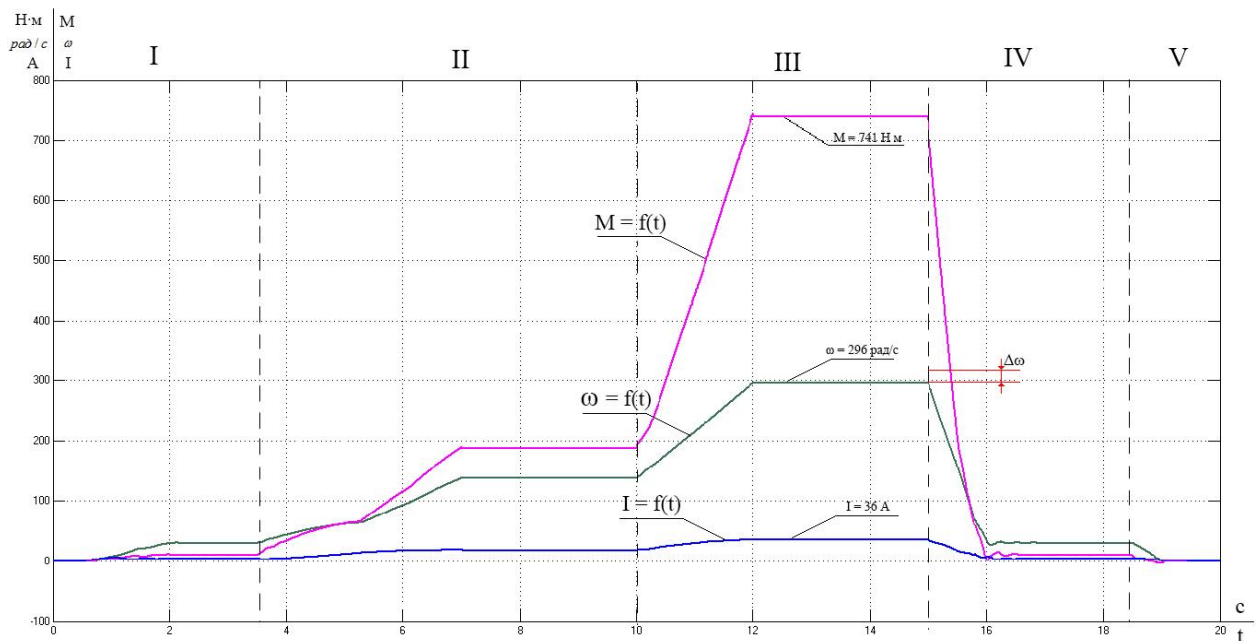


Рисунок 34 – Переходные процессы  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$  при заданном цикле работы

Полученные графики переходных процессов свидетельствуют об адекватной работе имитационной модели, данные, характеризующие параметры работы электропривода, соответствуют с полученными данными которые были получены в ходе расчета искусственных характеристик.

#### 4.2 Настройка модуля компенсации скольжения

Для того чтобы погрешность скорости на характеристике не превышала требуемого значения применим компенсацию скольжения. Компенсация скольжения осуществляется за счет регулирования частоты в канале формирования фазных напряжений.

Для настройки модуля компенсации скольжения находим значение передаточной функции:

$$W(p)_{is} = \frac{\Delta f_1}{\Delta(I_1 - I_0)} = \frac{k_{is}}{T_{is} \cdot p + 1}, \quad (4.8)$$

где  $k_{is}$  – коэффициент передачи цепи обратной связи по току, значение которого выбирается из условия:

$$\frac{f_{1H} \cdot s_H}{I_{1H} - I_0} \geq k_{is} \leq \frac{f_{1H} \cdot s_H}{I_{1H}} \quad (4.9)$$

$$0.319 \geq k_{is} \leq 0.239$$

где  $T_{is}$  – постоянная времени цепи обратной связи, которое находится из:

$$T_{is} \geq 4 \cdot T_9 \quad (4.10)$$

Где  $T_9$  – эквивалентная электромагнитная постоянная времени цепей статора и ротора АД

$$T_9 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H} \cdot s_K} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0.138} = 0.023 \text{ с}$$

$$W(p)_{is} = \frac{k_{is}}{T_{is} \cdot p + 1} = \frac{0.074}{0.092 \cdot p + 1}$$

На вход блока с передаточной функцией (рисунок 35) подается сигнал с действующим значением тока статора  $I_d$ , сигнал с выхода поступает в блок формирования фазных напряжений где суммируется с сигналом задатчика интенсивности. В результате этого происходит коррекция частоты питающей сети, и скорость вращения вала двигателя возрастет и будет соответствовать синхронной скорости.



Рисунок 35 – Реализация контура компенсации скольжения

На рисунке 36 показано как изменяется частота после применения контура компенсации скольжения.

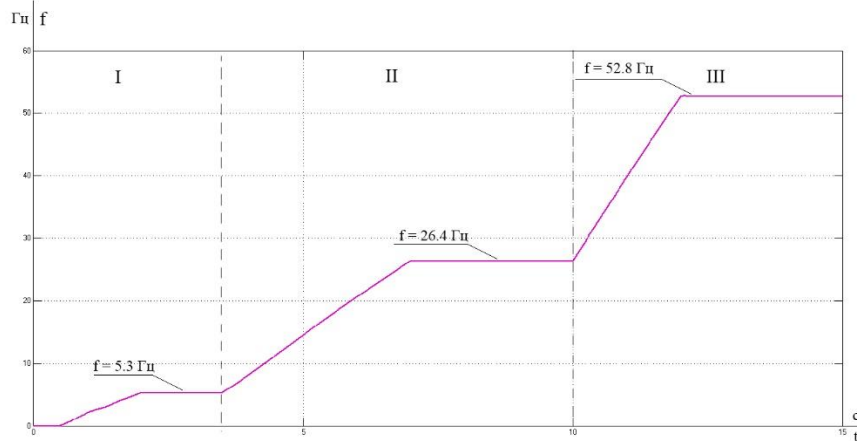


Рисунок 36 – График изменения частоты после применения компенсации скольжения

На рисунке 37 представлены переходные характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$  с применением контура компенсации скольжения.

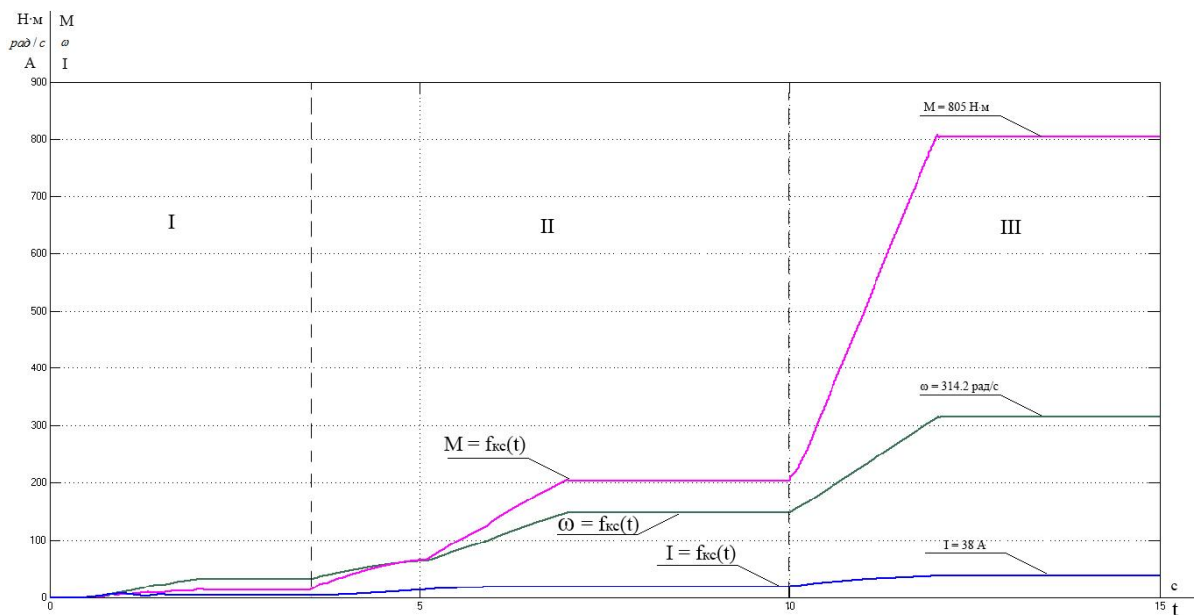


Рисунок 37 – Переходные процессы  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$  с применением контура компенсации скольжения

В результате применения компенсации скольжения, удалось устранить погрешность регулирования скорости вращения вала двигателя при номинальной нагрузке. Зона I соответствует пуску электродвигателя при скорректированной частоте  $f=5,3$  Гц, зона II – разгон двигателя при частоте  $f=26,4$  Гц, выход на номинальную частоту  $f=52,8$  Гц – зона III. Помимо увеличения скорости вращения электродвигателя, удалось увеличить

перегрузочную способность электропривода. В момент наброса номинальной нагрузки броска тока не наблюдается и его значение составляет  $I=38$  А.

### 4.3 Настройка модуля IR-компенсации

При работе двигателя на частотах меньше номинальной питающей частоты, производимый двигателем момент уменьшается. Для того чтобы повысить критический момент и обеспечить нормальную работу двигателя применяют IR-компенсацию. Ее суть заключается в компенсации потери напряжения, возникающую в результате падения напряжения на реактивном сопротивлении обмотки статора, которое особенно заметно при работе на малой частоте питающей сети.

Для настройки модуля IR-компенсации необходимо определить передаточную функцию:

$$W(p)_{is} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} = \frac{k_{iR}}{T_{iR} \cdot p + 1}, \quad (4.11)$$

Где значение коэффициента передачи цепи обратной связи

$$k_{iR} \leq (0.75 \div 0.85) \cdot R_1$$

$$k_{iR} = 3.41$$

где  $T_{iR}$  – постоянная времени цепи обратной связи, которое находится из:

$$T_{iR} \geq 4 \cdot T_s \quad (4.12)$$

Где  $T_s$  – эквивалентная электромагнитная постоянная времени цепей статора и ротора АД

$$T_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H} \cdot s_K} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0.138} = 0.023 \text{ с}$$

$$W(p)_{iR} = \frac{k_{iR}}{T_{iR} \cdot p + 1} = \frac{3.41}{0.092 \cdot p + 1}$$

На рисунке 34 изображена реализация контура IR-компенсации. На вход блока с передаточной функцией подается сигнал с действующим значением тока статора  $I_d$ , сигнал с выхода поступает в блок формирования

фазных напряжений где суммируется с сигналом напряжения заданным преобразователем частоты. В результате этого происходит коррекция величины напряжения. Блок Saturation задает ограничение по увеличению напряжения до 15% от номинального значения.

