

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

Институт - Энергетический
Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Кафедра - Электропривода и электрооборудования
Профиль подготовки – Электроприводы и системы управления электроприводов

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы

Разработка и исследование электропривода газовой запорной арматуры

УДК 62-83-52:621.646

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Рабинович Евгений Евгеньевич		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2017

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

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

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

Институт - Энергетический
Направление – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Кафедра Электропривод и электрооборудование

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой
_____ Ю.Н. Дементьев
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5А	Рабиновичу Евгению Евгеньевичу

Тема работы:

Разработка и исследование электропривода газовой запорной арматуры
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>Обзор и классификация запорной арматуры для систем трубопроводов. Основные режимы работы электроприводов запорно-регулирующей арматуры. Каталожные параметры асинхронного двигателя (АИР100L6).</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>	<p>Теоретические сведения о режимах работы исследуемого технологического оборудования, формирование требований к исследуемому ЭП на основе анализа режимов работы запорной арматуры, имитационное моделирование АД, расчёт и выбор компонентов силовой части ЭП, разработка и оптимизация системы векторного управления ЭП, моделирование и исследование системы ЭПЗА.</p>

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Подробная функциональная схема ЭПЗА, структурная схема системы векторного управления ЭПЗА на основе АД.
---	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
<i>Основной общий и специальный разделы ВКР</i>	<i>Научный руководитель Ланграф С.В.</i>
<i>Экономическая часть ВКР</i>	<i>Кузьмина Н.Г.</i>
<i>Раздел экология и техника безопасности</i>	<i>Дашковский А.Г.</i>
<i>Раздел на иностранном языке</i>	<i>Пташкин А.С.</i>

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Основная и специальная части, экономическая часть и раздел экология и техника безопасности – русский язык

На иностранном языке выполнены следующие разделы диссертации:

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

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Рабинович Е.Е.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5А	Рабиновичу Евгению Евгеньевичу

Институт	Энергетический	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника/Электроприводы и системы управления электроприводов

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

1. Стоимость затрат научного исследования (НИ)	Итоговая стоимость затрат на НИ составит 432479,63 рублей.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов».
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные страховые фонды – 30%.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

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

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Рабинович Евгений Евгеньевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5А	Рабиновичу Евгению Евгеньевичу

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника/ Электроприводы и системы управления электроприводов

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<i>1. Характеристика объекта исследования</i>	<i>Помещение закрытого типа с естественной вентиляцией воздуха. Помещение имеет как искусственный, так и естественный источник освещения. Основное рабочее оборудование – ПЭВМ.</i>
<i>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	<i>1) ГОСТ Р ИСО 26000-2012. Технический регламент по социальной; 2) N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" N 426-ФЗ "О специальной оценке условий труда"</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды</i>	<i>Вредные факторы, возникающие из-за ПЭВМ. - Негативные влияния: электромагнитное и ионизирующее излучения, шум, вибрация</i>
<i>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды</i>	<i>Установлены удлинители в розетках (эл. сеть перегружена) Физические опасные факторы: электрический ток.</i>
<i>3. Охрана окружающей среды</i>	<i>Бытовые отходы. Отходы, образующиеся при поломке ПЭВМ</i>
<i>4. Безопасность в ЧС</i>	<i>Наиболее вероятная ЧС в здании - пожар</i>
<i>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности</i>	<i>Социальные гарантии по компенсации для работника.</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Дашковский А.Г.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Рабинович Евгений Евгеньевич		

Реферат

Магистерская диссертация содержит 115 страниц текста, 59 рисунков, 14 таблиц, 33 использованного источника, 1 приложение.

Ключевые слова: запорная арматура, электропривод, привод, математическое моделирование, имитационное моделирование, система управления.

В первой главе приведены теоретические сведения о запорной арматуре и приводе для нее.

Во второй главе приведены расчеты параметров электропривода запорной арматуры.

В третьей главе приведены: настройка контуров тока, скорости и потокосцепления; имитационное моделирование электропривода запорной арматуры; модель нагрузки запорной арматуры.

В четвертой главе представлен финансовый расчет проекта, информация по безопасности жизнедеятельности и английская часть диссертации.

Пояснительная записка магистерской диссертации выполнена в текстовом редакторе Microsoft Office Word 2010 с использованием пакетов MathCad 16, Microsoft Visio, Matlab\Simulink.

Оглавление

Введение	10
1. Анализ технологического процесса и технологического оборудования как объекта исследования	11
1.1 Конструкция и эксплуатация запорной арматуры.....	12
1.2 Привод запорной арматуры.....	14
1.2.1 Обоснование принципа реализации электропривода	18
1.2.2 Структурная схема механической части	19
2. Расчетная часть	20
2.1 Расчет параметров электропривода.....	20
2.2 Выбор преобразователя	24
2.3 Определение параметров силовой цепи	26
2.4 Расчет выпрямителя (трехфазная мостовая схема)	27
2.5 Расчет фильтра.....	28
2.6 Расчет механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя	29
2.7 Определение области работы и проверка выбора двигателя..	32
3. Структурная схема силового канала электропривода.	35
4. Выбор функциональной и структурной схем, настройка контуров регулирования.....	40
4.1 Выбор и обоснование функциональной схемы электропривода	40
4.2 Структурная схема системы управления электроприводом...	41
4.3 Определение настроек СУ электропривода	43
4.4 Параметры настройки контура тока с ПИ-регулятором и аналоговым датчиком:	44
4.5 Настройки контура потокосцепления с ПИ-регулятором и аналоговым датчиком:.....	48
4.6 Параметры настройки контура скорости с ПИ-регулятором и импульсным датчиком:	52
5. Имитация работы электропривода запорной арматуры	56
5.1 Имитационная модель	56
5.2 Переходные процессы электропривода.....	59
5.3 Проверка работоспособности контура скорости в составе имитационной модели.	61

5.4	Имитация работы задвижки.....	66	
6.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	72	и
6.1	Планирование работ технического проекта.....	72	
6.2	Смета затрат на проектирование	75	
6.2.1	Материальные затраты.....	75	
6.2.2	Затраты на амортизацию	75	
6.2.3	Затраты на заработную плату	76	
6.2.4	Затраты на социальные нужды	77	
6.2.5	Прочие затраты.....	77	
6.2.6	Накладные затраты.....	77	
7.	Социальная ответственность.....	79	
7.1	Анализ опасных вредных производственных факторов	79	
7.2	Требования безопасности	80	
7.2.1	Требования электробезопасности.....	80	
7.2.2	Защита в чрезвычайных ситуациях	82	
7.2.3	Требования пожарной безопасности.....	84	
7.2.4	Требования безопасности при работе с персональным	85	
7.2.5	Требования к освещенности.....	86	
7.2.6	Требования к параметрам шума и вибрации	89	
7.2.7	Требования к параметрам микроклимата	91	
7.2.8	Социальные гарантии для работника.....	92	
	Заключение	94	
	Литература.....	95	
	Приложение А	98	

Введение

Электропривод является одним из ведущих компонентов во многих областях современной технической цивилизации. В современных системах электропривода нашли широкое применение различные типы электродвигателей и силовых преобразователей.

В области транспортировки газового топлива электроприводы применяются для привода перекачивающих компрессорных агрегатов, для управления транспортировкой газовых потоков как привода запорной арматуры и для прочих вспомогательных нужд.

От быстрой, точной и надёжной работы электроприводов запорной арматуры в газовой отрасли напрямую зависит безопасная и эффективная работа всего газотранспортного комплекса. Таким образом, задача разработки и исследования электроприводов для управления запорной арматуры в газовой отрасли является актуальной и своевременной.

В выпускной квалификационной работе предполагается обсудить решение вопросов, связанных с разработкой и исследованием возможностей применения систем асинхронного электропривода переменного тока для управления запорной арматурой.

1. Анализ технологического процесса и технологического оборудования как объекта исследования

Управление потоками в трубопроводных системах осуществляется с использованием устройств, объединенных общим названием трубопроводная арматура.

Запорная арматура (ЗА) – это устройство, предназначенное для перекрытия потока среды и регулирования различных параметров технологических процессов, таких как температуры, давления, количества подаваемого вещества, напора и т.д. Регулирование технологических процессов осуществляется за счёт изменения расхода транспортируемого потока среды путем изменения положения запорного органа ЗА.

Трубопроводная арматура монтируется на трубопроводах, ёмкостях и других агрегатах в которых необходимо отключать, распределять или регулировать потоки транспортируемых либо используемых сред.

Магистральные трубопроводы, месторождения нефти и газа и заводы по их переработке, сталеплавильные и химические предприятия, очистные сооружения и городской водопровод – вот лишь небольшая часть предприятий, где требуется огромное количество запорно-регулирующей арматуры.

Существует множество типов и модификаций запорно-регулирующей арматуры. Мы рассмотрим принцип задвижки с клиновым затвором.

Принцип действия всех типов запорной арматуры примерно одинаков. Все эти устройства либо ограничивают поток среды (воздуха, жидкостей, пара, газа, сыпучих тел), либо полностью перекрывает его.

Различаются лишь элементы конструкции типов запорной арматуры, (мембрана, диск, шар) с помощью которых и происходит перекрытие потока.

Основные требования к запорной арматуре:

- надежность;
- герметичность уплотнений;

- минимальное гидравлическое сопротивление открытой арматуры;
- простота срабатывания после длительной эксплуатации в открытом состоянии;
- прочность (долговечность);
- бесперебойность (безотказность);
- коррозионная стойкость;
- взрывобезопасность.

1.1 Конструкция и эксплуатация запорной арматуры

Задвижкой называется ЗА, в которой трубопровод перекрывается поступательным движением затвора вдоль уплотнительных колец перпендикулярно движению потока перемещаемой среды. Данный тип арматуры применяется в газонефтепроводах с диаметрами проходов от 50 до 2000 мм при давлениях 0,4...20 МПа и температуре среды до 450⁰С. По сравнению с другими типами запорной арматуры, задвижки имеют преимущества [1]:

- гидравлическое сопротивление в открытом состоянии практически отсутствует;
- высокая степень герметичности в закрытом состоянии;
- возможность подачи рабочей среды в любом направлении.

Задвижки делятся на три типа исходя из формы и конструкции запорного органа:

- параллельные однодисковые,
- параллельные двухдисковые,
- клиновые задвижки.

Основным видом задвижек на газонефтепроводах являются клиновые задвижки, так как высокая степень герметичности затвора в закрытом положении. Затвор клиновых задвижек имеет форму плоского «клина». У

клиновой задвижки расположение уплотнительной поверхности и седла относительно друг друга осуществляется под углом 10-12 градусов к направлению движения затвора. Уплотнение осуществляется путем прижатия запирающего элемента к посадочному седлу.

У затворов с клиновым затвором существуют несколько типов клина:

- клин цельный,
- клин упругий.

Запирающий элемент с цельным клином имеет следующие недостатки:

- высокий износ уплотнительных поверхностей и потребность в регулировке седла и клина для обеспечения герметичности,
- возможность заедания клина при длительном закрытом положении из-за изменения температур, износа механических частей и т.д.

Существуют два режима работы запорной арматуры:

- открытый (затвор не препятствует прохождению среды);
- закрытый (затвор препятствует прохождению среды).

Регулировка потока не осуществляется [2].

Конструкция клиновой задвижки представлена на рисунке 1.

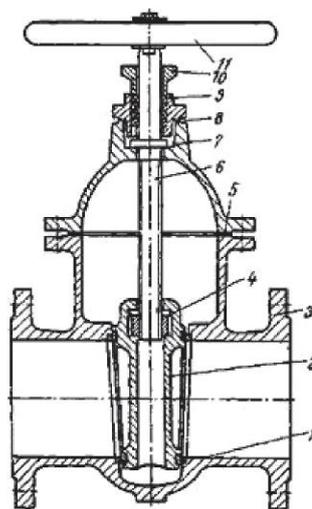


Рисунок 1 – Конструкция задвижки

Основные части задвижки: 1 – седло; 2 – затвор; 3 – корпус; 4 – ходовая гайка; 5 – уплотнительная прокладка; 6 – шпindel; 7 – верхняя крышка;

Рабочая часть задвижки, куда подается среда, образуется корпусом 3 и верхней крышкой 7. Эта полость герметизируется прокладкой 5, прижатой крышкой к корпусу. Корпус задвижки представляет собой цельную, сварную или литую конструкцию.

Примеры марок задвижек: 30с905нж; 30с511нж; ЗКЛПЭ-75;

1.2 Привод запорной арматуры

Современный привод должен выполнять свои функции, находясь на удалении от диспетчерских пунктов (ДП) и с учетом специфических условий окружающей среды.

Для управления ЗА применяют:

- электрические приводы;
- ручные приводы;
- поршневые приводы;
- пневматические приводы;
- ручки(рычаги), маховики.

Система управления (СУ) обеспечивает:

- закрытие арматуры;
- открытие арматуры;
- размыкание электрической цепи при достижении крайних положений. [3]

Корпус привода герметичен относительно внешней среды.

Подвижные детали электропривода должны обеспечиваться специальной смазкой.

Для строповки при монтаже на арматуре привод имеет специальные приспособления (проушины, рым-болты и т.д.).

Электропривод запорной арматуры

Самый распространенный привод для запорной арматуры – это электрический привод.

В настоящее время практически все задвижки имеют электрический привод. С помощью электропривода существует возможность дистанционного управления всеми классами и типами запорной арматуры, высокий КПД, электропривод может монтироваться как на управляемую арматуру, так и на расстоянии от нее. В отличие от большинства других приводов (пневматический, гидравлический), электропривод может быть снят с действующей арматуры (для ремонта или замены), не создавая опасности самопроизвольного положения рабочего органа.

В интеллектуальных приводах промышленной запорной арматуры контроль положения осуществляется с помощью датчиков, называемых абсолютными энкодерами. С помощью энкодеров контроль скорости осуществляется непрерывно во всем диапазоне. Контроль усилия может осуществляться с помощью тензометрических датчиков [2]. Для передачи вращающего момента служит редуктор с большим передаточным отношением, что позволяет снизить скорость вращения и повысить момент, прикладываемые к выходному валу механизма. К основным типам редукторов, используемых для электропривода задвижки относятся:

- червячный редуктор,
- планетарный редуктор,
- волновой редуктор с промежуточными телами качения [3].

В состав привода также входит ручной дублер, служащий для закрытия задвижки в случае неработоспособности двигателя.

Для приведения в движение арматуры, используется источник электроэнергии, электродвигатель преобразует ее в механическое вращательное движение, которое посредством редуктора передается на ходовую гайку.

Ходовая гайка приводит в движение шток с запорным органом, перемещение которого контролируется при помощи концевых и моментных выключателей [4].

Электроприводы запитываются трехфазной сетью с напряжением 380 В и частотой 50 Гц, 220 В, 50 Гц (и другого - по требованию заказчика) и ручного дублера.

Электрические привода реализуют во взрывозащищенном исполнении класса 1ExdПВТЗ согласно [32] степень защиты оболочки не ниже IP 66 [33], с двойным уплотнением и изолированным блоком клемм.

Электроприводы и блоки управления должны быть заземлены в соответствии с требованиями ПУЭ [4].

Для отслеживания крайних положений затворов, применяются регулируемые механические упоры и электрические конечные выключатели. При достижении затвором крайних положений происходит отключение двигателя и подается сигнал на панель управления электроприводом.

Цепь управления электропривода надежно коммутируется конечными выключателями.

Для ограничения крутящего момента используются специальные устройства: механические и электрические, диапазон регулирования которых может регулироваться. Электроприводы отключают двигатель при превышении предельных значений. Сигнал об аварии подается на панель управления и на панель оператора. [32]

Пример электропривода запорной арматуры приведен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Интеллектуальный электропривод ЭПЦ-1000

Принцип действия:

Оператор дистанционно включает электропривод, тот создает момент и с помощью редуктора передает его на шток и ходовую гайку. Происходит перемещение запирающего элемента. По окончании работы привод отключается.

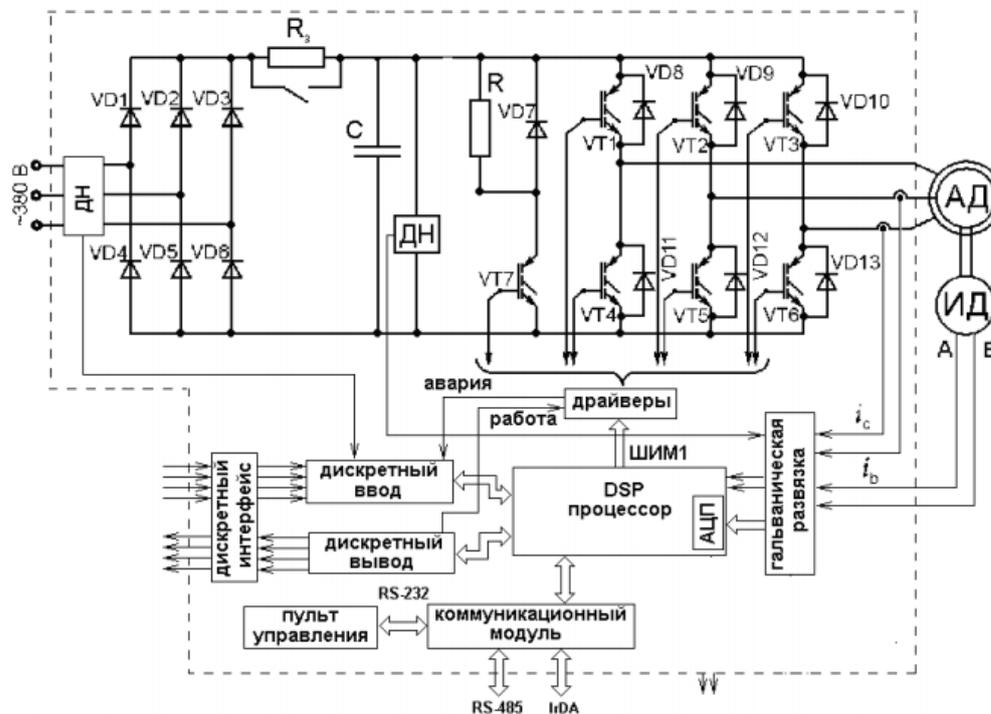


Рисунок 3 – Структурная схема ЭПЗА на базе транзисторного ПЧ

Вариант с ПЧ обладает большей функциональностью нежели вариант с ТРН благодаря применению широтно-импульсной модуляции при формировании напряжения для питания двигателя. Данный способ кроме ограничения моментного усилия на валу двигателя позволяет обеспечить произвольное регулирование скорости вращения, и увеличивает точность позиционирования рабочего органа ЭПЗА при отработке любых перемещений.

