

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Частотно-регулируемый привод центробежного насоса для перекачивания криогенной жидкости

УДК 62-83-523:621.67

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А8Ж	Майгатов Семен Евгеньевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Тимошкин В.В.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН ШБИП ТПУ	Гасанов Магеррам Али оглы	д-р экон. наук		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Тютеева П.В.	к.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать в повседневной жизни и в профессиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества, в том числе при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в практической деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
УК(У)-10	Способен принимать обоснованные экономические решения в различных областях жизнедеятельности
УК(У)-11	Способен формировать нетерпимое отношение к коррупционному поведению
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности
ОПК(У)-2	Способен разрабатывать алгоритмы и компьютерные программы, пригодные для практического применения
ОПК(У)-3	Способен применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач
ОПК(У)-4	Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин
ОПК(У)-5	Способен использовать свойства конструкционных и электротехнических материалов в расчетах параметров и режимов объектов профессиональной деятельности
ОПК(У)-6	Способен проводить измерения электрических и неэлектрических величин применительно к объектам профессиональной деятельности
Профессиональные компетенции	
ПК(У) -1.	Способен проводить сбор и анализ данных для проектирования объектов профессиональной деятельности (ПД)
ПК(У) -2.	Способен составить конкурентно-способные варианты технических решений при проектировании объектов профессиональной деятельности
ПК(У) -3.	Способен проводить проектирование в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных методов
ПК(У) - 4.	Способен контролировать техническое состояние объектов профессиональной деятельности, организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт по имеющейся технической документации
ПК(У) - 5.	Способен осваивать вводимые в эксплуатацию объекты профессиональной деятельности по имеющейся технической документации

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

Инженерная Школа Энергетики

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение школы (НОЦ) Отделение электроэнергетики и электротехники

Специализация Электропривод и автоматика

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Тютеева П.В.
 (Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
5А8Ж	Майгатов Семен Евгеньевич

Тема работы:

Частотно-регулируемый привод центробежного насоса для перекачивания криогенной жидкости	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является насосная установка «Vanzetti DSM 230» для заправки криогенной емкости.</p>
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор технической литературы, содержащий описание оборудования, применяемого для заправки криогенных емкостей; 2. Выбор силового оборудования системы; 3. Расчет статических характеристик асинхронного двигателя; 4. Исследование динамических характеристик электропривода; 5. Проработка разделов финансового менеджмента и социальной ответственности; 6. Прodelать соответствующие выводы по данной работе.
--	--

<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Презентация</p>
--	---------------------------

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Основной раздел ВКР</p>	<p>Тимошкин В.В.</p>
<p>Финансовый менеджмент...</p>	<p>Гасанов Магеррам Али оглы</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Черемискина М.С.</p>

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

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент ОЭЭ</p>	<p>Тимошкин Вадим Владимирович</p>	<p>к.т.н.</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>5А8Ж</p>	<p>Майгатов Семен Евгеньевич</p>		

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

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника Уровень образования: бакалавр Отделение Электроэнергетики и электротехники Период выполнения: осенний / весенний семестр 2021 /2022 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН

выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
21.02.22	Анализ исходных данных для исследования	10
25.02.22	Технологический процесс волочения	10
04.03.22	Выбор и описание электроприводов	10
04.04.22	Расчет основных параметров и характеристик двигателя.	10
22.04.22	Функциональная схема электропривода	10
29.04.22	Математическое описание асинхронного двигателя как объекта управления	10
10.05.22	Система автоматического регулирования электропривода	10
23.05.22	Имитационная модель регулируемого асинхронного электропривода	10
26.05.22	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	10
31.05.22	Социальная ответственность	10
		100

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тимошкин Вадим Владимирович	к.т.н., доцент		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

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

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа		ФИО	
5А8Ж		Майгатов Семен Евгеньевич	
Школа	Инженерная Школа Энергетики	Отделение (НОЦ)	Электроэнергетика и электротехника
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Тема ВКР:

<i>Частотно-регулируемый привод центробежного насоса для перекачивания криогенной жидкости</i>	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при эксплуатации. 	<p><i>Объектом исследования:</i> электропривод центробежного насоса для заправки криогенной жидкости.</p> <p><i>Область применения:</i> использование в конструировании мощных холодильных установок.</p> <p><i>Рабочая зона:</i> полевые условия.</p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> электропривод центробежного насоса для заправки криогенной жидкости.</p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> заправка сжиженного природного газа транспортных средств, промышленная эксплуатация объекта, производство СПГ.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие эргономические требования. – Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ(ред. от 09.03.2021) – ТОО Р-200-23-95. Основная профессиональная охрана труда
<p>2. Производственная безопасность при эксплуатации проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов 	<p>Вредные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Неудовлетворительный микроклимат; – Повышенный уровень шума на рабочем месте; – Повышенный уровень вибрации; – Недостаточная освещенность рабочей зоны; <p>Опасные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Электропоражение
<p>3. Экологическая безопасность при эксплуатации проектного решения</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Воздействие на атмосферу: загрязнение

	<p>отходами производства (токсичные пары);</p> <ul style="list-style-type: none"> – Воздействие на гидросферу: продукты жизнедеятельности персонала; – Воздействие на литосферу: утилизация комплектующих частей персонального компьютера, люминесцентных ламп, макулатуры.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации проектного решения	<ul style="list-style-type: none"> – Возможные ЧС: пожар, техногенные катастрофы, ураганы, наводнения; – Наиболее типичные ЧС: пожар, взрыв (при контакте с окислителями).
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А8Ж	Майгатов Семен Евгеньевич		

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

Студенту

Группа	ФИО
5А8Ж	Майгатов Семен Евгеньевич

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	ОЭЭ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Тема ВКР:

Частотно-регулируемый привод центробежного насоса для перекачивания криогенной жидкости	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием предприятия.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Районный коэффициент – 1,3. Накладные расходы – 16%
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды: 30,2%
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	SWOT - анализ.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Планирование работ и оценка их выполнения. Разработка диаграммы Ганта. Бюджет проекта.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение интегрального показателя ресурсоэффективности.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
<ol style="list-style-type: none"> Матрица SWOT Диаграмма Ганта Основные показатели эффективности НИ 	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН ШБИП	Гасанов Магеррам Али оглы	д-р экон. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А8Ж	Майгатов Семен Евгеньевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 94с., 36 рисунков, 19 таблиц, 25 источника. Ключевые слова: электропривод центробежного насоса, скалярное управление, асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, преобразователь частоты, насос. Объектом исследования является электропривод центробежного насоса для заправки криогенной емкости.

Цель работы – Расчет и моделирование частотно-регулируемого электропривода центробежного насоса для заправки криогенной емкости.

В результате исследования был разработан частотно-регулируемый электропривод центробежного насоса «Vanzetti DSM 230». Достигнутые технико-эксплуатационные показатели: полностью соответствующие заданию. Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2016 на листах белой бумаги формата А4 с помощью программных средств MATLAB Simulink, Mathcad 15.0.

ВВЕДЕНИЕ.....	13
1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС.....	15
1.1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЗАВОДА ПО СЖИЖЕНИЮ ГАЗА	15
1.2. ОБЗОР НАСОСОВ ДЛЯ ЗАПРАВКИ КРИОГЕННОЙ ЖИДКОСТИ	17
1.3. ОСОБЕННОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ	20
1.4. ОПИСАНИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ.....	22
2 РАСЧЕТ И ВЫБОР СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	25
2.1 ВЫБОР НАСОСА	25
2.2 ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ	25
2.4 ВЫБОР АППАРАТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ	29
2.5 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПРОСАДКИ НАПРЯЖЕНИЯ И ПЕРЕКОСА ФАЗ В СЕТИ	29
3 СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	31
3.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	31
3.2 РАСЧЕТ ЕСТЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	35
3.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА И ВИДА СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ЦН	40
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА	43
4.1. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ.....	43
4.2. ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЯМОГО ПУСКА АД ОТ СЕТИ ПРИ РЕАКТИВНОЙ НАГРУЗКЕ.....	51
4.3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗОМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ПЧ-АД ПРИ ПУСКЕ И ТОРМОЖЕНИИ С ЗАДАТЧИКОМ ИНТЕНСИВНОСТИ БЕЗ ВОЛЬТ ЧАСТОТНОЙ ДОБАВКИ.	53

4.4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗОМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ПЧ-АД ПРИ ПУСКЕ И ТОРМОЖЕНИИ С ЗАДАТЧИКОМ ИНТЕНСИВНОСТИ С ВОЛЬТ ЧАСТОТНОЙ ДОБАВКОЙ.....	55
5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	58
5.1. ОЦЕНКА КОММЕРЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА И ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОЗИЦИИ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ.....	58
5.1.1. ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	58
5.1.2. SWOT-АНАЛИЗ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ЗАПРАВКИ КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ.....	60
5.2.1. СТРУКТУРА РАБОТ В РАМКАХ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	63
5.2.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРУДОЕМКОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ.....	65
5.3.5. НАКЛАДНЫЕ РАСХОДЫ.....	74
5.3.6. ФОРМИРОВАНИЕ БЮДЖЕТА ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА.....	74
Вывод по главе «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ».....	77
6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	78
ВВЕДЕНИЕ.....	78
6.1. ПРАВОВЫЕ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ.....	79
6.2. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ.....	80
6.3. АНАЛИЗ ОПАСНЫХ И ВРЕДНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ И ОБОСНОВАНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ИХ УСТРАНЕНИЮ.....	80
6.3.2. ПОВЫШЕННЫЙ УРОВЕНЬ ШУМА НА РАБОЧЕМ МЕСТЕ.....	82
6.3.3. ПОВЫШЕННЫЙ УРОВЕНЬ ОБЩЕЙ ВИБРАЦИИ.....	82
6.3.5. ЭЛЕКТРОПОРАЖЕНИЕ.....	84
6.4. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ.....	85
6.5. БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ.....	86

6.5.1. Анализ ЧС, которые могут произойти при проведении исследований	87
Заключение по главе «Социальная ответственность»	88
Заключение	90
Список литературы	92

Введение

На сегодняшний день на любом производстве основная доля электроэнергии потребляется электродвигателями. Приводные системы насосов, вентиляторов и прочих систем с периодической нагрузкой жизненно необходимы предприятиям.

Большое количество электродвигателей требует большого количества электротрат, следовательно, первой должен стоять вопрос о снижении расходов на электроэнергию. Анализируя расходы некоторого предприятия, можем прийти к выводу, что решить такую задачу можно способом применения более совершенного оборудования или оптимизацией расходов электроэнергии.

Электроприводы служат для приведения в движение основных компонентов механизма. Самыми распространенными двигателями являются электроприводы с короткозамкнутым ротором. Большая популярность была получена благодаря двум составляющим: относительная невысокая стоимость и простая сложность конструкции.

Из самых важных недостатков, в первую очередь, необходимо упомянуть о тяжелом пуске при включении к сети и затрудненном регулировании скорости вращения ротора. Благодаря совокупности положительных и отрицательных сторон, АД с КЗ ротором активно применяются в насосных станциях водоснабжения, канализационных и отопительных системах.

Насосные установки имеют относительно невысокое КПД, а значит потребляемая электроэнергия не дает желаемого результата. Учитывая, что электроприводы данных установок являются нерегулируемыми, то факты использования электроэнергии и, естественно, огромное энергопотребление при изменении технологического процесса нерациональны.

Главная задача криогенных установок – получение чистейшего сжиженного природного газ. Очистка включает в себя несколько этапов.

Происходит первичная фильтрация и нагнетение сырьевого газа. Следующим шагом избавляются от двуокиси углерода. Газ сжимается в компрессоре, происходит удаление влаги и углекислоты. С помощью холодильного компрессора температура достигает -160°C . Сам процесс достаточно энергоемкий. Каждый этап требует значительного количества времени. Однако на выходе получается значительный объём и высокое качество продукта.

На таком производстве особое внимание уделяют используемым материалам при производстве, транспортировке и хранении, так как низкие температуры способны отрицательно влиять на физико-механические свойства материалов.

Цель данной выпускной квалификационной работы – разработка электропривода центробежного насоса по заправке криогенной жидкости, расчет и подбор параметров необходимых для моделирования данной установки в среде MATLAB Simulink.

1. Технологический процесс

1.1. Анализ технологического процесса завода по сжижению газа

Важность сжиженного природного газа для всего человечества возрастает с каждым годом. Главной причиной такого поведения является сокращение мирового запаса углеводородных полезных ископаемых, в особенности угля и нефти. Использование СПГ имеет экономическую и экологическую целесообразность. Основную часть газа составляет метан (не менее 93%), другие газы, такие, как диоксид углерода, кислород, сероводород, этан, бутан, пропан и прочее, также имеются, но благодаря высококлассной очистке их содержание не превышает 0.04% на каждое соединение. Газообразный метан на выходе охлаждается до -160 °С, что приводит к уменьшению объёма в 600 раз и переходу в жидкое агрегатное состояние.

Транспортировку газа на средние расстояния осуществляют двумя основными способами: прокладывая трубопровода и непосредственное сжижение газа с последующей транспортировкой удаленным потребителям.

Суровые погодные условия в северных географических районах позволяют снизить энергопотребление в ходе сжижения, к тому же позволяют доставлять СПГ с меньшими потерями, т.е. меньшим нагревом жидкости с последующим испарением. Это является преимуществом при его изготовлении на территории России.

Сырьевой природный газ под давлением 1,10 Мпа, температурой 0 -20°С вступает в установку предварительной подготовки сырьевого газа, проходит через трубопроводный фильтр, отсечный клапан и клапан регулирования давления. В фильтре сырьевого газа происходит очистка от больших частиц примеси, после чего попадает в блок очистки природного газа от двуокиси углерода на теплообмен с очищенным воздухом, а последующий сепаратор сырьевого газа позволяет избавиться от малых капель и других частиц примеси.

Вода в природном газе часто может привести к следующим серьезным последствиям: гидрат, образующийся водой и природным газом, может забивать трубопровод и влиять на процесс охлаждения и сжижения. Т.е. при низких температурах газ переходит в жидкое состояние, а вода кристаллизуется. С помощью абсорбционных колонн отделяют воду на молекулярных ситах, газ проходит через пылевой фильтр и отправляется в холодильник.

Регенерационный газ – это природный газ, отделенный из сырьевого газа, который поступает в нагреватель до 240°C после осушения и холодильника, после чего достигает дна осушительной колонны для регенерации, где завершается процесс абсорбции.

Попадая в охладитель регенерационного газа, охлаждается до 40°C и снова проходит через охладитель для достижения температуры до 10°C. Далее проходит через сепаратор регенерационного газа, где газ уходит в осушительную колонну, а жидкость в сепаратор тяжелых углеводородов. Полученные углеводороды утилизируются, а свободная вода поступает в установку очистки.

Природный газ, очищенный от примеси, входит в верх холодильника, охлаждается до -160°C и превращается в жидкость, откуда подается в резервуар для снижения давления. С помощью сепаратора газ при -50°C очищается от углеводородов, которые будут прерывисто дренированы из системы.

Сжиженный в холодильнике природный газ прямо подается в резервуар, откуда откачивается погрузочным насосом в погрузочный рукав. В зоне погрузки располагается одно погрузочное место, где имеются жидкофазный и газофазный штуцер. При заправке цистерны СПГ, газофазный природный газ будет возвращаться в резервуар через трубопровод для поддержания балансирования давления между резервуаром и цистерной.

На территории России не так много компаний занимаются сжижением природного газа. На территории Сибири эту нишу забрала «Сибирь – энерго»,

расположенная в Кемеровской области, в городе Новокузнецк. В июне 2017 года введена в эксплуатацию первая очередь завода по сжижению природного газа производственной мощностью 1,5 тонны СПГ в час.

Завод спроектирован и изготовлен «под ключ» в модульном исполнении на основе высокотехнологичного MRC-процесса, обеспечивающего 100%-е сжижение сырьевого газа, высокую энергоэффективность процесса и гибкость производства. Все это делает данный завод уникальным, не имеющим на сегодняшний день аналогов в Российской Федерации среди сопоставимых по производительности объектов.

На территории Кузбасса находится большое количество разрезов по добыче угля и полезных ископаемых, учитывая эту специфику СПГ используется в качестве альтернативного топлива для средне- и крупнотоннажной самосвальной карьерной техники угледобывающих предприятий.

Для обеспечения доставки производимого СПГ и организации его заправки в качестве моторного топлива в транспортные средства клиентов компанией на сегодняшний день эксплуатируются криогенные передвижные автогазозаправщики, оборудованные колонкой выдачи СПГ и системой учета топлива и криогенными цистернами объемом от 18 до 36,6 м³ [1].

1.2. Обзор насосов для заправки криогенной жидкости

В криогенной технике, зачастую, применяют различные насосы для перекачки криогенной жидкости:

- насосы в общепромышленном исполнении для перекачивания воды в системах оборотного водоснабжения градирен, охладительных прудов, систем охлаждения компрессоров и конденсаторов,
- насосы в общепромышленном исполнении для перекачивания смазочных масел в системах смазки компрессоров,
- насосы для перекачивания агрессивных жидкостей, например, водных растворов солей NaCl и Ca₂Cl₃, этиленгликоля,

используемых в качестве промежуточных теплоносителей при отрицательных температурах,

- насосы для перекачивания сжиженных газов (аммиака, пропана, бутана, метана, природного сжиженного газа),
- насосы для перекачивания криогенных жидкостей [2].

Криогенный насос должен обладать безмасляным вакуумом и большой скоростью откачки, чтобы СПГ не имел возможности испаряться. Существуют несколько основных типов криогенных насосов:

- Криогенные вакуумные насосы;
- Центробежные криогенные насосы;
- Криогенный насос поршневой;
- Насос с вакуумной изоляцией.

Криогенные вакуумные насосы используют двухступенчатые криорефрижераторы, которые работают по циклу Гиффорда-МакМагона, где в качестве хладагента используется газообразный гелий [2].

Центробежные криогенные насосы имеют ряд преимуществ:

- Компактный насос с легким редуктором;
- Низкий уровень шума;
- Высокоэффективный защитный кожух, полый вал.

Поршневые криогенные насосы служат для подачи сжиженной двуокиси углерода из криогенных или изометрических резервуаров под давлением. Имеют укомплектованный шкафом и панелью управления для более точной настройки и регулировки насосной установки. Данный тип насосов располагается вблизи с резервуаром, на улице.

Для того, чтобы сделать автоматизированным весь процесс регенерации, а также обеспечения автоматического переключения между работающими насосами во время процесса откачки применяют контроллеры для управления системами криогенных насосов.

Криогенный насос с вакуумной изоляцией используют для трубопроводов с пенной изоляцией или мягких вакуумных трубопроводов, что позволяет противостоять влажным испарениям и заморозкам.

Как правило, принцип работы криогенного насоса заключается в конденсации. Вода достаточно просто улавливается криогенными поверхностями, а при 130 К достигается желаемое равновесие в давлении пара, которое обеспечивает эффективность более 99% во время откачивания до отметки давления ниже 10-10 Торр. Функционирование поверхности такого насоса в диапазоне от 65 до 90 К характеризуется 100%-й эффективностью при откачивании воды и газовых скоплений с достаточно высокой молекулярной массой, а также паров в любой вакуумной системе. Именно в этом диапазоне конденсат выглядит как твердое вещество, похожее на лед.

Процессу конденсации не должна препятствовать теплота газа сквозь соприкосновение его молекул с охлажденными поверхностями, поэтому процесс сопровождается отводом ненужной энергии. Количество теплоты, удаляемой из газов при температуре, близкой к комнатной, весьма низкое. Для азота конверсия газа при 300 К в твердое вещество при 20 К — это сложный, хотя и мгновенный процесс [3].

В данной дипломной работе представлен насос марки «Vanzetti». На предприятии он служит для перекачки и закачки сжиженных газов в технику, которая и доставит СПГ в нужную точку. На рисунке 1.1 представлен криогенный насос «Vanzetti».