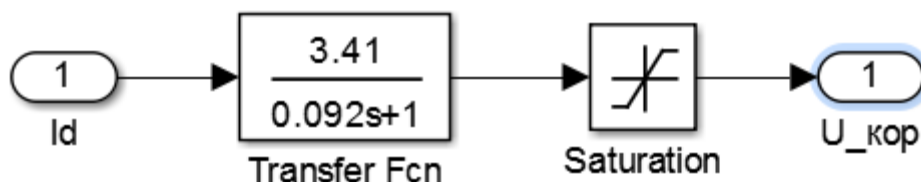


Рисунок 38 – Модуль IR-компенсации

На рисунке 39 представлены переходные характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$  с применением IR-компенсации.

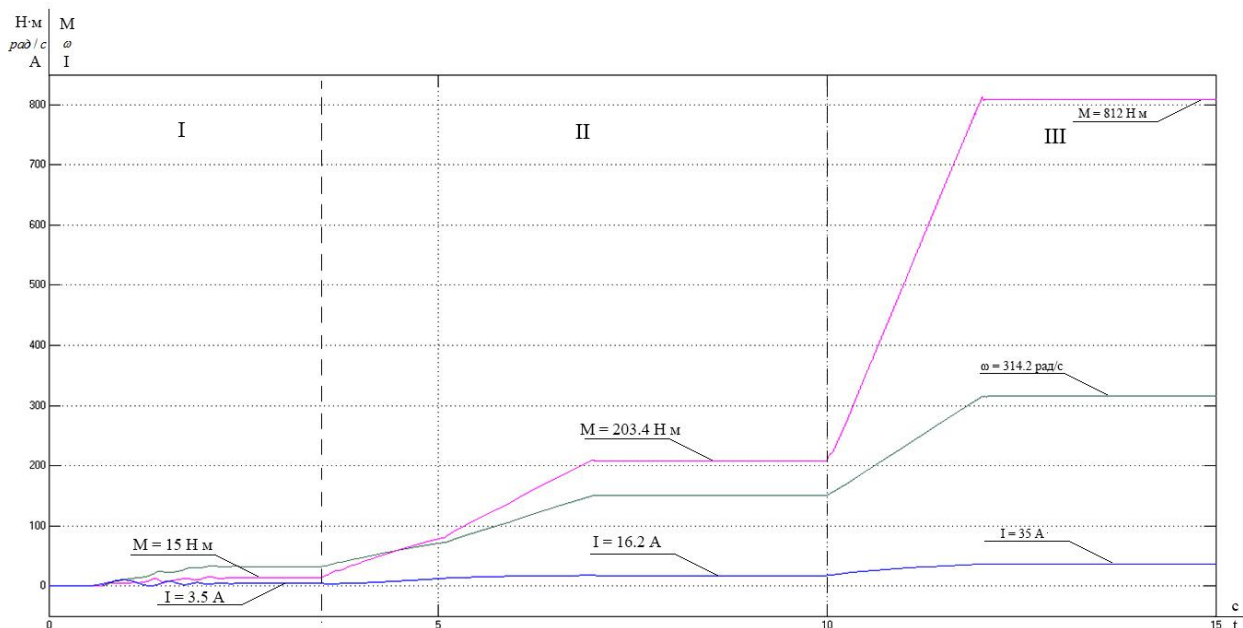


Рисунок 39 – Переходные характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$  с применением IR-компенсации

Благодаря применению IR-компенсации удалось повысить надежность работы электропривода, особенно, при минимальной частоте  $f=5$ Гц. В результате этого, увеличение номинального момента электродвигателя составило порядка 10% от значения полученного без применения компенсации. Компенсация проходит до определенного момента – значение действующего напряжения не превышает 15% от номинального напряжения,



благодаря этому ограничению магнитная система электродвигателя работает без перенасыщения.

#### 4.4 Ограничение тока электродвигателя

Для ограничения тока при больших нагрузках в двигателях предусматривается применение контура ограничения тока.

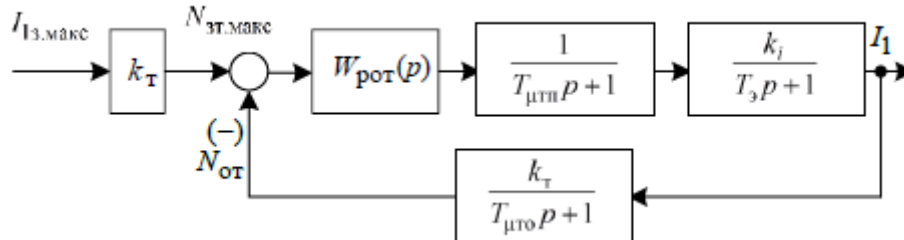


Рисунок 40 – Структурная схема контура ограничения тока

Передаточная функция ПИ-регулятора ограничения тока [7]:

$$W(p) = k_{PT} \cdot \frac{T_{PT} \cdot p + 1}{T_{PT} \cdot p} \quad (4.13)$$

Постоянная времени регулятора тока:

$$T_{PT} = T_{1Э} = 0,0221 \text{ с}$$

Коэффициент усиления регулятора тока:

$$k_{PT} = \frac{T_{1Э} \cdot R_{1Э}}{k_H \cdot k_T \cdot a_T \cdot T_{мтЭ}} \quad (4.14)$$

$$k_{PT} = \frac{0,023 \cdot 7,58}{7,124 \cdot 0,7071 \cdot 2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}}$$

где  $k_H$  – коэффициент передачи по каналу частоты:

$$k_H = \frac{U_{1H}}{f_{1H} \cdot R_{1Э}} = \frac{2700}{50 \cdot 7,58} = 7,124 \text{ A / Гц};$$

$k_T$  – коэффициента обратной связи по току:

$$k_H = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,7071 \text{ 1 / A};$$

$a_T = 2$  – коэффициент типовой настройки контура тока на модульный оптимум (МО);

$T_{\mu TЭ}$  – эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока:

$$T_{\mu TЭ} = \frac{T_{OC.T}}{n_T} + T_{ЗВ.И} = \frac{0,0002}{2} + 0,0002 = 0,0003 \text{ с};$$

где  $T_{OC.T} = T_{ШИМ} = 0,0002 \text{ с}$  – интервал квантования сигналов в цепи обратной связи контура тока;

$n_T = 2$  – коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном (при настройке контура тока на МО);

$T_{ЗВ.И} = T_{ШИМ} = 0,0002 \text{ с}$  – интервал времени задержки подачи управления регулятора тока к ключам инвертора.

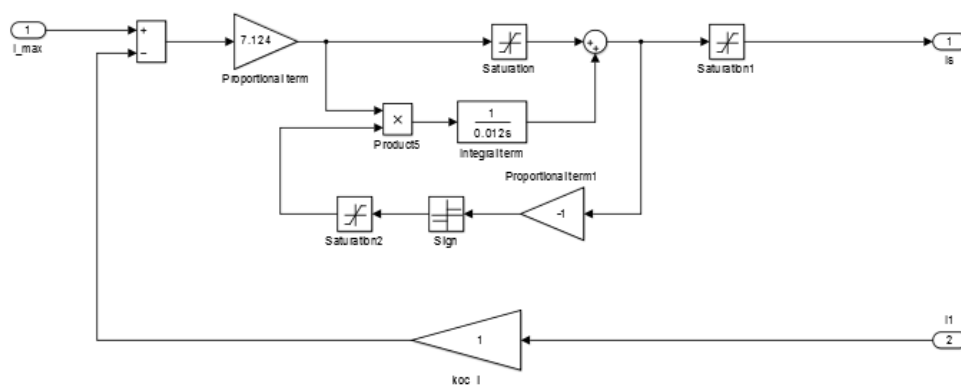


Рисунок 41 – Имитационная модель регулятора ограничения тока

На рисунке 42 представлены графики переходных процессов  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$  с применением контура ограничения тока и момента. Имитационная модель электропривода, построенная в среде Matlab Simulink предоставлена в полном объеме в Приложении 1.

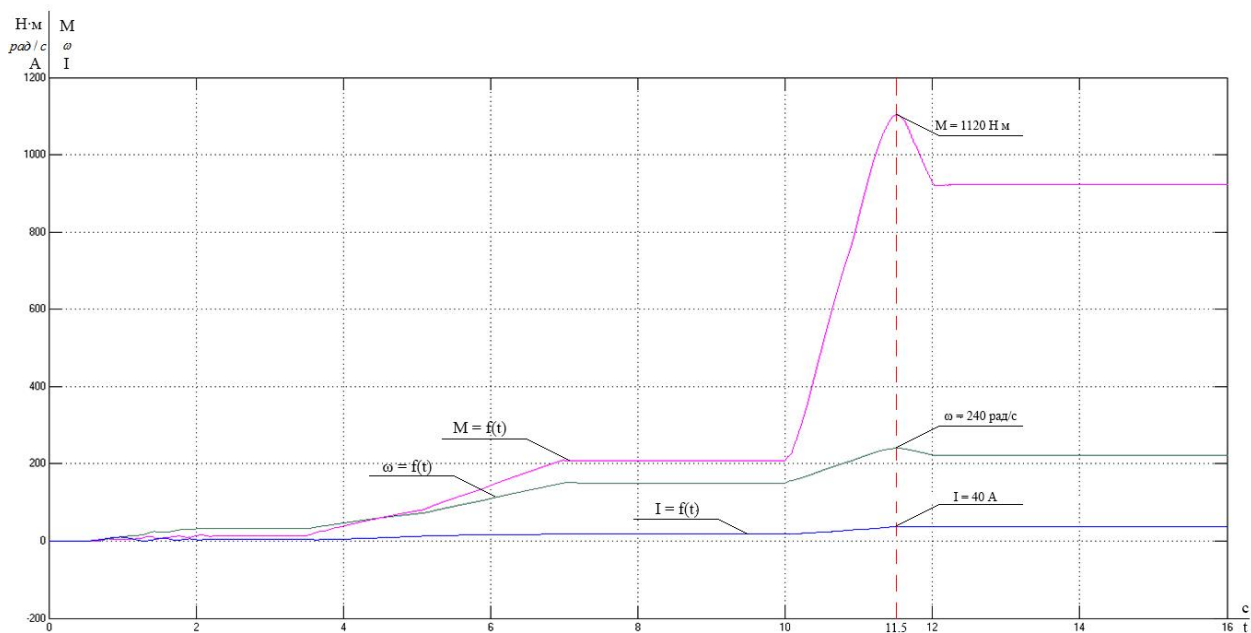


Рисунок 42 – Переходные характеристики  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$  с применением контура ограничения тока

Исходя из полученных данных можно сделать вывод о том, что контур ограничения тока работает адекватно. В момент, когда возникает перегрузка (11,5 с), система, воздействуя на канал формирования напряжений, снижает момент на валу и скорость вращения электродвигателя. Дальнейшая работа двигателя осуществляется при поддержании заданного допустимого значения тока.

#### 4.5 Сравнение энергетических показателей частотно-регулируемого электропривода

Сравним энергоэффективность регулируемого электропривода, выполненного по системе ПЧ–АД с электроприводом, пуск которого осуществляется напрямую, подачей напряжения на обмотку статора.