1.2.1 Обоснование принципа реализации электропривода

Так как электропривод задвижки является моментным электроприводом, в котором важно формировать момент на запорном органе данной арматуры. Это связано с тем, что на задвижку действует постоянный реактивный момент нагрузки, даже в начале пуска. Поэтому для эффективного запуска механизма является пусковой момент (момент трогания). С помощью электропривода на базе системы ПЧ-АД существует такая возможность с применением векторного управления.

Существуют 2 типа векторного управления:

- управление двигателем без датчика скорости — при этом устройство управления (УУ) использует данные момента двигателя и значения, полученные при измерении тока статора и ротора.
- управление двигателем с датчиком скорости — при этом УУ измеряет помимо токов и значение напряжения, что позволяет повысить точность регулирования.

В данной работе используется векторное управление с датчиком скорости. Так как это позволяет повысить точность измерения положения запорного органа задвижки, что, в свою очередь, не допустит повреждения запорным органом трубопровода.

1.2.2 Структурная схема механической части

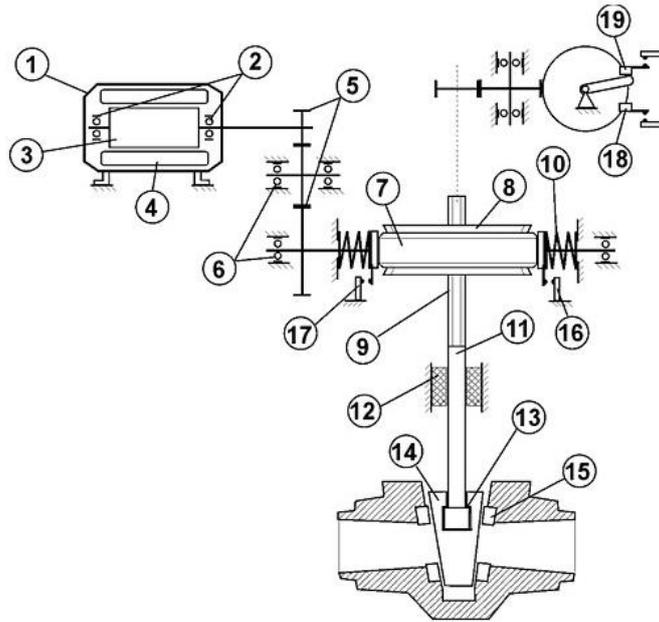


Рисунок 3 – Кинематическая схема задвижки с приводом

На схеме изображенной на рисунке 3 приведены следующие элементы арматуры и привода: 1 – электродвигатель; 2 – подшипники электродвигателя; 3 – ротор электродвигателя; 4 – статор электродвигателя; 5 – зубчатые колеса редуктора; 6 – подшипники редуктора; 7 – червячный вал; 8 – ходовая гайка; 9 – ходовая резьба; 10 – пружины; 11 – шток; 12 – сальник; 13 – узел крепления запорного органа; 14 – запорный орган; 15 – седло посадки запорного органа; 16, 17 – моментные выключатели («открытия/закрытия»); 18, 19 – концевые выключатели («открытия/закрытия»).

На рисунке 4 показана упрощенная модель арматуры с электроприводом.



Рисунок 4 – Модель арматуры

Главные инерционные массы описывают поведение электропривода и запорного органа, а упругая связь учитывает деформации внутри механизмов

Система дифференциальных уравнений для такой системы имеет вид:

$$M_{\delta 6} - M_{\text{упр}} - M_{\delta 1} = J_{\delta 6} (d\omega_{\delta 6} / dt),$$

$$F_{\text{упр}} - F_{\delta 2} = m_{3.0.} (dV_{3.0.} / dt),$$

$$M_{\text{упр}} = C_{\text{упр}} (\varphi_{\text{пр}} - \varphi_{3.0.}),$$

где $M_{\delta 6}$ – крутящий момент электродвигателя; $M_{\text{упр}}, F_{\text{упр}}$ – крутящий момент и сила на упругой связи; $M_{\delta 1}, F_{\delta 2}$ – тормозящие моменты силы трения, возникающие в приводе и запорном органе; $J_{\delta 6}, \omega_{\delta 6}$ – приведенные момент инерции и скорость вращения электродвигателя; $m_{3.0.}, V_{3.0.}$ – приведенная масса и скорость перемещения запорного органа; $C_{\text{упр}}$ – коэффициент упругой связи; $\varphi_{\text{пр}}, \varphi_{3.0.}$ – относительные перемещения привода и запорного органа.

2. Расчетная часть

2.1 Расчет параметров электропривода

В таблице 1 приведены параметры асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором АИР100L6.

Таблица 1. Технические характеристики электродвигателя АИР100L6 [7].

Тип	n_0 , об/мин	$U_{\text{н.}}$, В	$P_{\text{дв.н.}}$, кВт	При номинальной нагрузке			$J_{\text{дв.}}$, кг·м ²
				$s_{\text{н.}}$, %	$\cos\varphi_{\text{н.}}$	$\eta_{\text{н.}}$, %	
АИР100L6	1000	380	2.2	5,5	0,74	81	0,013

Продолжение таблицы 1.

$m_{\text{п}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{н.}}}$	$m_{\text{к}} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н.}}}$	$m_{\text{м}} = \frac{M_{\text{мин}}}{M_{\text{н.}}}$	$k_{\text{идв}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{н.}}}$
2	2,2	1,6	6

Параметры схемы замещения определим по методике, изложенной в [8].

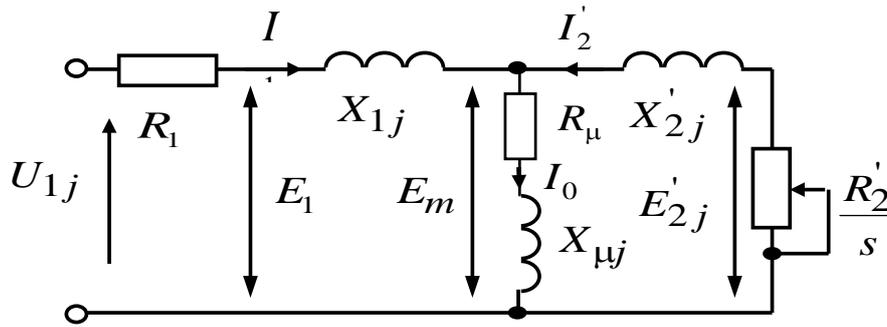


Рисунок 5 – Схема замещения

Ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(p^* \cdot I_{1н} \cdot \frac{1-s_n}{1-p^* \cdot s_n} \right)^2}{1 - \left(p^* \cdot \frac{1-s_n}{1-p^* \cdot s_n} \right)^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{4,539^2 - \left(0,75 \cdot 5,561 \cdot \frac{1-0,055}{1-0,75 \cdot 0,055} \right)^2}{1 - \left(0,75 \cdot \frac{1-0,055}{1-0,75 \cdot 0,055} \right)^2}} = 2,857 \text{ A},$$
(2.1.1)

где $I_{1н}$ – номинальный ток статора:

$$I_{1н} = \frac{P_n \cdot 1000}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{2200}{3 \cdot 220 \cdot 0,74 \cdot 0,81} = 5,561 \text{ A},$$
(2.1.2)

I_{11} – ток фазы статора при частичной нагрузке:

$$I_{11} = \frac{p_z \cdot P_n}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos \varphi_z \cdot \eta_z} = \frac{2200 \cdot 0,75}{3 \cdot 220 \cdot 0,74 \cdot 0,81} = 4,171 \text{ A}.$$
(2.1.3)

p^* – коэффициент загрузки двигателя, принимаем $p^* = 0,75$;

η_{p^*} – КПД при частичной нагрузке, принимаем $\eta_{p^*} = 0,85$.

Коэффициент мощности при частичной нагрузке, принимаем согласно:

$$\cos \varphi_z = 0,74.$$

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

$$c_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{2,857}{2 \cdot 6 \cdot 5,561} = 1,043. \quad (2.1.4)$$

Критическое скольжение:

$$s_{\kappa} = s_H \cdot \frac{m_{\kappa} + \sqrt{m_{\kappa}^2 - (1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_{\kappa} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_{\kappa} - 1)} =$$

$$= 0,055 \cdot \frac{2,6 + \sqrt{2,2^2 - (1 - 2 \cdot 0,055 \cdot 1,85 \cdot (2,2 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,055 \cdot 1,85 \cdot (2,2 - 1)} = 0,307. \quad (2.1.5)$$

где β – коэффициент, значение которого находится в диапазоне 0,6–2,5, принимаем $\beta = 1,85$.

Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = m \cdot U_{1H}^2 \cdot \frac{1 - s_H}{2 \cdot C_1 \cdot m_{\kappa} \cdot P_H} \cdot \frac{1}{C_1 \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_{\kappa}} \right)} =$$

$$= 3 \cdot 220^2 \cdot \frac{1 - 0,06}{2 \cdot 1,043 \cdot 2,2 \cdot 2200} \cdot \frac{1}{1,043 \cdot \left(1,85 + \frac{1}{0,307} \right)} = 2,553 \text{ Ом}. \quad (2.1.6)$$

Активное сопротивление статорной обмотки можно определить по следующему выражению:

$$R_1 = c_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,043 \cdot 2,553 \cdot 1 = 4,925 \text{ Ом}. \quad (2.1.7)$$

Определим параметр γ , который позволит найти индуктивное сопротивление короткого замыкания X_{κ} :

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_{\kappa}^2} \right) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,307^2} \right) - 1,85^2} = 2,679, \quad (2.1.8)$$

тогда

$$X_{\kappa H} = \gamma \cdot c_1 \cdot R_2' = 2,679 \cdot 1,043 \cdot 2,553 = 7,132 \text{ Ом}. \quad (2.1.9)$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки может быть определено по следующему выражению:

$$X_{1н} = 0,42 \cdot X_{кн} = 0,42 \cdot 7,132 = 2,996 \text{ Ом.} \quad (2.1.10)$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме:

$$L_{1н} = \frac{X_{1н}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{2,996}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 9,535 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (2.1.11)$$

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

$$X'_{2н} = \frac{0,58 \cdot X_{кн}}{c_1} = \frac{0,58 \cdot 7,132}{1,043} = 3,967 \text{ Ом.} \quad (2.1.12)$$

Индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{3,967}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,013, \text{ Гн.} \quad (2.1.13)$$

Согласно векторной диаграмме ЭДС ветви намагничивания E_1 , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1н} \cdot \cos \varphi_n - I_{1н} \cdot R_1)^2 + (U_{1н} \cdot \sin \varphi_n - I_{1н} \cdot X_{1н})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,74 - 5,561 \cdot 4,925)^2 + (220 \cdot 0,673 - 5,561 \cdot 23996)^2} = \\ &= 188,625 \text{ В,} \end{aligned} \quad (2.1.12)$$

где

$$\sin \varphi_n = \sin(a \cos(\cos \varphi_n)) = \sin(a \cos(0,74)) = 0,673 \quad (2.1.14)$$

Тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания:

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{188,625}{2,857} = 57,777 \text{ Ом.} \quad (2.1.15)$$

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

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{66,032}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,21 \text{ Гн.} \quad (2.1.16)$$

Рассчитанные параметры схемы замещения сведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры схемы замещения электродвигателя

R_1 , Ом	X_{1H} , Ом	L_{1H} , Гн	R_2' , Ом	X_{2H}' , Ом	L_{2H}' , Гн	X_{μ} , Ом	X_{KH} , Ом	L_{μ} , Гн
4,925	2,996	0,009535	2,553	3,957	0,013	66,032	7,132	0,21019

2.2 Выбор преобразователя

1. Питающая сеть: 3-фазная сеть 380 В, 50 Гц.

2. Параметры преобразователя частоты:

- три фазы;
- максимальное выходное линейное напряжение 380 В;
- максимальная выходная частота инвертора:

$$f_{и.макс} > 50 \cdot \frac{\omega_{эп.макс}}{\omega_0} = \frac{104,72}{104,72} \cdot 50 = 50 \text{ Гц,} \quad (2.2.1)$$

- минимальная выходная частота инвертора:

$$f_{и.мин} < 50 \cdot \frac{\omega_{эп.мин}}{\omega_0} = 50 \cdot \frac{n_{эп.мин}}{n_0} = 50 \cdot \frac{15}{1000} = 0,75 \text{ Гц.} \quad (2.2.2)$$

3. Преобразователь частоты по току выбирается исходя из следующих условий:

- максимальный ток инвертора должен быть больше максимального тока нагрузки

$$I_{и.макс} \geq I_{1лн} \cdot \frac{M_{эл.макс}}{M_{дв.н}} = 5,561 \cdot \frac{2 \cdot 22,231}{22,231} = 11,122 \text{ А.} \quad (2.2.3)$$

В качестве преобразователя частоты для электропривода используется Danfoss VLT серии AutomationDrive FC 302, так как он позволяет реализовать векторное управление (управление вектором потока, бездатчиковое или с датчиком). Параметры представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры преобразователя

Преобразователь частоты	132F0024 Danfoss VLT Micro FC-51 3,0 кВт
Номинальная мощность	2,2 кВт
Номинальный ток	6,49 А
Перегрузочная способность	<ul style="list-style-type: none"> •160% от номинального момента в течение 1 минуты (разгон) •180% от номинального момента в течение 0,5 секунды (в момент пуска)
Управление двигателем	<ul style="list-style-type: none"> •VVCplus (прямое управление амплитудой, углом и частотой вектора напряжения) •Диапазон регулирования : 1:100 без датчика ОС, 1:1000 с датчиком ОС •Возможность управления моментом
Охлаждение	<ul style="list-style-type: none"> •Регулируемый по температуре вентилятор через заднюю стенку •Специальные воздухопроводы для охлаждения приводов большой мощности
Порты связи	<ul style="list-style-type: none"> •Встроенный RS 485 •Встроенный USB
Выходная частоты и частота коммутации	<ul style="list-style-type: none"> •Максимальная выходная частота – 1000 Гц •Частота коммутации – 0,75-16 кГц
Входы\выходы управления	<ul style="list-style-type: none"> •Количество программируемых дискретных выходов – 2 •Количество аналоговых входов – 2 •Количество аналоговых выходов – 1 •Количество встроенных реле -2 •Вход для аппаратного аварийного останова
ПИ\ПИД-регуляторы	<ul style="list-style-type: none"> •ПИД-регуляторы скорости и параметра процесса

2.3 Определение параметров силовой цепи

Максимальный ток через ключи инвертора [9]:

$$I_{c\max} = \frac{P_H \cdot k_1 \cdot \sqrt{2} \cdot k_2}{\eta_{дв} \cos \phi \sqrt{3} U_{л}} = \frac{2200 \cdot 1.3 \cdot \sqrt{2} \cdot 1.2}{0.81 \cdot 0.74 \cdot \sqrt{3} \cdot 380} = 12,303 \text{ А}, \quad (2.3.1)$$

где $k_1 = 1.3$ – коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току, $k_2 = 1.2$ – коэффициент допустимой мгновенной пульсации тока.

Потери в в проводящем состоянии:

$$\begin{aligned} P_{ss} &= \frac{I_{c\max}}{k_1} \cdot U_{ce(sat)} \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \phi \right) = \\ &= \frac{12,303}{1.3} \cdot 0.9 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{0.95}{3 \cdot \pi} \cdot 0.74 \right) = 1,7 \text{ Вт}. \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

где $D = 0.9$ – максимальная скважность.

$U_{ce(sat)}$ - прямое падение напряжения

Потери при коммутации:

$U_d = 1.35U_{л}$, т.к. схема выпрямителя мостовая, $U_{cc} = U_d = 540 \text{ В}$ – напряжение на коллекторе IGBT. Время включения и выключения транзистора: $t_{c(on)} = 0.3 \cdot 10^{-6}$, $t_{c(off)} = 0.7 \cdot 10^{-6}$.

$$I_{cp} = \frac{I_{c\max}}{k_1} = \frac{12,303}{1,3} = 9,464 \text{ А}, \quad (2.3.3)$$

$$\begin{aligned} P_{sw} &= \frac{1}{\pi \sqrt{2}} \cdot \frac{I_{cp} \cdot U_{cc} \cdot f_{sw} (t_{c(on)} + t_{c(off)})}{2} = \\ &= \frac{1}{\pi \sqrt{2}} \cdot \frac{9,464 \cdot 540 \cdot 5000 \cdot (0,3 \cdot 10^{-6} + 0,7 \cdot 10^{-6})}{2} = 2,876 \text{ Вт}, \end{aligned} \quad (2.3.4)$$

где $f_{sw} = 5 \text{ кГц}$ – несущая частота инвертора. [10]

Суммарные потери в IGBT:

$$P_q = P_{ss} + P_{sw} = 1,7 + 2,876 = 4,576 \text{ Вт}. \quad (2.3.5)$$

Потери диода в проводящем состоянии:

$U_{ec} = 1 \text{ В}$ – прямое падение напряжения на диоде в проводящем состоянии:

$$P_{ds} = I_{cp} \cdot U_{ec} \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \phi \right) =$$

$$= 9,464 \cdot 1 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{0.9}{3 \cdot \pi} \cdot 0.74 \right) = 1,889 \text{ Вт.} \quad (2.3.6)$$

Потери диода при восстановлении запирающих свойств:

$T_{rr} = 0.2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ – продолжительность импульса обратного тока.

$$P_{dr} = \frac{1}{8} \cdot U_{ec} \cdot I_{cp} \cdot t_{rr} \cdot f_{sw} = \frac{1}{8} \cdot 1 \cdot 9,464 \cdot 0.2 \cdot 10^{-6} \cdot 5000 = 0,00183 \text{ Вт.} \quad (2.3.7)$$

Потери диода:

$$P_d = P_{dr} + P_{ds} = 1,89 \text{ Вт.} \quad (2.3.8)$$

Результирующие потери в IGBT:

$$P_t = P_d + P_q = 6,466 \text{ Вт.} \quad (2.3.9)$$

2.4 Расчет выпрямителя (трехфазная мостовая схема)

$U_d = 540 \text{ В}$ – среднее выпрямленное напряжение; $n = 6$ – кол-во пар диодов в инверторе. [11]

Максимальное значение среднего выпрямленного тока:

$$I_{dm} = \frac{\cos \phi \cdot \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot \frac{I_{c \max}}{\sqrt{2}} + n \cdot P_t}{U_d} =$$

$$= \frac{0.74 \cdot \sqrt{3} \cdot 380 \cdot \frac{12,303}{\sqrt{2}} + 6 \cdot 6,466}{540} = 7,918 \text{ А.} \quad (2.4.1)$$

Максимальный рабочий ток диода:

$k_{cc} = 1.045$ – для мостовой трехфазной схемы.

$$I_{vm} = k_{cc} I_{dm} = 1,045 \cdot 7,928 = 8,274 \text{ А.} \quad (2.4.2)$$

Максимальное обратное напряжение:

$$U_{vm} = k_{зн} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{л} \cdot k_c \cdot k_{cx} + \Delta U_{\Pi} =$$

$$= 1.2 \cdot \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1.1 \cdot 1.35 + 100 = 1058 \text{ В} \quad (2.4.3)$$

где $k_c = 1.1$ – коэффициент допустимого повышения напряжения сети, $k_{зн} = 1.2$ – коэффициент запаса по напряжению, $\Delta U_{\Pi} = 100\text{--}150 \text{ В}$ – запас на коммутационные выбросы напряжения в звене постоянного тока.