Рисунок 1.1. Криогенный насос «Vanzetti»

Основными проблемы конструирования криогенных насосов являются:

- Конструктивные материалы должны сохранять свои свойства при агрессивно низких температурах;
- применяемые материалы должны быть способны к агрессивным перекачкам различных жидкостей;
- опоры и уплотнения должны быть несмазываемыми, узлами сухого трения (графитовые, фторопластовые, композиционные материалы);
- насосные агрегаты должны соответствовать требованиям по пожарно- и взрывобезопасным условиям эксплуатации;
- насосные агрегаты должны быть герметизированными;
- необходимо исключить опасность возникновения кавитации.

1.3. Особенности центробежных насосов

Конструкции центробежных насосов разнообразны, но имеют основные элементы: одно или же несколько рабочих колес, подвод, подшипниковые узлы, различные уплотнения. Остальные элементы вариативны, зависит от

необходимого применения. Принцип действия центробежного насоса довольно прост. Жидкая среда через подвод попадает в спиралевидный корпус, где он соединен со спиралевидным колесом. Благодаря центробежным силам, жидкость во вращающемся рабочем колесе, между лопатками самого колеса, поступает в отвод, и далее выходит через напорный патрубок. Таким образом происходит подача жидкостей [5].

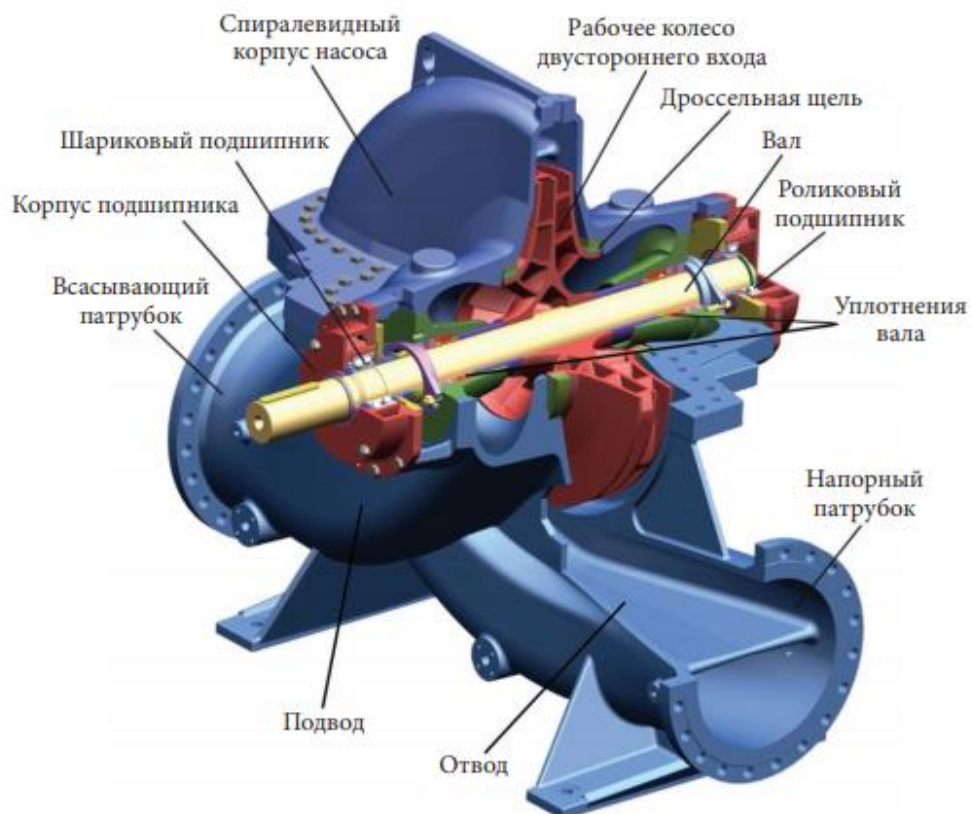


Рисунок 1.2. Устройство центробежного насоса

1.4. Описание и технические характеристики насосной установки

В данной дипломной работе используется насосная установка «Vanzetti» Model: DSM 230. Данный агрегат представлен на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3. Насосная установка DSM 230

В конструкцию установки входят такие элементы как: Асинхронный двигатель с КЗ ротором «AV30r 160MB», центробежный насос, преобразователь частоты «Schneider electric Altivar 61».

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором переменного тока AV30r 160MB имеет взрывонепроницаемую оболочку и соответствуют требованиям безопасности для работы в зонах 1, 2, 21, 22 с содержанием горючих смесей газов и пыли категории 2D, 2G, 2GD, группы IIВ / IIС. Короткозамкнутый тип ротора, энергоэффективность стандартного (IE1) и высокого (IE2) класса. Широкий модельный ряд одно- и трехфазных двигателей, включающих также два типа двухскоростных версий исполнения [5].

Корпус изготовлен из чугуна, закрытый дизайн отлично защищает чувствительные компоненты от попадания пыли, грязи и воды. Воздушное

охлаждение внешней поверхности от крыльчатки, установленной на основном валу, или от вентиляционного блока принудительного действия (для габаритов 100 - 355 мм). Большой выбор монтажных решений, опциональных возможностей и аксессуаров для оптимального подбора конфигурации [6].

Номинальные параметры двигателя представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Номинальные параметры двигателя

Мощность, кВ	Фазное напряжение, В	Частота сети, Гц	Частота вращения, об/мин	Cos ϕ , о.е.
15	400	60	3540	0,9

Насос центробежный «Vanzetti» DSM 230 номинальные параметры которого представлены в таблице 1.2:

Таблица 1.2. Номинальные параметры насоса

Напор $H_{\text{мех}}$, м	Рабочий диапазон Q , $\frac{\text{м}^3}{\text{сут}}$	Скорость вращения $n_{\text{мех}}$, $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	КПД, %
82	1336	3540	66

Представленный преобразователь частоты Schneider Electric Altivar 61 приведен на рисунке 1.4:



Рисунок 1.4. Преобразователь частоты Schneider Electric

Данный ПЧ соответствует интересам компании, может использоваться в вентиляторных и насосных установках. Позволяет благодаря регулировке потребляемой энергии уменьшить затрачиваемую при эксплуатации энергию.

2 Расчет и выбор силового оборудования системы регулируемого электропривода

2.1 Выбор насоса

Согласно техническому заданию ЭЦН должен обеспечивать:

1. Напор $H - 82$ м;
2. Подача сжиженного газа $Q - 1923 \frac{\text{м}^3}{\text{сут}}$;

При плотности криогенной жидкости $\gamma = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Выбираем ЦН типа DSM 230. Каталожные данные выбранного ЦН при номинальной частоте питающего напряжения 60 Гц приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Каталожные данные DSM 230

Рабочий диапазон $Q, \frac{\text{м}^3}{\text{сут}}$	Напор $H_{\text{мех}}, \text{м}$	Скорость вращения $n_{\text{мех}}, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$
1152-2150	82,03	3540

Из каталожных данных видно, что при подаче $1923 \frac{\text{м}^3}{\text{сут}}$, КПД насоса 66%, а максимальная мощность, потребляемая насосом $P_{\text{мех}} = 13,4$ кВт. [8]

По мощности, потребляемой насосом, рассчитывается мощность погружного электродвигателя.

2.2 Выбор двигателя

При выборе мощности двигателя, определяем мощность на валу механизма. Примем $K_з = 1,05$ о. е. – коэффициент запаса.

$$P = K_з \cdot P_{\text{мех}} = 1,05 \cdot 14,1 = 14,8 \text{ кВт.} \quad (2.1)$$

Выбираем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором переменного тока «Сепр АВ30г 160МВ» с взрывонепроницаемой оболочкой и соответствующим требованиям.

Таблица 2.2. Каталожные данные Сепр АВ30г

Номинальная мощность $P_{дв}$, кВт	Номинальное линейное напряжение $U_{л}$, В	Номинальный фазный ток I_1 , А	КПД $\eta_{дв}$, о. е.	Коэффициент мощности $\cos\varphi$, о. е.	Номинальное скольжение s_n , о. е.
15	690	26,8	0,75	0,9	0,073

Пересчет значения номинального тока по формуле:

$$I_1 = \frac{P_{дв}}{\sqrt{3}U_{л} \cdot \cos\varphi \cdot \eta_{дв}} = \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 690 \cdot 0,9 \cdot 0,75} = 24,5 \text{ А.} \quad (2.2)$$

2.3 Выбор преобразовательного устройства для системы регулируемого привода

ПЧ «Schneider electric Altivar 61» обеспечивает управление, защиту и регулирование частоты вращения центробежного насоса номинальной мощностью от 0,75 до 800 кВт.

Имеющиеся функции, встроенные в ПЧ, позволяют адаптировать его к различным электрическим установкам. При разработке данного преобразователя, производитель учитывал необходимость электромагнитной совместимости и уменьшения гармонических составляющих тока.

Серия преобразователей частоты Altivar 61 предназначена для двигателей мощностью от 0,75 до 800 кВт с тремя типами сетевого питания:

- однофазное, 200 - 240 В, от 0,37 до 5,5 кВт;
- трехфазное, 200 - 240 В, от 0,37 до 75 кВт;
- трехфазное, 380 - 480 В, от 0,75 до 630 кВт;
- трехфазное, 500 - 690 В, от 1,5 до 800 кВт [7].




Преобразователи частоты низкого напряжения для асинхронных и синхронных электродвигателей		
ATV12	ATV320	ATV61
		
Области применения		
Простые производственные механизмы	Сборочные линии, конвейеры, фасовочно-упаковочное, грузоподъемное, дерево- и металлообрабатывающее оборудование	Насосные и вентиляционные установки (отопление, вентиляция и кондиционирование)
Диапазон мощности в однофазной сети 200-240 В, кВт		
0,18-2,2	0,18-2,2	-
Диапазон мощности в трехфазной сети 380 В, кВт		
-	0,37-15	0,75-75
Степень защиты		
IP20	IP20, IP65, IP66	IP21, IP55
Выходная частота электропривода, Гц		
0,1-400	0,1-599	0,5-200
Закон управления для асинхронных электродвигателей		
Скалярное управление U/f Векторное управление в разомкнутой системе Квадратичный закон для центробежных агрегатов	Скалярное управление U/f по 2 и 5 точкам Векторное управление в разомкнутой системе Энергосберегающий режим Квадратичный закон для центробежных агрегатов	Скалярное управление U/f по 2 точкам Векторное управление в разомкнутой системе Энергосберегающий режим Квадратичный закон для центробежных агрегатов
Закон управления для синхронных электродвигателей		
-	Векторное управление в разомкнутой системе	Векторное управление в разомкнутой системе
Перегрузка		
150% номинального тока	150% номинального тока	110% номинального тока
Количество предустановленных скоростей		
8	16	7
Количество входов/выходов (DI – дискретные входы, DO – дискретные выходы, AI – аналоговые входы, AO – аналоговые выходы, RO – релейные выходы, STO – дискретные входы активации функции безопасного отключения)		
DI – 4, DO – 1, AI – 1, AO – 1, RO – 1	DI – 6, AI – 3, AO – 1, DO – 1, RO – 2, STO – 1	DI – 3, AI – 2, AO – 1, RO – 2
Встроенные коммуникационные порты		
Modbus	Modbus и CANopen	Modbus
Коммуникационные порты, доступные как дополнительная опция		
-	DeviceNet, Profibus DP, Modbus TCP, Ethernet/IP, EtherCAT, Profinet, Powerlink	LONWORKS, METASYS N2, APOGEE FLN, BACnet
Карты расширения и встроенный контроллер		
-	Встроенный контроллер с программированием в среде ATV Logic	-
Средства отображения информации		
Встроенный дисплей и выносной графический терминал с IP54 или IP65	Встроенный дисплей и выносной графический терминал с IP54	Встроенный дисплей и выносной графический терминал с IP54 или IP65
Средства настройки		
Встроенный дисплей и выносной графический терминал, программное обеспечение SoMove		
Средства переноса конфигурации		
Загрузчик, мультзагрузчик, программное обеспечение SoMove		
Стандарты и сертификаты		

Рисунок 2.1. Параметры ПЧ «Schneider electric Altivar»

Предусмотрено четыре режима пуска:

- плавный;
- с синхронизацией;
- толчковый;
- с раскачкой.

Во всех режимах (кроме режима «с раскачкой») увеличение частоты на выходе ПЧ происходит с темпом, определяемым отношением заданной

частоты к времени разгона. Изменение напряжения на выходе ПЧ с ростом частоты происходит в соответствии с заданной вольт-частотной характеристикой [7].

Режим разгона «Плавный». В этом режиме изменение частоты происходит равномерно с заданным темпом.

Режим разгона «с синхронизацией». В этом режиме увеличение частоты на выходе ПЧ происходит с заданным темпом до заданного значения, поддерживается в течение заданного времени, затем увеличение частоты продолжается с прежним темпом до конечного значения. Таким образом, полное время достижения заданной частоты будет равно сумме времени разгона и времени синхронизации.

Режим разгона «Толчковый». В этом режиме увеличение частоты на выходе происходит с установленным темпом до заданного значения, напряжение на выходе увеличивается до повышенного «напряжения толчков», соответствующего данной частоте по вольт-частотной характеристике. Время действия повышенного напряжения определяется частотой толчков, количество толчков задается с помощью программы. В конце происходит увеличение напряжения и частоты по заданной характеристике.

Режим разгона «с раскачкой». При тяжелых условиях пуска двигатель запускается сначала в прямом направлении, затем в обратном и затем снова в прямом. Изменение выходной частоты происходит с заданным темпом, количество циклов «раскачки» задается с помощью программы.

На интерфейсе оператор видит следующие параметры:

- режим работы: ручной или автоматический;
- состояние: «Работа» или «Стоп»;
- время работы;
- направление вращения ЭД: прямое или обратное;
- выходная частота;
- фазные токи ЭД и ПЧ;
- дисбаланс токов;

- порядок чередования фаз напряжений на выходе ПЧ;
- напряжение и ток звена постоянного тока ПЧ;
- выходное напряжение ПЧ;
- линейные напряжения на входе ПЧ;
- выходное напряжение на вторичной обмотке трансформатора;
- активная и полная мощность на выходе ПЧ;
- коэффициент мощности ПЧ;
- загрузка ПЧ в процентах по отношению к номинальной активной мощности;
- температура охладителей силовых полупроводниковых приборов [7].

2.4 Выбор аппаратуры управления и защиты

При выборе преобразовательного устройства для системы регулируемого электропривода было отмечено, что ПЧ Schneider electric Altivar 61 также выступает в качестве средства управления и защиты.

ПЧ Schneider electric Altivar 61 имеет следующие виды защит:

- защита от «сухого хода»;
- защита от перегрузки ЭД;
- защита от КЗ;
- защита от недогрузки ЭД;
- контроль коэффициента мощности;
- защита от перенапряжения во входной сети;
- защита от дисбаланса токов [7].

2.5 Проектирование системы защиты от просадки напряжения и перекоса фаз в сети

При перекосе фаз наблюдается значительное снижение мощности трехфазных электрических приборов. На векторной диаграмме векторы фаз сдвигаются по отношению друг к другу на произвольные углы, напряжение фаз имеют различные значения, а линейные напряжения при этом останутся прежними и равны 380 В.

Замечено, что ПЧ «Altivar 61» также выступает в качестве средства защиты от перекоса фаз и просадки напряжения.

В ПЧ существует функция опции «Уставки и защиты» позволяют программными средствами устанавливать защиту от перегрузки, недогруза, дисбаланса токов фаз, времятоковой перегрузки. Таким образом, реализуется защита от просадки напряжения и перекоса фаз [7].

3 Статические характеристики асинхронного двигателя

3.1 Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя

Основные каталожные данные двигателя приведены в таблице 2.2. Принимается кратность пускового тока $K_t=6$ о.е., кратность максимального момента $K_M=2$ о.е.

Для аналитических расчет Т-образная схема замещения является самой простой и оптимальной (рисунок 3.1.)

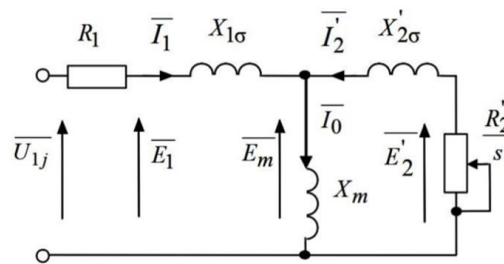


Рисунок 3.1. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующей представленной схеме замещения:

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

где $U_{1\phi}=U_L / 3^{1/2}=690 / 3^{1/2}=400$ В- фазное напряжение обмотки статора;

R_1 – активное сопротивление обмотки статора;

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

I_1 - ток обмотки статора;

E_1 - ЭДС обмотки статора;

R_2 - активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке

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

s - скольжение;

ω_0 - синхронная угловая скорость;

ω - угловая скорость асинхронного двигателя;

z_p - число полюсов;

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

E_m - ЭДС от главного магнитного потока машины;

E_2' - ЭДС обмотки ротора, приведенная к обмотке статора.

Векторная диаграмма токов, напряжений и ЭДС представлена на рисунке 3.2.