В исследуемой технологии для регулирования подачи насоса используют метод дросселирования, минуя использование устройств регулирования скорости вращения двигателя. С помощью дроссельной задвижки осуществляется регулирование насосной характеристики (рисунок 43). Данный метод эффективен с точки зрения простоты исполнения, но крайне неэффективен с точки зрения энергосбережения [14]. На рисунке 43

представлены зависимости подачи насоса при регулировании с использованием дроссельной задвижки и изменением частоты вращения.

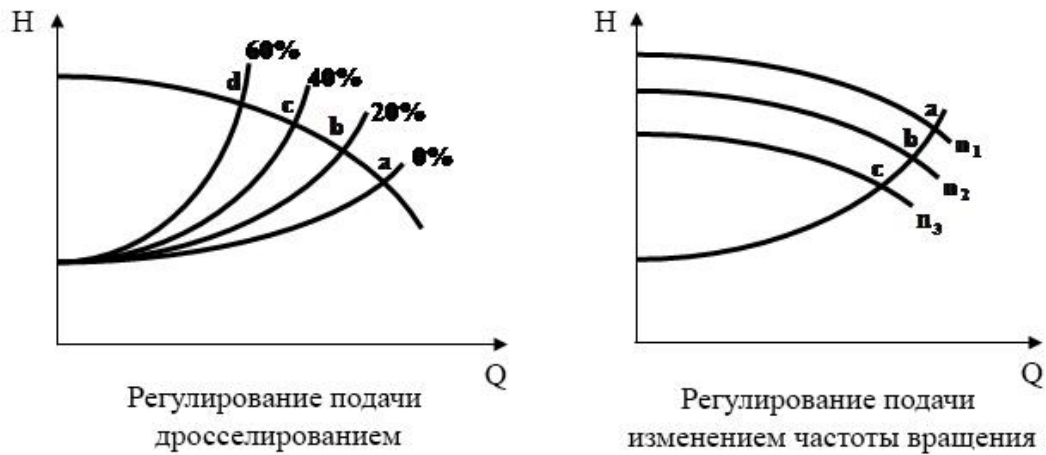


Рисунок 43 – Зависимости подачи насоса при регулировании

Работа насосного агрегата при дросселировании осуществляется при том же количестве потребляемой мощности, что и в номинальном режиме работы. В то время как, способ регулирования подачи с помощью применения преобразователя частоты с последующим изменением частоты вращения, позволяет потреблять значительно меньше электроэнергии и КПД установки гораздо выше чем при регулировании с помощью задвижки.

Предположим, что нам необходимо снизить подачу насоса на 20%. В случае применения дроссельной задвижки двигатель будет работать в номинальном режиме при номинальных параметрах сети. Рассчитаем количество потребляемой двигателем полной мощности по выражению [14]:

$$S = 3 \cdot U \cdot I \quad (4.15)$$

где  $U$  – значение фазного напряжения;

$I$  – потребляемый ток.

Полная мощность, потребляемая электродвигателем при регулировании дросселированием при прямом способе пуска будет равна:

$$S_0 = 3 \cdot 2178 \cdot 38 = 235 \text{кВА}$$

При 80% от номинальной подачи, двигателю необходимо развивать скорость вращения равную  $\omega = 249 \text{ рад/с}$ , исходя из рассчитанных

искусственных характеристик (глава 3.3), такой скорости будет удовлетворять работа двигателя при частоте равной  $f = 40$  Гц. Потребляемая электродвигателем полная мощность, с применением преобразователя частоты для регулирования подачи насосного агрегата, будет составлять:

$$S_{mч-д} = 3 \cdot 1450 \cdot 30.65 = 133 \text{кВА}$$

На рисунках 44,45 представлены переходные процессы при регулировании дросселированием и, соответственно, регулировании с применением преобразователя частоты.

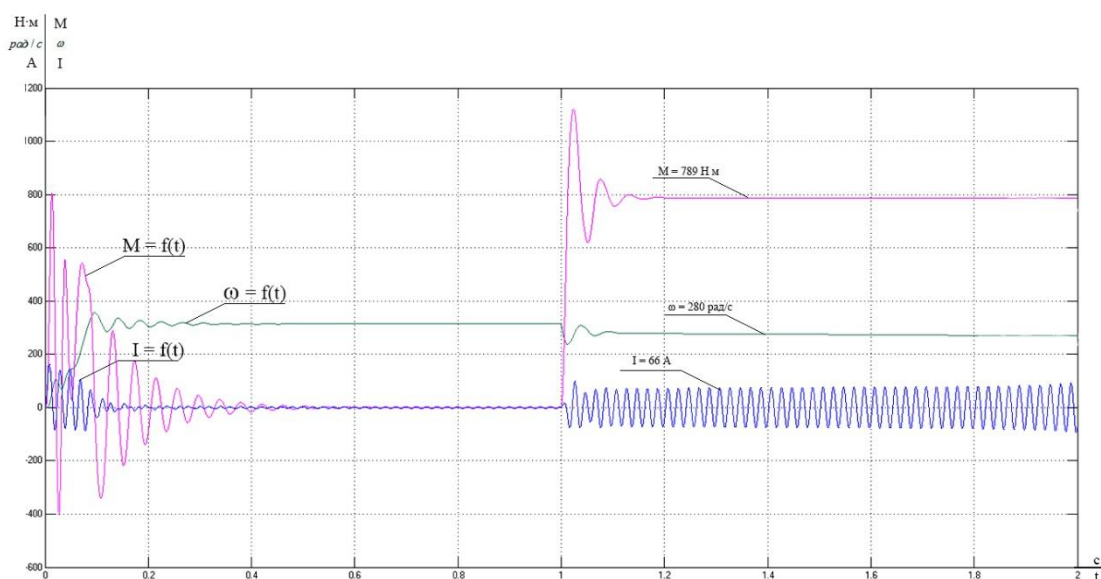


Рисунок 44 – Переходные процессы  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$  при регулировании подачи дросселированием

На рисунке 45 представлены переходные характеристики электропривода насосного агрегата. Работе насоса, при ограниченной подаче равной 80% от номинальной, соответствует зона (IV).

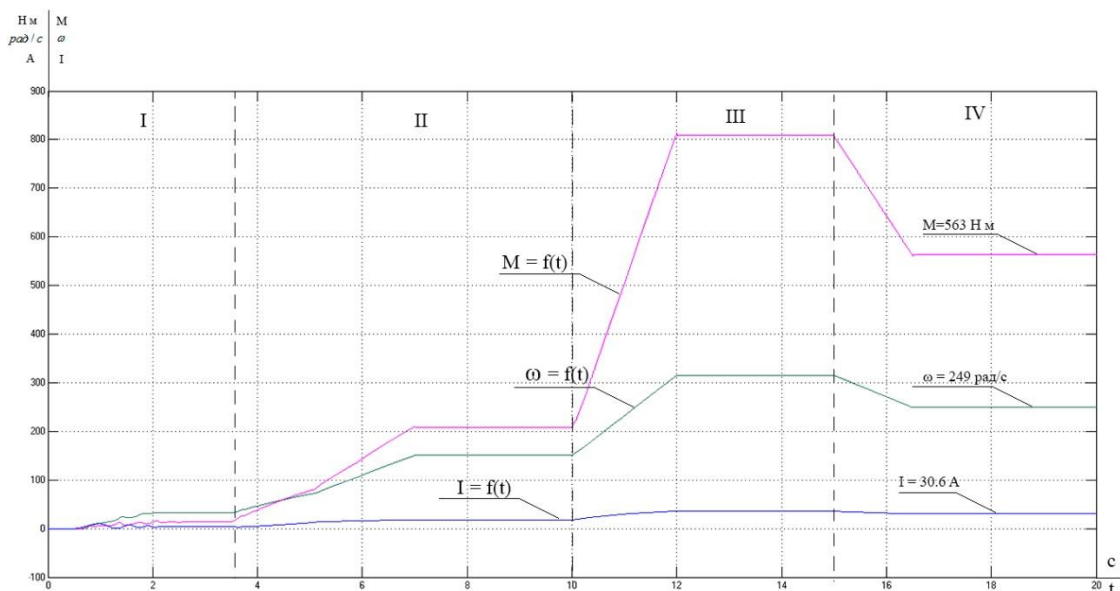


Рисунок 45 – Переходные процессы  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$  при регулировании подачи преобразователем частоты

Электродвигатель обеспечивает требуемую производительность насоса при частоте 40 Гц с высокой эффективностью по сравнению с прямым пуском двигателя и регулированием подачи с помощью дросселирования задвижки (рисунок 44). Потребляемая мощность частотно-регулируемого электропривода в данном случае ниже на 40% чем при прямом пуске. Помимо этого, регулирование с применением ЧРП позволяет избежать дополнительных перегрузок электродвигателя.

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

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5Б	Перебаскину Назару Геннадьевичу

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Оклад ИР – 26300 руб, Оклад инженера 10р – 17000 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Нормы амортизации – 20 %
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Социальные отчисления – 30 %

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

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Планирование работ и их временных оценок
2. Разработка устава научно-технического проекта	Смета затрат на проектирование
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Смета затрат на оборудование
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Анализ полученных результатов

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

1. Диаграмма Ганта

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Перебаскин Н.Г.		

## 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью проекта является разработка регулируемого электропривода погружного насосного агрегата для откачки попутного нефтяного газа. В результате исполнения полученная система отвечает всем техническим параметрам.

Исследуемый регулируемый электропривод позволяет решить проблему утилизации ПНГ, помимо сокращения выбросов вредных веществ, он способствует притоку скважинной продукции, которая в свою очередь повышает экономическую эффективность добывающей скважины. В данном разделе производится финансовый менеджмент и анализ ресурсоэффективности проекта.

### 5.1 Планирование работ технического проекта

В таблице 5 приведена организационная структура проекта и оценка времени работы исполнителя проекта и научного руководителя.

Таблица 5 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, день
1	Перебаскин Н.Г., студент	Инженер 10 разряда	Исполнитель проекта	94
2	Ланграф С.В., доцент	Научный руководитель	Руководитель проекта	9

В таблице 6 приведены ключевые события проекта

Таблица 6 – Контрольные события проекта

Основные этапы	№	Содержание работ	Исполнитель	Трудозатраты, день
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель, инженер	2
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	20



	3	Изучение уже существующих решений в данной области	Инженер	10
	4	Изучение зарубежной литературы	Инженер	2
	5	Выбор направления исследований	Научный руководитель, инженер	2
	6	Календарное планирование работ по теме	Научный руководитель, инженер	4
Теоретические и экспериментальные исследования	7	Расчет параметров оборудования	Инженер	15
	8	Разработка системы регулирования	Инженер	22
	11	Имитационное моделирование	Инженер	14
Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель, инженер	2
	13	Оценка целесообразности проведения дальнейших исследований по данной теме	Научный руководитель, инженер	1

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Таблица 7 – Показатели рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней работы	14	122
Количество нерабочих дней за период выполнения проекта	5	27
Продолжительность выполнения проекта, в рабочих днях	9	94

По результатам планирования строится диаграмма Ганта, приведенная в приложении 3.