Расчет потерь в выпрямителе для установившегося режима работы ЭП:

$$P_{dv} = mv \cdot k_{cs} \cdot \frac{I_{dm}}{k_1} = 6 \cdot 0,577 \cdot \frac{7,918}{1,3} = 21,086 \text{ Вт},$$

$$k_{cs} = 0.577, \quad mv = 6. \quad (2.4.4)$$

2.5 Расчет фильтра

Коэффициент пульсаций на входе фильтра:

$$q_{1вх} = \frac{2}{m^2 - 1} = 0.057, \quad (2.5.1)$$

где $m = 6$ – для трехфазной мостовой схемы.

Амплитуда тока в фазе двигателя:

$$I_{sm1} = 1.41 \cdot I_{\text{двн}} = 1.41 \cdot 5,561 = 7,841 \text{ А}. \quad (2.5.2)$$

Емкость конденсатора, необходимая для протекания реактивного тока нагрузки инвертора:

$$C_0 = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{sm1} \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_1}{2} - \frac{\pi}{12}\right)}{2U_d \cdot f_{sw} \cdot q_{1вх}} =$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot 7,841 \cdot \sin^2\left(\frac{90}{2} - \frac{\pi}{12}\right)}{2 \cdot 540 \cdot 5000 \cdot 0,057} = 2,076 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}, \quad (2.5.3)$$

$I_{c0m} = q_{1вх} \cdot U_d \cdot 2\pi \cdot m \cdot f_s \cdot C_0 = 3.688 \text{ А}$ – амплитуда тока через конденсатор,

где $f_s = 100 \text{ Гц}$.

Индуктивность в цепи источника питания:

$$L_d = \frac{1}{144 \cdot f} \cdot \left[\frac{U_d}{\cos \beta_{\min}} \right]^2 \cdot \frac{\sin 2\varphi}{P_H} = \frac{1}{144 \cdot 50} \cdot \left[\frac{540}{0.99} \right]^2 \cdot \frac{0.996}{2200} = 0,019 \text{ Гн}, \quad (2.5.4)$$

где $\beta_{\min} = 1.35$ эл/град - минимальный угол запираия ключей.

$$\cos(\varphi) = 0.74;$$

$$\varphi = \arccos(0.74) = 0.738 = 42,284 \text{ град};$$

$$\sin 2\varphi = 0,996.$$

2.6 Расчет механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя

Синхронная угловая скорость:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{3} = 104,72 \text{ рад/с}, \quad (2.6.1)$$

Номинальная угловая скорость:

$$\omega_n = \omega_0 \cdot (1 - s_n) = 104,72 \cdot (1 - 0,055) = 98,96 \text{ рад/с}, \quad (2.6.2)$$

Критическая угловая скорость:

$$\omega_k = \omega_0 \cdot (1 - s_k) = 104,72 \cdot (1 - 0,307) = 72,571 \text{ рад/с}. \quad (2.6.3)$$

Естественная электромеханическая характеристика рассчитывается для частоты 50 Гц по выражению:

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + I_2'(\omega)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(\omega) \cdot \sin \varphi_2(s)} \quad (2.6.4)$$

Приведенный к обмотке статора ток ротора:

$$I_0 = \frac{U_{1\phi n}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1n} + X_\mu)^2}} = \frac{220}{\sqrt{4,925 + (2,996 + 66,032)^2}} = 3.179 \text{ А}, \quad (2.6.5)$$

Ток ротора вычисляется по формуле:

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi n}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{кн}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu} \right)^2}}, \quad (2.6.6)$$

Ток в роторе при номинальном скольжении:

$$\begin{aligned}
 I'_{2H}(s) &= \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2 + X_{KH}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s_H \cdot X_\mu}\right)^2}} = \\
 &= \frac{220}{\sqrt{\left(4,925 + \frac{2,553}{0,055}\right)^2 + 7,132^2 + \left(\frac{4,925 \cdot 2,553}{0,055 \cdot 66,032}\right)^2}} = 4,235 \text{ A.}
 \end{aligned}
 \tag{2.6.7}$$

Действующее значение тока холостого хода вычисляется по следующему выражению:

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}}}\right)^2 + X_{KH}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot X_\mu}\right)^2}},
 \tag{2.6.8}$$

Действующее значение тока холостого хода при номинальном скольжении:

$$\begin{aligned}
 \sin \varphi_{2H}(s) &= \frac{X_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2 + X_{KH}^2}} = \\
 &= \frac{7,132}{\sqrt{\left(4,925 + \frac{2,553}{0,055}\right)^2 + 4,303^2}} = 0,138 \text{ A,}
 \end{aligned}
 \tag{2.6.9}$$

Номинальный ток статора при номинальной частоте вращения:

$$\begin{aligned}
 I_1(\omega_H) &= \sqrt{I_0^2 + I'_2(\omega_H)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2(\omega_H) \cdot \sin \varphi_{2H}(s_H)} = \\
 &= \sqrt{3,179^2 + 4,235^2 + 2 \cdot 3,179 \cdot 4,235 \cdot 0,138} = 5,635 \text{ A.}
 \end{aligned}
 \tag{2.6.10}$$

На рисунке 6 показана естественная электромеханическая характеристика для тока статора.

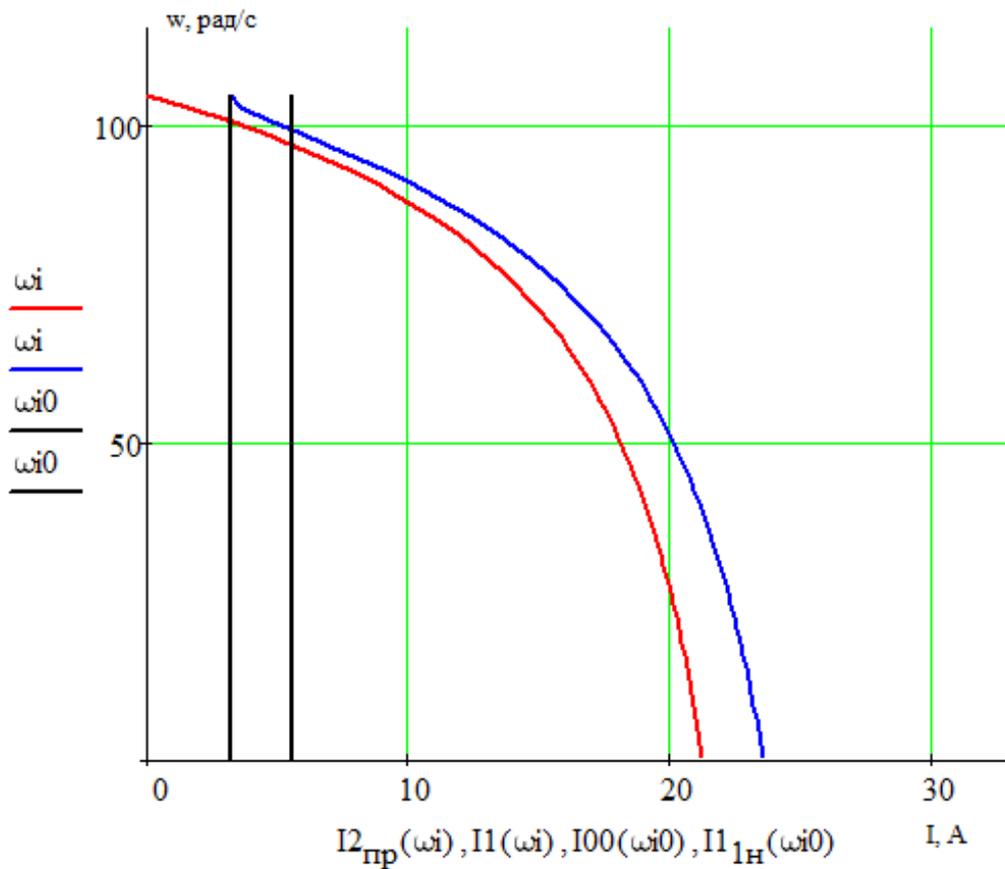


Рисунок 6 – Естественная электромеханическая характеристика

Формула для расчета естественной механической характеристики:

$$M(\omega) = \frac{3 \cdot U_{1\phi n}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{\omega_0 - \omega} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{\omega_0 - \omega} \cdot X_{\mu} \right)^2 \right]} \quad (2.6.11)$$

Критический момент:

$$M(\omega_{кр}) = \frac{3 \cdot U_{1\phi n}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{кр} \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_{кр}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{кр}} \cdot X_{\mu} \right)^2 \right]} = 50,915 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.6.12)$$

Номинальный электромагнитный момент:

$$M_{эм.н}^* = \frac{3 \cdot U_{1\phi н}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_n \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_n} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_n \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = \quad (2.6.14)$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 2,553}{104,72 \cdot 0,055 \cdot \left[7,132^2 + \left(4,925 + \frac{2,553}{0,06} \right)^2 + \left(\frac{4,925 \cdot 2,553}{0,055 \cdot 66,032} \right)^2 \right]} =$$

$$= 23,847 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

На рисунке 7 показана естественная механическая характеристика.

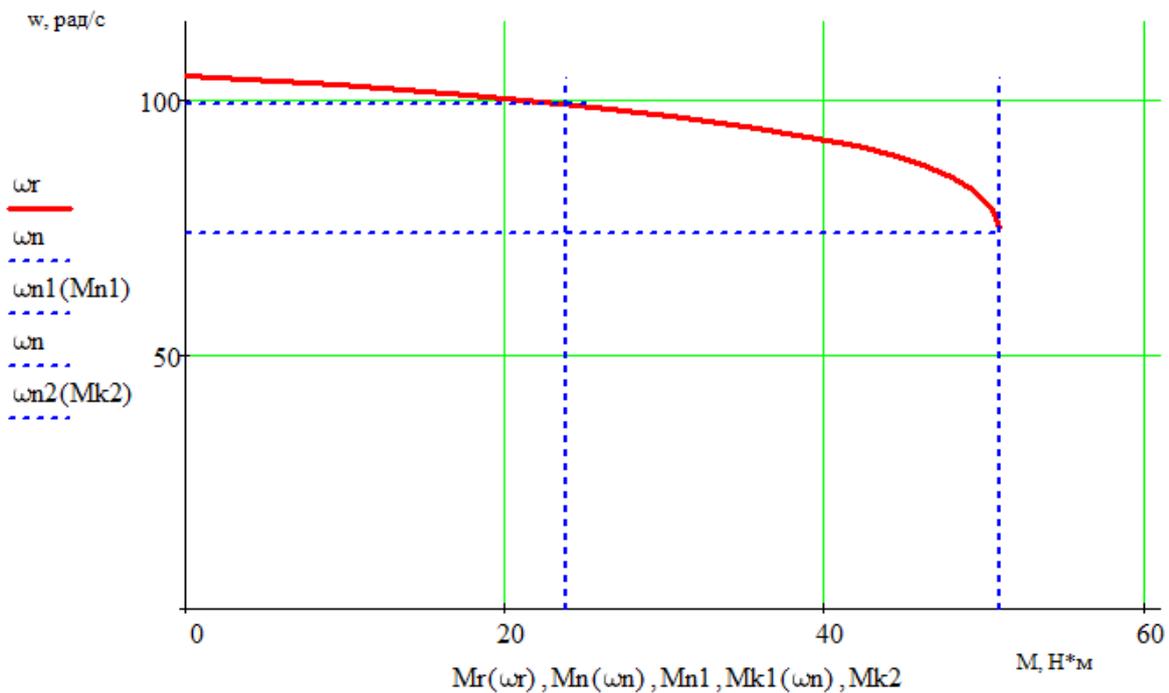


Рисунок 7 – Естественная механическая характеристика

2.7 Определение области работы и проверка выбора двигателя

Ограничение момента:

$$M_{дв.макс} \leq 2 \cdot M_{дв.н} ,$$

$$M_{max} = 1,5 \cdot M_{дв.н} + \Delta M_c + 2,15 =$$

$$= 1,5 \cdot 22,231 + 1,614 + 2,15 = 37,111 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.7.1)$$

Длительный допустимый момент:

$$M_{\text{длдоп}}(\omega M) = M_{\text{эм.н}} \cdot \left(k + (1-k) \cdot \frac{2 \cdot \omega M}{\omega_n} \right), \quad (2.7.2)$$

$$M_{\text{д}}(\omega M) = \text{if}(\omega M \leq 0,5 \cdot \omega_n, M_{\text{длдоп}}(\omega M), (M_{\text{эмн}})). \quad (2.7.3)$$

где $k=0,9$ – коэффициент ухудшения теплоотдачи.

Постоянная нагрузка:

$$M_{\text{нагр}} = 0,746 \cdot M_{\text{двн}} + \Delta M_{\text{смех}} = 16,584 + 1,614 = 18,198 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.7.4)$$

Минимальная нагрузка:

$$M_{\text{нагр,мин}} = 0,17 \cdot M_{\text{двн}} = 3,779 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.7.5)$$

На рисунке 8 показана электромеханическая характеристика с ограничениями.

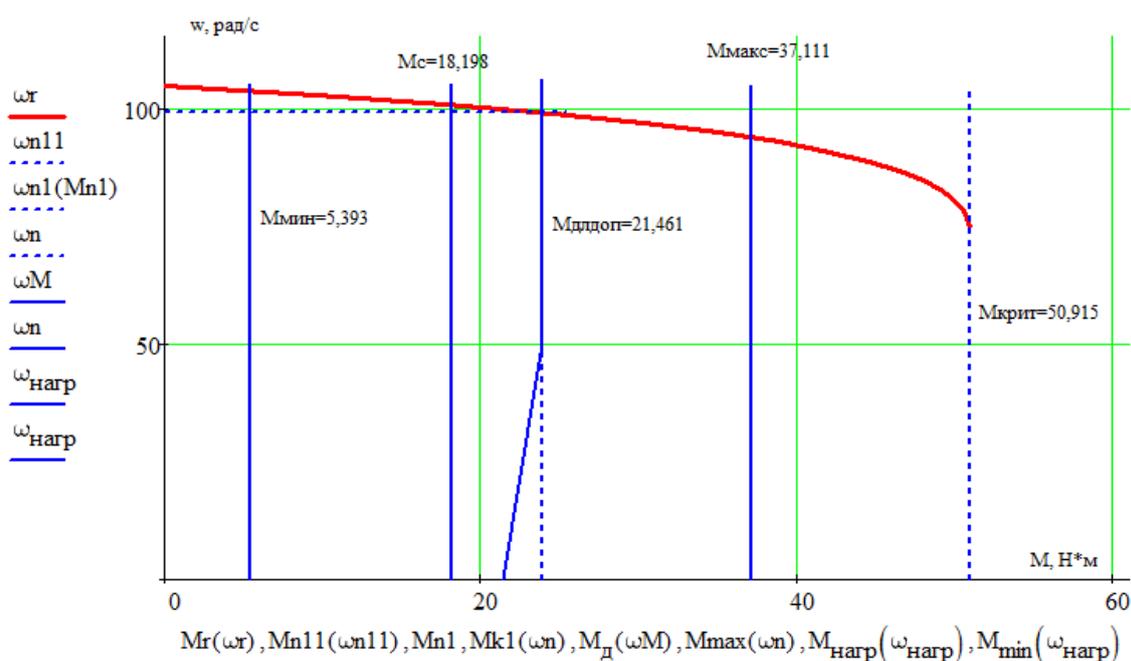


Рисунок 8 – Механическая характеристика с ограничениями

Из рисунка видно, что длительный допустимый момент двигателя больше, чем момент нагрузки. Следовательно, двигатель на низких скоростях вращения не будет перегреваться.