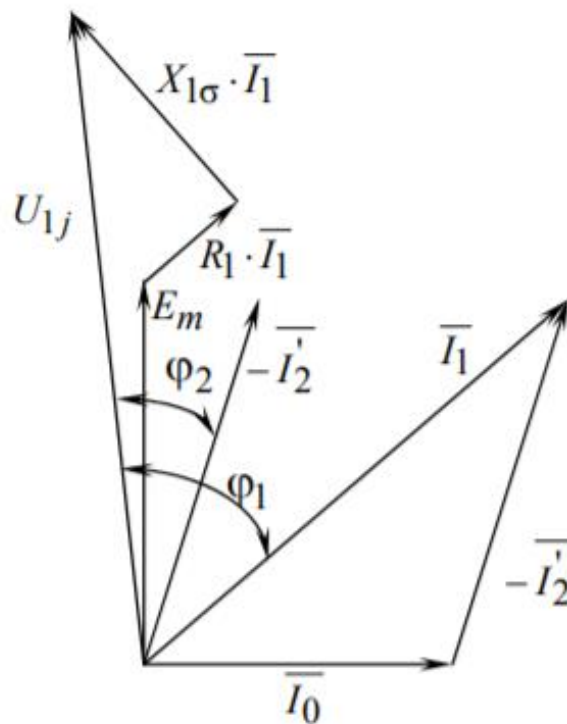


Рисунок 3.2. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Определение параметров АД по каталожным данным [10]:

Синхронная угловая частота вращения вала рассчитаем по формуле:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 3540}{30} = 370,707 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (3.1)$$

Номинальная угловая частота вращения вала:

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - s_H) = 370,707 \cdot (1 - 0,073) = 343,646 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (3.2)$$

Номинальный момент на валу рассчитаем по формуле:

$$M_H = \frac{P_{дв}}{\omega_H} = \frac{15000}{343,646} = 43,65 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.3)$$

КПД при частичной нагрузке рассчитаем по формуле:

$$\eta_{0,75} = \eta_H = 0,75 \text{ о.е.} \quad (3.3)$$

Коэффициент мощности при частичной нагрузке, согласно графику зависимости $\frac{\cos \varphi_{0,75}}{\cos \varphi_H}$ от $P_{дв}$ рассчитаем по формуле:

$$\cos \varphi_{0,75} = 0,99 \cos \varphi_H = 0,99 \cdot 0,9 = 0,891 \text{ о.е.} \quad (3.4)$$

Ток статора при частичной нагрузке рассчитаем по формуле:

$$I_{11} = \frac{0,75 \cdot P_{дв}}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \eta_{0,75} \cdot \cos \varphi_{0,75}} = \frac{0,75 \cdot 15000}{3 \cdot 400 \cdot 0,75 \cdot 0,891} = 14,918 \text{ А.} \quad (3.5)$$

Ток холостого хода АД рассчитаем по формуле:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left[\frac{0,75 \cdot I_{1H} \cdot (1 - s_H)}{(1 - 0,75 \cdot s_H)} \right]^2}{1 - \left[\frac{0,75 \cdot I_{1H} \cdot (1 - s_H)}{(1 - 0,75 \cdot s_H)} \right]^2}} = \sqrt{\frac{14,02^2 - \left[\frac{0,75 \cdot 26,8 \cdot (1 - 0,073)}{(1 - 0,75 \cdot 0,073)} \right]^2}{1 - \left[\frac{0,75 \cdot 26,8 \cdot (1 - 0,073)}{(1 - 0,75 \cdot 0,073)} \right]^2}} = 6,083 \text{ А.} \quad (3.6)$$

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

Критическое скольжение, выраженное из формулы Клосса:

$$s_K = s_H \cdot \frac{K_M + \sqrt{K_M^2 - [1 - 2 \cdot s_H \beta (K_M - 1)]}}{[1 - 2 \cdot s_H \beta (K_M - 1)]} \quad (3.7)$$

По формуле (3.7) рассчитаем критическое скольжение

$$s_K = 0,073 \cdot \frac{2 + \sqrt{2^2 - [1 - 2 \cdot 0,073 \cdot 1 \cdot (2 - 1)]}}{[1 - 2 \cdot 0,073 \cdot 1,3 \cdot (2 - 1)]} = 0,323 \text{ о.е.}$$

Расчет промежуточных коэффициентов для дальнейшего расчета параметров АД рассчитаем по формулам:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot K_I I_{1H}} = 1 + \frac{7,03}{2 \cdot 6 \cdot 26,8} = 1,021 \text{ о.е.} \quad (3.8)$$

$$A_1 = \frac{3U_{1\phi}^2(1-s_H)}{2C_1 \cdot K_M \cdot P_{дв}} = \frac{3 \cdot 400^2 \cdot (1 - 0,073)}{2 \cdot 1,021 \cdot 2 \cdot 15000} = 7,263. \quad (3.9)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,341^2} - 1,3} = 2,9 \text{ о.е.} \quad (3.10)$$

Активное сопротивление ротора, приведенное обмотке статора, рассчитаем по формуле:

$$R'_2 = \frac{A_1}{(\beta + \frac{1}{s_K}) C_1} = \frac{7,263}{(1 + \frac{1}{0,341}) \cdot 1,021} = 1,718 \text{ Ом.} \quad (3.11)$$

Активное сопротивление статора рассчитаем по формуле:

$$R_1 = C_1 R'_2 \beta = 1,021 \cdot 1,681 \cdot 1,3 = 1,736 \text{ Ом.} \quad (3.12)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания рассчитаем по формуле:

$$X_{кн} = \gamma C_1 R'_2 = 3,828 \cdot 1,021 \cdot 2,451 = 4,669 \text{ Ом.} \quad (3.13)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния ротора, приведенное к обмотке статора, рассчитаем по формуле:

$$X'_{2\sigma} = 0,58 \frac{X_{кн}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{4,668}{1,026} = 2,639 \text{ Ом.} \quad (3.14)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статора рассчитаем по формуле:

$$X_{1\sigma} = 0,42 X_{кн} = 0,42 \cdot 4,462 = 1,961 \text{ Ом.} \quad (3.15)$$

ЭДС ветви намагничивания в номинальном режиме:

$$E_{mн} = \sqrt{(U_{1\phi} \cos \varphi_n - R_1 I_{1н})^2 + (U_{1\phi} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n} - X_{1\sigma} I_{1н})^2}. \quad (3.16)$$

ЭДС ветви намагничивания в номинальном режиме рассчитаем по формуле (3.16):

$$E_{mн} = \sqrt{(400 \cdot 0,9 - 3,253 \cdot 26,8)^2 + (400 \sqrt{1 - 0,9^2} - 1,874 \cdot 26,8)^2} = 0,336 \cdot 10^3 \text{ В}$$

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания рассчитаем по формуле:

$$X_m = \frac{E_{mн}}{I_0} = \frac{0,353 \cdot 10^3}{7,03} = 55,245 \text{ Ом.} \quad (3.17)$$

Полученные расчетные параметры схемы замещения двигателя сведены в таблицу 5,

Таблица 3.1 – Расчетные параметры схемы замещения двигателя

R_1 , Ом	$X_{1\sigma}$, Ом	$X_{кн}$, Ом	R'_2 , Ом	$X'_{2\sigma}$, Ом	X_m , Ом
1,591	1,961	4,669	1,551	2,639	55,245

Индуктивность рассеяния статора рассчитаем по формуле:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2\pi f_1} = \frac{1,961}{2\pi \cdot 60} = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (3.18)$$

Индуктивность рассеяния ротора, приведенная к обмотке статора, рассчитаем по формуле:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2\pi f_1} = \frac{2,639}{2\pi \cdot 60} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (3.19)$$

Индуктивность ветви намагничивания рассчитаем по формуле:

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f_1} = \frac{55,245}{2\pi \cdot 60} = 0,146 \text{ Гн.} \quad (3.20)$$

Эквивалентная индуктивность цепи статора рассчитаем по формуле:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0,146 + 5,2 \cdot 10^{-3} = 0,151 \text{ Гн.} \quad (3.21)$$

Эквивалентная индуктивность цепи ротора, приведенная к индуктивности статора, рассчитаем по формуле:

$$L'_2 = L_m + L'_{2\sigma} = 0,146 + 0,007 = 0,153 \text{ Гн.} \quad (3.22)$$

Коэффициенты для расчета динамики АД рассчитаем по формулам:

$$K_r = \frac{L_m}{L'_2} = \frac{0,146}{0,153} = 0,954 \text{ о.е.} \quad (3.23)$$

$$A_r = \frac{R'_2}{L'_2} = \frac{1,551}{0,153} = 10,13 \text{ с}^{-1}. \quad (3.24)$$

$$L_3 = L_1 - \frac{L_m^2}{L'_2} = 0,151 - \frac{0,146^2}{0,153} = 0,011 \text{ Гн.} \quad (3.25)$$

$$R_3 = R_1 + R'_2 \cdot K_r^2 = 1,591 + 1,551 \cdot 0,954^2 = 4,05 \text{ Ом.} \quad (3.26)$$

$$K_m = \frac{3}{2} K_r \cdot z_p = \frac{3}{2} \cdot 0,954 \cdot 1 = 1,431 \text{ о.е.} \quad (3.27)$$

Полученные параметры индуктивностей и коэффициентов будут использоваться для расчетов динамики.

3.2 Расчет естественных характеристик

Основной выходной координатой силового электропривода является электромагнитный момент, значение которого для асинхронного двигателя определяется по выражению

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_\phi \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2 \right]}$$

Пересчет скольжения s на угловую скорость ω производится в соответствии с выражением:

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

Естественная механическая характеристика $\omega = f(M)$ (рисунок 3.3) получается при номинальных параметрах двигателя и располагается в первом квадранте. Все параметры были рассчитаны при расчете схемы замещения.

Характеристика имеет нелинейный вид и ее описывают 4 основные точки: **ХХ**, **номинальной работы**, **критического момента**, **пускового момента**.

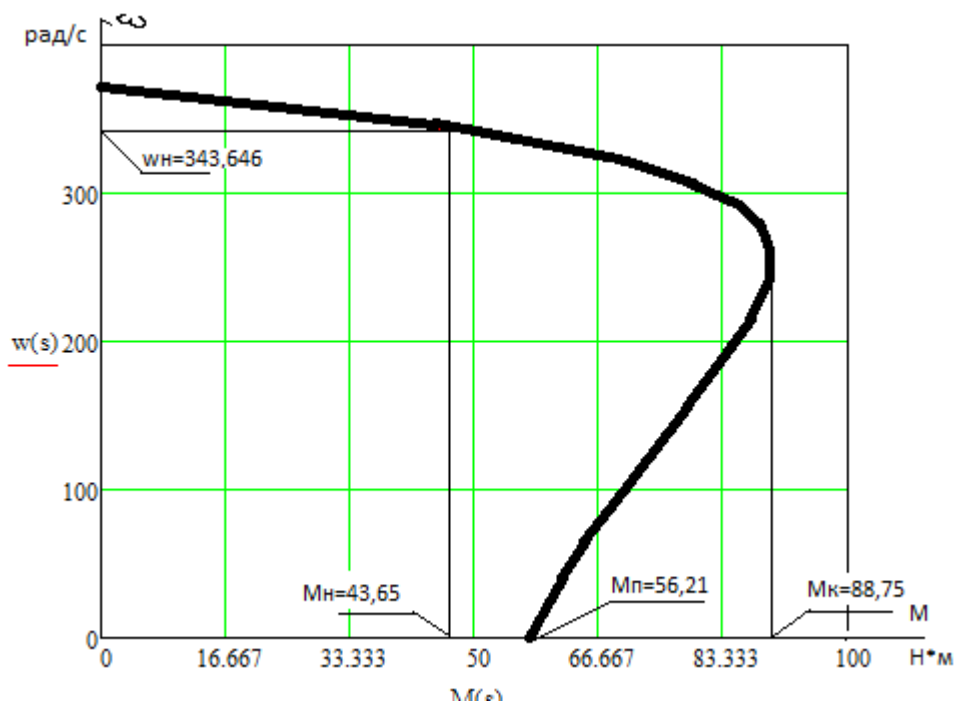


Рисунок 3.3. Естественная механическая характеристика

Номинальный электромагнитный момент рассчитаем по формуле:

$$M(s_H) = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H} \right)^2 + X_{кн}^2 \right]} \quad (3.28)$$

Расчитаем номинальный электромагнитный момент по формуле (3.28):

$$M(s_H) = \frac{3 \cdot 400^2 \cdot 1,551}{370,707 \cdot 0,073 \cdot \left[\left(1,591 + \frac{1,551}{0,073} \right)^2 + 4,669^2 \right]} = 45,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Естественная электромеханическая система $\omega = f(I)$ (рисунок 3.4) асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором получается при номинальных параметрах двигателя и рассчитывается по выражению

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

где

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}},$$

$$I_2'(s) = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}}.$$

Пересчет скольжения s на угловую скорость ω производится в соответствии с выражением:

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

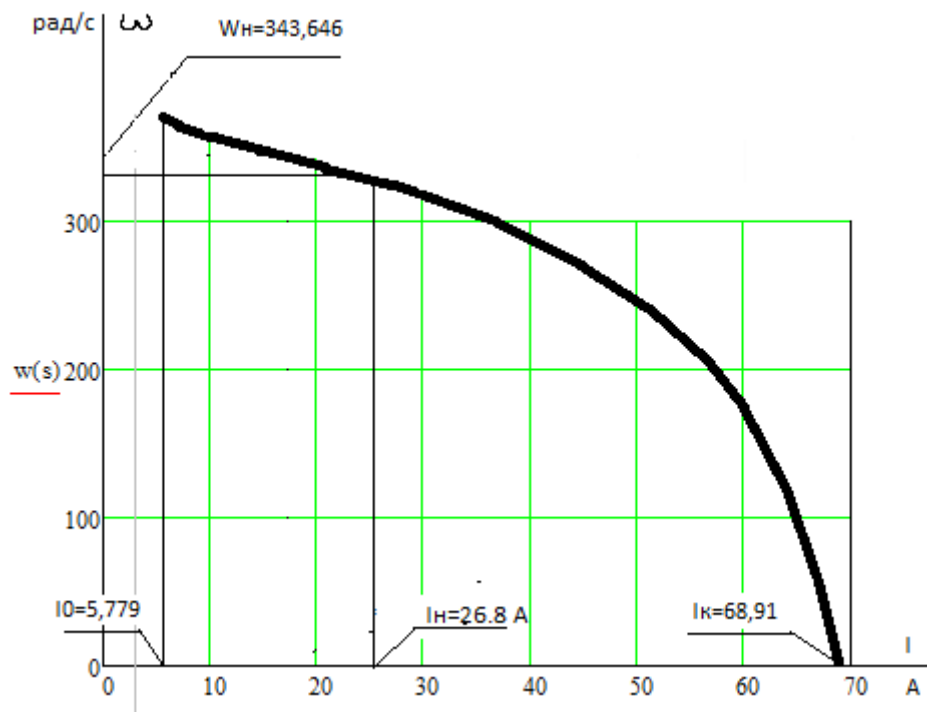


Рисунок 3.4. Естественная электромеханическая характеристика

Таким образом, получена электромеханическая характеристика, отражающая зависимость тока статора I от угловой частоты вращения ω .

Расчет искусственных характеристик при частотном управлении

По выбранному закону частотного управления $\frac{U_1}{f_1^2} = const$ строятся искусственные механические (рисунок 3.7) и электромеханическая (рисунок 3.8) характеристики при разных частотах системы ПЧ-АД по выражениям:

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

$$I_1(s) = \sqrt{I_{0j}^2 + (I'_2)^2 + 2 \cdot I_{0j} \cdot I'_2 \cdot \sin \phi_2}$$

где

$$I'_2(s) = \frac{U_{1j}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_m \cdot f_{1*}} \right)^2}};$$

$$\sin \phi_2(s) = \frac{X_{\text{кн}} \cdot f_{1*}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2}};$$

$$f_{1*} = \frac{f_1}{f_{\text{н}}}.$$

При уменьшении частоты изменяются реактивные сопротивления, фазное напряжение, угловая скорость вращения и ток ХХ.

Значения тока ХХ для каждой из частот определяются по выражению:

$$I_{0j}(f) = \frac{U_{1j}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2 \cdot f_{1*}^2}}.$$

Пересчет скольжения s на угловую скорость ω производится в соответствии с выражением:

$$\omega(s) = \omega_0 \cdot f_{1*} \cdot (1 - s).$$

Для построения искусственных характеристик необходимо построить вольт-частотную характеристику (рисунок 11) чтобы вычислить значение напряжения U_{1j} при любой частоте.

Коэффициент пропорциональности для заданного закона регулирования:

$$K = \frac{U_{1H}}{f_{1H}^2} = \frac{400}{60^2} = 0.111 \text{ о. е.} \quad (3.29)$$

Вольт-частотная характеристика тогда примет вид:

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

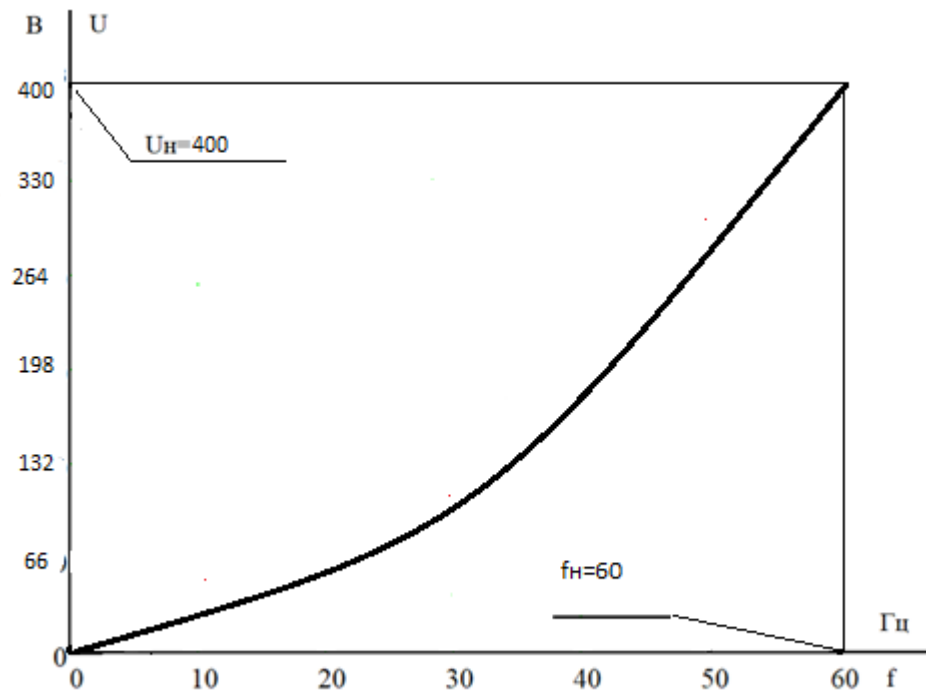


Рисунок 3.5. Вольт-частотная характеристика при законе $\frac{U_1}{f_1^2} = const$

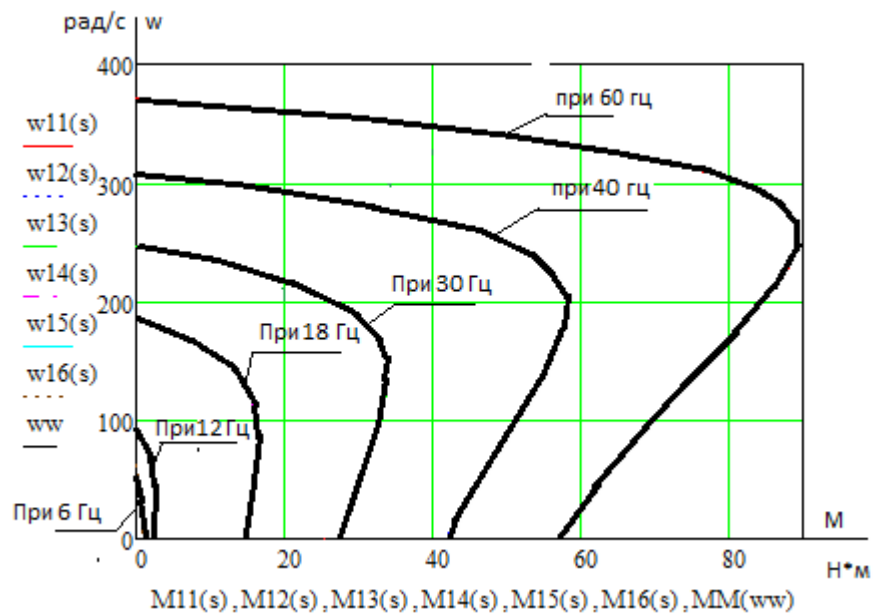


Рисунок 3.6. Искусственные механические характеристики при частотном регулировании

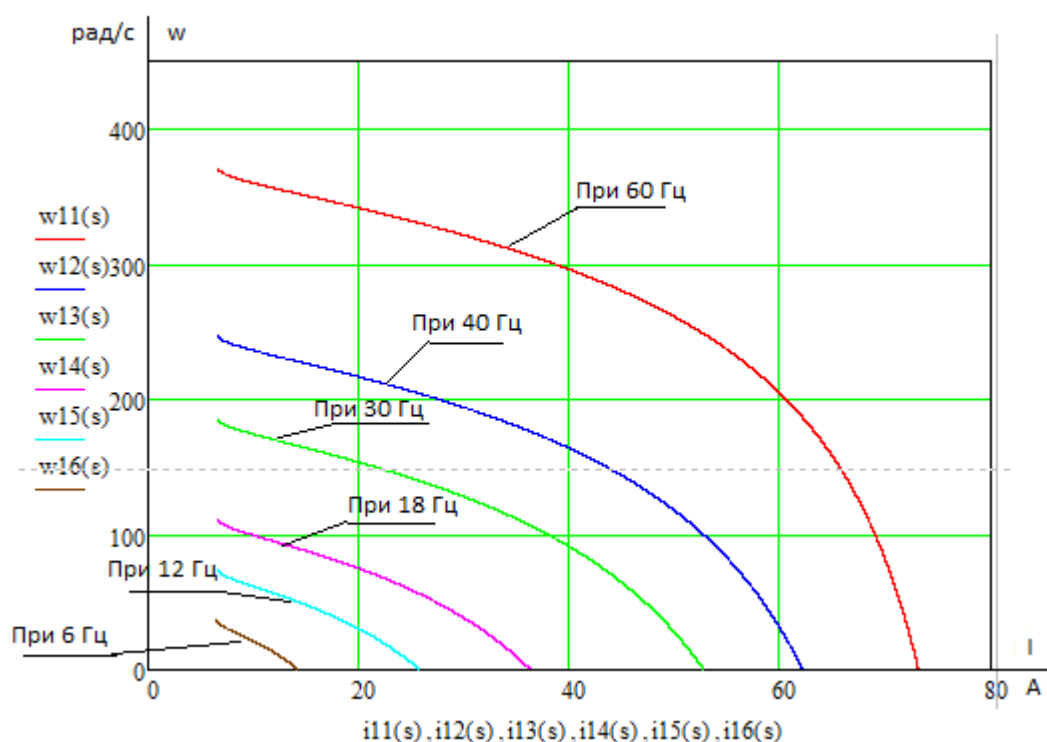


Рисунок 3.7. Искусственные электромеханические характеристики при частотном регулировании

Как видно из полученных искусственных механических характеристик, пусковой момент при малых частотах может оказаться слишком мал для пуска системы. Для этого необходимо определить статическую нагрузку ЦН.