На основе анализа составленной диаграммы Ганта можно сделать вывод, что продолжительность работ составляет 13 декад, начиная с первой декады февраля и заканчивая первой декады июня. Можно предположить, что объем работ, в ходе исследования, может быть увеличен или наоборот сокращен, в зависимости от полученных результатов.

### 5.1.1 Смета затрат на научное исследование

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

$$K_{НТИ} = K_{мат} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о} + K_{пр} + K_{накл} \quad (5.1)$$

где  $K_{мат}$  – материальные затраты;

$K_{ам}$  – амортизация компьютерной техники;

$K_{з/пл}$  – затраты на заработную плату;

$K_{с.о.}$  – затраты на социальные нужды;

$K_{пр}$  – прочие затраты;

$K_{накл}$  – накладные затраты.

Составление сметы научного исследования является необходимым условием. Она должна отражать все расходы, связанные с выполнением данного исследования.

### 5.1.2 Материальные затраты

В качестве материальных затрат принимаем канцелярские товары, которые приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Материальные затраты

№	Наименование	N, шт	Ц, руб
1	Канцелярские товары	1	1000
Итого:			1000

### 5.1.3 Затраты на амортизацию

В процессе исследовательской работы использовалась компьютерная техника и специализированное программное обеспечение (таблица 9). В связи с этим необходимо определить амортизацию от её использования.

Таблица 9 – Использованные амортизационные средства

№	Наименование оборудования	Ц <sub>кт</sub> , руб	T <sub>сл</sub> , год
1	Персональный компьютер	25 000	5
2	Специальное ПО	15 000	10

Затраты на амортизацию рассчитываются по формуле:

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot C_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}} \quad (5.2)$$

$T_{исп.кт}$  – время использования компьютерной техники

$T_{кал}$  (365 дней) – календарное время

$C_{кт}$  – цена компьютерной техники

$T_{сл}$  – срок службы компьютерной техники

$$K_{ам(ПК)} = \frac{94}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 1287 \text{ руб.}$$

$$K_{ам(ПО)} = \frac{94}{365} \cdot 15000 \cdot \frac{1}{10} = 386 \text{ руб.}$$

Итого амортизационные расходы составят:

$$K_{ам} = K_{ам(ПК)} + K_{ам(ПО)} = 1287 + 386 = 1673 \text{ руб.}$$

#### 5.1.4 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Размер основной заработной платы устанавливается, исходя из численности исполнителей, трудоемкости и средней заработной платы за один рабочий день.

$$Kз / пл = ЗПинж + ЗПнр \quad (5.3)$$

$$ЗПмес = ЗПо \cdot K1 \cdot K2 \quad (5.4)$$

$K1$  – коэффициент, учитывающий отпуск ( $1,1 = 10\%$ );

$K2$  – районный коэффициент ( $1,3 = 30\%$ );

$Z_{По}$  – месячный отклад (для доцента 26300 р., для инженера 17000р.)

Для научного руководителя:

$$Z_{Пмес} = 26300 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 37609 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$Z_{Пмес} = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.}$$

$$Z_{Пор} = \frac{Z_{Пмес}}{21} \cdot n \quad (5.5)$$

$21$  – число рабочих дней в месяц;

$n$  – фактическое число дней в проекте.

Для научного руководителя:

$$Z_{Пор} = \frac{37609}{21} \cdot 9 = 16118 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$Z_{Пор} = \frac{24310}{21} \cdot 94 = 108816.2 \text{ руб.}$$

$$Kз / нл = 16118 + 108816.2 = 124934.2 \text{ руб.}$$

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

Обязательные расходы 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:

$$Kс.о. = \frac{Kз / нл \cdot k_{внеб}}{100\%} \quad (5.6)$$

$$Kс.о. = \frac{124934.2 \cdot 0,3}{1} = 37480.2 \text{ руб}$$

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

учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность вводится пониженная ставка – 30 %.

### 5.1.6 Прочие затраты

Прочие затраты принимаются в размере 10% от ( $K_{мат} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о}$ )

$$K_{пр} = \frac{(K_{мат} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о}) \cdot 10\%}{100\%} \quad (5.7)$$

$$K_{пр} = \frac{(1000 + 1673 + 124934.2 + 37480.2) \cdot 0,1}{1} = 16508,7 \text{ руб}$$

### 5.1.7 Накладные расходы

Еще на этапе планирования проекта должна быть составлена смета затрат. Это станет основой для формирования договора с заказчиком и является минимальным в рамках данного исследования.

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

$$K_{накл} = \frac{K_{з/пл} \cdot 200\%}{100\%} \quad (5.8)$$

$$K_{накл} = \frac{124934.2 \cdot 2}{1} = 249868.4 \text{ руб}$$

Таблица 10 – Расчет бюджета затрат НТИ

№	Наименование статьи	Сумма, руб.
1	Материальные затраты НТИ	1 000
2	Амортизация	1 673
3	Затраты по основной з/п	124934,2
4	Отчисления во внебюджетные фонды	37480,2
5	Прочие затраты	16508,7
6	Накладные расходы	249868,4
Итого :		431464,5

## 5.2 Определение экономической эффективности проекта

Для определения срока окупаемости проекта необходимо рассчитать затраты на предусмотренное оборудование, монтажные работы. Смета затрат на оборудование представлена в таблице 11.

Таблица 11 – Смета затрат на оборудование

№	Наименование оборудования	Сумма, руб.
1	Электроцентробежный насос	55 000 000
2	Преобразователь частоты	15 000 000
3	Кабель	3 000 000
4	Вспомогательное оборудование	5 000 000
5	Монтажные работы	100 000 000
Итого:		178 000 000

Основываясь на данные источника [3], принимаем, что ежемесячный экономический эффект составляет почти 3 млн. рублей без учёта прибыли от утилизации попутного нефтяного газа, а эксплуатационные издержки составляют 6.6 млн. рублей тогда срок окупаемости проекта составит:

$$T_{ок} = \frac{K_{пр} + K_{об} + K_{монт}}{\mathcal{E}_{год} - I_{год}} \quad (5.9)$$

$$T_{ок} = \frac{178\,000\,000}{36\,000\,000 - 6\,600\,000} = 6,05 \text{ лет}$$

где

$K_{пр}$  – капитальные вложения в проект;

$K_{об}$  – капитальное вложение в оборудование;

$K_{монт}$  – Капитальные вложения в монтажные работы;

$\mathcal{E}_{год}$  – Годовой экономический эффект;

$I_{год}$  – Годовые эксплуатационные издержки.

Подводя итоги, можно сделать вывод о том, что исследуемый проект стоимостью 178 миллионов рублей является экономически эффективным и срок окупаемости составит 6 лет без учета прибыли.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5ГМ5Б	Перебаскину Назару Геннадьевичу

<b>Институт</b>	<b>ЭНИН</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ЭПЭО</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

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

<i>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения.</i>	<i>Территория нефтедобывающей скважины с главным объектом рассмотрения исследования – помещению насосной станцией в которой размещается оборудование для регулируемого электропривода погружного насосного агрегата для откачки попутного нефтяного газа.</i>
--	---

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

<b>1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</b> <i>1.1 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды</i>	<i>Вредные факторы производственной среды:</i> 1. микроклимат; 2. шум; 3. вибрации; 4. вредные вещества
<i>1.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</i> – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность	<i>Электробезопасность: поражение электрическим током.</i> <i>Пожаровзрывоопасность: взрыв горючих, смазочных веществ</i>
<b>2. Экологическая безопасность</b> • анализ воздействия объекта на атмосферу (отходы); • разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации ее последствий	<i>В случае аварий возможны выбросы различных загрязнителей, которые оказывают негативные воздействия на окружающую среду – атмосферу, гидросферу, литосферу.</i>
<b>3. Защита в чрезвычайных ситуациях:</b> • перечень возможных ЧС на объекте; • выбор наиболее типичной ЧС; • разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий	<i>Наиболее распространенным ЧС на объекте является возгорание в следствие авариях в электрических цепях. Разработаны мероприятия по предупреждению возгораний (п.2.1) и электропоражений (п.2.2) и мер по ликвидации их последствий.</i>
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> • Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	<i>Право на условие труда, отвечающие требованиям безопасности и гигиены</i>

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент кафедры ЭБЖ	Дашковский Анатолий Григорьевич	к.т.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5ГМ5Б	Перебаскин Назар Геннадьевич		

## **6 Социальная ответственность**

Целью данного раздела является выявление и анализ вопросов, связанных с организацией рабочего места, производственной санитарией, техникой производственной безопасности и охраной окружающей среды. Основной задачей является создание допустимых норм для улучшения условий труда, обеспечения производственной безопасности человека, повышения его производительности, сохранения работоспособности в процессе деятельности, а также охраны окружающей среды.

Вопросы производственной и экологической безопасности рассматриваются с позиции исполнителя, непосредственно связанного с технологическим процессом по откачке попутного нефтяного газа.

Рабочая среда, организация рабочего места должны соответствовать общепринятым и специальным требованиям техники безопасности, эргономики, нормам санитарии, экологической и пожарной санитарии. Помещения оборудованы отдельными рабочими местами для всех сотрудников с предоставлением средств индивидуальной защиты.

### **6.1 Анализ выявленных вредных факторов**

#### **6.1.1 Микроклимат**

В ходе работы необходимо соблюдать допустимые значения на следующие производственные метеоусловия – влажность воздуха на рабочем месте, температура воздуха, скорость движения воздуха, а так же тепловые излучения. Указанные физические свойства воздуха на рабочем месте оказывают значительное влияние на протекание жизненных процессов в организме человека. Так, при неблагоприятном микроклимате (превышение или же занижение допустимых нормативных показателей указанных в СанПиН 2.2.4.548 – 96) снижается производительность труда и ухудшается здоровье работника.

Оптимальные и допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений представлены в таблице 12.



Таблица 12 – нормы микроклимата в рабочей зоне

Сезон года	Категория работ	Температура, °С		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
		По ГОСТ 12.1.005 – 88	Эл.тех-ийучасток	По ГОСТ 12.1.005 – 88	Фильтр овалынь зал	По ГОСТ 12.1.005 – 88	Эл.тех-ий участок
Холодный	Средней тяжести	17 – 19	15 – 21	40 – 60	70 – 30	0,3	0,2
Тёплый со значительным избытком тепла	Средней тяжести	20 – 22	16 – 27	40 – 60	60 – 30	0,2 - 0,5	0,5

Для обеспечения нормального микроклимата предусматривается, в соответствии с Сан ПиН 2.2.4.548 – 96(1), следующее:

- вентиляция приточно-вытяжная по СНиП 2.04.05 – 91 (28.11.91) установка центробежных вентиляторов. Кратность воздухообмена 1;
- установка систем местных отсосов по СНиП 2.04.05 – 91 для удаления вредных, пожароопасных и взрывоопасных веществ от мест их образования и выделения;
- установка систем воздушного отопления, совмещённых с вентиляцией;
- герметизация технологического оборудования.

Предусмотренные мероприятия обеспечивают параметры микроклимата в соответствии с нормами представленными в таблице 1.