Максимальный ток инвертора:

$$I_{\text{макс}} = 10,8 \text{ А}$$

Номинальный ток инвертора:

$$I_{\text{ном}} = 6,49 \text{ А}$$

Длительно допустимый ток двигателя:

$$I_{\text{длдоп}}(\omega I) = I_{\text{двн}} \cdot \left(k + (1-k) \cdot \frac{2 \cdot \omega I}{\omega_n} \right), \quad (2.7.6)$$

$$I_{\text{д}}(\omega I) = \text{if}(\omega I \leq 0,5 \cdot \omega_n, I_{\text{длдоп}}(\omega I), I_{\text{двн}}), \quad (2.7.7)$$

Максимальный ток электропривода:

$$I_{\text{эм}}(\omega I) = \sqrt{\left(\frac{M_{\text{max}}(\omega I)}{\frac{3}{2} \cdot \frac{L_{\mu}}{L_2} \cdot z_p \cdot \psi_{2н} \cdot \sqrt{2}} \right)^2 + I_0^2}, \quad (2.7.8)$$

Ток при минимальной нагрузке:

$$I_{\text{смин}}(\omega I) = \sqrt{\left(\frac{\text{Nagr}_{\text{min}}(\omega I)}{\frac{3}{2} \cdot \frac{L_{\mu}}{L_2} \cdot z_p \cdot \psi_{2н} \cdot \sqrt{2}} \right)^2 + I_0^2}, \quad (2.7.9)$$

Ток при максимальной нагрузке:

$$I_{\text{смакс}}(\omega I) = \sqrt{\left(\frac{\text{Nagr}(\omega I)}{\frac{3}{2} \cdot \frac{L_{\mu}}{L_2} \cdot z_p \cdot \psi_{2н} \cdot \sqrt{2}} \right)^2 + I_0^2}. \quad (2.7.10)$$

На рисунке 9 показана электромеханическая характеристика с ограничениями.

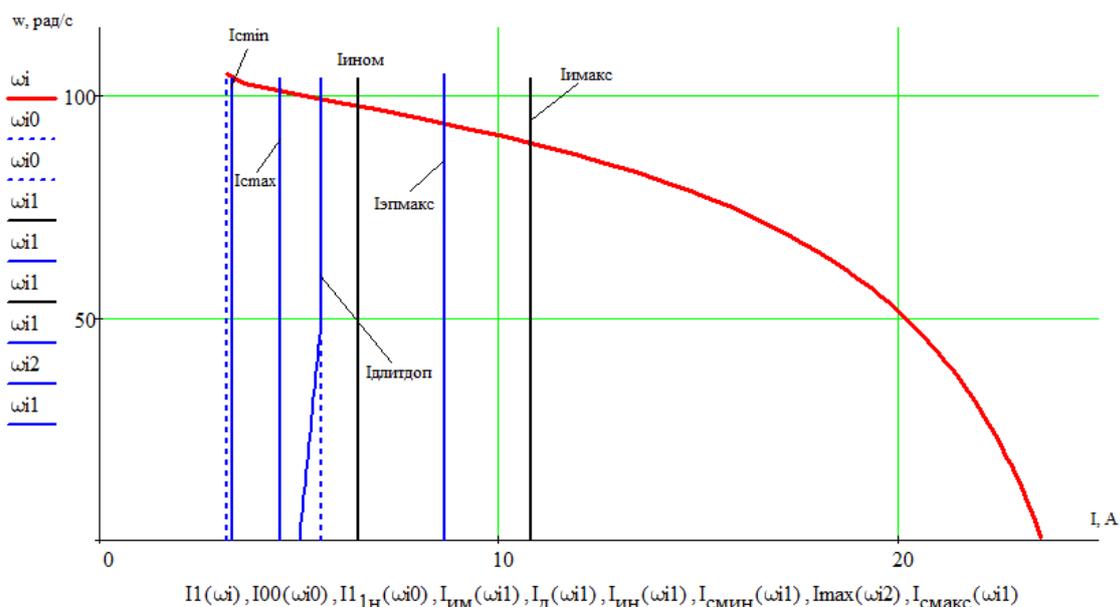


Рисунок 9 – Электромеханическая характеристика с ограничениями

Максимальный ток электропривода ограничивается максимальным током инвертора. Это связано с тем, что силовые полупроводниковые ключи не рассчитаны на высокий ток перегрузки. Поэтому электропривод не должен работать в зоне токов, превышающих максимальный ток инвертора.

3. Структурная схема силового канала электропривода.

Параметры звеньев силовой канал электропривода входят:

- преобразователь частоты, выполняющий функцию электрического преобразователя;
- электродвигатель, выполняющий функцию электромеханического преобразователя;
- механическая система, которая выполняет функцию механического преобразователя.

Структурная схема (рисунок 10) характеризуется следующими промежуточными координатами:

U_1, I_1, Ψ_2 – составляющие напряжения, тока статора и потокосцепления ротора в выбранной ортогональной системе координат;

$M_{\text{дв.эм}}$ – электромагнитный момент двигателя, Н·м.

На структурных схемах приняты следующие обозначения:

$W_{\Pi}(p)$ – передаточная функция преобразователя частоты;

$M_{\text{ср}}$ и $M_{\text{с.а}}$ – момент сопротивления нагрузки реактивного и активного характера.

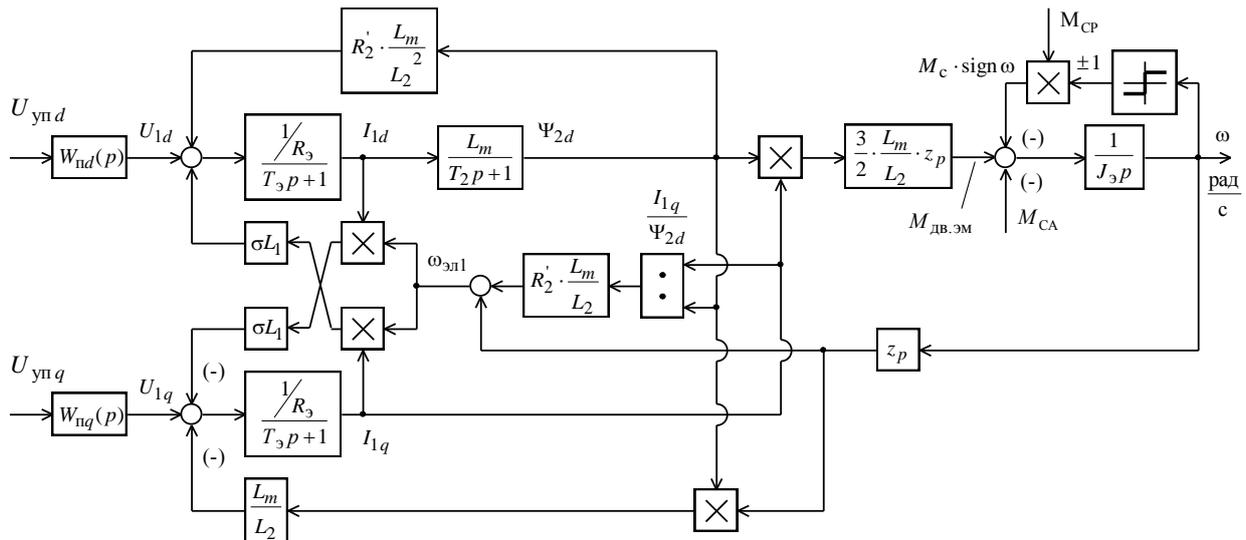


Рисунок 10 – Структурная схема силового канала системы преобразователь – асинхронный электродвигатель во вращающейся двухфазной системе координат, ориентированной по результирующему вектору потока сцепления ротора

Структурная схема силового канала системы преобразователь – асинхронный электродвигатель во вращающейся двухфазной системе координат смоделированная в программе MATLAB Simulink изображена на рисунке 11.

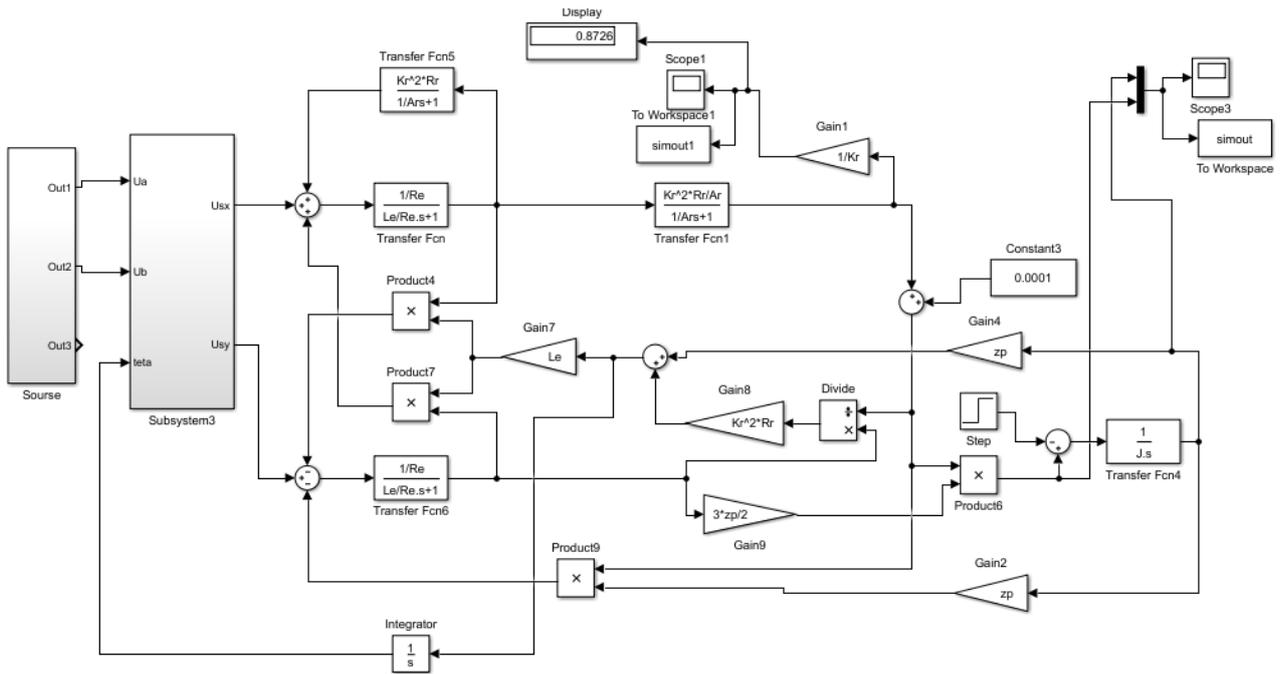


Рисунок 11 – АД во вращающейся системе координат

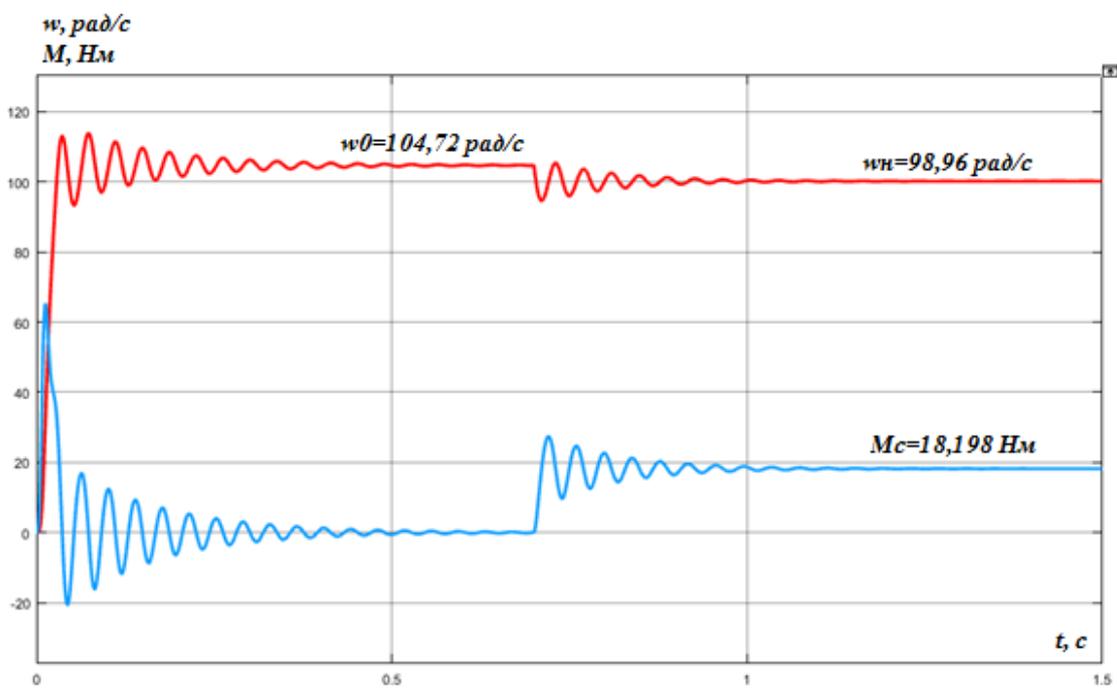


Рисунок 12 - Переходный процесс для скорости и момента

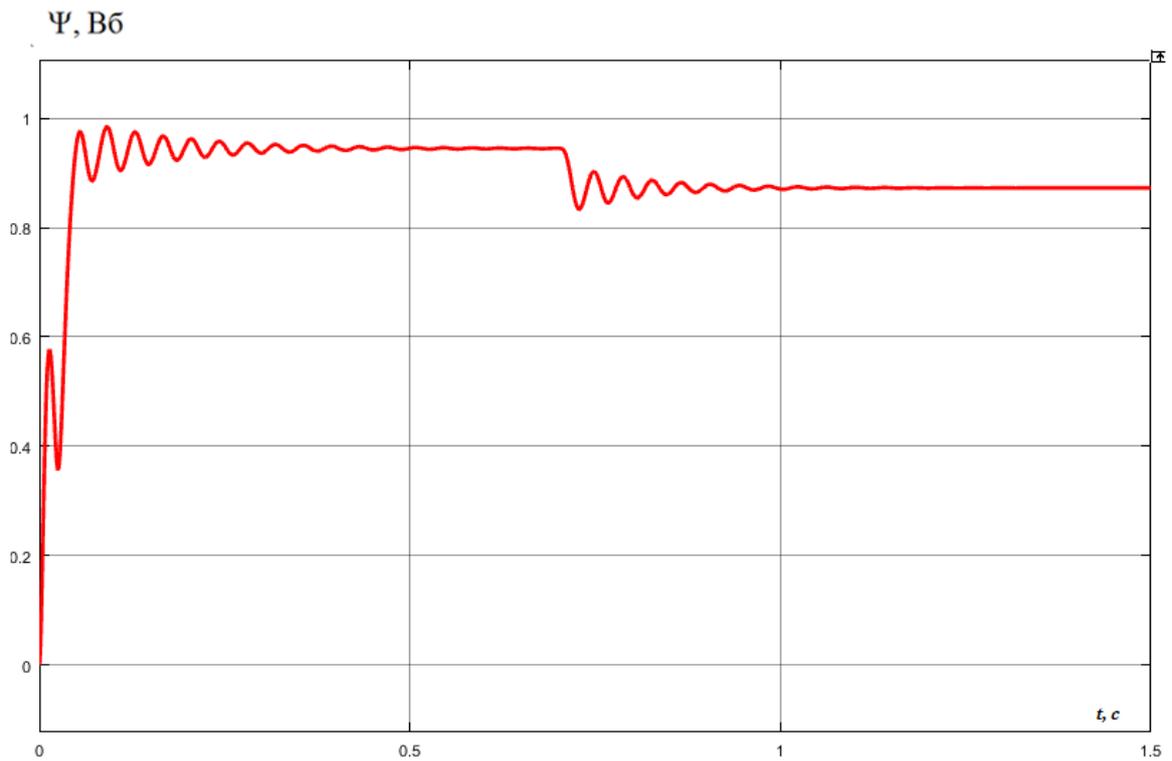


Рисунок 13 - Переходный процесс потокосцепления

Структурная схема силового канала системы преобразователь – асинхронный электродвигатель в неподвижной двухфазной системе координат смоделированная в программе MATLAB Simulink изображена на рисунке 14.