3.3 Определение характера и вида статической нагрузки ЦН

Механическая характеристика двигателя рассчитана для номинального электромагнитного момента, то полная нагрузка должна учитывать момент трения двигателя.

Нагрузка имеет вентиляторный характер и для этого вида нагрузки был выбран закон регулирования $\frac{U_1}{f_1^2} = const.$

Для механизмов с вентиляторным типом нагрузки предполагается, что статический момент сопротивления на валу двигателя изменяется в зависимости от скорости вращения двигателя в соответствии с выражением [11]

$$M_c(\omega) = \Delta M_{c,дв} + (M_H - \Delta M_{c,дв}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2.$$

Построено семейство механических характеристик при частотном управлении на рисунке 14.

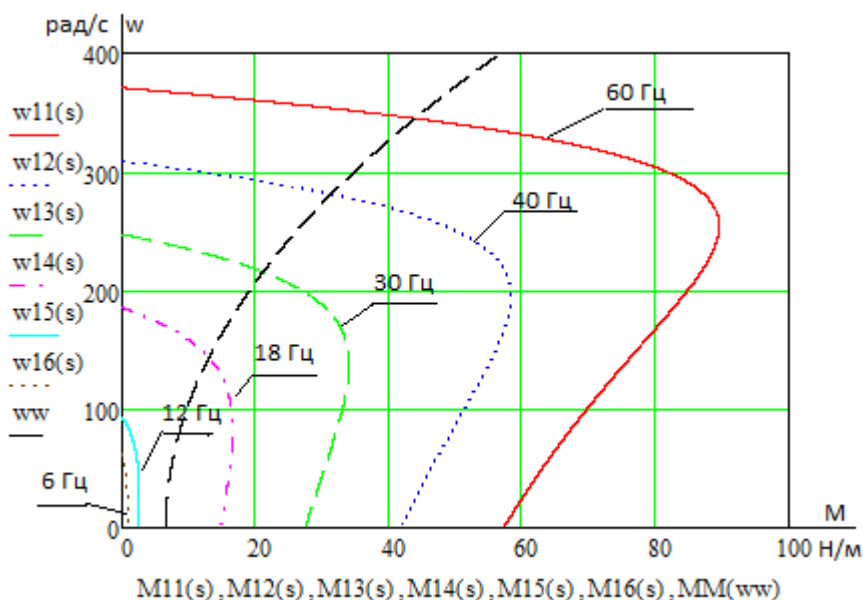


Рисунок 3.8. Семейство механических характеристик

Рассмотрение приведенных на рисунке 14 механических характеристик системы ПЧ-АД и нагрузки показывает, что при законе регулирования $\frac{U_1}{f_1^2} = const$ пуск системы с начальной частотой 6 и 12 Гц невозможен. Но при частоте 18 Гц двигатель пускается с двухкратным запасом по моменту и необходимый диапазон регулирования обеспечивается.

Чтобы обеспечить стабильность работы в области низких частот введем IR -компенсацию в структуру с датчиком тока или корректировку вольт-частотной характеристики [10]. Поскольку корректировка вольт-частотной характеристики $U(f)$ может быть осуществлена для конкретной точки характеристики, то и применять ее следует при работе двигателя с известной нагрузкой.

С целью увеличения пускового момента возьмем вольт – частотную характеристику и представим зависимость:

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

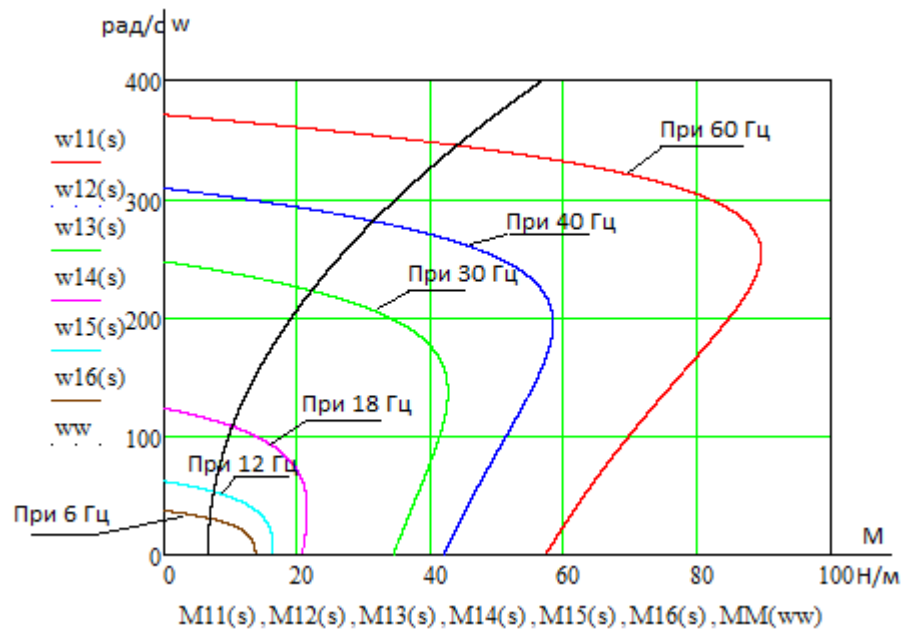


Рисунок 3.9. Механические характеристики $\omega(M)$ системы преобразователь – двигатель после коррекции вольт - частотной характеристики

4. Исследование динамических характеристик электропривода

4.1. Разработка имитационной модели

При составлении уравнений АД приводятся следующие допущения [12]:

1. Пренебрегаем потерями в стали, т.е. явлениями гистерезиса и вихревыми токами;
2. Не учитываем насыщение магнитопровода (насыщение может быть учтено косвенно путем использования так называемых «насыщенных» параметров, то есть параметров, определяемых при состоянии насыщения);
3. Не учитываем неравномерность воздушного зазора между телом ротора и статора и изменением магнитной проводимости, обусловленной наличием пазов при относительном перемещении сердечников;
4. Пренебрегаем высшими пространственными гармониками магнитного поля, то есть распределение магнитного поля каждой из обмоток вдоль окружности ротора и статора принято синусоидальным;
5. Считаем, что статор и ротор имеют симметричные трехфазные обмотки. Обмотка ротора приведена к числу витков обмотки статора, то есть число витков обмотки статора и ротора одинаково;
6. Принимаем сопротивления роторных обмоток одинаковыми и постоянными;
7. Принимаем сопротивления статорных обмоток одинаковыми и постоянными;
8. Не учитываем механические потери.

Произведем моделирование системы асинхронного двигателя с КЗ ротором в рабочей среде MATLAB Simulink.

Система дифференциальных уравнений для исследуемой математической модели АД в неподвижной, жестко связанной со статором системе координат α и β в операторной форме приводится ниже [11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{1\alpha}(t)}{dt} = \frac{1}{L_3} [u_{1\alpha}(t) - R_3 \cdot i_{1\alpha}(t) + K_r A_r \cdot \psi_{2\alpha}(t) + K_r z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{2\beta}(t)], \\ \frac{di_{1\beta}(t)}{dt} = \frac{1}{L_3} [u_{1\beta}(t) - R_3 \cdot i_{1\beta}(t) + K_r A_r \cdot \psi_{2\beta}(t) + K_r z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{2\alpha}(t)], \\ \frac{d\psi_{2\alpha}(t)}{dt} = R'_2 K_r \cdot i_{1\alpha}(t) - A_r \cdot \psi_{2\alpha}(t) - z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{2\beta}(t), \\ \frac{d\psi_{2\beta}(t)}{dt} = R'_2 K_r \cdot i_{1\beta}(t) - A_r \cdot \psi_{2\beta}(t) + z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{2\alpha}(t), \\ M_{\text{эм}}(t) = \frac{3}{2} K_r z_p \cdot (\psi_{2\alpha}(t) \cdot i_{1\beta}(t) - \psi_{2\beta}(t) \cdot i_{1\alpha}(t)), \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_{\text{эм}}(t) - M_c(t)). \end{array} \right.$$

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

$\psi_{2\alpha}(t), \psi_{2\beta}(t)$ – компоненты пространственных векторов мгновенного значения потока сцепления ротора в системе координат α и β ,

$J, z_p, \omega(t), M_c(t), M_{\text{эм}}(t)$ – момент инерции, число пар полюсов, мгновенное значение угловой скорости вращения, мгновенное значение момента нагрузки, мгновенное значение электромагнитного момента,

R_3, L_3, K_r, A_r – коэффициенты для расчета динамики, полученные ранее.

Полученные ранее значения индуктивностей фаз обмотки ротора и статора, а также индуктивности цепи намагничивания внесем в параметры двигателя:

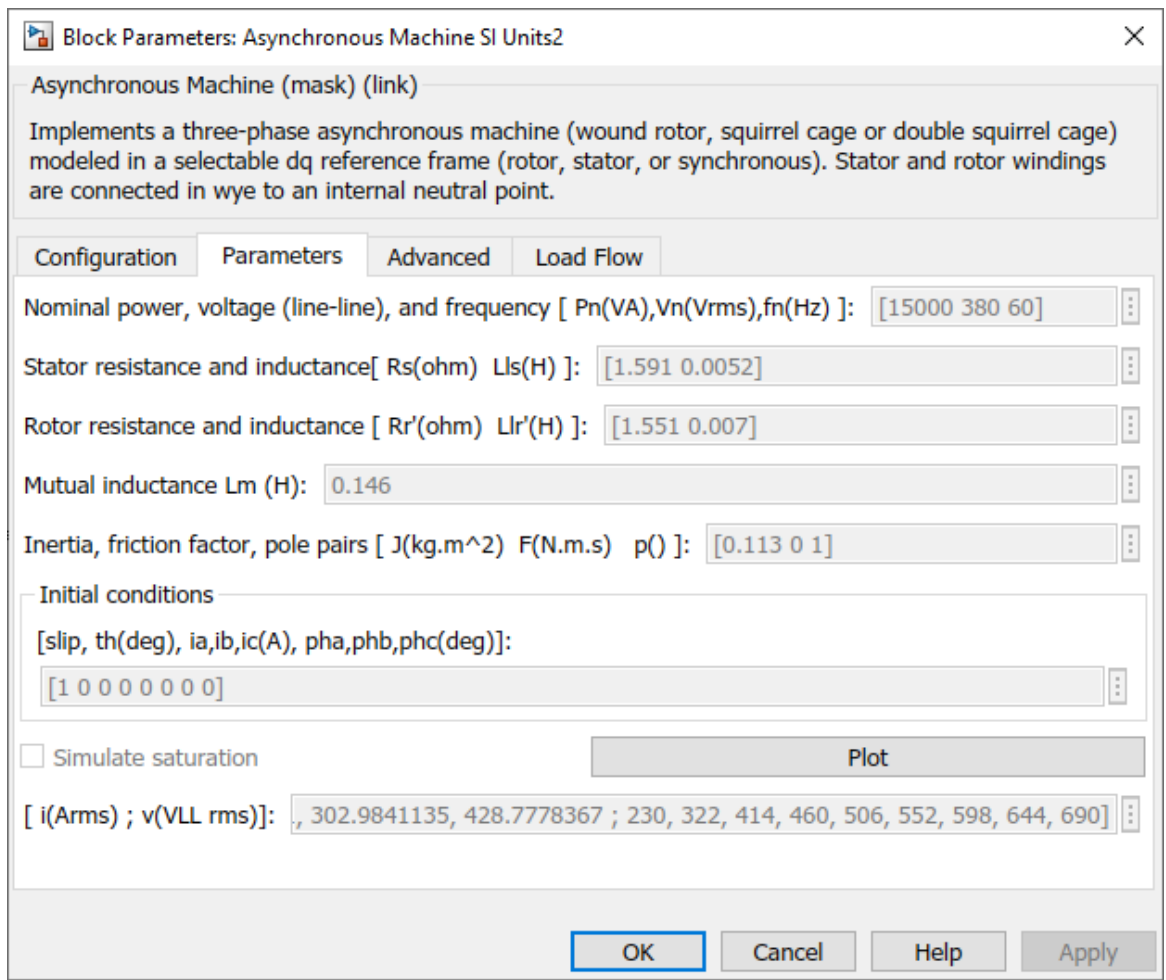


Рисунок 4.1. Параметры АД с КЗ

Stator resistance and inductance – сопротивление и индуктивность статора;

Rotor resistance and inductance – сопротивление и индуктивность ротора;

Mutual inductance L_m – индуктивность цепи намагничивания.

Параметры моделирования были заданы с помощью m-файла в командной строке MATLAB на основе предыдущих расчетов:

Параметры двигателя:

$f = 50$; Частота питающего напряжения;

$U_1 = 690$ Фазное напряжение;

$U_1 = 690 * \sqrt{3}$; Линейное напряжение;

$P_n = 15000$ Мощность двигателя;

$R_s = 1.591$ Активное сопротивление статора;

$R_r = 1.551$ Активное сопротивление ротора;

$L_{s_} = 1.961 / (2 \cdot \pi \cdot f)$ Индуктивность рассеяния обмотки статора;

$L_{r_} = 2.639 / (2 \cdot \pi \cdot f)$ Индуктивность рассеяния обмотки ротора;

$L_m = 55.245 / (2 \cdot \pi \cdot f)$ Индуктивность цепи намагничивания;

$$L_s = L_{s_} + L_m;$$

$$L_r = L_{r_} + L_m;$$

$$p = 2;$$

Количество полюсов;

$$J = 0.113$$

Момент инерции;

$$z_p = p / 2;$$

Число пар полюсов;

$$n = 35404$$

Номинальная скорость;

Расчет параметров имитационной модели АД:

$$K_r = L_m / L_r;$$

$$R_e = R_s + R_r \cdot K_r^2;$$

$$L_e = L_s - L_m^2 / L_r;$$

$$A_r = R_r / L_r;$$

$$W_{ref} = 2 \cdot \pi \cdot f;$$

$$K_m = (3 \cdot K_r \cdot z_p) / 2;$$

$$\omega = (\pi \cdot n) / 30;$$

$$M_n = P_n / \omega;$$

Параметры нагрузки:

$$M_0 = 0.15 \cdot M_n;$$

$$k = (M_n - M_0) / \omega^3.$$

Далее производим построение модели прямого пуска АД от сети, что изображено на рисунке 4.2.

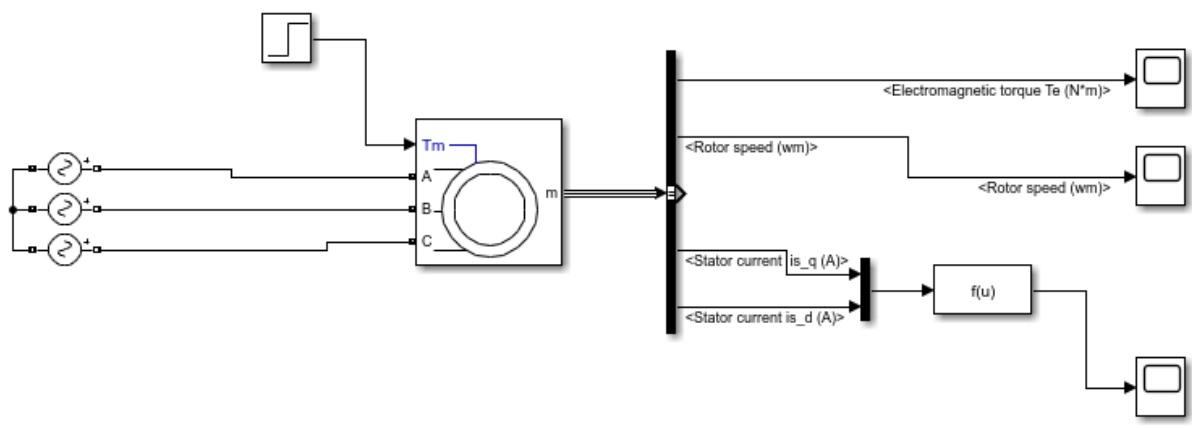


Рисунок 4.2. Имитационная модель прямого пуска АД

На рисунке 4.3 представлены переходные характеристики момента и скорости асинхронного двигателя на холостом ходу.

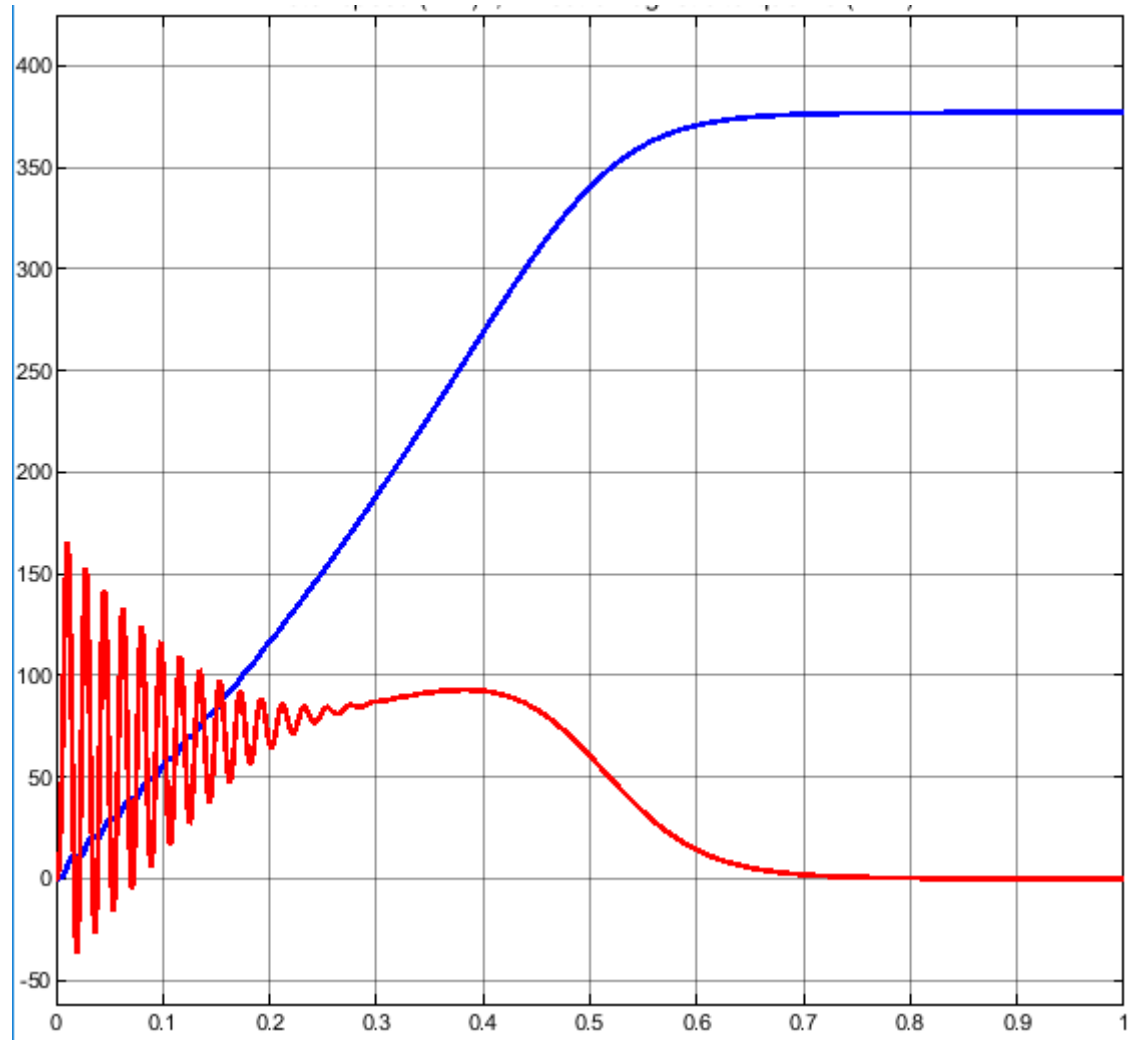


Рисунок 4.3. Прямой пуск на холостом ходу

Для оценки адекватности математической модели накидываем номинальный момент в момент времени 1 с. Получим переходные характеристики угловой скорости вращения (рисунок 4.4), тока статора (рис. 4.5), электромагнитного момента (рис. 4.6).