В соответствии с Сан ПиН 2.2.4.548 – 96(1) значения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха устанавливаются, для рабочей зоны производственных помещений, в зависимости от категории тяжести выполняемой работы, величины явного избытка тепла выделяемого в помещении и периода года.

Необходимым условием для комфортного и безопасного пребывания людей в помещениях является регулирование температуры. Сюда можно отнести отопление и кондиционирование. Для этих целей используется

несколько систем, которые позволяют обеспечить комфортный микроклимат в зданиях и в холодное, и в жаркое время года. Это организация вытяжек из вентиляционных каналов, отопительных и кондиционирующих устройств [17].

### **6.1.2 Шум и вибрация**

Шум – один из наиболее распространенных неблагоприятных факторов производственной среды. Источниками звуков и шумов являются вибрирующие тела. Основные производственные процессы, сопровождающиеся шумом, – это работа технологического оборудования в машинных залах насосных, воздухоудвнх станций и в других помещениях водопроводно-канализационного хозяйства. Говоря о действии шума на организм, следует иметь в виду, что он оказывает как местное, так и общее воздействие. При этом учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, изменяются двигательная и секреторная функции желудка и других органов. Неблагоприятно отражается шум на нервной системе, вызывая головные боли, бессонницу, ослабление внимания, замедление психических реакций, что, в конечном счете, приводит к понижению работоспособности [18].

Источником производственного шума и вибрации являются насосы, вентиляторы, фильтры.

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

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты по ГОСТ 12.4.011 – 89;
- установка звукоизолирующих кабин;
- звукоизолирующие кожухи и экраны;
- виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы).

Предельно допустимые уровни шума представлены в таблице 13.

Таблица 13 – предельно допустимые уровни шума

Рабочее место	Уровни звукового давления, дБ									По шкале
	1,5	3	25	50	100	120	140	150	160	
Насосная станция	07	5	7	2	8	5	3	1	9	80
Щит управления	6	3	4	8	3	0	7	5	4	65

Технические нормы вибрации представлены в таблице 14.

Таблица 14 – технические нормы вибрации

Вид вибрации	Среднеквадратичная частота, Гц					
	Логарифмический уровень виброскорости					
	16	31,5	63	125	250	500
Насосная станция	103	100	101	106	112	118

### 6.1.3 Вредные вещества

Основным опасным воздействием является наличие вредных и опасных веществ в рабочей зоне при проведении монтажных и пуско-наладочных работ.

Авария на скважине (открытый выброс) носит локальный характер и при условии отсутствия токсичных веществ в газе. При возгорании природный газ стремится подняться в более высокие слои атмосферы за счет пластового давления и его плотности, меньшей, чем плотность воздуха. Поэтому воздействие на растительность в радиусе более 400 м будет не существенным [18].

На границе санитарной зоны, временно, на период строительства скважин, будет иметь место превышение предельно-допустимых концентраций (ПДК) в приземном слое атмосферы:

- по двуокиси азота - в 1,07-1,10 ПДК
- группе суммации ( $\text{NO}_2 + \text{SO}_2$ ) -1,12-1,15 ПДК

Необходимо отметить дискретный характер выбросов, а также сравнительно небольшой период продолжительности (136 суток бурения и

крепления). При возможной аварийной ситуации уровень загрязнения в приземном слое атмосферы по рассчитанным загрязняющим веществам не превысит ПДК. Захороняемые отходы бурения не являются токсичными. С целью утилизации этих отходов рекомендован шламовый амбар и амбар для буровых сточных вод, конструкция которых разработана в соответствии с санитарными требованиями [19].

#### **6.1.4 Анализ выявленных опасных факторов**

##### **Пожарная безопасность**

Пожарная опасность при эксплуатации скважины определяется двумя основными факторами: наличием на буровой площадке горючих материалов как в условиях нормальной работы, так и при возникновении аварийных ситуаций, а также возможностью образования источников зажигания в горючей среде. Исследуемый объект относится к группе Б по степени пожаровзрывоопасности, т.к. производство связано с применением жидкостей, имеющих температуру вспышки паров 28-120°C, т.е. горючих жидкостей 2-3 классов.

Пожарно-профилактическая работа начинается с правильного выбора и планировки площадки для сооружения насосной скважинной станции является соблюдение противопожарных разрывов между бурящейся скважиной и близлежащими жилыми и промышленными объектами.

Планировка площадки должна предусматривать:

- возможность свободного перемещения людей и пожарной техники при возникновении пожара на буровой;
- отвод жидкости, выбрасываемой из скважины при аварийных ситуациях;
- предотвращение возможность затопления разлившейся жидкостью электрооборудования, находящегося под напряжением.

Двигатели, а также буровые насосы можно устанавливать в помещении любой степени огнестойкости с негорючим полом. Необходимым условием

обеспечения пожарной безопасности является строгое соблюдение требований, предъявляемых к электрооборудованию.

Осветительную и силовую электропроводку на территории насосной станции выполняют проводами и кабелями, сечения и защиту которых выбирают как для невзрывоопасных помещений и установок. При этом открыто проложенные кабели должны быть бронированными и не иметь наружных покровов из горючих веществ (джута, битума и д. р.). Кабели к переносным токоприемникам должны иметь исполнение для средних условий работы. Кабельные линии, прокладываемые на буровой площадке должны выполняться из цельных кусков кабелей и не содержать соединительных и осветительных кабельных муфт.

Территория скважинной установки должны быть обеспечены аварийным освещением напряжением не выше 12 В и переносными взрывозащищенными светильниками того же напряжения. Питание их может осуществляться от автономного источника или от двухобмоточного трансформатора, корпус и один из низковольтных выводов которого должны быть заземлены.

Основные меры, обеспечивающие пожарную безопасность сварочных работ вблизи устья скважины, - это удаление горючих материалов с места проведения сварочных работ и обеспечению надежной работы сварочного оборудования. Перед проведением сварочных работ рабочую площадку очищают от горюче смазочных материалов, а горючие конструкции, находящиеся на расстоянии до 4 м от места огневых работ, защищают от искр металлическими листами или асбестом.

В помещении насосной станции, должен быть разработан план эвакуации при пожаре, в котором должны быть отмечены все выходы из помещения. На рисунке 46 представлен план эвакуации из помещения насосной станции.

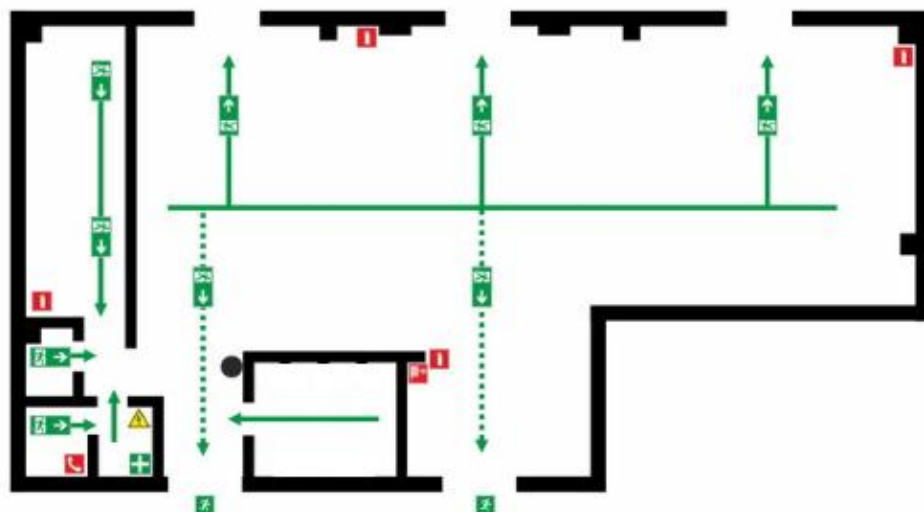


Рисунок 46 – План эвакуации из помещения насосной станции

### **Электропоражение**

Электроустановки и их части должны быть выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным и вредным воздействиям электрического тока и электромагнитных полей, и соответствовать требованиям электробезопасности. При возникновении пожаров каждый работник должен позвонить в службу спасения, дать сигнал тревоги.

К электротехническим средствам относятся:

- изолирующие штанги всех видов;
- изолирующие клещи;
- указатели напряжения;
- сигнализаторы наличия напряжения индивидуальные и стационарные;
- диэлектрические ковры и изолирующие подставки;
- защитные ограждения (щиты и ширмы);
- ручной изолирующий инструмент;
- плакаты и знаки безопасности;

Для обеспечения защиты от поражения термическим действием электрической дуги при работах в закрытых и открытых электроустановках со снятием и без снятия напряжения дополнительно следует применять

специальные защитные термостойкие комплекты, включающие одежду, обувь, средства защиты головы и рук.

Современная система электробезопасности обеспечивает защиту от поражения в двух наиболее вероятных и опасных случаях:

- при прямом прикосновении к токоведущим частям электрооборудования;
- при косвенном прикосновении.

Под косвенным прикосновением понимается прикосновение человека к открытым проводящим частям оборудования, на которых в нормальном режиме электроустановки отсутствует электрический потенциал, но при каких-либо неисправностях, вызвавших нарушение изоляции или ее пробой на корпус, на этих частях возможно появление опасного для жизни человека потенциала.

Для защиты от прямого прикосновения к токоведущим частям, служат изоляция токоведущих частей, применение ограждений и оболочек, установка барьеров, размещение вне зоны досягаемости, устройства защитного отключения (УЗО). Для защиты от косвенного прикосновения применяются: УЗО и защитное заземление и зануление [15].

Даже если при электропоражении, работающий внешне сохранил нормальное самочувствие, он должен быть осмотрен врачом с заключением о состоянии здоровья, т.е. пострадавшему должна быть обеспечена скорая медицинская помощь. Предварительно пострадавший должен быть освобожден от действия электрического тока. Если есть необходимость оказания первой помощи, то до прибытия медработника необходимо начать делать: наружный массаж сердца, искусственное дыхание.

Для предотвращения от поражения электрическим током при прикосновении к корпусам электроустановок, находящихся под напряжением при пробое изоляции или в других случаях, необходимо рассчитать и установить защитное заземление.

Данные для расчёта заземления:

1. Заземление необходимо выполнить для установки, работающей под напряжением 380 В.

2. Для заземления используем трубы диаметром 4 мм и длиной 2,5 м и сталь полосовую 18х4 мм.

3. Заземлители расположены в ряд.

4. Характер грунта в месте установки заземления — глина. Заземлители установлены на глубину (от верхнего конца трубы) 17 см, а расстояние между трубами принимаем равной трём длинам заземлителей, т.е.  $a=2$  м.

Верхние концы соединены с помощью полосовой стали. Определим, что для данного случая по нормам допускается сопротивление не более 4 Ом. Удельное сопротивление глины составляет  $\rho_T = 0,6 \cdot 10^4$  Ом·см.