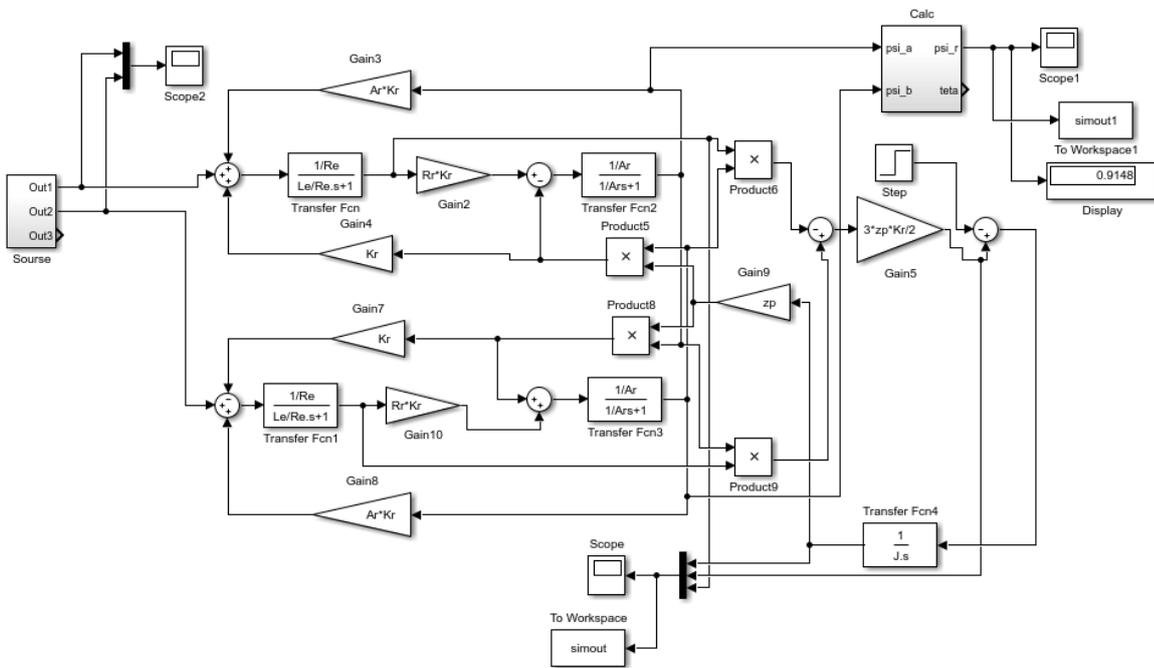


Рисунок 14 - АД в неподвижной системе координат

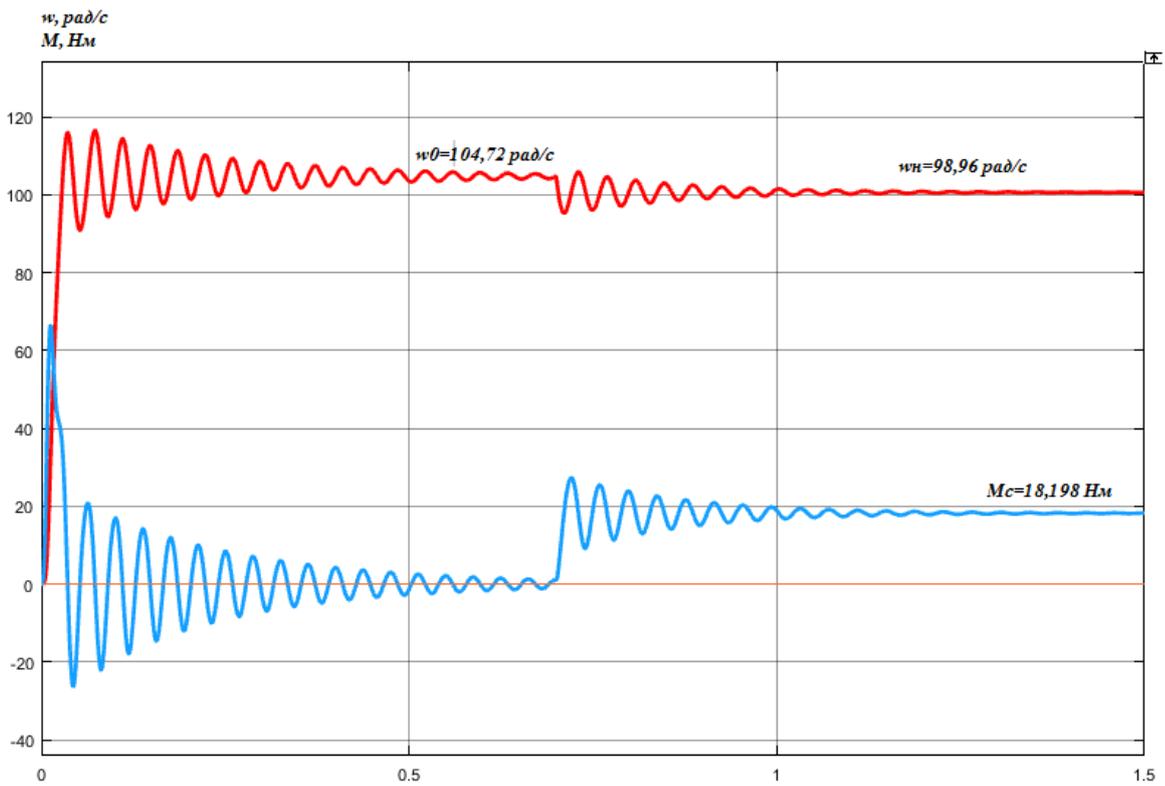


Рисунок 15 - Переходный процесс для скорости и момента

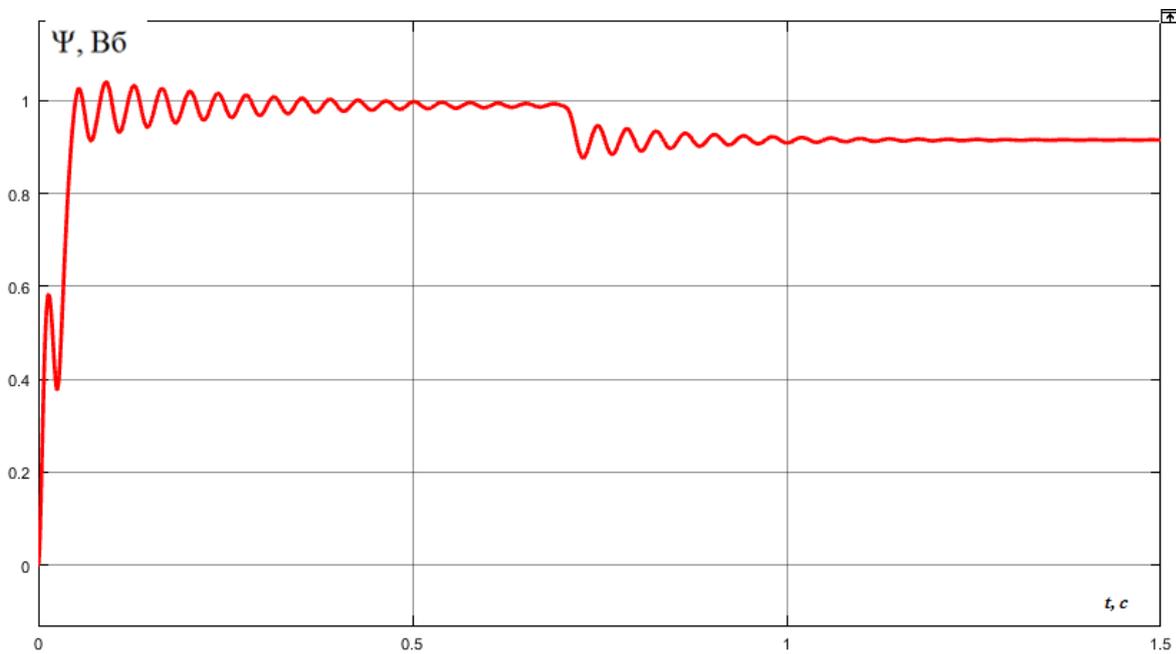


Рисунок 16 - Переходный процесс потокосцепления

Из полученных графиков видно что переходные процессы для неподвижной системы координат и вращающейся практически совпадают.

4. Выбор функциональной и структурной схем, настройка контуров регулирования

4.1 Выбор и обоснование функциональной схемы электропривода

Функциональная схема частотно-регулируемого электропривода с векторным управлением показана на рисунке 17.

На схеме приняты следующие обозначения:

– РС, РΨ, РТ – регуляторы скорости, потокосцепления и составляющих тока статора I_{1q} и I_{1d} .

– УПК1, УПК2 – устройства преобразования координат, прямого и обратного

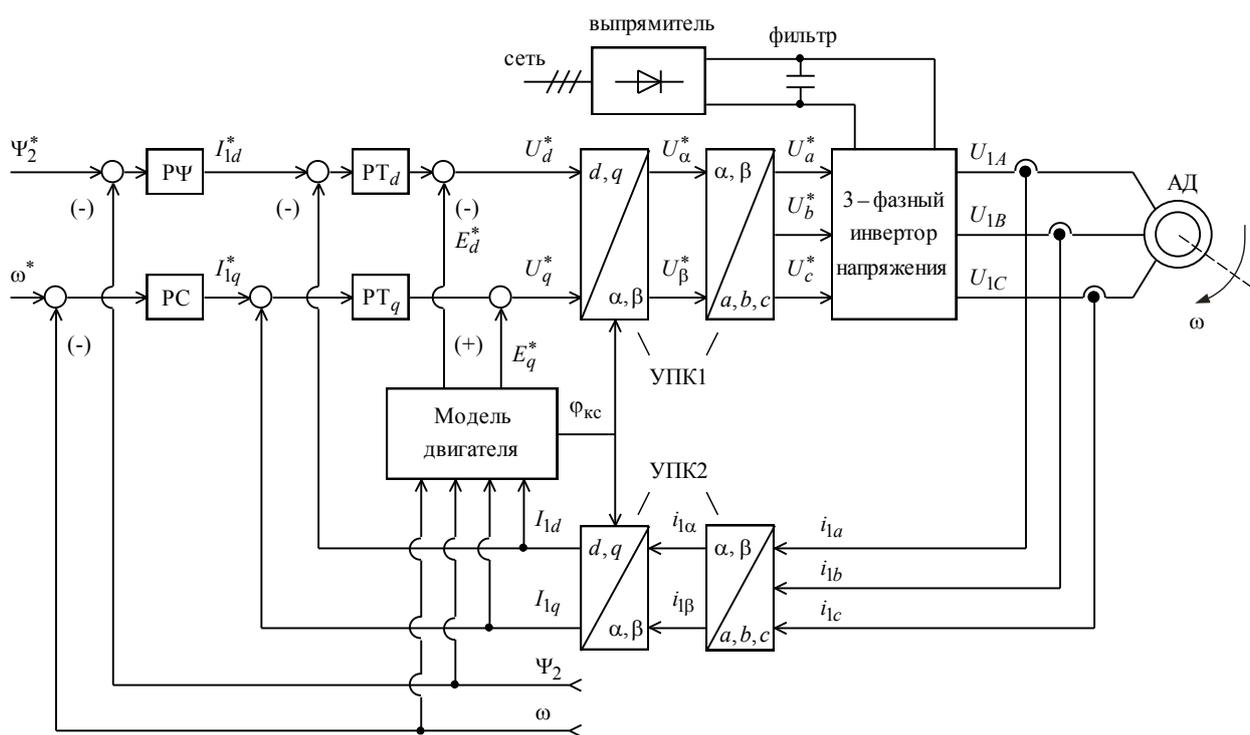


Рисунок 17 – Функциональная схема частотно-регулируемого электропривода с векторным управлением

Обратные связи по потокосцеплению и скорости могут быть выполнены с датчиками потока и скорости и без датчиков. В последнем случае значения

потокосцепления и скорости находятся расчетным путем на основании эталонной модели электродвигателя. Датчики фазных токов двигателя (практически достаточно двух) аналогового типа, поэтому в измерительной цепи устанавливаются сглаживающие фильтры и АЦП. Полоса пропускания фильтров должна быть больше максимальной частоты питающего напряжения двигателя $f_{1\text{макс}}$. Наличие фильтров в цепях измерения токов электродвигателя определяет инерционность обратных связей по току САУ электропривода. Преобразование аналогового сигнала в цифровой происходит с несущей частотой инвертора $f_{\text{шим}}$ и дополнительного запаздывания в контуры регулирования токов не вносит. Однако АЦП вносит квантование сигналов обратной связи по уровню, которое определяется разрядностью преобразователя.[8]

4.2 Структурная схема системы управления электроприводом

Структурная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода приемника с векторным управлением приведена на рисунке 18. На схеме рисунка приняты следующие обозначения:

$W(p)_{рТ}, W(p)_{р\psi}, W(p)_{рс}$ – передаточные функции регуляторов тока, потокосцепления и скорости;

k_T – коэффициент обратной связи по току В/А.

k_ψ – коэффициент обратной связи по потокосцеплению ротора, В/Вб ;

k_c – коэффициент обратной связи по скорости, $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$.

$T_{\mu\tau o}, T_{\mu\psi o}, T_{\mu c o}$ – малые постоянные времени цепи обратной связи по току, потокосцеплению и скорости, с.

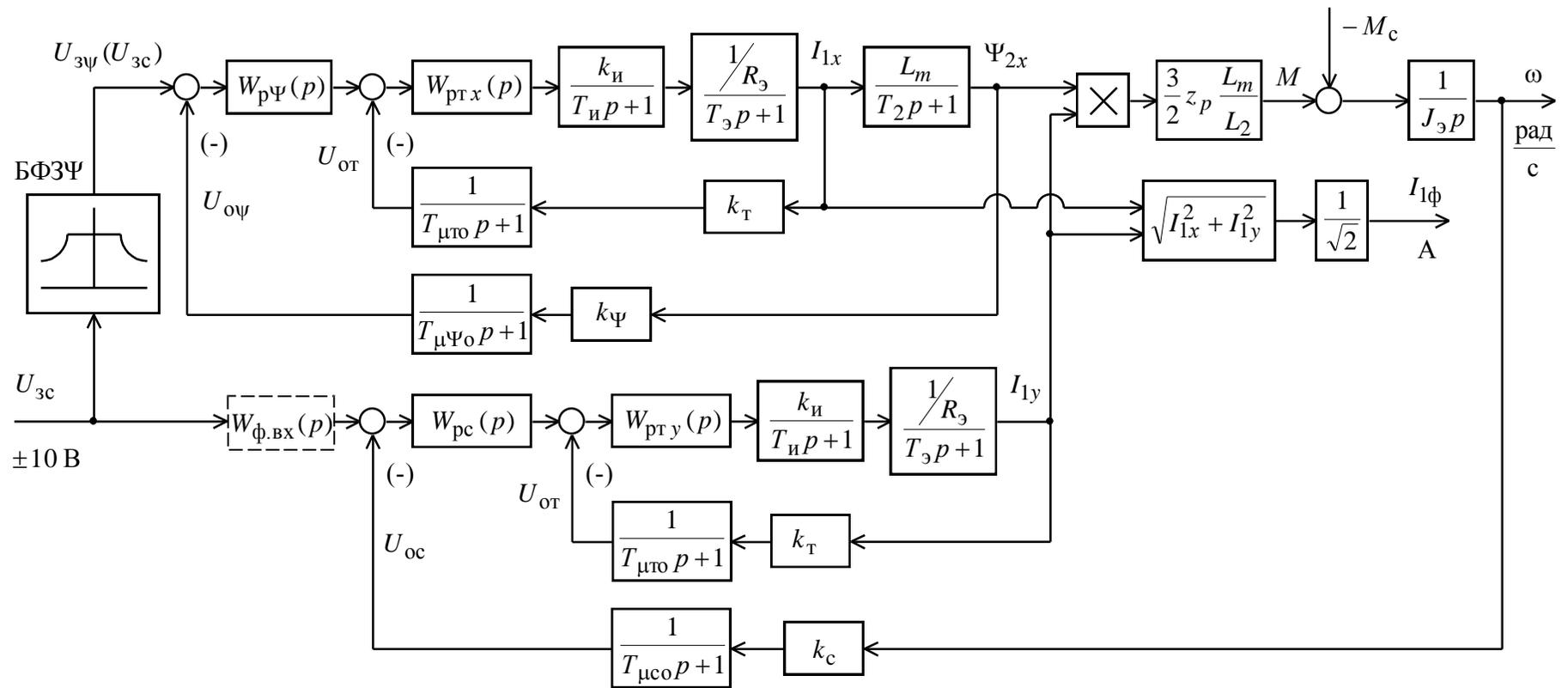


Рисунок 18 – Структурная схема линеаризованной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении

4.3 Определение настроек СУ электропривода

Частота ШИМ:

$$f_{\text{шим}} = 5000 \text{ Гц.}$$

Максимальный ток инвертора:

$$I_{\text{имакс}} = 10,8 \text{ А.}$$

Номинальный ток инвертора:

$$I_{\text{ин}} = 6,49 \text{ А.}$$

Параметры силового канала электропривода

Эквивалентные индуктивности обмоток:

- статора: $L_1 = L_{1\sigma} + L_{1\mu} = 9,535 \cdot 10^{-3} + 0,21 = 0,21972 \text{ Гн,}$ (4.3.1)

- ротора: $L_2' = L_{2\sigma}' + L_{2\mu}' = 0,013 + 0,21 = 0,22319 \text{ Гн.}$ (4.3.2)

Коэффициент рассеяния:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2'} = 1 - \frac{0,21^2}{0,21972 \cdot 0,22319} = 0,099, \quad (4.3.3)$$

Эквивалентное сопротивление:

$$R_{1\sigma} = R_1 + R_{2np} \frac{L_{1\mu}^2}{L_{2np}^2} = 4,925 + 2,553 \cdot \frac{0,21^2}{0,22319^2} = 7,189 \text{ Ом,} \quad (4.3.4)$$

Электромагнитные постоянные времени:

$$T_{1\sigma} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{1\sigma}} = \frac{0,099 \cdot 0,22}{7,189} = 3,02921 \cdot 10^{-3} \text{ с,} \quad (4.3.5)$$

$$T_2 = \frac{L_{2np}}{R_{2np}} = \frac{0,223}{2,553} = 0,08742 \text{ с,} \quad (4.3.6)$$

Эквивалентный момент инерции

$$J_{\sigma} = 0,03 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Постоянная времени ШИМ:

$$T_u = T_{\text{шим}} = \frac{1}{f_{\text{шим}}} = \frac{1}{5000} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с,} \quad (4.3.7)$$

Сквозность импульсов:

$$\gamma = 0.95$$

Напряжение звена постоянного тока:

$$U_{d0} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{1\phiн}}{\gamma_{\max}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 220}{0.95} = 567.25 \text{ В.} \quad (4.3.9)$$

Инвертор ШИМ может быть представлен линейным усилителем с коэффициентом усиления при соединении обмоток статора в звезду:

$$k_u = \frac{U_{d0}}{\sqrt{3} \cdot N_{уп\max}} = \frac{567.25}{\sqrt{3} \cdot 1.35} = 327.502. \quad (4.3.10)$$

Вариант настройки по ограничению момента:

$$M_{\text{эпмакс}} = 2 \cdot M_{\text{двн}} + \Delta M_{\text{сдв}} = 2 \cdot 22,231 + 1,616 = 46,078 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (4.3.11)$$

Максимальный ток I_q :

$$I_{q\max} = \frac{M_{\text{эпмакс}}}{\frac{3}{2} \cdot \frac{L_\mu}{L_{2н}} \cdot z_p \cdot \psi_{2н}} = \frac{46,078}{\frac{3}{2} \cdot \frac{0.21}{0.223} \cdot 3 \cdot 0.945} = 11,506 \text{ А}, \quad (4.3.12)$$

$$\text{mod } I_{1\max} = \sqrt{I_{1q\max}^2 + I_{1дн}^2} = \sqrt{11,506^2 + 4,04^2} = 12,194 \text{ А}. \quad (4.3.13)$$

Максимальный ток электропривода:

$$I_{\text{эпмакс}} = \frac{\text{mod } I_{1\max}}{\sqrt{2}} = \frac{12,194}{\sqrt{2}} = 8,623 \text{ А} \quad (4.3.14)$$

Условие правильности:

$$I_{\text{эпмакс}} \leq I_{\text{иммакс}} \\ 8,623 \leq 10,8$$

Условие выполняется

4.4 Параметры настройки контура тока с ПИ-регулятором и аналоговым датчиком:

Ток электропривода максимальный:

$$I_{\text{эпмакс}} = 8,623 \text{ А}$$

Разрядность АЦП:

$$n_{\text{ацндт}} = 12$$

Величину σ_T выбирают из условия $\sigma_T \geq 1.2$

Максимальный измеряемый ток электропривода

$$I_{\text{изммакс}} = \sigma_c \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{элмакс}} = 1.2 \cdot \sqrt{2} \cdot 8,623 = 14,634 \text{ А} \quad (4.4.1)$$

Принимаем $I_{\text{изммакс}} = 15$

Структурная схема контура регулирования составляющей тока статора i_{sx} представлена на рисунке 19.