Задаем время наброса нагрузки, $t=1$ с.

На рисунках 19 и 20 при набросе нагрузки представлены переходные характеристики момента и скорости.

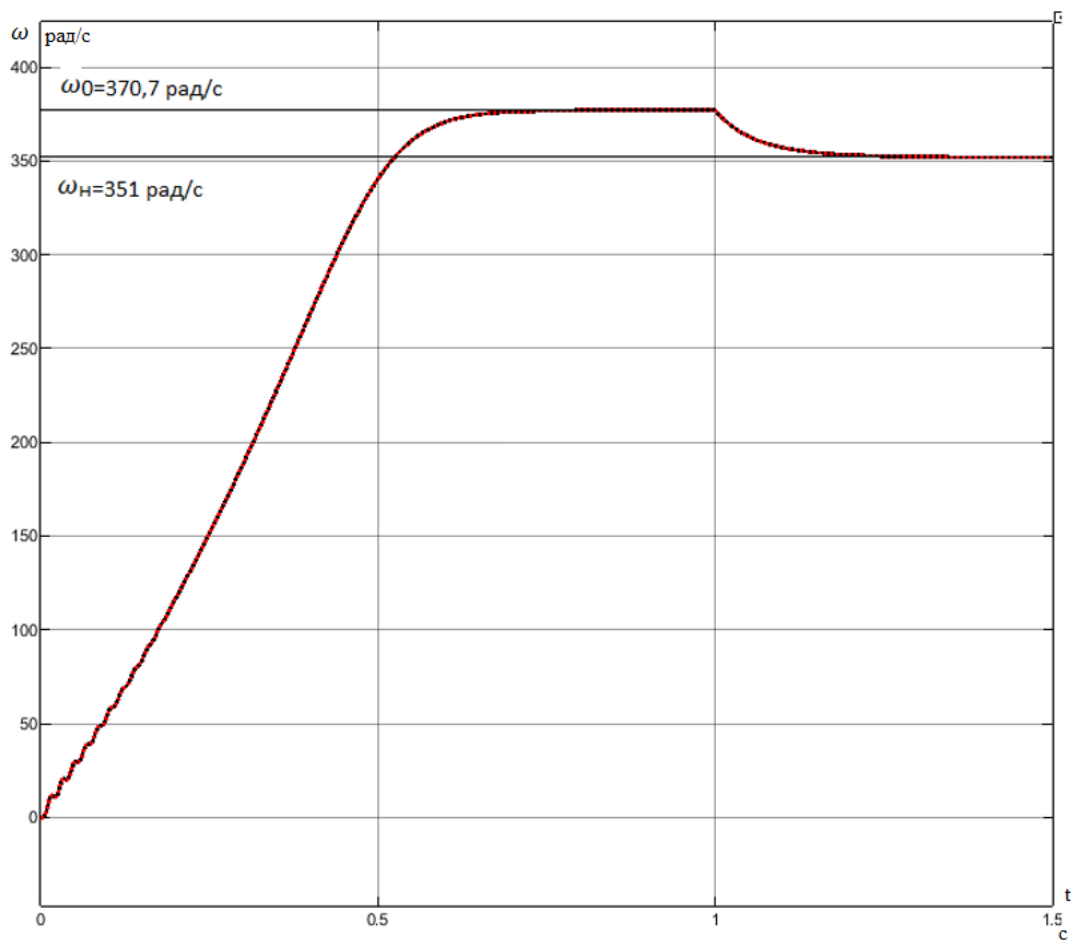


Рисунок 4.4. Переходный процесс угловой скорости вращения при набросе нагрузки

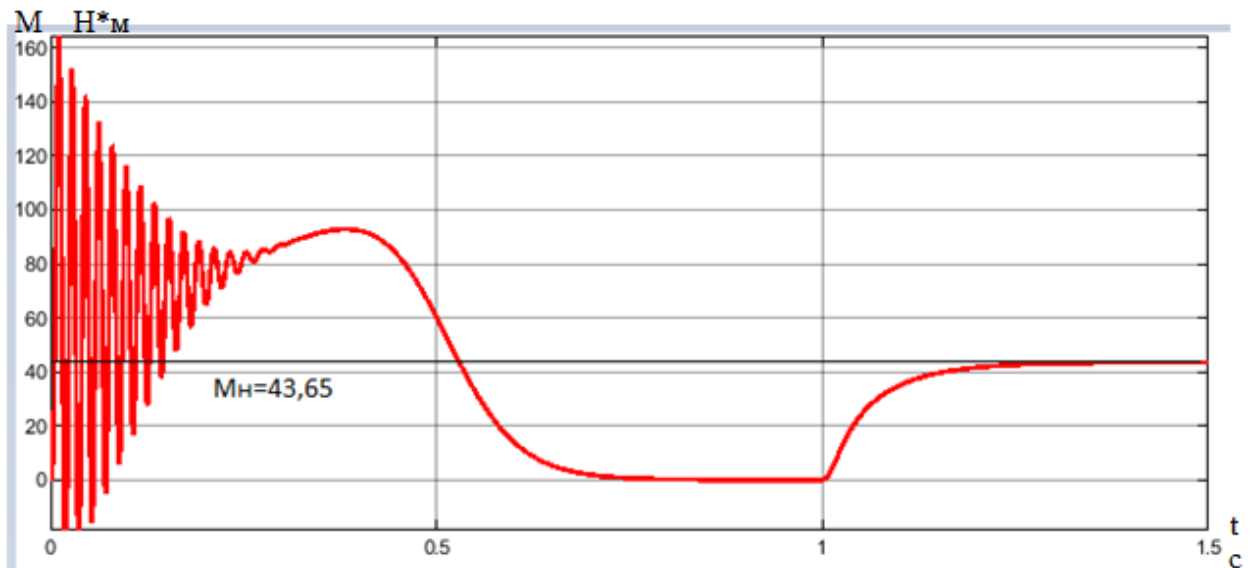


Рисунок 4.5. Переходный процесс электромагнитного момента при набросе нагрузки

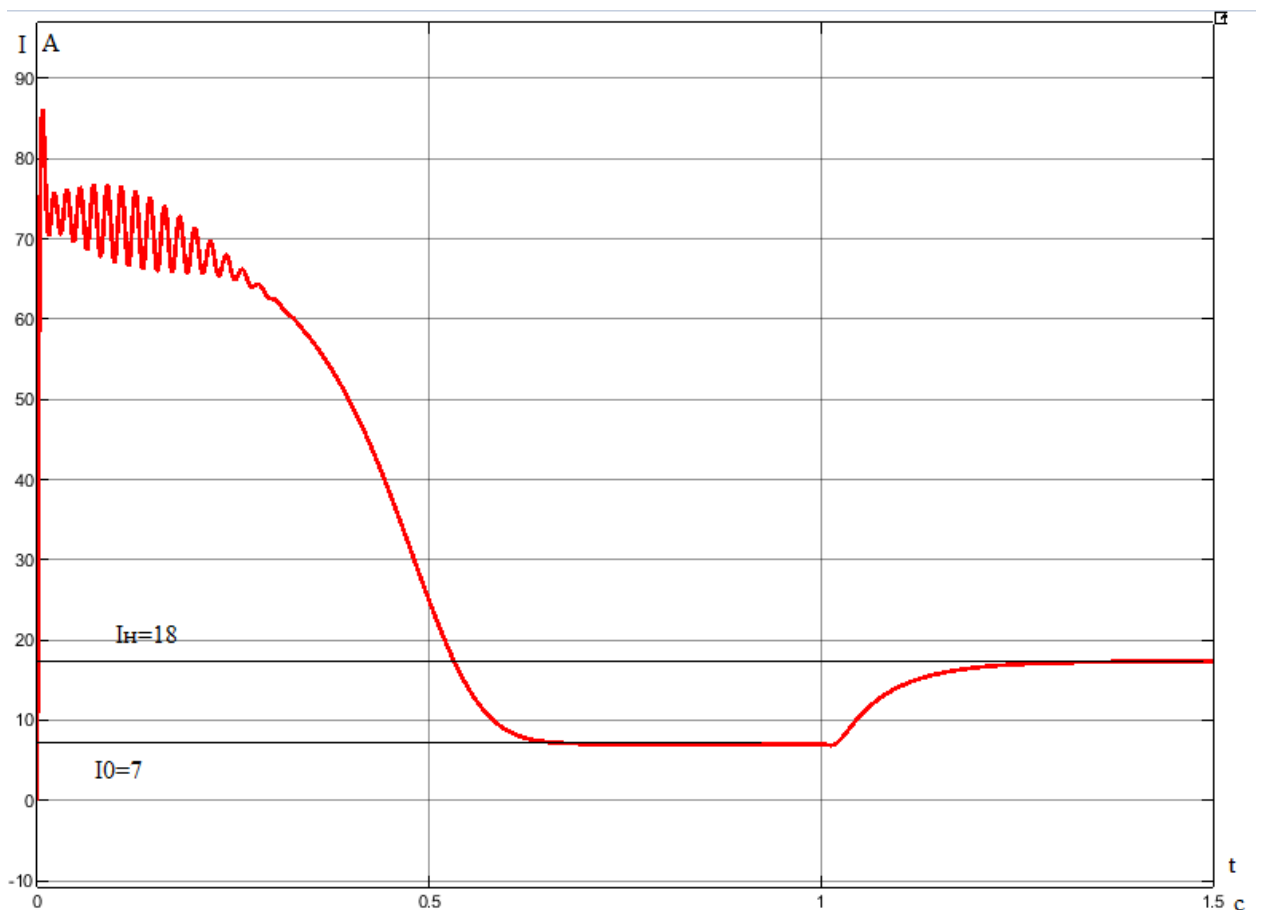


Рисунок 4.6. Переходный процесс тока статора при набросе нагрузки

Как видно из графиков переходных процессов модель асинхронного двигателя работает, но заметна разница между подсчитанными и полученными результатами. Связано это с некоторыми округлениями и

особенностью построенной модели. Погрешность небольшая, поэтому можем сделать вывод о том, что при номинальной частоте питающей сети двигатель выходит на номинальную скорость.

Исходя из полученных переходных характеристик, можно сказать что при пропорциональном уменьшении частоты и напряжения уменьшается величина номинальной скорости и время достижения этой скорости., а также уменьшается электромагнитный момент.

Насосную нагрузку представляем в MATLAB в виде следующей схемы:

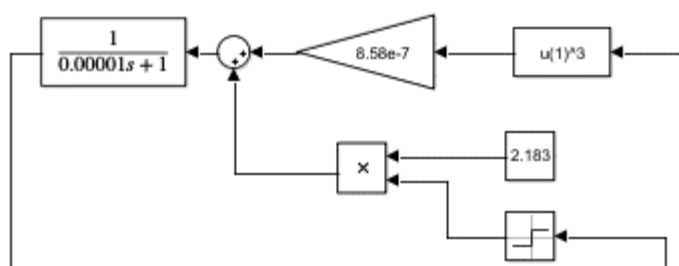


Рисунок 4.7. Имитационная модель насосной нагрузки с законом управления U/f^2

Преобразователь частоты состоит из выпрямителя и автономного инвертора напряжения, а также блока ШИМ. Имитационная модель представлена на рисунке 4.8.

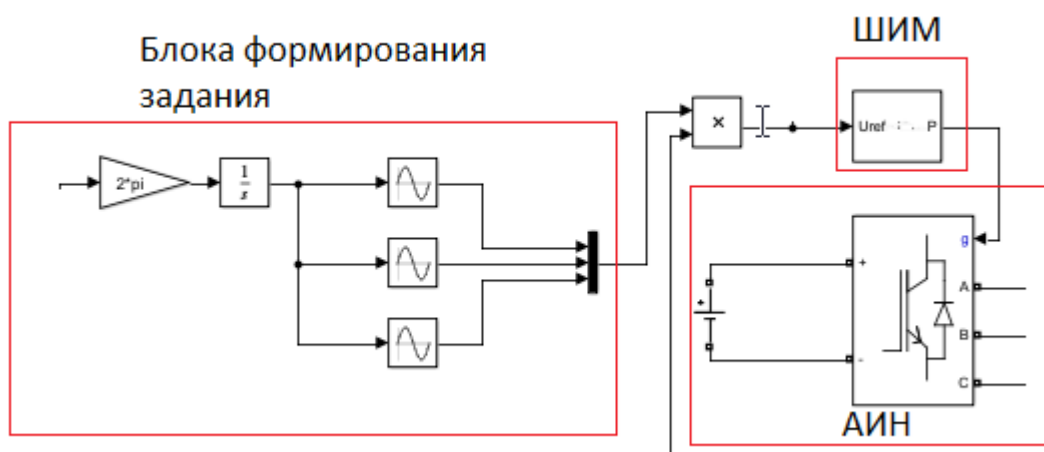


Рисунок 4.8. Имитационная модель ПЧ

4.2. Исследования прямого пуска АД от сети при реактивной нагрузке

Для исследования прямого пуска АД от сети приводится модель на рисунке 4.9. Получаются переходные характеристики угловой скорости вращения, тока статора, электромагнитного момента.

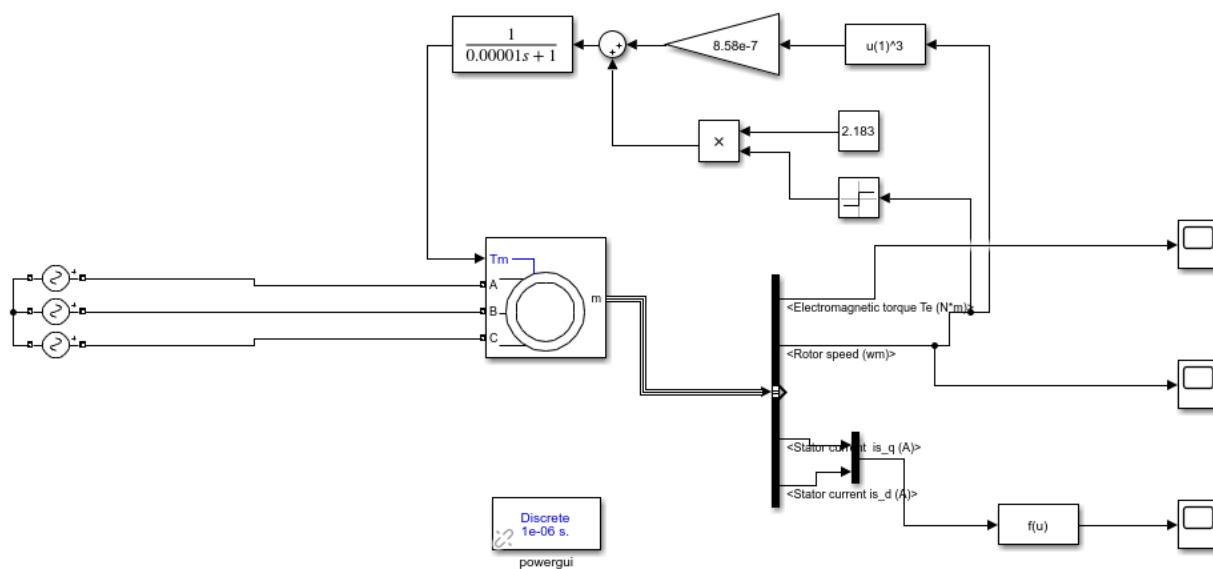


Рисунок 4.9. Имитационная модель прямого пуска от сети АД при реактивной нагрузке

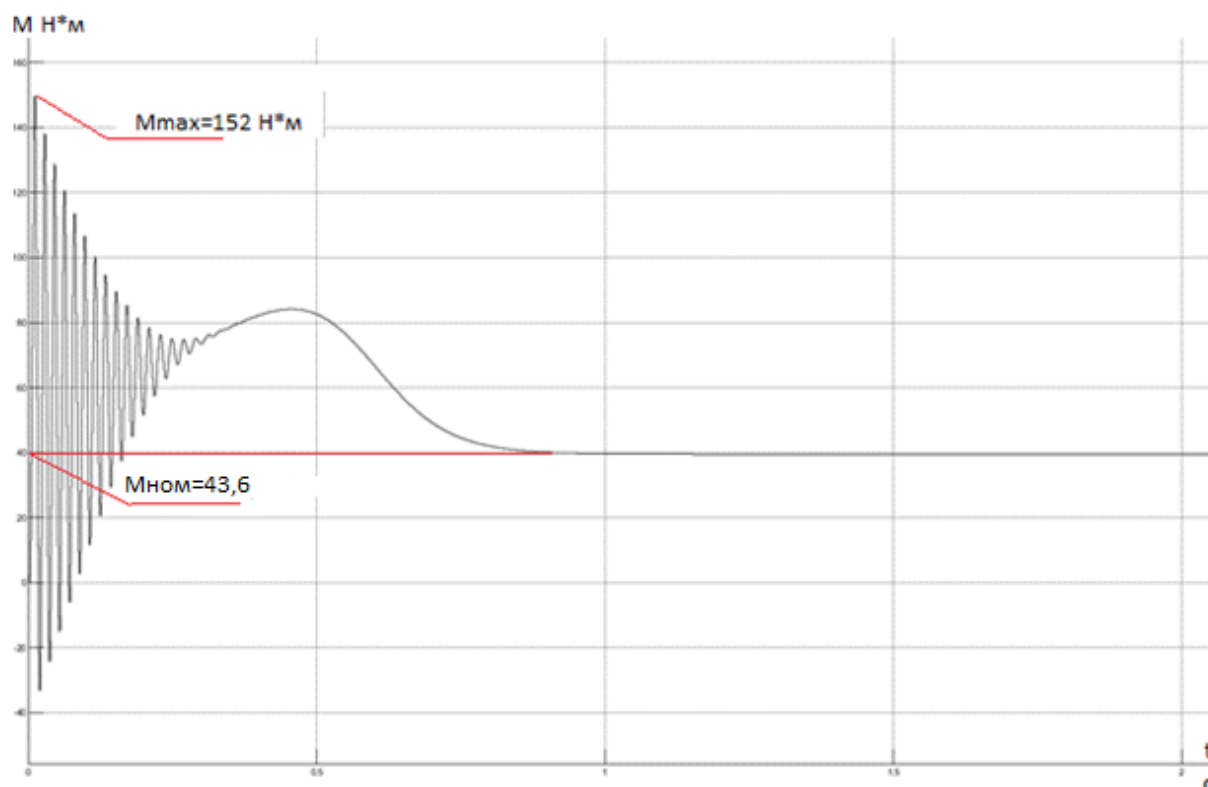


Рисунок 4.10. Переходный процесс момента при прямом пуске от сети АД при реактивной нагрузке