Учитывая применение грунта зимой и просыхания его летом, определяем расчётные значения  $\rho_\varepsilon$  и  $\rho_n$  при использовании трубчатых заземлителей соединительной полосы и соединительной полосы:

$$\rho_\varepsilon = \rho_T \cdot \kappa_\varepsilon \quad (6.1)$$

$$\rho_\varepsilon = 0,6 \cdot 10^4 \cdot 1,9 = 1,14 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

где  $\kappa_\varepsilon = 1,9$  - коэффициент для вертикальных электродов;

$$\rho_n = \rho_T \cdot \kappa_n \quad (6.2)$$

$$\rho_n = 0,6 \cdot 10^4 \cdot 5 = 3 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

где  $\kappa_n = 5$  - коэффициент для горизонтальных электродов.

Определим величину сопротивлений одной забитой в землю трубы по выражению:

$$R_\varepsilon = \frac{\rho_\varepsilon}{2 \cdot \pi \cdot l_m} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot l_m}{d} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot h_m + l_m}{4 \cdot h_m \cdot l_m} \right) \quad (6.3)$$

где  $h_m$  - глубина заземления,  $h_m = 750$  см;

$l_m$  - длина заземления,  $l_m = 250$  см;



$d$ - диаметр заземления,  $d=0,4$  см.

$$R_{\text{э}} = \frac{1,14 \cdot 10^4}{6,28 \cdot 250} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot 250}{0,4} + 0,5 \cdot \ln \frac{750 + 250}{750 \cdot 250} \right) = 54,4 \text{ Ом.}$$

Определим число заземлителей:

$$n = \frac{R_{\text{э}}}{z} = \frac{54,4}{6} = 9 \text{ шт.}$$

Учитывая, что трубы соединены заземлительной полосой, которая выполняет роль заземлителя, уменьшаем число труб до 6 штук. Определим длину соединительной полосы:

$$l_m = 1,05 \cdot a \cdot (n-1) = 1,05 \cdot 2 \cdot (6-1) = 10,5 \text{ м,}$$

где  $n$ - число заземлителей;

$a$  - расстояние между заземлителями.

Размер резервуара 5x5 м, длина соединительной полосы вписывается в его размер.

Результирующее сопротивление (полосы и трубы) с учётом коэффициента использования труб  $J_{\text{э}}=0,85$  и полосы  $J_{\text{л}}=0,86$  определяется по формуле:

$$R_c = \frac{R_{\text{э}} \cdot R_{\text{л}}}{R_{\text{э}} \cdot J_{\text{л}} + R_{\text{л}} \cdot J_{\text{э}} \cdot n} \quad (6.4)$$

$$R_c = \frac{54,4 \cdot 7,26}{54,4 \cdot 0,86 + 7,26 \cdot 0,85 \cdot 9} = 3,85 \text{ Ом.}$$

Данная величина удовлетворяет требованиям защитного заземления. Контроль заземления производится при приёме в эксплуатацию, а также периодически, в сроки, установленные правилами, при переконфигурации оборудования и ремонте заземлителей.

Схема расположения устройства защитного заземления показана на рисунке 47.

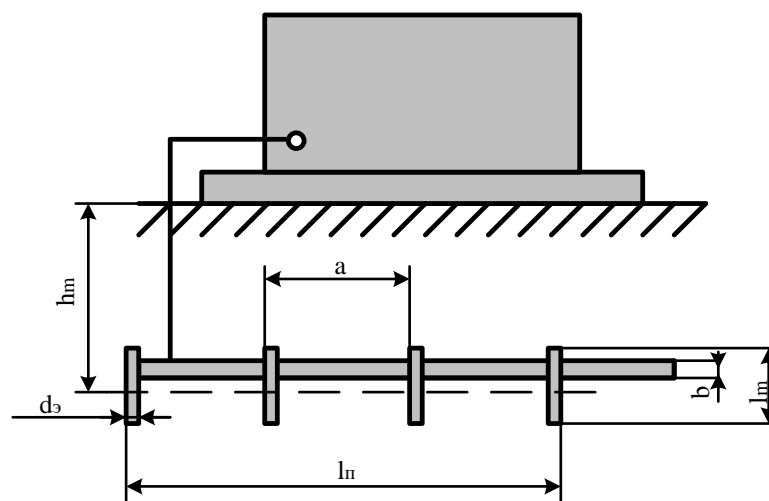


Рисунок 47 – Схема монтажа защитного заземления

В данном случае выполняем выносное заземление. Заземлители располагаются на некотором удалении от объекта заземления. Поэтому заземление корпуса находится вне поля растекания и человек, касаясь корпуса, оказывается под полным напряжением относительно земли. Выносное заземление защищает за счёт малого сопротивления заземлителей [15].

### 6.1.5 Экологическая безопасность

К основным загрязнителям окружающей среды относятся буровые растворы, химические реагенты, а также диспергированные глины, выбуренные породы, смазочные масла, буровой шлам, содержащий все химические соединения, используемые при приготовлении буровых растворов, в том числе 0,8 – 7,5% нефти, 15% химических реагентов, выбуренную породу, 30 – 90% глины и 10 – 30% утяжелителя.

Вместе с буровым раствором в сточных водах содержатся реагенты гипан, нитролигнин, хромкан (образует пену, затрудняет самоочищение водоема) и другие токсичные вещества. Причины опасного загрязнения растворами водоемов связаны с переливами и выбросами бурящихся скважин, избыточного раствора, образующегося при разбурировании глинистых пород, сбросом растворов в овраги и водоемы, перетоками их по поглощающим горизонтам (пластам). При этом не вытекающий густой осадок остается в земляном амбаре и после затвердевания засыпается землей.

Загрязнение территории вокруг буровой можно значительно снизить удалением выбуренной породы (шламоочистными сооружениями). Для очистки не утяжеленных растворов можно эффективно использовать вибрационные сита, гидроциклонные пескоотделители и шламоочистители; для утяжеленных – вибросита, гидроциклонные установки и центрифуги [20].

### **6.1.6 Защита в чрезвычайных ситуациях**

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

Основными ЧС на территории насосной скважины является пожар, возникающий, как правило, в результате аварий в электрических цепях. В пункте 2.2.1 был выполнен расчет цепи защитного заземления, с помощью которого можно уменьшить риск возникновения коротких замыканий и в цепях электрооборудования.

Ликвидация ЧС осуществляется силами и средствами предприятий, учреждений и организаций субъектов РФ, на территории которых сложилась ЧС, при проведении аварийно-спасательных и других неотложных работ.

## **6.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Производственная санитария – это система организационных, санитарно-гигиенических мероприятий, технических средств и методов, предотвращающих или уменьшающих воздействие вредных производственных факторов на рабочих [17].

Обеспечение безопасных условий труда осуществляется путем целенаправленного проведения научно обоснованной системы оздоровительных мероприятий во всех, без исключения, цепочках

производственного цикла. В него входят ведение технологических процессов, эксплуатация оборудования, организация рабочего места, бытовое обслуживание, содержание производственных и бытовых помещений, эксплуатация приточно-вытяжных устройств (вентиляции), организация лечебно-профилактической работы, наличие и качество средств индивидуальной защиты и личной гигиены.

В систему таких мероприятий должны входить:

- постоянное совершенствование технологических процессов и оборудования с целью устранить и предотвратить возможность появления производственных вредностей;
- соблюдение технологических режимов, строгий контроль за их исполнением;
- безусловное соблюдение режимов труда и отдыха, правильная организация рабочего места;
- постоянный контроль за состоянием воздушной среды производственных помещений;
- регулярные медицинские осмотры.

Требования к производственным помещениям являются нормативным документом при проектировании производственных площадей. Санитарные нормы определяют объемно-планировочные решения (объем производственной площади на одного работающего), определяют требования к освещенности, отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, водоснабжению и канализации, регламентируют допустимые параметры шума, вибрации, ультразвука, температуру, влажность, скорость движения воздуха в рабочей зоне помещения, предельно допустимую концентрацию вредных веществ [17].

### **6.2.1 Организация рабочего места**

Территория предприятия и размещение на ней сооружений, зданий, производственных объектов должны соответствовать проекту, разработанному с учетом требований СНиП 11-89-80. Буровые, насосные и

компрессорные станции, другие производственные объекты должны иметь надежное транспортное сообщение с базами материально – технического сообщения и местами дислокации основных производственных служб предприятия. Трубопроводы в местах пересечения с автомобильными дорогами, переходами должны иметь знаки предупреждения об опасности [8]. От крайнего ряда эксплуатационных скважин, а также от каждого объекта нефтяного или газового месторождения устанавливается санитарно – защитная зона, размеры которой определяются по нормам СН – 245 – 71 в соответствии с принятыми методическими рекомендациями. При наличии в продукции месторождений вредных примесей между промышленными объектами, добывающими, транспортирующими или перерабатывающими эту продукцию, и жилыми объектами должна быть установлена буферная зона, величина которой устанавливается при проектировании.

Рабочие места, объекты, проезды и подходы к ним, проходы и переходы в темное время суток должны быть освещены. Искусственное освещение выполняется в соответствии с требованиями «Правил устройства электроустановок» [15] и строительных норм и правил, установленных СН 245-71, СН 433-79 и СНиП 23-05-95.

Объекты, для обслуживания которых требуется подъем рабочего на высоту до 0,75 м, оборудуются ступенями, а на высоту выше 0,75 м – лестницами с перилами. Работы, связанные с опасностью падения работающего с высоты должны проводиться с применением предохранительного пояса.

Открывать дверцы ограждений или снимать ограждения следует после полной остановки оборудования или механизма. Пуск оборудования или механизма разрешается только после установки на место и надежного закрепления всех съемных частей ограждения.

## **Заключение**

В данной выпускной квалификационной работе был спроектирован и исследован регулируемый электропривод погружного насосного агрегата, применяемый для откачки попутного нефтяного газа. В нашем случае разработанная система применена для управления установкой электроцентробежного насоса, электромеханическим преобразователем в которой является асинхронный погружной электродвигатель.

Произведен расчет и выбор силового оборудования системы регулируемого электропривода, построены статические и динамические характеристики для системы преобразователь-двигатель.

Расчет характеристик электропривода был подтвержден данными полученными при имитационном моделировании в программной среде Matlab Simulink. После чего были внесены дополнительные настройки и проведены исследования, которые показали высокую надежность и энергоэффективность разработанного электропривода.

Применение частотно-регулируемого электропривода в технологии откачки попутного нефтяного газа и эксплуатации скважины, позволяет повысить эффективность работы установки электроцентробежного насоса. Электродвигатели, управляемые частотными преобразователями, менее подвержены аварийным режимам работы, возникающих в следствии перегрузок, так как переходные процессы при пуске и работе под нагрузкой протекают наиболее плавно по сравнению с двигателями, пуск которых осуществляется напрямую.

Проведенные исследования показали, что для выполнения одной и той же задачи регулируемый электропривод потребляет на 40% меньше электроэнергии чем электропривод, пуск которого осуществляется напрямую.

В результате проделанной работы была получена система регулируемого электропривода погружного насосного агрегата для откачки попутного нефтяного газа, которая удовлетворяет техническому заданию и может найти применение в реальных проектах, которые направлены на

решение такой проблемы, как утилизация ПНГ и откачки скважинной продукции с помощью УЭЦН.