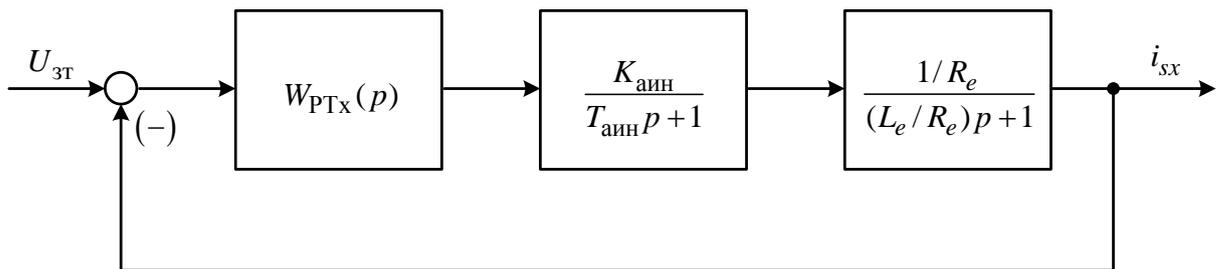


Рисунок 19 – Структурная схема контура регулирования составляющей тока статора i_{sx}

Преобразователь частоты представлен в системе электропривода апериодическим звеном первого порядка.

Принимаем значение коэффициента усиления преобразователя равным единице:

$$k_{\text{аин}} = 1.$$

Эквивалентная постоянная времени преобразователя:

$$T_{\text{аин}} = \frac{1}{f_{\text{шим}}} = \frac{1}{5000} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с.} \quad (4.4.2)$$

Контур тока настраиваем на модульный оптимум. В этом случае принимаем ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{\text{пр}}(p) = k_{\text{пр}} \cdot \frac{T_{\text{пр}} \cdot p + 1}{T_{\text{пр}} \cdot p}. \quad (4.4.3)$$

Принимаем малую некомпенсируемую постоянную времени контура тока равной постоянной времени автономного инвертора напряжения:

$$T_{\mu m} = T_{\text{аин}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с.} \quad (4.4.4)$$

Коэффициент передачи регулятора тока:

$$k_{\text{пр}} = \frac{L_e}{K_{\text{аин}} \cdot a_T \cdot T_{\text{аин}}} = \frac{0,0218}{1 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 54,4445. \quad (4.4.5)$$

где $a_T = 2$ – коэффициент оптимизации.

Постоянная времени регулятора тока:

$$T_{\text{пр}} = \frac{L_e}{R_e} = \frac{0,0218}{7,1893} = 0,003 \text{ с.} \quad (4.4.6)$$

Контур является астатической системой 1-ого порядка по управлению и имеет ожидаемые показатели качества работы по управлению приведенные в таблице 4.

Таблица 4. Ожидаемые показатели качества работы контура тока

Перерегулирование	$\sigma, \%$	4.3 %
Время первого согласования	$t_{\text{py1}}^{(5)}, \text{ с}$	$4.1 \cdot T_{\mu\text{тэ}} = 4.1 \cdot 0.0002 = 0.0082 \text{ с}$
Время переходного процесса при обработке ступенчатого управляющего задания	$t_{\text{py2}}^{(5)}, \text{ с}$	$4.1 \cdot T_{\mu\text{тэ}} = 4.1 \cdot 0.0002 = 0.0082 \text{ с}$
Полоса пропускания по модулю	$\omega_{\text{п}}^{(M)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\frac{0.71}{T_{\mu\text{тэ}}} = \frac{0.71}{0.0002} = 3550 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$
Полоса пропускания по фазе	$\omega_{\text{п}}^{(\Phi)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\frac{0.71}{T_{\mu\text{тэ}}} = \frac{0.71}{0.0002} = 3550 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$
Установившаяся ошибка	$\Delta I_{\text{уст}}$	$\Delta I_{\text{уст}} = 0, \text{ А}$

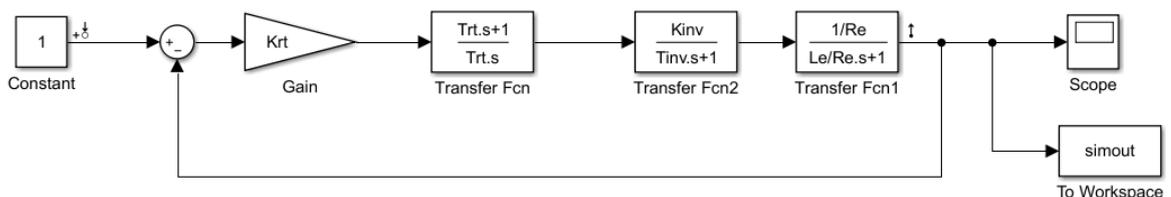


Рисунок 20 - Имитационная модель контура тока

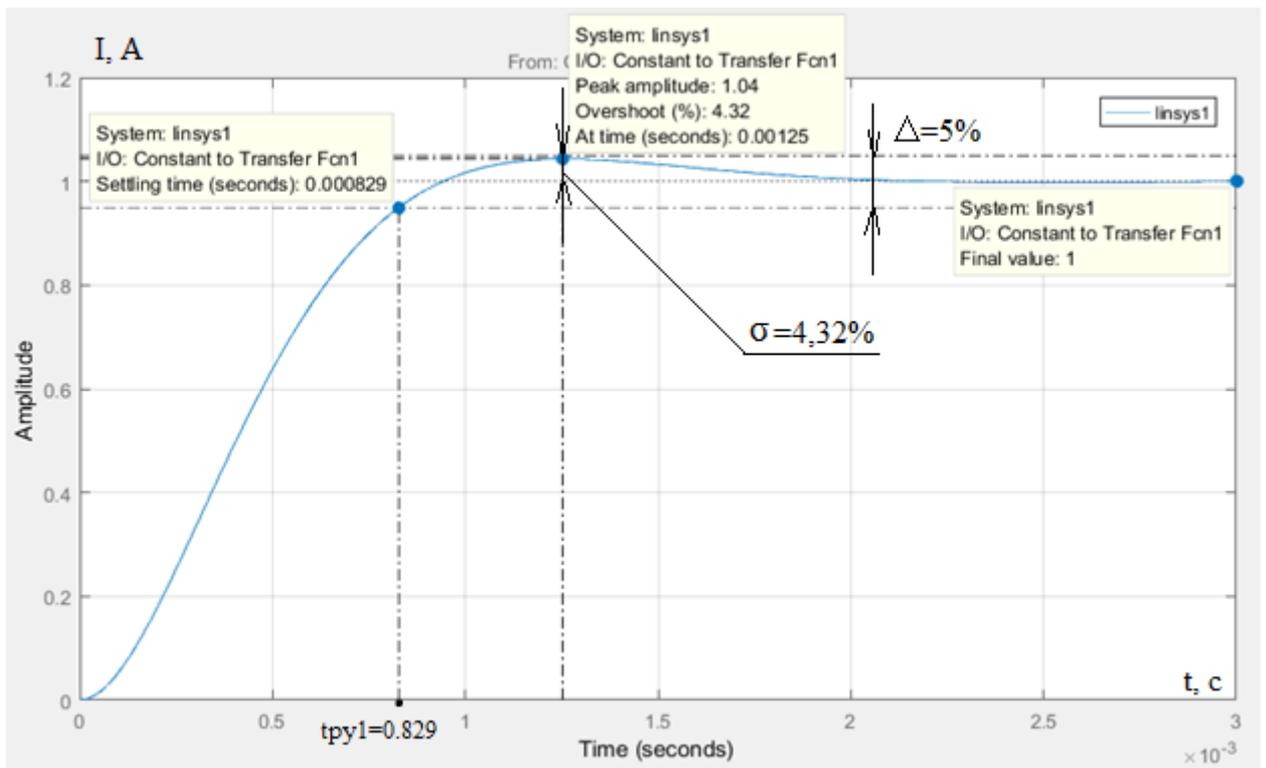


Рисунок 21 – Переходный процесс контура тока

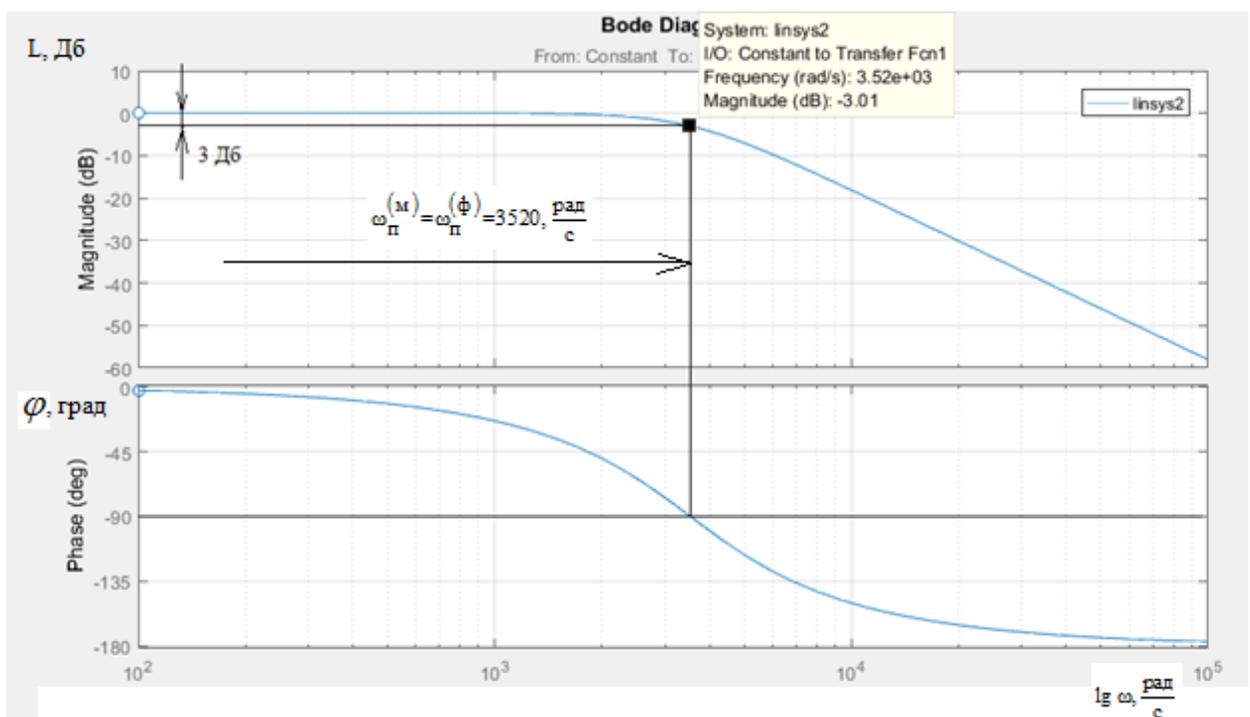


Рисунок 22 – ЛЧХ замкнутого контура тока

Сведем теоретические и экспериментальные показатели качества работы линеаризованного контура тока в таблицу 1.

Таблица 5 – Показатели качества переходных процессов по управлению
линеаризованного контура тока, оптимизированного по МО

$t_{py1}^{(5)}, c$	$t_{py2}^{(5)}, c$	$\sigma, \%$	$\Delta I_{уст}, A$	$\omega_n^{(\phi)}, \frac{рад}{c}$	$\omega_n^{(M)}, \frac{рад}{c}$
Ожидаемые показатели					
0,00082	0,00082	4,3	0	3550	3550
Результаты моделирования					
0,000829	0,000829	4,32	0	3520	3520

Сравнивая ожидаемые показатели качества переходного процесса в контуре потокосцепления, оптимизированного по МО, с результатами моделирования, можно сказать, что теоретические значения сошлись с полученными с допустимой погрешностью.

4.5 Настройки контура потокосцепления с ПИ-регулятором и аналоговым датчиком:

Разрядность АЦП:

$$n_{аналог\psi} = 12$$

Величину σ_ψ выбирают из условия $\sigma_\psi \geq 1.1$

Максимальный измеряемый поток электропривода

$$\psi_{изм\max} = \sigma_\psi \cdot \psi_{2н} = 1.1 \cdot 0.945 = 1,0395 \text{ Вб} \quad (4.5.1)$$

Принимаем $\psi_{изм\max} = 1$

Коэффициент передачи датчика потока:

$$k_{\psi} = \frac{0.5 \cdot 2^{n_{аналог\psi}}}{\psi_{изм\max}} = \frac{0.5 \cdot 2^{12}}{1} = 2048 \quad (4.5.2)$$

Максимальное задание на датчик потока:

$$N_{зт\max} = \frac{\psi_{2н}}{\psi_{изм\max}} = \frac{0.945}{1} = 0.945 \quad (4.5.3)$$

Структурная схема контура потокосцепления ротора представлена на рисунке 23.

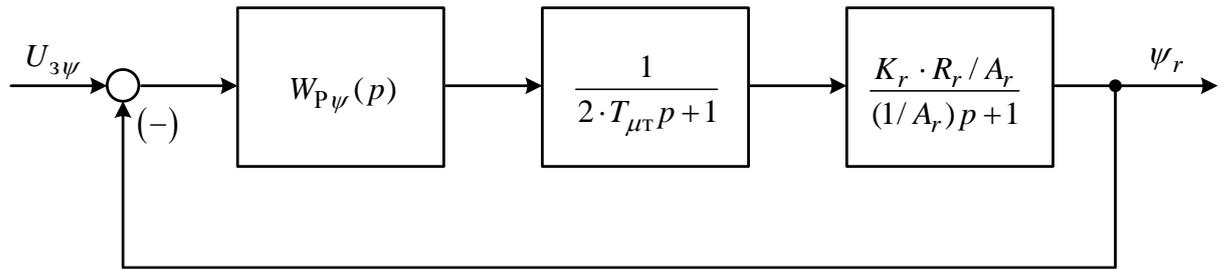


Рисунок 23 – Структурная схема контура потокосцепления ротора

Внутренний оптимизированный контур тока представлен усеченной передаточной функцией:

$$W_{з.к.т.}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu T} \cdot p + 1}. \quad (4.5.4)$$

Контур потокосцепления ротора настраиваем на модульный оптимум. В этом случае принимаем ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{p\psi}(p) = k_{p\psi} \cdot \frac{T_{p\psi} \cdot p + 1}{T_{p\psi} \cdot p}. \quad (4.5.5)$$

$$K_r = \frac{L_m}{L_r} = \frac{0.2102}{0.2232} = 0.9418 \quad (4.5.6)$$

Коэффициент передачи регулятора потокосцепления ротора:

$$k_{p\psi} = \frac{1}{K_r \cdot R_r \cdot a_n \cdot a_T \cdot T_{\mu T}} = \frac{1}{0.94 \cdot 2.553 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 519,9025 \quad (4.5.7)$$

где $a_\psi = a_T = 2$ – коэффициенты оптимизации.

Постоянная времени регулятора потокосцепления ротора:

$$T_{p\psi} = \frac{1}{A_r} = \frac{1}{11,4387} = 0,0874 \text{с}, \quad (4.5.8)$$

где

$$A_r = \frac{R_r}{L_r} = \frac{2,553}{0,2232} = 11,4347 \quad (4.5.9)$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура потокосцепления ротора представлены в таблицу 6.