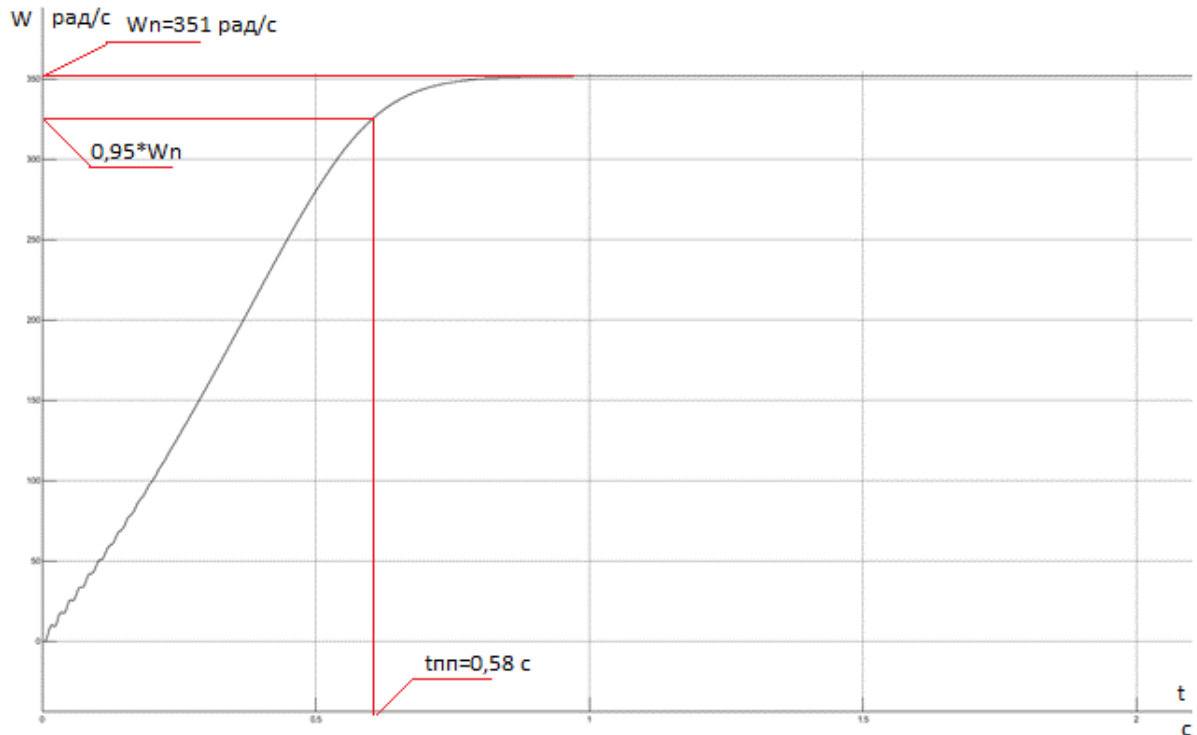


Рисунок 4.11. Переходный процесс угловой частоты вращения при прямом пуске от сети АД при реактивной нагрузке

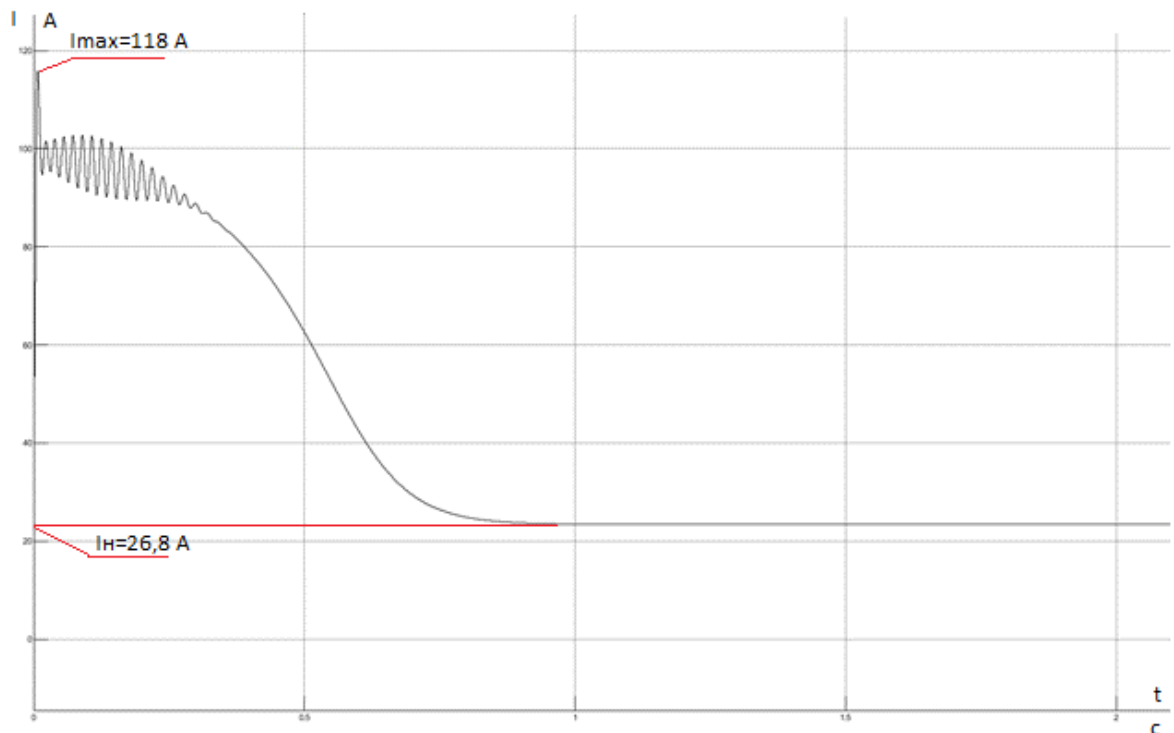


Рисунок 4.12. Переходный процесс тока статора при прямом пуске от сети АД при реактивной нагрузке

Наблюдаем, что АД вышел на номинальные параметры, время переходного процесса $t_{пп} = 0,58$ с без перерегулирования, бросок тока $I_{max} = 118$ А, бросок момента $M_{max} = 152$ Н·м.

4.3. Исследование разомкнутой системы ПЧ-АД при пуске и торможении с задатчиком интенсивности без вольт частотной добавки.

Имитационная модель ПЧ с ЗИ приводится на рисунке 4.13, ЗИ ограничивает изменение выходной частоты, чтобы избежать сильных переходных процессов [10]. Плавный разгон позволит нам избежать электрических и механических перегрузок двигателя, и решить проблемы чрезмерных пусковых токов. В электрических приводах с длительным режимом работы с определенной скоростью вращения, диапазон регулирования скорости не должен превышать значения 1:2 и так же не предъявляются особые требования к динамике электрического привода, а это значит, что целесообразно применять простейшие структуры и законы частотного управления. Закон изменения частоты и переходный процесс угловой скорости вращения представлены на рис. 4.14. Переходные процессы момента и тока представлены на рисунках 4.15 и 4.16, соответственно.

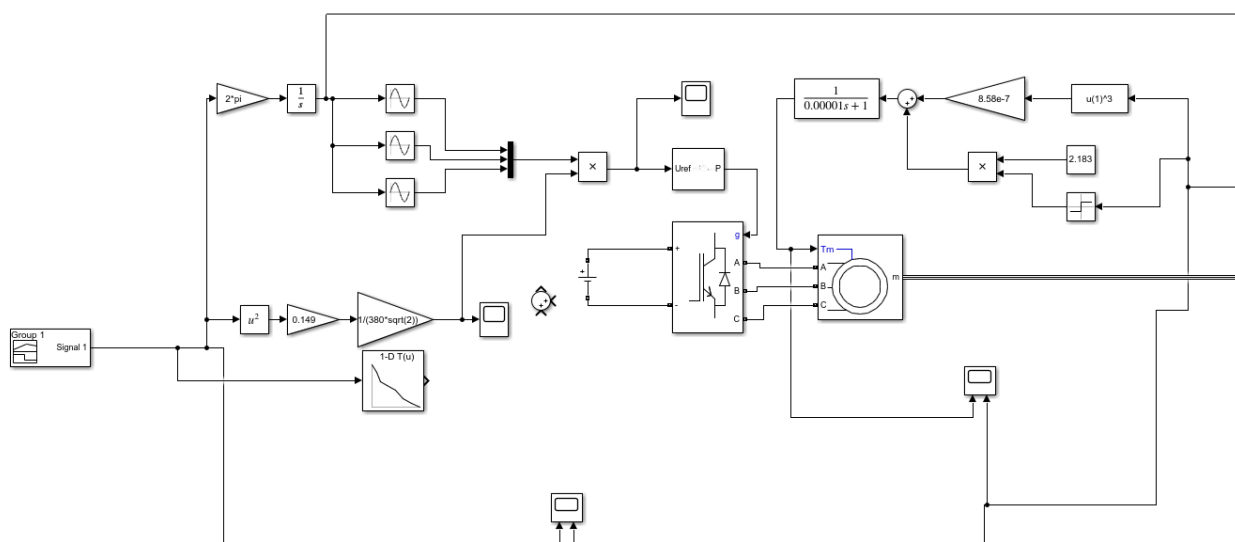


Рисунок 4.13. Имитационная модель ПЧ с ЗИ без вольт частотной добавки

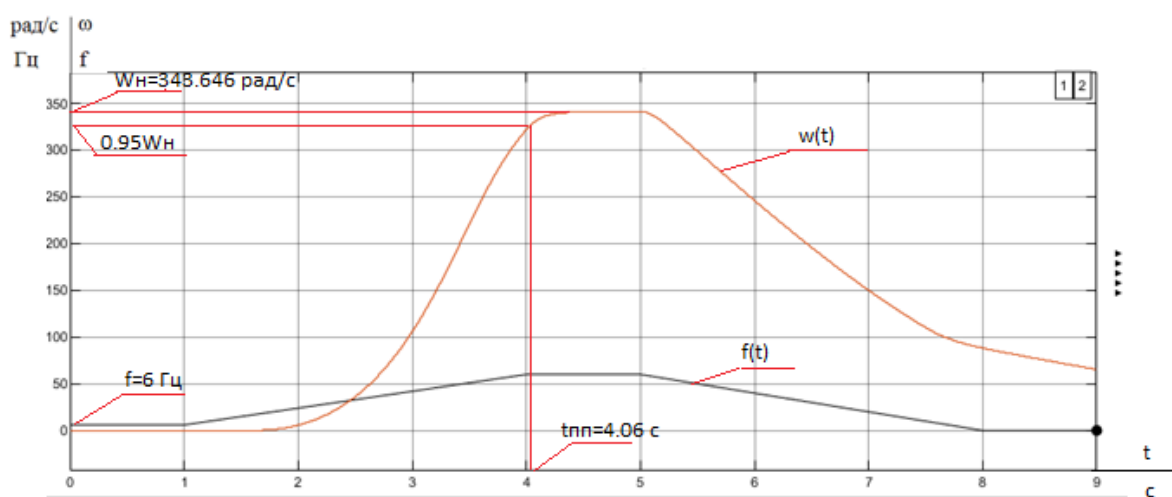


Рисунок 4.14. Переходный процесс угловой скорости вращения при пуске и торможении системы ПЧ-АД с ЗИ без вольт частотной добавки

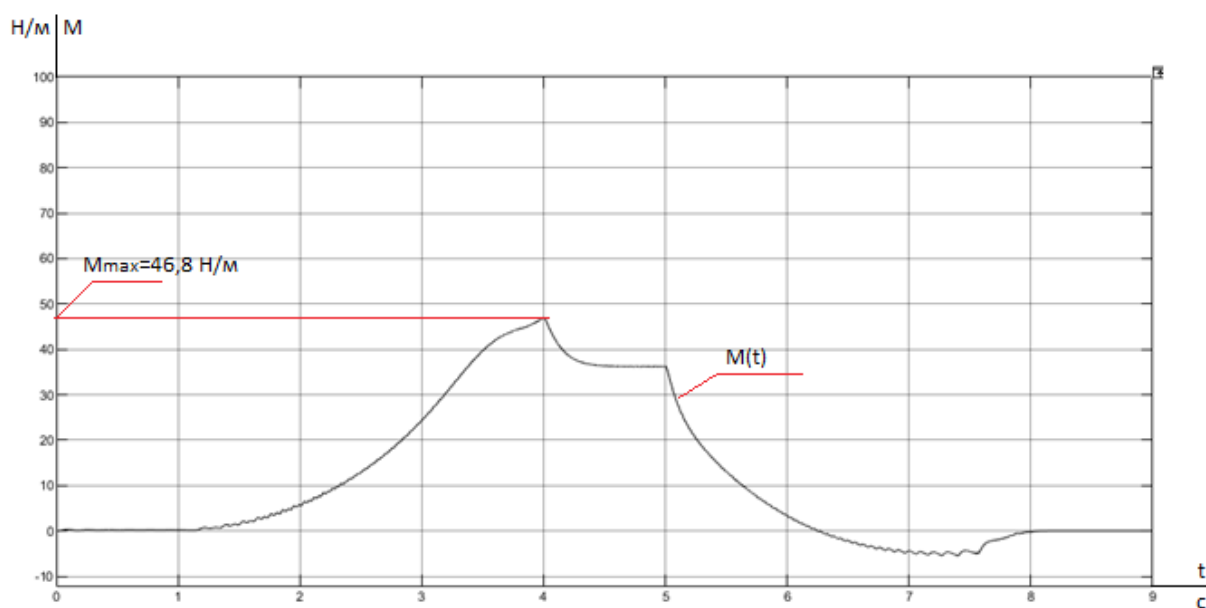


Рисунок 4.15. Переходный электромагнитного момента при пуске и торможении системы ПЧ-АД с ЗИ без вольт частотной добавки

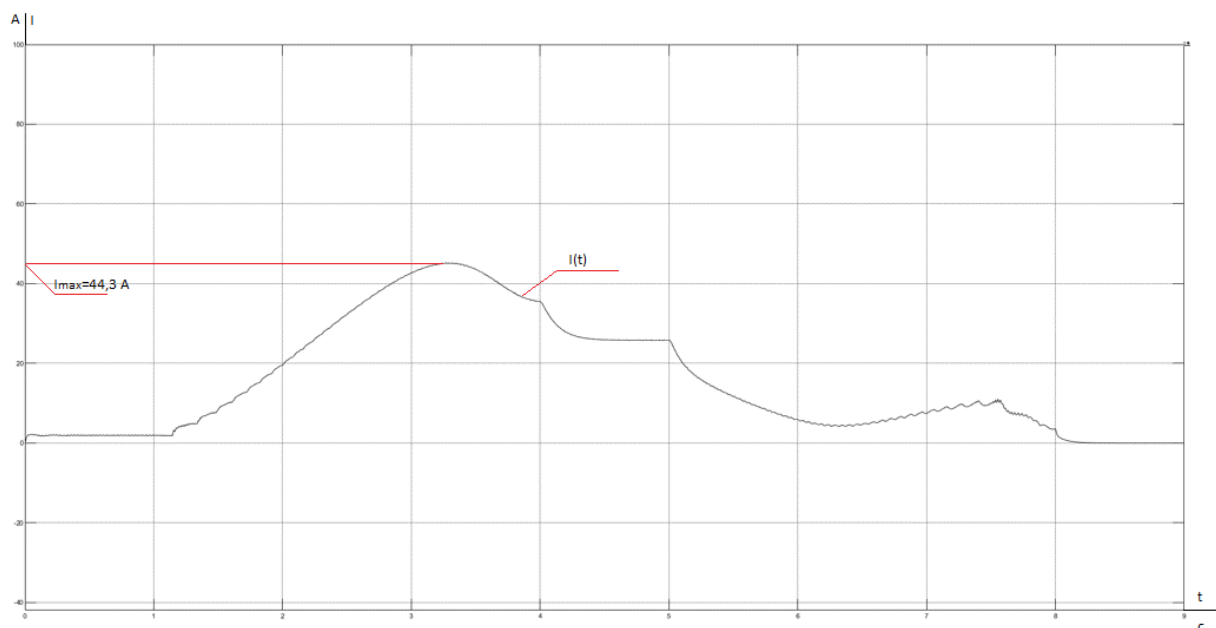


Рисунок 4.16. Переходный тока статора при пуске и торможении системы ПЧ-АД с ЗИ без вольт частотной добавки

4.4. Исследование разомкнутой системы ПЧ-АД при пуске и торможении с задатчиком интенсивности с вольт частотной добавкой.

Имитационная модель ПЧ с ЗИ, а также с вольт частотной корректировкой, приведена на рисунке 4.17. Вольт частотная корректировка позволяет произвести запуск при низких частотах путем некоторого добавления напряжения. Увеличение напряжения приведет к увеличению пускового момента, но также приведет к увеличению потребляемого тока. На практике пропорционально увеличению протекающего тока усиливается нагрев, в этом случае больше внимания уделяют нагреву. Закон изменения частоты и переходный процесс угловой скорости вращения представлены на рис. 4.18. Переходные процессы тока и момента представлены на рисунках 4.19 и 4.20, соответственно.

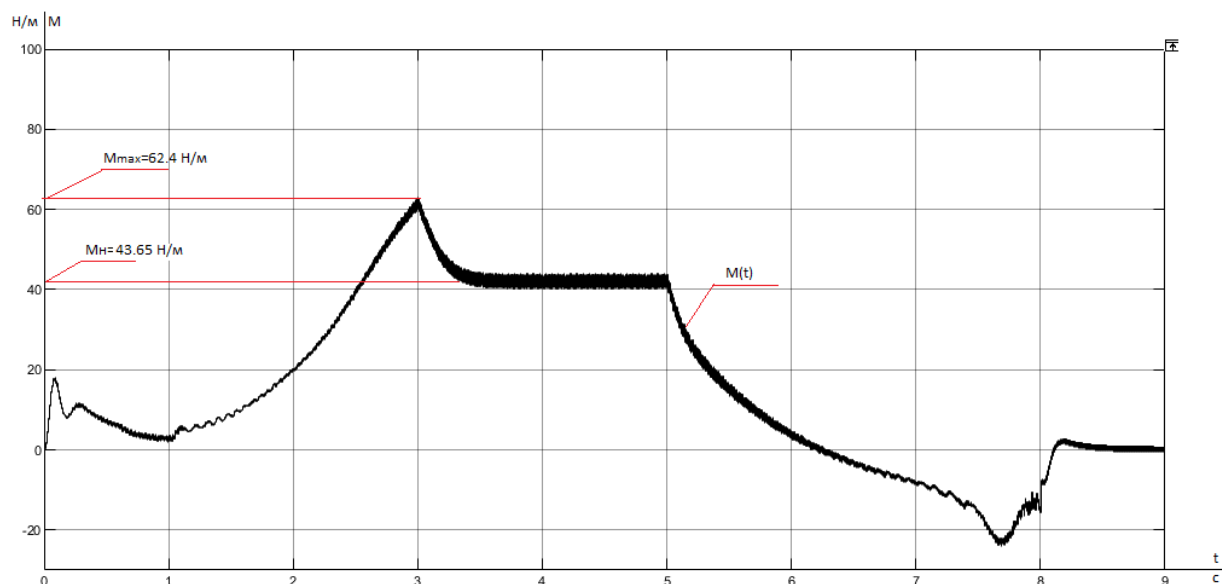


Рисунок 4.20. Переходный электромагнитного момента при пуске и торможении системы ПЧ-АД с ЗИ с вольт частотной добавкой

В системе ПЧ-АД с помощью ЗИ увеличили время переходного процесса, тем самым удалось уменьшить броски по моменту и току статора. Пуск начинается с частоты 6 Гц, т.к. требуется обеспечить диапазон регулирования 1:10. Процесс торможения начинался с 5 секунды началом изменения частоты с 60 Гц до 0 Гц, по рис. 4.20 видно, что момент становится отрицательным (тормозным). Торможение фиксируем по нулевому значению скорости при задании частоты 0 Гц.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела проекта является оценка проектирования регулируемого электропривода циркуляционного насоса с позиции конкурентоспособности, а также ресурсоэффективности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сделать оценку перспективности;
- провести SWOT-анализ;
- выполнить планирование и организацию научного исследования;
- создать диаграмму Ганта
- определить бюджет научного проекта;
- определить ресурсоэффективность проекта.