В разделе финансового менеджмента и ресурсоэффективности были выполнены расчеты затрат на проектирование в соответствии с графиком выполнения проектных работ. Расчет по определению экономической эффективности и срока окупаемости проекта дал положительный результат. Проект, ориентировочной стоимостью в 178 млн. рублей, окупится за 6 лет без учета прибыли от утилизации попутного нефтяного газа.

В разделе социальной ответственности был произведен анализ возможных вредных и опасных факторов, а также разработаны способы их устранения. Без внимания не остались чрезвычайные ситуации. Были рассмотрены наиболее вероятные ЧС, которые могут возникнуть в результате эксплуатации установки электроцентробежного насоса. Рассчитан контур заземления здания для защиты от аварий в питающей сети, с помощью которого удастся предотвратить поражение электрическим током рабочего персонала и снизить риск возникновения возгораний.

## **Публикации**

Статья «Имитационное моделирование статических характеристик электропривода погружного насосного агрегата для откачки попутного нефтяного газа», опубликованная в материалах VII международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК».



## Список использованных источников

1. А.А. Долгань, Технология откачки газа из затрубного пространства добывающих скважин, Изд-во: «Нефтегазовая вертикаль» №6
2. А.А. Нургалиев, Л.Т.Хабибуллин Решение проблемы утилизации попутного нефтяного газа, скапливающегося в затрубном пространстве добывающих скважин
3. Г.В. Молчанов, А.Г.Молчанов; Машины и оборудования для добычи нефти
4. М.Д. Валеев, А.В., Севастьянов, Ю.В. Нигай, Р.С. Третьяков Технология увеличения производительности нефтяных скважин
5. Petroleum learning centre, Центр профессиональной переподготовки специалистов нефтегазового дела; Короткие курсы; интернет ресурс, режим доступа: <http://hw.tpu.ru/short-courses/>, свободный
6. Д.А. Сарачева Совершенствование электроцентробежных насосных установок для скважин, осложненных высоким газовым фактором, Диссертация, Уфа 2016
7. Каталог электроцентробежных насосов фирмы REDA, [Электронный-ресурс]: Режим доступа [http://www.slb.com/~media/Files/artificial\\_lift/product\\_sheets/ESPs/ho\\_tline\\_pumps\\_ps.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/artificial_lift/product_sheets/ESPs/ho_tline_pumps_ps.pdf), свободный
8. Каталог погружных электродвигателей, [Электронный-ресурс]: Режим доступа <http://www.rimera.com/upload/catalog/pdf/pogruzhnye-elektrodvig-ped.pdf>, свободный
9. ЗАО «ЧЭАЗ» Каталог преобразователей частоты среднего напряжения, ВЧРП-ТМ [Электронный-ресурс]: Режим доступа [http://www.cheaz.ru/upload/iblock/900/vchrp\\_s\\_oblozhkoy.pdf](http://www.cheaz.ru/upload/iblock/900/vchrp_s_oblozhkoy.pdf), свободный

10. А.А Сивков, Д.Ю. Герасимов, А.С. Сайгаш. Основы электроснабжения Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – 180с.
11. ООО «Камский кабель» Каталог кабельной продукции для нефтенасосов, [Электронный-ресурс]: Режим доступа <http://www.kamkabel.ru/production/catalog/kabeli-i-provoda-spetsialnye/dlya-neftenasosov/>, свободный
12. Л. С. Удут, О. П. Мальцева, Н. В. Кояин. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 8.
13. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Расчёт характеристик электроприводов переменного тока. Ч.1. Асинхронный двигатель: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 136 с.
14. Байбаков С. А., Субботина Е. А. Регулирование центробежных насосов, ОАО «ВТИ», 2009
15. Правила устройства электроустановок, ПУЭ, утвержденные Министерством энергетики России от 08.07.2002, №204
16. Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»: Издательство Томского политехнического университета 2014
17. ГОСТ 12.3.002-75. Система стандартов безопасности труда. Процессы производственные. Общие требования безопасности
18. ГОСТ 12.1.003-83 «Шум. Общие требования безопасности
19. Положение о декларации промышленной безопасности опасных производственных объектов предприятий, согласованного с Госгортехнадзором РФ за № 03-35/39 от 23.02.1999 г
20. СевКавНИПИГаз «Безопасность жизнедеятельности и экологичность проекта»
21. «Правил по эксплуатации, ревизии, ремонту и отбраковке нефтепромысловых трубопроводов», утвержденных Минтопэнерго РФ 30.12.93 г.

## Приложение 1

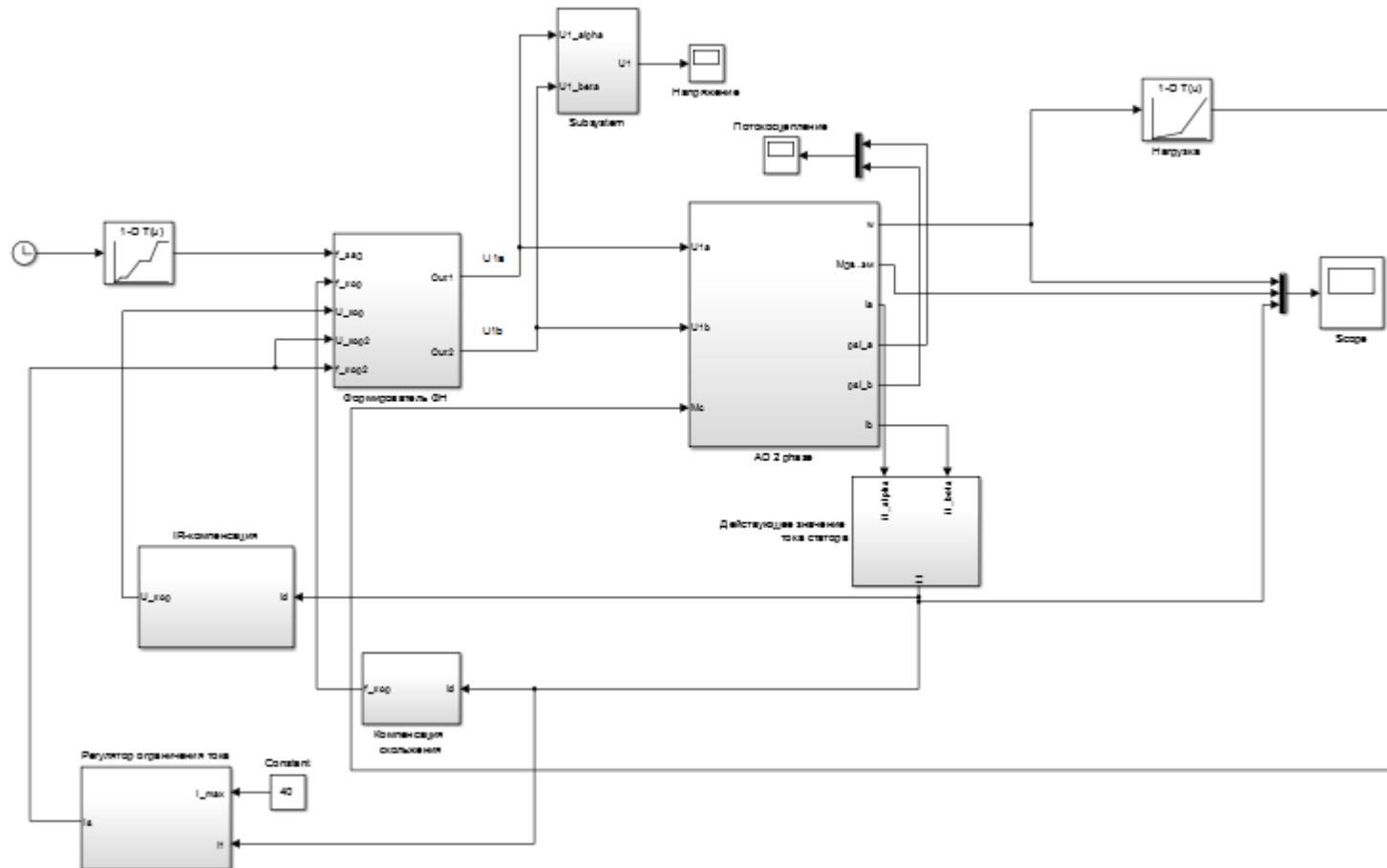


Рисунок 48 – Имитационная модель регулируемого электропривода насосного агрегата в Matlab Simulink

## Приложение 2

Development of a regulated electric drive of a submersible pumping unit for  
pumping associated petroleum gas

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5Б	Перебаскин Назар Геннадьевич		

Консультант кафедры ЭПЭО

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Краснов Иван Юрьевич	К. Т. Н.		

Консультант - лингвист кафедры ИЯЭИ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Баластов Алексей Владимирович			

## **Introduction**

Associated petroleum gas (APG) is a digest of various gaseous hydrocarbons dissolved in oil that are released during extraction and distillation. The APG pumping-out technology, to date, is a very urgent task that contributes to the solution of the APG utilization problem; in addition, it allows to lower the pressure in the annulus space, thereby increasing the inflow of well production.

The electric drive is an electromechanical system consisting of power converters, electromechanical and mechanical converters, control and information devices and interface devices with external electrical, mechanical, control and information systems designed to drive the executive device of a working machine and to control this movement in order to implement technological process.

Pumps and pumping equipment are an integral part of production in the oil industry. In terms of oil production, the installation of an electric centrifugal pump. The electromechanical converter in this unit is an asynchronous submersible motor. However, effective driving all of them are a rather complex task and requires the special creation management systems.

Automation control allows the speed control for a given program in the function of the path, time or load, acceleration and deceleration control, load redistribution, precise stop, overload protection, spacing, incorrect starting position, etc. The use automation increases the reliability and accuracy of the electric drive, increases the productivity of machines in general.

When using adjustable electric drives, the task is to maintain a certain value of the technological parameter, for example, regulating the supply of well production in pumping plants.

The intention of the graduation thesis is the development a regulated electric drive of a submersible pump unit that meets the specifications and requirements.

## **Process description**

APG is a valuable hydrocarbon component that is extracted from minerals extracted, transported and processed, containing hydrocarbons at all stages of the investment life cycle to the realization of finished products to the end user.

According to the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, of the annual APG produced in Russia, only 26% are recycled, 47% go to the needs of the fisheries, or are written off for technological losses and 27% are burned in torches. In addition to economic losses, APG utilization results in significant emissions of solid pollutants and environmental degradation in oilfield areas. According to the Decree of the Government of the Russian Federation at 08.01.2012 (Minutes No. 7, point 2) on measures taken to prevent atmospheric air pollution by pollutant emissions and to reduce greenhouse gas emissions from associated petroleum gas combustion, the target APG flaring at 2012 And subsequent years in the amount of no more than 5% of the volume produced by APG. Thus, when APG is flared at flare plants more than 5%, the payment for emissions of harmful substances formed in this case is calculated as for excess pollution and when calculating to the standards of the board an additional coefficient.