Таблица 6. Ожидаемые показатели качества работы контура скорости

Перерегулирование	$\sigma, \%$	8,14 %
Время первого согласования	$t_{\text{пв1}}^{(5)}, \text{с}$	$7 \cdot T_{\text{пр}} = 7 \cdot 0.0002 = 0.0014 \text{ с}$
Время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего задания	$t_{\text{пв2}}^{(5)}, \text{с}$	$12 \cdot T_{\text{пр}} = 12 \cdot 0.0002 = 0.0024 \text{ с}$
Полоса пропускания по модулю	$\omega_{\text{п}}^{(M)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\frac{0,5}{T_{\text{пр}}} = \frac{0,5}{0,0002} = 2500 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$
Полоса пропускания по фазе	$\omega_{\text{п}}^{(\Phi)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\frac{0,35}{T_{\text{пр}}} = \frac{0,35}{0.0002} = 1750 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$
Установившаяся ошибка	$\Delta\Psi_{\text{уст}}$	$\Delta\Psi_{\text{уст}} = 0, \text{ Вб}$

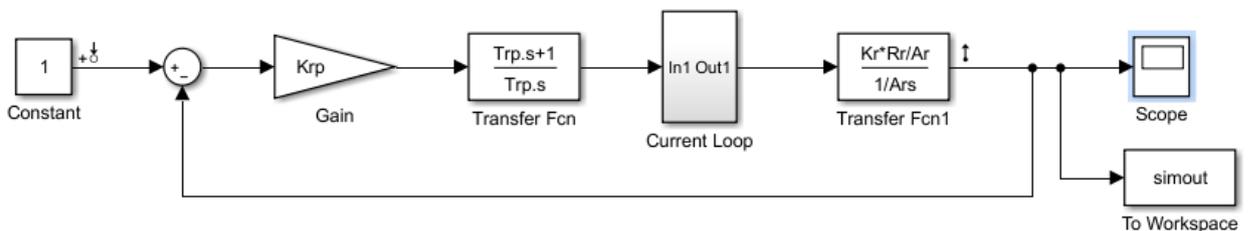


Рисунок 24 – Имитационная модель контура потокосцепления

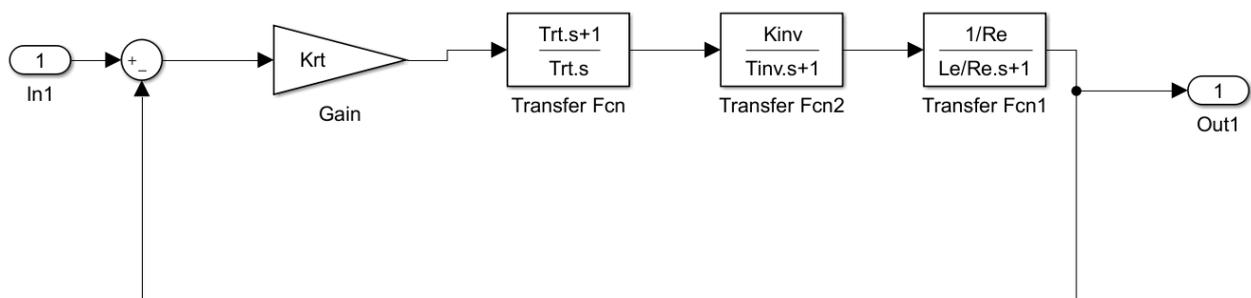


Рисунок 25 – Имитационная модель подсистемы «Current Loop»

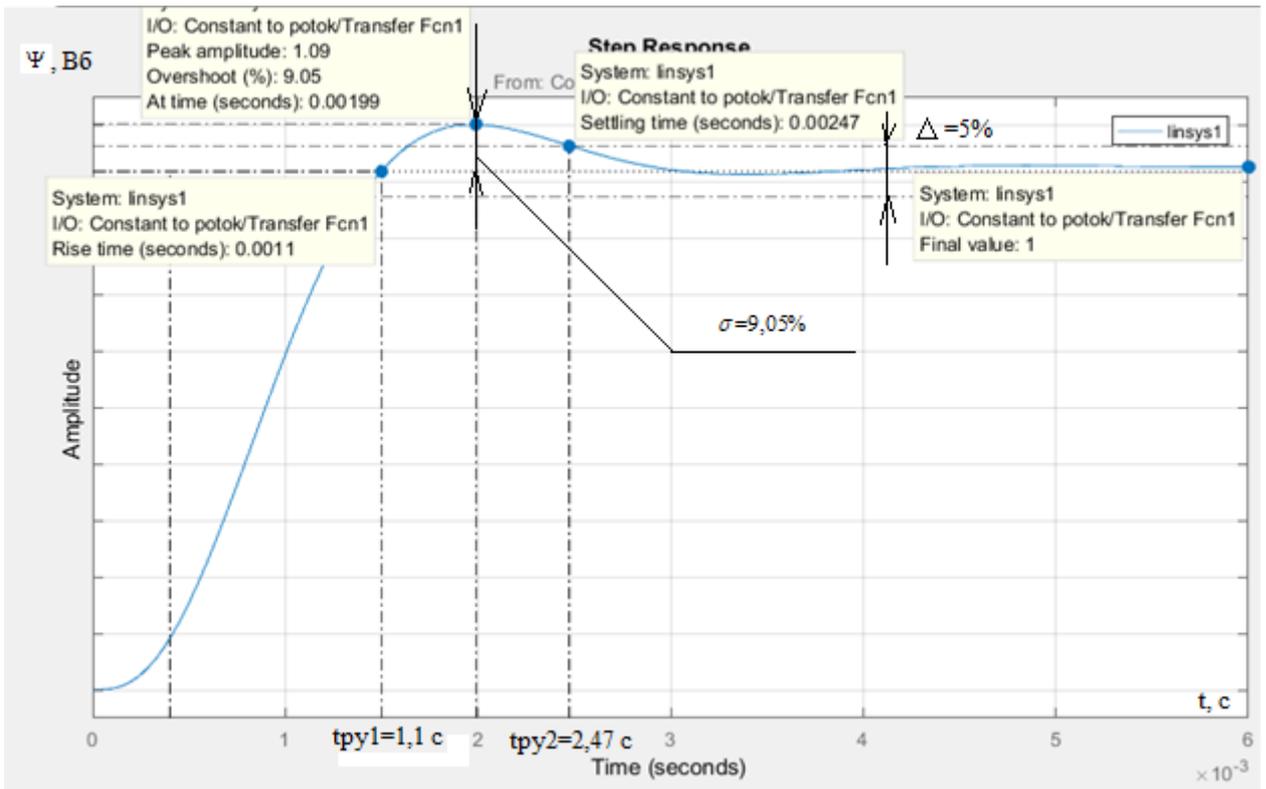


Рисунок 26 – Переходный процесс контура потокосцепления

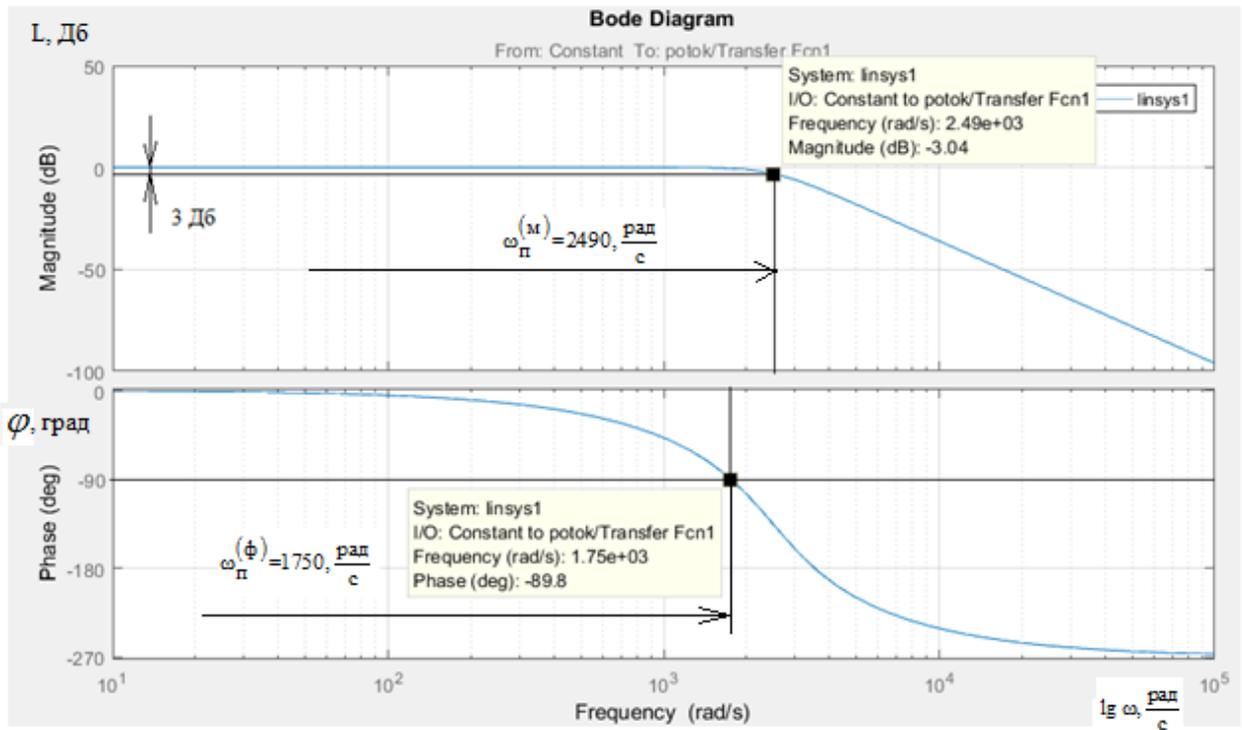


Рисунок 27 – ЛЧХ замкнутого контура потокосцепления ротора

Сведем теоретические и экспериментальные показатели качества работы линеаризованного контура тока в таблицу 7.

Таблица 7 – Показатели качества переходных процессов по управлению линейризованного контура потокосцепления, оптимизированного по МО

$t_{py1}^{(5)}, c$	$t_{py2}^{(5)}, c$	$\sigma, \%$	$\Delta\psi_{уст}, Bб$	$\omega_n^{(\phi)}, \frac{рад}{c}$	$\omega_n^{(м)}, \frac{рад}{c}$
Ожидаемые показатели					
0,0014	0,0024	8,14	0	1750	2500
Результаты моделирования					
0,0011	0,00247	9,05	0	1750	2490

Сравнивая ожидаемые показатели качества переходного процесса в контуре потокосцепления, оптимизированного по МО, с результатами моделирования, можно сказать, что теоретические значения сошлись с полученными с допустимой погрешностью.

4.6 Параметры настройки контура скорости с ПИ-регулятором и импульсным датчиком:

Датчик скорости – импульсный. Выдает 1024 имп/оборот (без учетверения)

Максимальная скорость электропривода $\omega_{эпмакс} = 98,96 \text{ рад/с}$

Величину σ_c выбирают из условия $\sigma_c \geq 1.5$

$$\sigma_c \cdot \omega_{эпмакс} = 1,5 \cdot 98,96 = 148,44$$

Принимаем $\omega_{изммакс} = 150$

Структурная схема контура скорости представлена на рисунке 27.

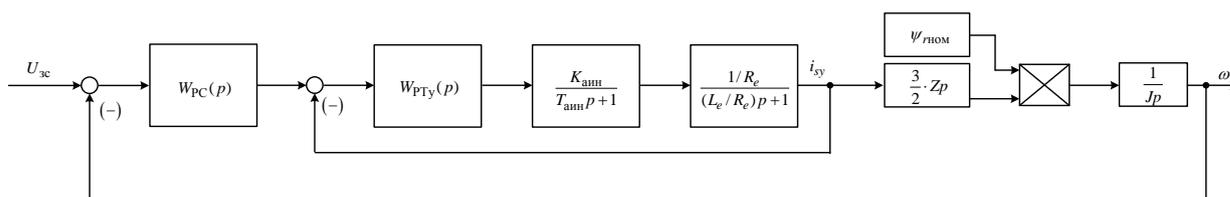


Рисунок 28 – Структурная схема контура скорости

Контур скорости настраиваем на симметричный оптимум. В этом случае принимаем ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{pc}(p) = k_{pc} \cdot \frac{T_{pc} \cdot p + 1}{T_{pc} \cdot p}. \quad (4.6.1)$$

Для уменьшения влияния работы контура потокосцепления на динамику контура скорости принимаем малую некомпенсируемую постоянную времени контура скорости:

$$T_{\mu c} = 20 \cdot T_{\mu m} = 20 \cdot 0,0002 = 0,004 \text{ с.}$$

Для величины малой некомпенсируемой постоянной времени в контуре скорости принято значение $T_{\mu c} = 0,004 \text{ с}$, что гораздо больше чем при оптимизации контура управления потокосцеплением. Данное положение приводит к снижению быстродействия в контуре скорости с одной стороны, но позволяет уменьшить взаимное влияние между контурами скорости и потокосцепления с другой.

Коэффициент передачи регулятора скорости:

$$\begin{aligned} k_{pc} &= \frac{J \cdot 98}{1,5 \cdot z_p \cdot \psi_{2H} \cdot a_c \cdot 1024 \cdot T_{\mu t}} = \\ &= \frac{0,011 \cdot 98}{1,5 \cdot 3 \cdot 0,849 \cdot 8 \cdot 1024 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 0,3163, \end{aligned} \quad (4.6.2)$$

где $a_c = 8$ – коэффициент оптимизации.

Постоянная времени регулятора скорости:

$$T_{pc} = 98 \cdot T_{\mu t} = 98 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 0,0196 \text{ с.} \quad (4.6.3)$$

Для уменьшения перерегулирования контура скорости, настроенного на симметричный оптимум, на вход контура устанавливаем фильтр (апериодическое звено первого порядка) с постоянной времени:

$$T_{\text{вх.ф}} = 32 \cdot 4 \cdot T_{\mu t} = 32 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 0,0256 \text{ с.} \quad (4.6.4)$$

Ожидаемые показатели качества работы контура скорости, настроенного на модульный оптимум сведены в таблицу 8.

Таблица 8. Ожидаемые показатели качества работы контура скорости

Перерегулирование	$\sigma, \%$	8,1 %
Время первого согласования	$t_{py1}^{(5)}, c$	$7 \cdot T_{\mu c} = 7 \cdot 0.004 = 0.0028 c$
Время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего задания	$t_{py2}^{(5)}, c$	$12 \cdot T_{\mu c} = 12 \cdot 0.004 = 0.048 c$
Полоса пропускания по модулю	$\omega_p^{(M)}, \frac{\text{рад}}{c}$	$\frac{0,5}{T_{\mu c}} = \frac{0,5}{0,004} = 156,25 \frac{\text{рад}}{c}$
Полоса пропускания по фазе	$\omega_p^{(\Phi)}, \frac{\text{рад}}{c}$	$\frac{0,36}{T_{\mu c}} = \frac{0,36}{0,004} = 112,5 \frac{\text{рад}}{c}$
Установившаяся ошибка	$\Delta\omega_{уст}$	$\Delta\omega_{уст} = 0 \frac{\text{рад}}{c}$