Потребителями данной разработки являются нефтегазовые компании, заправочные станции.

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

5.1.1. Оценка перспективности проведения научных исследований

Качество и перспективность новой разработки, а также целесообразность вложения денежных средств в данную научно-исследовательскую работу, можно определить с помощью технологии QuaD(QualityADvisor) [11].

Технология QuaD(QualityADvisor) в своей основе содержит две основные группы показателей:

1. Показатели оценки коммерческого потенциала разработки;
2. Показатели оценки качества разработки [11].

Учитывая экономические и технические особенности, подбираются показатели качества и перспективности разработки.

Для упрощения процедуры проведения QuaD оценка проводится в табличной форме (табл. 5.1).

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

Таблица 5.1. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерий оценки	Вес критерия	Баллы	Макс. балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5*2)*100%
1	2	3	4	5	
Показатели оценки качества разработки					
1. Энергоэффективность	0,08	90	100	0,9	8,1
2. Помехоустойчивость	0,1	85	100	0,85	8,5
3. Надежность	0,1	96	100	0,96	9,6
4. Унифицированность	0,03	83	100	0,83	2,49
5. Уровень материалоемкости разработки	0,05	95	100	0,95	3,8
6. Уровень шума	0,02	78	100	0,78	2,34
7. Безопасность	0,06	86	100	0,86	6,02
8. Потребность в резервном питании	0,03	70	100	0,7	1,4
9. Функциональная мощность	0,09	84	100	0,84	7,56
10. Простота эксплуатации	0,06	89	100	0,89	5,34
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,04	95	100	0,95	1,9
12. Ремонтопригодность	0,06	96	100	0,96	7,68
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
13. Конкурентоспособность продукта	0,04	90	100	0,90	3,6
14. Уровень проникновения на рынок	0,03	77	100	0,77	2,31
15. Цена	0,06	60	100	0,6	3,6
16. Предполагаемый срок эксплуатации	0,03	87	100	0,87	2,61
17. Послепродажное обслуживание	0,02	75	100	0,75	1,5

Продолжение таблицы 5.1.

18. Финансирование научной разработки	0,04	85	100	0,85	3,4
19. Срок выхода на рынок	0,02	80	100	0,80	1,6
20. Наличие сертификации разработки	0,03	92	100	0,92	2,76
Итого	1				84,11

Благодаря полученному результату средневзвешенного значения показателя качества и перспективности научной разработки ($P_{cp}=84,11$), можно сделать вывод, что разработка является весьма перспективной.

5.1.2. SWOT-анализ работы электропривода для заправки криогенных жидкостей.

SWOT-анализ является инструментом стратегического менеджмента. Представляет собой комплексное исследование технического проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [8].

SWOT-анализ позволит оценить положительные и отрицательные стороны проекта по разработке электропривода центробежного насоса для заправки криогенной жидкости.

Для проведения SWOT-анализа составляется матрица SWOT, которая в свою очередь, способствует выявлению слабых и сильных сторон проекта.

При составлении матрицы SWOT-анализа стоит использовать следующие обозначения: С – сильные стороны проекта; Сс – слабые стороны проекта; В – возможности; У – угрозы.

Матрица SWOT приведена в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Матрица SWOT-анализа технического проекта

	Сильные стороны проекта: С1. Высокое качество питающего напряжения С2. Надежность систем защит и аварийной сигнализации С3. Квалифицированный персонал С4. Небольшие затраты на ремонт и обслуживание оборудования	Слабые стороны проекта: Сс1. Повышенный уровень вибраций и шума Сс2. Высокая стоимость оборудования
Возможности: В1. Экономия электроэнергии за счет использования задатчика интенсивности и частотного преобразователя.	B1 C1 C2 C3	B1 Cc2 Cc3;
В2. Повышение износостойкости элементов конструкции электропривода	B2 C2 C3 C4	B2 Cc1 Cc2
В3. Резервное питание электропривода насоса	B3 C1 C2 C3 C4	B3 Cc2 Cc3.
В4. Повышение стоимости конкурентных разработок.	B4 C1 C4	
Угрозы: У1. Развита конкуренция технологии производства	У1 C4	У1 Cc3
У2. Риск несвоевременной поставки оборудования	У2 C4	
У3. Введения дополнительных требований к стандартизации и сертификации продукции со стороны государственной инспекции	У3 C3	У3 Cc2

На основании матрицы SWOT производится построение интерактивных матриц возможностей и угроз, что в свою очередь, позволяет оценить эффективность данного проекта, а также надежность его реализации.

При построении интерактивных матриц используются следующие обозначения:

«1» – сильное соответствие;

«0» – слабое соответствие.

Анализ интерактивных матриц, приведен в таблицах 5.3 и 5.4.

Таблица 5.3. Интерактивная матрица возможностей

Возможности	Сильные стороны проекта			
	С1. Высокое качество питающего напряжения	С2. Надежность систем защит и аварийной сигнализации	С3. Квалифицир ованный персонал	С4. Небольшие затраты на ремонт и обслуживание оборудования
В1. Экономия электроэнергии за счет использования частотного преобразователя.	1	1	1	0
В2. Повышение износостойкости элементов деталей электропривода	0	1	1	1
В3. Резервное питание электропривода насоса	1	1	1	1
В4. Повышение стоимости конкурентных разработок.	0	0	0	0

Возможности	Слабые стороны проекта	
	Сс1. Повышенный уровень шума и вибраций	Сс2. Высокая стоимость оборудования
В1. Экономия электроэнергии за счет использования частотного преобразователя.	0	1
В2. Повышение износостойкости элементов деталей электропривода	1	0
В3. Резервное питание электропривода магистрального насоса	0	1
В4. Повышение стоимости конкурентных разработок.	0	0

Таблица 5.4 – Интерактивная матрица угроз

Угроза	Сильные стороны проекта			
	С1. Высокое качество питающего напряжения	С2. Надежность систем защит и аварийной сигнализации	С4. Квалифицир ованный персонал	С5. Небольшие затраты на ремонт и обслуживание оборудования
У1. Развитая конкуренция технологии производства	0	0	0	1
У2. Риск несвоевременной поставки оборудования	0	0	0	1

Продолжение таблицы 5.4.

У3. Введения дополнительных требований к стандартизации и сертификации продукции со стороны государственной инспекции	0	0	1	0
Угроза	Слабые стороны проекта			
	Сс1.Повышенный уровень шума		Сс2.Значительная стоимость оборудования	
У1 Развитая конкуренция технологии производства	0		1	
У2. Риск несвоевременной поставки оборудования	0		0	
У3 Введения дополнительных требований к стандартизации и сертификации продукции со стороны государственной инспекции	1		0	

Исходя из результатов интерактивных матриц, можно заметить, что наиболее сильной стороной проекта является - надежность защит и аварийной сигнализации, посредством того, что несвоевременная ликвидация ошибок и аварий может повлечь за собой нарушение технологического процесса, а также угрозе здоровью и жизни людей.

За счет высокого качества питающего напряжения видно, что проект является перспективным. Слабые стороны можно эффективно подавить за счет снижения себестоимости продукции, где можно сэкономить на расходах по заготовке сырья, благодаря современному технологическому процессу и простоты изготовления.

5.2. Планирование технического проекта

5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Организация работ технического проекта осуществляется в следующем порядке:

1 – разработка технического задания (ТЗ) – представляет собой изучение первичной информации об объекте, требования к техническому проекту, составление задания и плана на работу;

2 – литературный обзор – ознакомление с предметом работы, изучение различных источников, в том числе области применения оборудования, касающихся различных сторон технического проекта;

3 – сбор исходных данных – это выбор из изученных источников электрических схем соединения; параметров двигателя; параметров частотного преобразователя и задатчика интенсивности;

4 – подготовка данных для ввода в базу комплекса – составление схем замещения, расчет естественных характеристик электродвигателя, расчет параметров схемы замещения;

5 – отладка базы данных и проведение тестовых расчетов – перепроверка всех введенных значений, формул и схем;

6 – выбор оборудования – необходимо произвести выбор оборудования из изученных ранее источников;

7 – расчёт и проверка модели АД – построение естественных механических и электромеханических характеристик в среде MathCAD 15 MATLAB Simulink на холостом ходу, при пуске от сети, при пуске с задатчиком интенсивности, преобразователем частоты и вольт частотной добавкой;

8 – расчёт и проверка модели АД-ПЧ – расчет статических характеристик системы преобразователь-двигатель, расчет и построение механических ($M_{эм}$) и электромеханических (I_1) характеристик, характеристик асинхронного двигателя при изменении частоты в среде MathCAD 15;

9 – оформление пояснительной записки – окончательная проверка руководителем, устранение недочетов студентом, подготовка к защите, подготовка презентации;

10 – Проверка выпускной квалификационной работы руководителем - в рамках учебно-практической работы, включает в себя окончательную проверку руководителем, устранение окончательных недочетов студентом.

11 – Подготовка к защите ВКР – подготовка презентации, согласование с преподавателем для защиты перед аттестационной государственной комиссией.

5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемой (средней) величины трудоемкости используется следующая формула [1]:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{min\ i} + 2t_{max\ i}}{5} \quad (5.1)$$

где:

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

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

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} = \frac{2}{1} = 2 \text{ дня.} \quad (5.2)$$

Расчет календарного коэффициента для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 66} = 1,22. \quad (5.3)$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал} = 1,4 \cdot 1,22 = 1,7 \approx 2 \text{ дня.} \quad (5.4)$$

Расчет календарного коэффициента для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,477. \quad (5.5)$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} = 1,4 \cdot 1,477 = 2,1 \approx 3 \text{ дня}. \quad (5.6)$$

Все полученные значения в календарных днях округляются. Все данные заносятся в таблицу. Результаты расчетов продолжительности выполнения работ приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5. Расчет продолжительности выполнения работ

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{mini} человеко-дни		t_{maxi} человеко-дни		$t_{ожи}$ человеко-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление ТЗ	1		4		2,2		2		3	
Сбор и изучение литературы		5		7		6		6		9
Сбор исходных данных		4		5		5		5		8
Подготовка для ввода в базу	1		2		1,4		1,4		2	
Отладка данных и проведение расчетов		5		8		6		6		7

Продолжение таблицы 5.5.

Выбор оборудования		5		8		5		5		6
Расчёт и проверка модели АД		6		8		7		7		11
Расчет и проверка ПЧ - АД	8		10		8,8		8,8			11
Оформление пояснительной записки	4		6		5		5		8	
Проверка ВКР руководителем		6		8		7		7		11
Подготовка к защите ВКР		7	0	10		8,2		8,2		12

Используем диаграмму Ганта для визуальной демонстрации продолжительности выполняемой работы. Диаграмма Ганта приведена на рис.

5.1

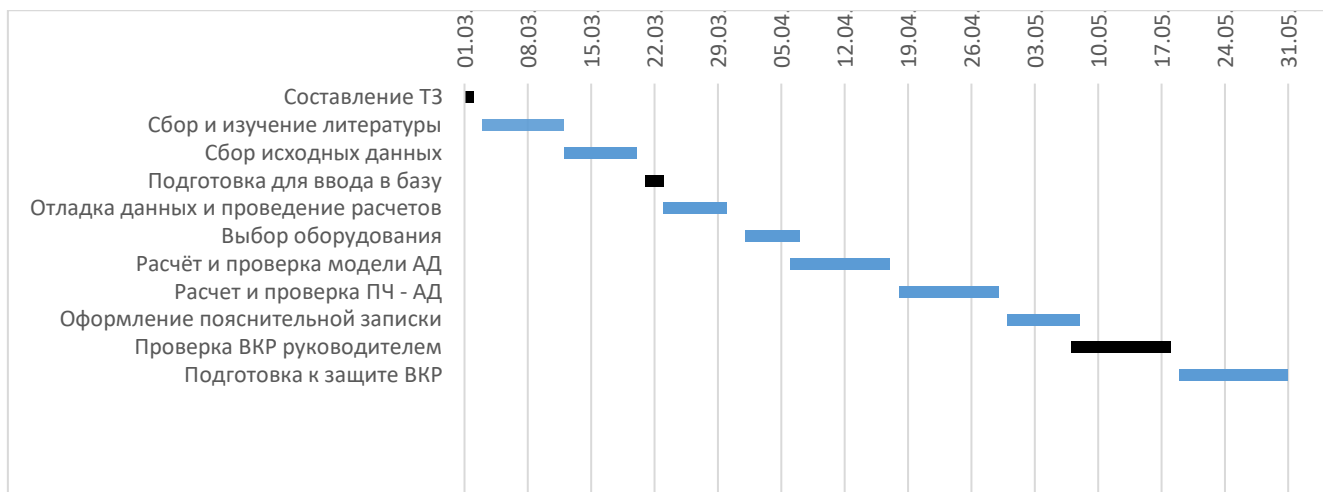


Рисунок 5.1. Диаграмма Ганта

■ – Руководитель ■ – Инженер

Исходя из диаграммы продолжительности работ, определяется участие каждого специалиста рабочей группы в разработке проекта: руководитель 14 рабочих дней, инженер 77 рабочих дней. Общая продолжительность выполнения ВКР с 01.03.22 по 31.06.22 составила 92 календарных дней из них 72 рабочих дня.

5.3. Бюджет научно-технического исследования

5.3.1. Полная заработная плата исполнителей ВКР

На данном этапе рассчитывается основная заработная плата научного руководителя и исполнителя (инженера), участвующих в выполнении данной работы. Расходы по заработной плате определяются исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок [1].

Статья включает основную заработную плату и дополнительную заработную плату:

Статья включает основную заработную плату и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (5.7)$$

где:

$Z_{осн}$ – основная заработная плата;

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

Основная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}}, \quad (5.8)$$

где:

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

$T_{\text{р}}$ – продолжительность работ, раб. дн.;

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

Среднедневная заработная плата:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (5.9)$$

где:

$Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

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

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, рад. дн.

Месячный должностной оклад:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (5.10)$$

где:

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

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 30 % от $Z_{\text{тс}}$.

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок, примем 35 % от $Z_{\text{тс}}$.

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 о.е.

По приведенным формулам, приведен пример расчета заработной платы для научного руководителя проекта.

Месячный должностной оклад рассчитаем по формуле (5.10):

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} = 25000 \cdot (1 + 0,3 + 0,35) \cdot 1,3 = 53625 \text{ руб.}$$

Среднедневная заработная плата рассчитаем по формуле (5.9):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{53625 \cdot 10,4}{229} = 2435,4 \text{ руб.}$$

Основная заработная плата рассчитаем по формуле (5.8):

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}} = 2345,4 \cdot 19 = 46272 \text{ руб.}$$

Таблица 5.6. Расчёт основной заработной платы исполнителей

Исполнители	$Z_{\text{тс}}$, руб	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$, руб.	$Z_{\text{дн}}$, руб.	$T_{\text{р}}$, раб.дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб
Научный руководитель	25000	0,3	0,35	1,3	53625	2435,4	19	46272
Исполнитель	13000	0,3	0,2	1,3	23400	1062,7	73	77577
Итого $Z_{\text{осн}}$								123849

Дополнительная заработная плата, составляет 12-15% от основной.

Расчет дополнительной и полной заработной платы приведен в таблице 5.7.

Таблица 5.7. Расчет дополнительной и полной заработной платы

Исполнители	Коэффициент дополнительной заработной платы	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Полная заработной плата, руб.
Руководитель	0,12	46272	5552	0,12
Инженер	0,12	77577	9309	0,12
Итого				14861

Таким образом, основная и дополнительная заработная плата составляют 138 710 руб., что занимает основную часть бюджета затрат проекта.

5.3.2. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В подразделе отражаются обязательные отчисления по нормам органам социального страхования, пенсионного фонда и медицинского страхования, установленные законодательством Российской Федерации.

Величина отчислений во внебюджетные фонды рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}); \quad (5.11)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на оплату во внебюджетные фонды.

Согласно [12] ставка отчислений для учреждений, осуществляющих научную и образовательную деятельность, на 2022 год составляет 30,2%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 5.8.

Таблица 5.8. Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Научный руководитель	46272	5552
Исполнитель	77577	9309
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,302	
Итого		
Научный руководитель	15650	
Исполнитель	26239	

5.3.3. Расчет материальных затрат НИИ

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m \Pi_i \cdot N_{расхi} , \quad (6)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

Π_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, приведены в таблице 5.9:

Таблица 5.9. Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед. руб.	Затраты на материалы, руб.
MathCAD	Лицензия	1	3000	3000
MATLAB Simulink	Подписка на год	1	4200	4200
Итого:				7200

Из таблицы видно, что материальные затраты составляют 7200 рублей.

5.3.4. Расчет затрат на специальное оборудование

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Для разработки системы требуется обычное оборудование в виде персонального компьютера и купленных серверов на время жизненного цикла программного продукта. Среда, программный софт и другие комплектующие, нужные для разработки, распространяются бесплатно и не требуют дополнительных затрат, исключая средство разработки. Пригодится кабель для подключения к частотному преобразователю через компьютер/ноутбук.

Таблица 5.10. Затраты на специальное оборудование

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Общая стоимость оборудования, тыс.руб.
1	VW3A8306R30 КАБЕЛЬ 3М, 2X RJ45	1	8000	8000
Итого:				8000

Расчёт амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации определяется по следующей формуле:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где n – срок полезного использования в годах.

Амортизация определяется по следующей формуле:

$$A = \frac{H_A I}{m},$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.;

m – время использования, мес.

Рассчитаем норму амортизации для ПК, с учётом того, что срок полезного использования составляет 1 год:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{1} = 1.$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A I}{m} = \frac{1 \cdot 8000}{12} \cdot 1 = 666,66 \text{ руб.}$$

5.3.5. Накладные расходы

Накладные расходы, которые могут включать в себя прочие затраты организации, которые не попали в предыдущие статьи, рассчитываются по формуле:

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей}) \cdot k_{\text{нр}} = (З_{\text{м}} + З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}} + З_{\text{внеб}}) \cdot 0,16. \quad (5.12)$$

Пример расчета по формуле (5.12):

$$\begin{aligned} З_{\text{накл}} &= (\text{сумма статей}) \cdot k_{\text{нр}} = (З_{\text{м}} + З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}} + З_{\text{внеб}}) \cdot 0,16 = \\ &= (53625 + 23400 + 46272 + 77577 + 5552 + 9309 + 15650 + 26239) \cdot 0,16 = 41220 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Значения расчётов накладных расходов приведены в таблице 5.11.

5.3.6. Формирование бюджета технического проекта

Рассчитанная величина затрат технического проекта является основой для формирования затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку технической продукции. [11]

Определение затрат на технический проект приведен в таблице 5.10.

Таблица 5.11 – Смета технического проекта

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Структура затрат, %
Материальные затраты НТИ.	7,2	3,05
Затраты на специальное оборудование	8	3,4
Полная заработная плата исполнителей темы	123,8	52,4
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	14,8	6,26
Отчисления во внебюджетные фонды	41,2	17,43
Накладные расходы	41,3	17,47
Итого	236,3	100,0

Таким образом, исходя из представленной выше таблицы 1.9, можно сделать вывод, что бюджет затрат на выполнение технического проекта составляет 236,3 тыс. руб. Большая часть (52,4 %) составляют заработная плата исполнителей.

5.4. Определение ресурсоэффективности проекта

Определение ресурсоэффективности [11] проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (5.12)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

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

Для определения ресурсоэффективности проекта по проектированию асинхронного электропривода центробежного насоса по закачке криогенной жидкости рекомендуется рассмотреть следующие критерии:

- Надежность центробежного насоса
- Энергосбережение центробежного насоса
- Материалоемкость центробежного насоса
- Производительность циркуляционного насоса
- Удобство центробежного насоса
- Производительности труда – показатель, характеризующий результативность труда, обеспечивается в проекте благодаря автоматизации.

Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики приведены в таблице 5.12.