APG utilization must be carried out both from the ecological safety point of view and from the point of view economic efficiency, because, in the production of well production, an undesirable amount of gas content accumulates in the annulus space, which, creating additional pressure, prevents the increase in inflow of well production. Excess gas content at the reception of the downhole pump results in a lower supply of well production and plant efficiency, since the presence of emulsified gas increases the volume of the mixture passing through the first operating stages of the pump and takes some of the energy supplied to the pump shaft, consuming it for gas bubble compression and full Their dissolution in oil.

The APG is pumped out using simple but effective technology [1], which is clearly illustrated in Figure 49.

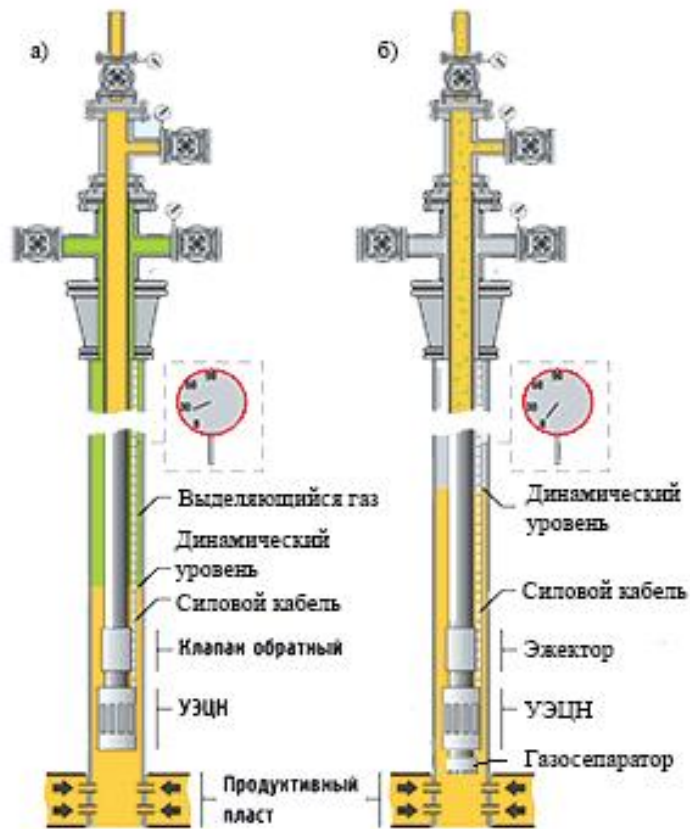


Figure 49 - Scheme of operation of the technology for pumping APG

The technology implies the use of an electric centrifugal pump (ESP) as a pumping unit. On a 1a shows us a well installation that is not designed for APG evacuation, it is evident that in such a system the dynamic level of well production is much lower than in Fig. 1b, this is due to the influence of APG that is in the annulus (in the figure it is highlighted in green). In this case, well production will arrive at the reception of the pump, but with a smaller inflow. Passing through the pump, borehole products enter the producing string and rise to the top of the wellhead, then fed to oil refineries.

Consider Figure 1b, there are depicts a scheme using the technology of evacuation of APG from the annulus and partial evacuation gas from the bottom of the well, by separation. At the input of the ESP there is a gas separator that is hydraulically connected to the annulus through a non-return valve. Its function is to deliver wells without excessive gas content. By separation, through the valve, the gas enters the annulus, which already contains APG initially.

The extraction of APG directly from the annular space is carried out with the help of a special device - an ejector, which creates in a low-pressure zone in the pipe in comparison with the annular space, which facilitates the evacuation of APG. After that, purging and injection of APG are mixed in the pipes and enter the discharge line. Thus, the dynamic level is increasing, and the growth in well production is increasing.

Proceeding from this, it can be concluded that the developed electric drive for APG evacuation is an actual task that allows to reduce emissions of harmful substances into the atmosphere, and also to increase economic efficiency in the production of wells.

The pump are a hydraulic machine that converts the mechanical energy of the drive motor into the energy of the fluid flow, which serves to move and create the head of liquids of all kinds, a mechanical mixture of liquid with solid substances or liquefied gases. The difference in pressure of the liquid at the outlet from the pump and the connected pipeline causes its movement. In the APG pumping technology, a pumping method is used to operate the well. To date, most of the electric drives used in this field do not imply the use of regulation by means of special devices. This is due to the simplicity and low cost of operation of the pump unit. In consequence of this, the electric motors operate on the limiting characteristics and are susceptible to rapid failure. The pumping unit does not require a large regulation range, and the well production is controlled by throttling the valves that are installed at the wellhead.

When throttling, the efficiency of the installation is significantly reduced and this method is extremely inefficient in terms of energy consumption. A comparison of the energy efficiency of an uncontrolled electric drive of a pumping unit and an electric drive, which is controlled by a frequency converter in detail, is given in Chapter 4.4. The choice of the frequency converter, as an engine control device, is due to the provision of the necessary energy efficiency and reliability. Based on the existing problem, it can be concluded that the use of a frequency-controlled electric



drive in oil production technology, and in particular, the evacuation of APG from the annular space, is an actual solution.

ESP it is the installation of the electric centrifugal pump is a submersible, scraper-free pumping unit of the blade type. According to the number of wells in which such pumps operate, they are inferior to SHG installations, but in terms of the amount of oil produced by them, the ESP is unrivaled. ESPs produce about 80% of all oil in Russia.

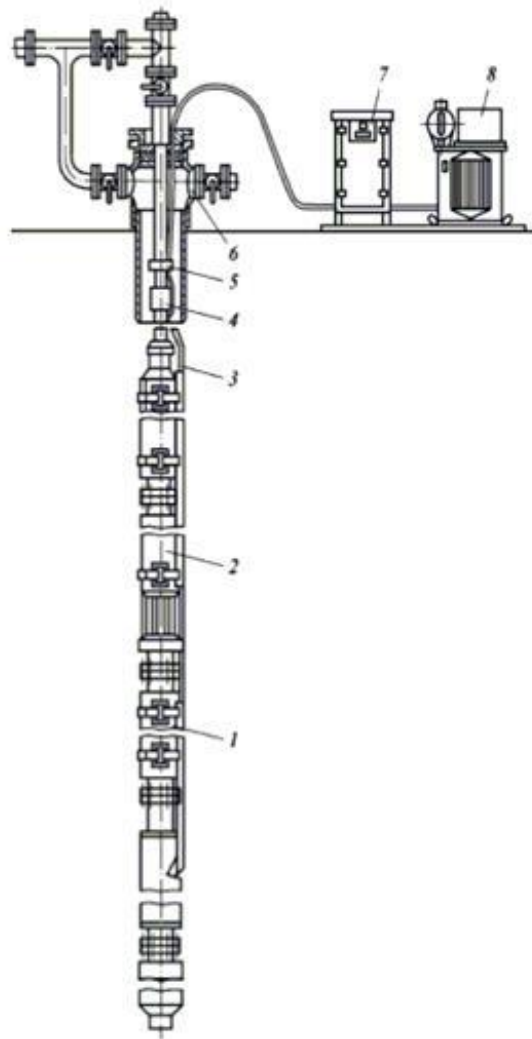


Figure 50 - Diagram of the installation of an electric centrifugal pump

The installation of a submersible centrifugal pump (Figure 50) consists of a submersible unit. The submersible unit includes a multi-stage electric centrifugal pump 3, a hydroprotection 2 and an electric motor 1. It descends into the well on the

column 5, the cable 4, the outlet valve 6, the control station 7 and the power transformer 8. Electricity from the supply transformer and control station by cable is fed to the electric motor, with the rotor of which the electric centrifugal pump shaft is connected through the keyed connections and drives the electric pump shaft.

Above the pump there is a reverse ball valve, which facilitates the start-up of the installation after idle time and prevents the reverse rotation of the motor rotor under the influence of the liquid column in the producing string at stops, and also to determine the tightness of the producing string, above the check valve - the drain valve. When they are lifted and to facilitate the killing of the well. The work of the pump is to create a centrifugal force that occurs when the impeller blades are exposed to a liquid. Under the action of the centrifugal force, the liquid will be thrown from the center of the wheel to the periphery. This will cause a depression in the central part of the wheel, and pressure will rise at the periphery, as a result which is the liquid from the pump will flow into the pressure line and simultaneously start to flow into the pump from the suction pipe. Thus, there is a continuous supply of liquid by a centrifugal pump from the suction to the pressure line.

### **Conclusion**

In this graduation thesis, a regulated electric drive of a submersible pumping unit designed for pumping associated petroleum gas was designed and studied. In our case, the system developed is used to control the installation of an electric centrifugal pump, an electromechanical converter in which is an asynchronous submersible motor.

The calculation and selection of the power equipment of the system regulated electric drive are made, static and dynamic characteristics for the converter-motor system are constructed.

The calculation characteristics of the electric drive was confirmed by data obtained during simulation simulation in the Matlab Simulink software environment. After that, additional adjustments were made and studies were carried out, which showed high reliability and energy efficiency of the developed electric drive.

The use of frequency-controlled electric drive in the technology of pumping associated petroleum gas and operation of the well allows to increase the efficiency of the electric centrifugal pump installation. Electric motors controlled by frequency converters are less susceptible to emergency operation modes that arise as a result of overloads, since transients during start-up and operation under load proceed more smoothly than engines directly started.

The conducted researches have shown that for accomplishing the same task the regulated electric drive consumes 40% less electricity than the electric drive, which is started directly.

As a result work done, a system for the controlled electric drive of a submersible pumping unit for pumping associated petroleum gas was obtained that meets the terms of reference and can be used in real projects that address the problem of utilization APG and pumping out borehole products using ESPs.

In the section of social responsibility, an analysis was made possible harmful and dangerous factors, and ways of their elimination were developed. Without attention, there were no emergencies. The most likely emergencies that could arise from the operation of the electric centrifugal pump installation were considered. The earthing loop of the building is designed to protect against accidents in the supply network, by which it will be possible to prevent electric shock to workers and reduce the risk of fires.

In the section of financial management and resource efficiency, design cost calculations were performed in accordance with the schedule for the execution of design work. The calculation by the definition of economic efficiency and the payback period the project gave a positive result. The project, estimated cost of 178 million rubles, will pay off in 6 years without taking into account the profit from utilization of associated petroleum gas.

### Приложение 3

Таблица 15 – Календарный план-график

№	Вид работ	$T_{k,i}$ , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ															
			Февр			Март			Апр			Май			Июнь			
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление и утверждение технического задания	3,5	■															
2	Подбор и изучение материалов по теме	19,6		■	■	■	■	■	■									
3	Изучение уже существующих решений в данной области	6,2					■	■	■									
4	Изучение зарубежной литературы	6,2						■	■	■								
5	Выбор направления исследований	1,7								■	■							
6	Календарное планирование работ по теме	0,98								■								
7	Расчет параметров оборудования	12								■	■	■	■					
8	Разработка системы регулирования	3,4									■	■	■					
9	Исследование по части «Социальная ответственность»	2,8													■	■	■	
10	Исследование по части	2,8																■