Таблица 5.12. Сравнительная характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки		
		ТРН-АД	Нерегулируемый АД	Частотно-регулируемый АД
Надежность	0,2	4	4	5
Энергосбережение	0,2	5	3	4
Материалоемкость	0,1	4	4	5
Производительность	0,2	4	4	5
Удобство	0,1	5	5	4
Безопасность	0,2	4	4	5
Итого:	1,00	4,3	3,9	4,7

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности произведем по формуле (5.12):

$$I_{pi} = 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,2 = 4,7$$

С точки зрения коммерческого потенциала и перспективности разработки проекта отметим следующее:

По приведенным в таблице значениям можно сделать вывод, что показатели ресурсоэффективности данного проекта имеет высокие показатели, что может говорить о высокой конкурентоспособности и надежности исследуемого объекта.

Вывод по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

- результате проведения SWOT-анализа были выявлены сильные и слабые стороны выбора технического проекта. Установлено, что технический проект имеет несколько важных преимуществ, обеспечивающих повышение производительности, безопасности и экономичности технического производства.
- при планировании технических работ был разработан график занятости для двух исполнителей, составлена ленточная диаграмма Ганта, позволяющая оптимально скоординировать работу исполнителя;
- составление сметы технического проекта позволило оценить первоначальную сумму затрат на реализацию технического проекта;
- оценка ресурсоэффективности проекта, проведенная по интегральному показателю, дала высокий результат (4,7 по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности реализации технического проекта.

Реализация данного технического проекта, позволяет увеличить эффективность применения электропривода центробежного.

6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

Данный раздел посвящен вопросам об обеспечении нормативных условий труда (защита от опасных производственных факторов, санитарногигиенические условия, обеспечение пожарной безопасности) в соответствии с действующими нормативными документами, а также вопросам обеспечения безопасности в ЧС и экологической безопасности.

Научно-исследовательская работа включает в себя исследование и моделирование регулируемого электропривода центробежного насоса. Объектом исследования является насос для перекачки криогенных жидкостей (сжиженных газов), служащий для заправки автоцистерн.

Рабочим местом является учебная аудитория площадью 60 м², оснащенная компьютерным оборудованием для проведения расчетов, а также моделирования результатов работы. В данном разделе проведена работа по технике безопасности, по охране окружающей среды, а также были приняты меры пожарной безопасности. Рассмотрены некоторые рекомендации по улучшению условий труда.

6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Трудовой кодекс Российской Федерации способствует урегулированию отношений между работником и работодателем в отношении трудовых и экономических прав.

Исходя из 91 и 108 статей ТК РФ, нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю.

Статья 109 ТК РФ предусматривает предоставление специальных перерывов в течение рабочего времени. В соответствии со Ст. 106 ТК РФ время отдыха — это свободное от исполнения трудовых обязанностей время, которое сотрудник может использовать по своему усмотрению.

Обязанности по обеспечению безопасных условий и охраны труда возлагаются на работодателя и отражены в Ст. 212 ТК РФ [13].

Общие требования к организации и оборудованию рабочих мест с ПЭВМ даны в ТОИ Р-45-048-97. Рабочее место должно быть организовано с учетом эргономических требований ГОСТ 12.2.032-78 и ГОСТ 22269-76. Эргономические требования к планировке рабочего места должны соответствовать ГОСТ 21889-76 [14].

Согласно ГОСТ 21889-76 Система «Человек-машина». Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования:

При размещении рабочих мест с ПЭВМ расстояние между рабочими столами с видеомониторами, должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов - не менее 1,2 м.

Экран видеомонитора, должен быть на расстоянии 600-700 мм от глаз, но не ближе 500 мм с учетом размеров символов.

Конструкция стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования.

Рабочее помещение должно оборудоваться системами отопления, кондиционирования воздуха или эффективной приточновытяжной вентиляцией.

Помещения должны иметь естественное и искусственное освещение. Для внутренней отделки интерьера помещений должны использоваться диффузно-отражающие материалы с коэффициентом отражения для потолка 0,7-0,8; для стен 0,5-0,6; для пола 0,3-0,5. [14]

6.2. Производственная безопасность

В данном пункте анализируются вредные и опасные факторы, которые могут возникать при эксплуатации электропривода центробежного насоса. Факторы приведены в таблице 1.

Таблица 6.1. Возможные опасные и вредные факторы

Факторы ГОСТ 12.0.003-2015	Нормативные документы
1. Неудовлетворительный микроклимат	СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [3]
2. Повышенный уровень шума на рабочем месте	СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменениями N 1, 2) [4]; ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности [5]
3. Повышенный уровень вибрации	СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [3]
4. Недостаточная освещенность рабочей зоны	СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* (с Изменениями N 1, 2) [6]
5. Электропоражение	ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [7]

6.3. Анализ опасных и вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

6.3.1. Неудовлетворительный микроклимат

Микроклимат (температура, относительная влажность, скорость движения воздуха, интенсивность теплового излучения) и содержание

вредных веществ в воздухе рабочей зоны должны быть в пределах санитарно-гигиенических норм, что обеспечивается:

– при незначительных перегревах воздуха и умеренных выбросах паров, газов, аэрозоля - применением организованной естественной вентиляции;

– при значительных уровнях теплового воздействия и выбросов загрязнителей - устройством принудительной вентиляции, обеспечивающей снижение температуры воздуха и концентрации загрязнителей до допустимых пределов притоком свежего воздуха в рабочую зону.

Источники интенсивных выбросов загрязнителей должны оборудоваться местной вытяжной вентиляцией непосредственно от них.

При невозможности достижения, нормативных показателей микроклимата воздуха рабочей зоны должна обеспечиваться защита работников средствами индивидуальной защиты и т.д.

Оптимальные показатели микроклимата на рабочих местах производственных помещений для категории работ приведены в таблице 9 из СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [15].

Таблица 6.2. Оптимальные показатели микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Iб (140-174)	21-23	20-24	60-40	0,1
Теплый	Iб (140-174)	22-24	21-25	60-40	0,1

6.3.2. Повышенный уровень шума на рабочем месте

Шум является общебиологическим раздражителем и в определенных условиях может влиять на органы и системы организма человека. Шум создается рабочим оборудованием, преобразователями напряжения, рабочими лампами дневного света, а также проникает снаружи. Он вызывает головную боль, усталость, бессонницу или сонливость, ослабляет внимание, память ухудшается, реакция уменьшается.

Согласно СП 51.13330.2011 при выполнении основных работ на ПЭВМ в помещениях офиса уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБА [16]. При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства индивидуальной защиты (СИЗ) и средства коллективной защиты (СКЗ) от шума.

Средства коллективной защиты:

- устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
- изоляция источников шума от окружающей среды (применение глушителей, экранов, звукопоглощающих строительных материалов);
- применение средств, снижающих шум на пути их распространения;

Средства индивидуальной защиты:

применение спецодежды и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

6.3.3. Повышенный уровень общей вибрации

Нарушения здоровья работающего, обусловленные локальной или общей вибрацией, складываются из поражений нейрососудистой, нервно-

мышечной систем, опорно-двигательного аппарата, изменений обмена веществ и др.

В соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» предельно допустимый эквивалентный скорректированный уровень виброускорения на стационарных рабочих местах в направлении действия Z_0 (вертикальная ось, перпендикулярная к опорной поверхности) составляет 100 дБ, а в направлении действия X_0 (горизонтальная ось от спины к груди) и Y_0 (горизонтальная ось от правого плеча к левому) составляет 97 дБ [15].

Основными методами и средствами защиты от вибрации являются:

- уменьшение интенсивности вибрации непосредственно в источнике;
- применение вибродемпфирования, динамического виброгашения, активной и пассивной виброизоляции;
- виброизоляция и шумоподавление ПК;
- своевременное и качественное обслуживание электронных приборов;
- рациональная организация режима труда и отдыха;
- производственная гимнастика.

6.3.4. Недостаточная освещенность рабочей зоны

Недостаточное освещение рабочего места затрудняет выполнение работы, вызывает утомление, увеличивает риск производственного травматизма. Длительное пребывание в условиях недостаточного освещения сопровождается снижением интенсивности обмена веществ в организме, ослаблением его реактивности, способствует развитию близорукости. К таким же последствиям приводит работа при ограниченном спектральном составе света и монотонном режиме освещения.

В соответствии с СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» освещенность при работе с персональным компьютером должна быть 300-500 лк [19]. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Следует ограничивать неравномерность распределения яркости в поле зрения пользователя ПК при этом соотношение яркости между рабочими поверхностями не должно превышать 3:1-5:1, а между рабочими поверхностями и поверхностями стен и оборудования — 10:1. Коэффициент пульсации не должен превышать 5% [19]. Для исключения бликов отражений в экране светильников общего освещения рабочий стол с ПК следует размещать между рядами светильников. При этом светильники должны быть расположены параллельно горизонтальной линии взгляда работающего. При рядном размещении рабочих столов не допускается расположение экранов дисплеев навстречу друг другу из-за их взаимного отражения, в противном случае между столами следует устанавливать перегородки

6.3.5. Электропоражение

Электрический ток относится к опасным факторам. Запрещается работать на компьютере во влажной одежде и влажными руками, прикасаться к тыльной стороне дисплея, вытирать пыль с компьютера при его включенном состоянии. Перед началом работы необходимо убедиться в отсутствии висящих под столом или свешивающихся со стола проводов электропитания, в целостности провода электропитания и вилки, в отсутствии видимых повреждений рабочей мебели и аппаратуры. Токи статического электричества, наведенные в процессе работы ПК на корпусах клавиатур, монитора и системного, могут приводить к разрядам при прикосновении к этим элементам. Эти разряды хоть и не опасны для человека, но могут привести к нарушению работы компьютера.

Для снижения величин токов статического электричества используются нейтрализаторы, общее и местное увлажнение воздуха, использование покрытия полов с антистатической пропиткой. Также в помещении мерой

защиты от поражения электрическим током может являться недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, например, расположения токоведущих частей на недоступной высоте, изоляция всех токоведущих частей и защитные ограждения (кожухи, крышки, сетки и т.д.).

К превентивным мерам по предупреждению и устранению поражения электрическим током в помещении офиса можно отнести запрет на использование шнуров питания, изоляция которых имеет небольшие трещины и другие повреждения. Все электрошнуры не должны быть сильно короткими и слишком длинными. Категорически запрещается прибивать их к полу гвоздями либо накрывать линолеумом и другими напольными покрытиями. Также необходимо следить за розетками, вне зависимости, где они установлены, их нельзя перегружать.

Перед допуском к самостоятельной работе оператору ПЭВМ необходимо пройти вводный инструктаж по охране труда, обучение безопасным приемам и методам труда по программе, проверку знаний, в том числе по электробезопасности.

6.4. Экологическая безопасность.

В компьютерах огромное количество компонентов, которые содержат токсичные вещества и представляют угрозу, как для человека, так и для окружающей среды. К таким веществам относятся: свинец, ртуть, никель и цинк, щелочи.

Поэтому компьютер требует специальных комплексных методов утилизации. В этот комплекс мероприятий входят:

- отделение металлических частей от неметаллических;
- металлические части переплавляются для последующего производства;
- неметаллические части компьютера подвергаются специальной переработке.

В свою очередь утилизацию компьютера можно провести, как прибегая к использованию услуг профессиональных компаний по рециклингу, так и обратившись в местный муниципалитет по вопросу переработки электроники.

При утилизации комплектующих частей персонального компьютера, люминесцентных ламп, макулатуры происходит негативное воздействие на литосферу. Продукты жизнедеятельности персонала неблагоприятно влияют на гидросферу. А воздействие на атмосферу происходит в случае выделения токсических веществ при неправильной утилизации комплектующих ПЭВМ и при горении самого ПК.

На основании ГОСТ Р 55090-2012 использованная бумажная продукция собирается и отсортировывается, доставляется в соответствующие перерабатывающие предприятия [21].

Лампы относятся к особо опасной категории отходов. Лампы необходимо передать специализированной организации, которая занимается их утилизацией. В Постановлении Правительства РФ №2314 указан порядок утилизации люминесцентных ламп [22].

6.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Мероприятия по безопасности и защите населения и территорий регламентируются ГОСТ Р 22.0.07-95 «Безопасность в ЧС. Источники техногенных ЧС. Классификация и номенклатура поражающих факторов и их параметров», ФЗ от 21.12.1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от ЧС природного и техногенного характера».

Основными причинами аварий и чрезвычайных ситуаций являются:

- стихийные бедствия;
- нарушения режимов технологических процессов;
- не компетенция лиц, допущенных к установкам;

- нарушение правил техники безопасности.

С точки зрения выполнения проекта характерны следующие виды ЧС:

- Взрывы и пожары;
- Обрушение зданий, конструкций;
- Метеорологические явления;
- Землетрясение.

6.5.1. Анализ ЧС, которые могут произойти при проведении исследований

Одной из вероятных чрезвычайных ситуаций, при разработке электропривода, является пожар на рабочем месте. В качестве противопожарных мероприятий должны быть применены следующие меры:

- Недопущение использования неисправного оборудования;
- Ознакомление сотрудников с правилами пожарной безопасности;
- Сотрудники должны знать место нахождения средств пожаротушения, связи и номера экстренных служб.

При возникновении пожара:

- Сообщить о пожаре ответственному лицу
- Предпринять меры по устранению очага возгорания имеющимися силами, при помощи первичных средств пожаротушения;
- Привести в действие систему экстренного оповещения, если очаг возгорания потушить не удастся;
- Сообщить о возгорании в службу пожарной охраны;
- Принять меры по эвакуации людей;
- Ожидать пожарную охрану, при необходимости сообщить всю необходимую информацию.

Заключение по главе «Социальная ответственность»

В ходе выполнения работы над разделом «Социальная ответственность» были выявлены опасные и вредные факторы, воздействию которых может подвергнуться исследователь и оператор, был проведен анализ нормативной документации. Был предложен ряд мер для исключения или уменьшения влияния опасных и вредных факторов на человека и окружающую среду. Согласно Федеральному закону "О специальной оценке условий труда" условия труда являются допустимыми.

В разделе ВКР «Социальная ответственность», был произведён анализ рабочего места во время исследовательской работы, а также:

- Рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности;
- Обнаружены и проанализированы возможные вредные и опасные факторы на рабочем месте;
- Проведён анализ возможного вредного воздействия исследования на экологию и способы защиты атмосферы, гидросферы и литосферы;
- Рассмотрены возможные чрезвычайные ситуации на рабочем месте. Проанализировано поведение работника при наиболее вероятном ЧС на рабочем месте – пожаре.

Конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов при работе сидя должны выполнять эргономические требования по ГОСТ 12.2.032-78, а также требования взаимодействия человека с машиной по ГОСТ 21889-76 Система «Человек-машина». Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования. На качество и работоспособность большое влияние оказывает освещенность помещения. При работе с ПЭВМ освещенность должна быть в пределах 300-500 лк [14].

Перед допуском к самостоятельной работе оператору ПЭВМ необходимо пройти вводный инструктаж по охране труда, обучение безопасным приемам и методам труда по программе, проверку знаний, в том числе по электробезопасности с присвоением 1-й квалификационной группы по электробезопасности [23].

Категория тяжести труда по СанПиН 1.2.3685-21 является Ia, энерготраты которой составляют до 139 Вт [24].

Согласно СП 12.13130.2009 офисное помещение, где размещен пользователь, работающий за ПЭВМ, относится к категории В и считается пожароопасным [25]. Такая классификация связана с наличием в офисных помещениях горючих и трудногорючих материалов и веществ, которые при контакте с воздухом горят без образования взрывоопасных смесей.

Заключение

В данной работе рассмотрено получение сжиженного природного газа, приведены основные данные, свойства и функционирования центробежного насоса по заправке криогенной жидкости.

Выбран требуемый насос по требуемой подаче и напору. По мощности насоса определен электродвигатель «Семр АВ30г 160МВ» с взрывонепроницаемой оболочкой. Выбран преобразователь частоты серии «Altivar 61», обеспечивающий ЭД необходимыми параметрами и защитой от:

- «сухого хода»;
- перегрузки ЭД;
- КЗ;
- недогрузки ЭД;
- перенапряжения во входной сети;
- дисбаланса токов.

Получены все необходимые характеристики для анализа ЭД с механической нагрузкой и скалярным частотным управлением $U/f_2 = const.$

Построены модели в программной среде MATLAB Simulink, получены необходимые переходные процессы тока статора, угловой скорости и электромагнитного момента при различных режимах эксплуатации электропривода.

По полученным данным и переходным процессам была выявлена корректная работа электропривода.

Было рассмотрено использование задатчика интенсивности, благодаря которому осуществили плавный разгон выбранного электродвигателя. При наличии задатчика интенсивности, а также преобразователя частоты, была выявлена грамотная корректировка параметров для успешной работы на низких частотах, что при номинальных данных было невозможно.

На насосной установке можно добиться следующего:

- Уменьшить затраты на плановый и капитальный ремонт оборудования (всей инфраструктуры подачи криогенных жидкостей), в результате пресечения различных аварийных ситуаций, вызванных в частности гидравлическим ударом;

- Уменьшить пусковые токи и электромагнитный момент;

- Добиться оптимальных параметров пуска и работы АД.

Список литературы

1. «Сибирь – Энерго» [Электронный ресурс]: URL: <https://sibir-energo.ru/#!/tab/61197568-1> (дата обращения 20.05.2022)
2. Криогенные насосы. Виды насосов. [Электронный ресурс]: URL: <https://cialis20.ru/kriogennye-nasosy/> (дата обращения 20.05.2022)
3. Крионасосы. Процесс сжижения газов. [Электронный ресурс]: URL: <https://dtzar.ru/krionasos/> (дата обращения 20.05.2022)
4. Центробежные насосы. Принцип работы. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.npmaap.ru/possnips/kniga/378-anikin/file.html> (дата обращения 20.05.2022)
5. Взрывозащищенные асинхронные двигатели типа АВ. [Электронный ресурс]: URL: <https://vecgroup.ru/equipment/catalog/vzryvozashchishchennye-elektrodvigateli-marelli-motori/vzryvozashchishchennye-asinkhronnye-dvigateli-cemp-ab-ac/> (дата обращения 22.05.2022)
6. Серия DSM криогенные насосы. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.vanzettiengineering.com/ru/kriogennye-nasosy/kriogennye-centrobezhnye-nasosy-dlja-promyshlennaja-proizvodstva-i-avtotransporta-na-spg-serija-dsm> (дата обращения 23.05.2022)
7. Altivar 61 преобразователь частоты. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.se.com/ru/ru/product-range-presentation/1422-altivar-61/> (дата обращения 23.05.2022)
8. Пустоветов М.Ю. Опыт разработки синус-фильтра для силовой схемы частотно-регулируемого асинхронного электропривода – Томск: Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов, 2014 – № 4 – С. 87-95.
9. Электропривод переменного тока: учебное пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.

10. Удут Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов: учебное пособие. Ч.8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин; Томский политехнический университет. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 648 с.
11. Технология QuaD (QUality ADvisor). [Электронный ресурс]: URL: <https://studfile.net/preview/4242828/page:3/>
12. Страховые взносы, установленные на 2022 г. [Электронный ресурс]: URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93256/
- 13.«Трудовой кодекс РФ» [Электронный ресурс]: URL: <https://rulaws.ru/tk/?yclid=2840441178656909794> (дата обращения 28.05.22)
14. ГОСТ 21889-76 «Система "Человек-машина". Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования. Обозначение».
15. СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки».
16. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
17. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменениями N 1, 2)
18. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности.
19. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 (с Изменениями N 1, 2)
20. ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
21. ГОСТ Р 55090-2012 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Рекомендации по утилизации отходов бумаги;

22. Постановление правительства РФ от 28.12.2020 г. Об утверждении правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде.

23. ИПБОТ 360-2008 Инструкция по промышленной безопасности и охране труда для операторов и пользователей ПЭВМ и работников, эксплуатирующих ПЭВМ и видеодисплейные терминалы (ВДТ) (актуализированная редакция.

24. СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания"

25. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением N 1);