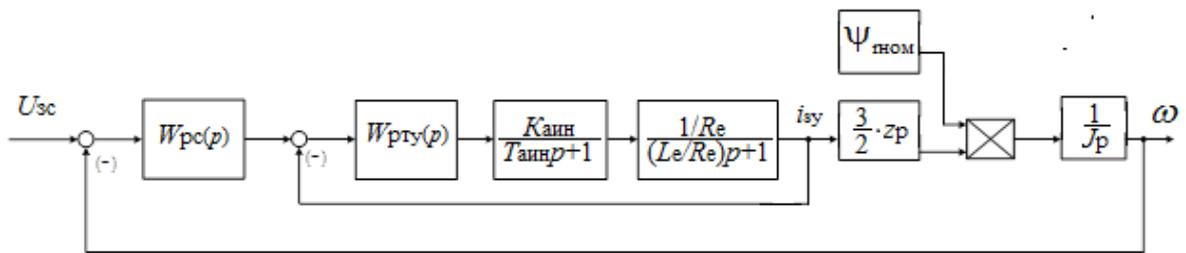


Рисунок 29 – Структурная схема контура скорости

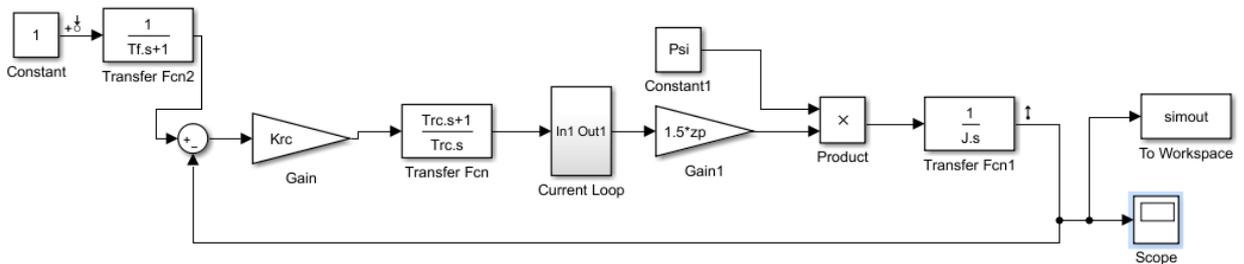


Рисунок 30 – Имитационная модель контура скорости

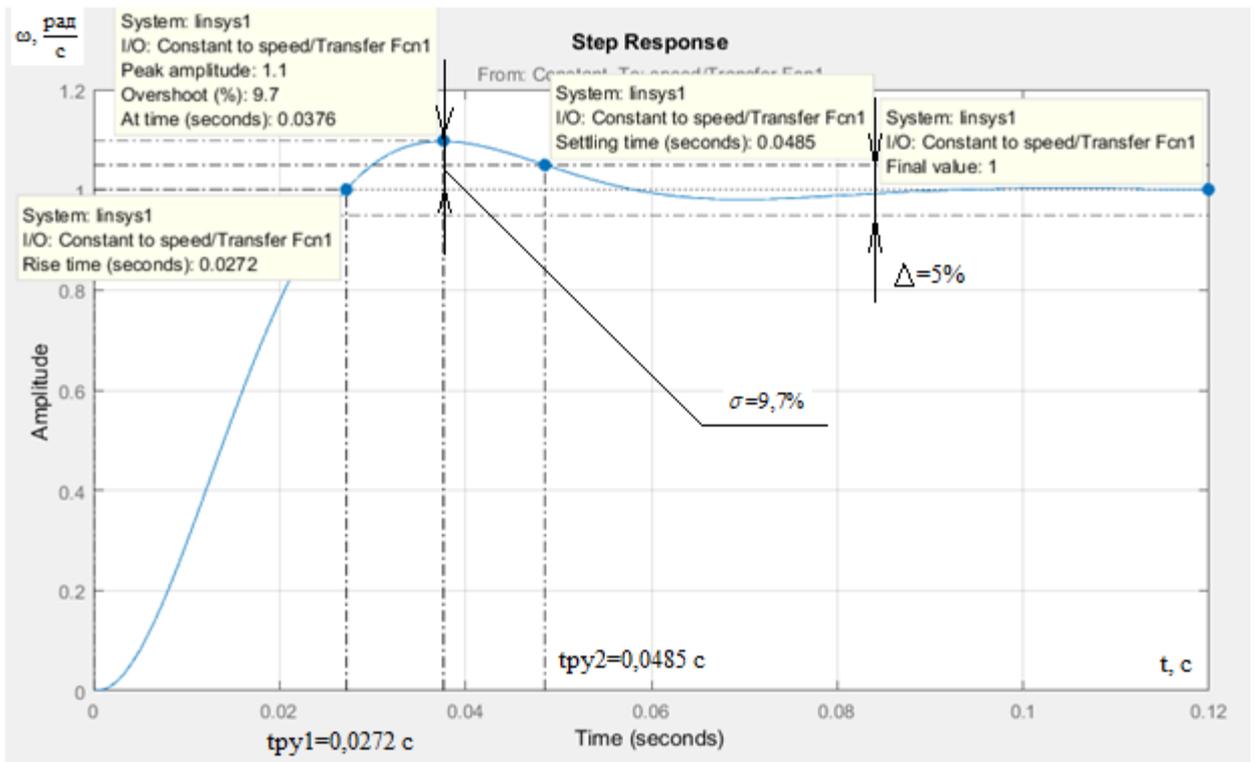


Рисунок 31 – Переходный процесс контура скорости

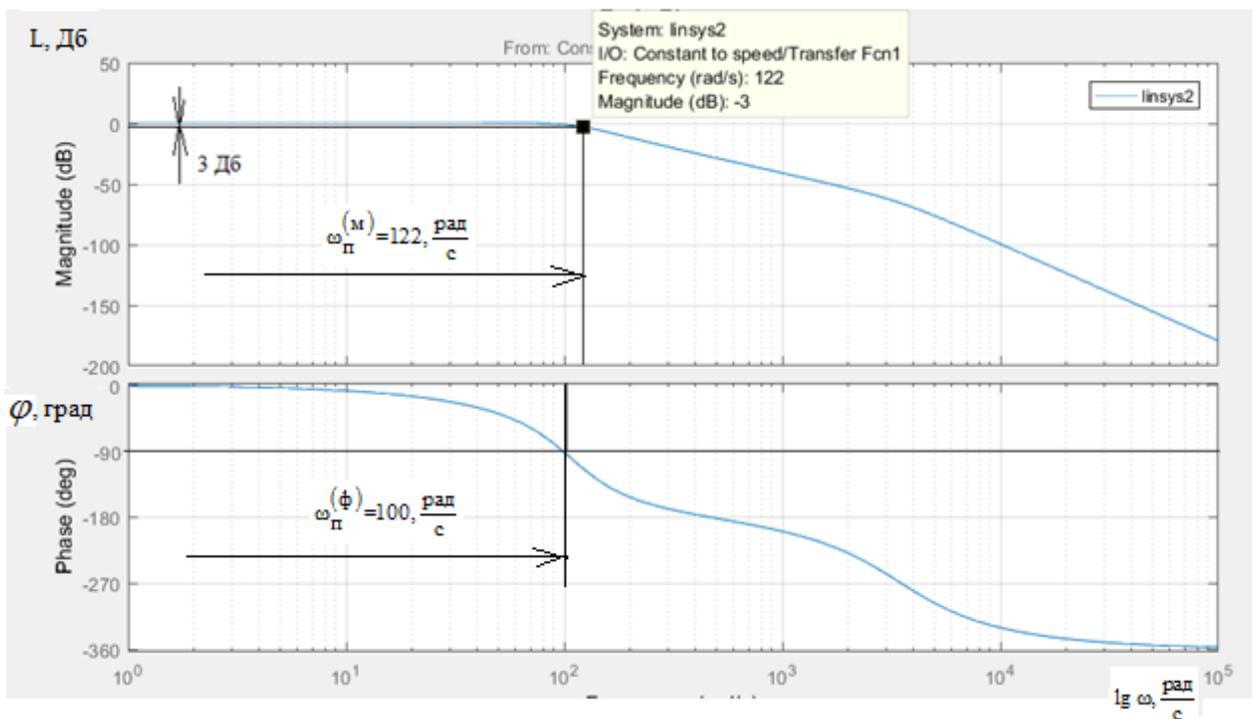


Рисунок 32 – ЛЧХ замкнутого контура скорости

Сведем теоретические и экспериментальные показатели качества работы линеаризованного контура скорости в таблицу 9.

Таблица 9 – Показатели качества переходных процессов по управлению
линеаризованного контура скорости, оптимизированного по СО

$t_{py1}^{(5)}$, с	$t_{py2}^{(5)}$, с	σ , %	$\Delta\omega_{уст}$, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_n^{(\phi)}$, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_n^{(M)}$, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$
Ожидаемые показатели					
0,0224	0,048	8,1	0	125	90
Результаты моделирования					
0,028	0,0485	9,7	0	122	100

Сравнивая ожидаемые показатели качества переходного процесса в контуре скорости, оптимизированного по СО с фильтром на входе, с результатами моделирования, можно сказать, что теоретические значения сошлись с полученными с допустимой погрешностью.

5. Имитация работы электропривода запорной арматуры

5.1 Имитационная модель

Имитационная модель показана на рисунке 33.

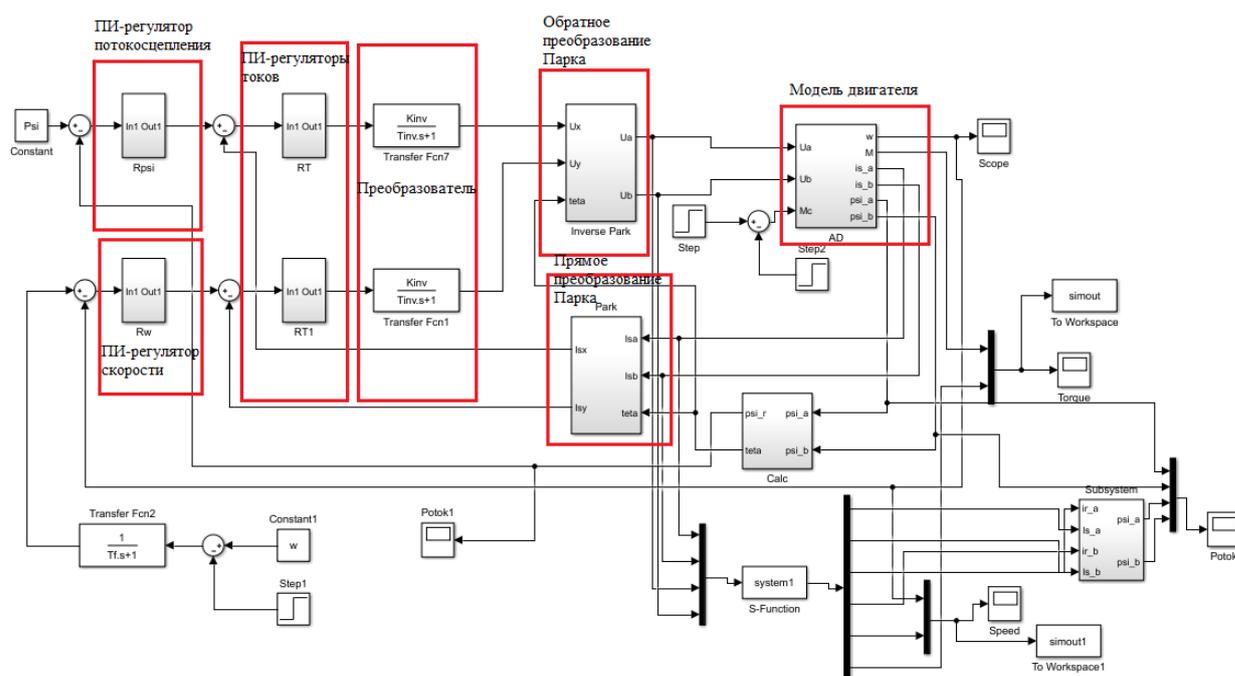


Рисунок 33 – Имитационная модель электропривода

Модель состоит из ПИ-регулятора потокосцепления (рисунок 37), ПИ-регулятора скорости (рисунок 35), ПИ-регуляторов токов (рисунок 36), модели двигателя в двухфазной неподвижной системе координат (рисунок 34), из преобразователя Парка и обратного преобразователя Парка и вычислителя действующего значения потокосцепления (рисунок 38).

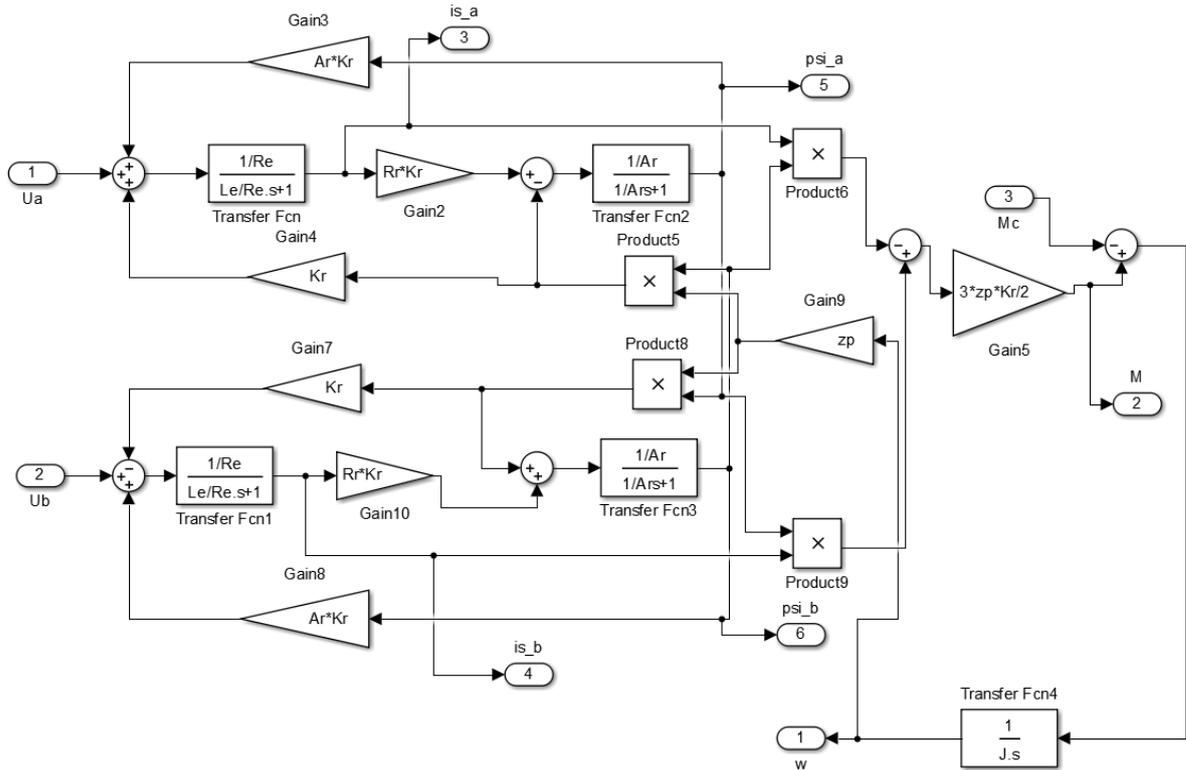


Рисунок 34 – Модель двигателя в двухфазной системе координат альфа-бета

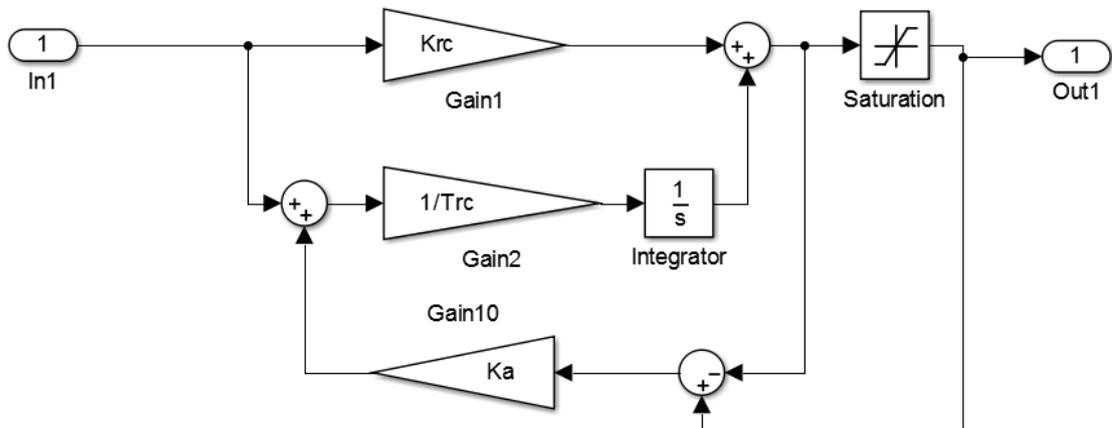


Рисунок 35 – Регулятор скорости

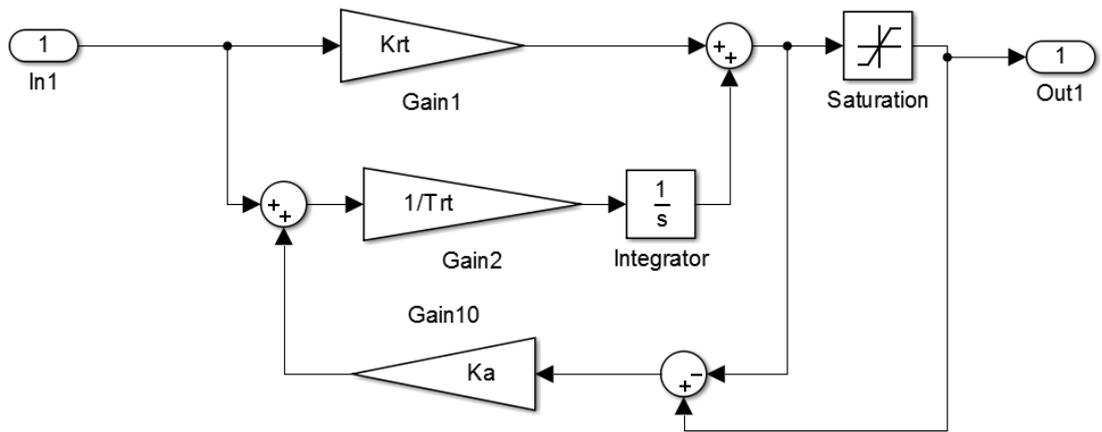


Рисунок 36 – Регулятор тока

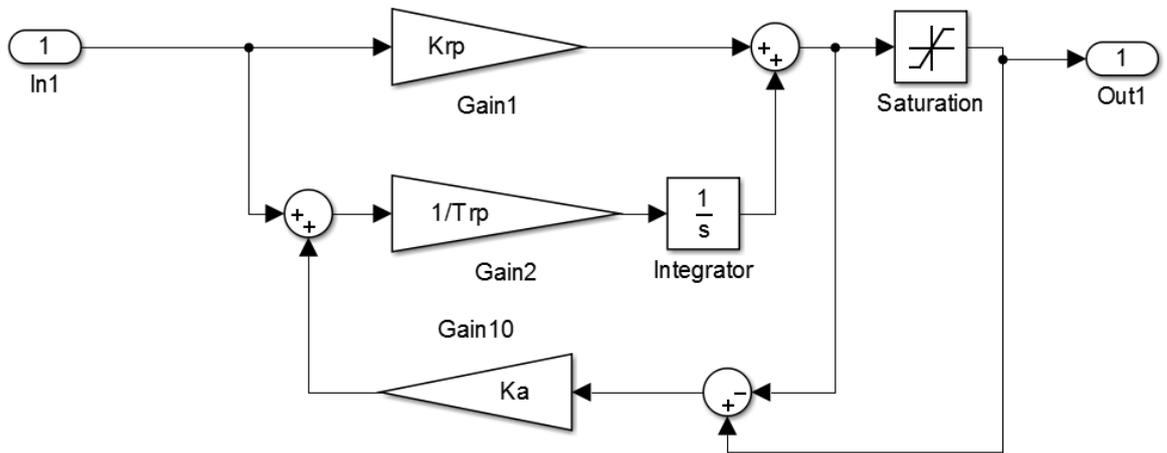


Рисунок 37 – Регулятор потокосцепления

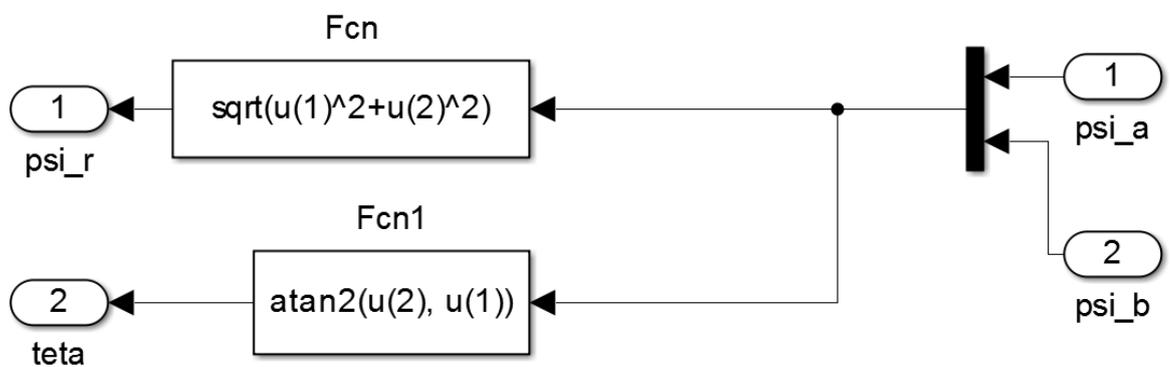


Рисунок 38 – Вычислитель потокосцепления

Параметры модели загружаются в М-файл программы MATLAB. Параметры состоят из параметров двигателя, параметров регуляторов, параметров системы управления и нелинейностей.

```
%Параметры двигателя
n=945;
w=pi*n/30;
f=50;
Rs=4.925;
Rr=2.553;
Ls_=0.009535;
Lr_=0.013;
Lm=0.21019;
p=6;
J=0.011;
Ls=Ls_+Lm;
Lr=Lr_+Lm;
zp=p/2;
In=5.561;
Kr=Lm/Lr;
Re=Rs+Rr*Kr^2;
Le=Ls-Lm^2/Lr;
Uamp=220*sqrt(2);
Iamp=In*sqrt(2);
Ar=Rr/Lr;
Wref=2*pi*f;
Psi=0.849;
%Параметры системы управления
Kinv=1;
finv=5000;
Tinv=1/finv;
Te=Le/Re;
Krt=(Te*Re)/(2*Tinv*Kinv);
Trt=Te;
Krp=1/(2*2*Kr*Rr*Tinv);
Trp=1/Ar;
Krc=(180*J)/(1.5*zp*8*1024*Tinv*Psi);
Trc=98*Tinv; %98 vmesto 49
Tf=32*4*Tinv; %4 vmesto 2
%Нелинейности
Ux=0.312*Uamp;
Uy=0.95*Uamp;
Ix=1.5*Iamp;
Iy=2*Iamp;
Imax=2*Iamp;
Umax=Uamp;
Ka=2;
h=0.0001;
```

5.2 Переходные процессы электропривода

При правильной работе электропривода, показания тока и напряжения не должны превышать амплитудных значений.

$$I_{амп} = I_{элмакс} \cdot \sqrt{2} = 8.623 \cdot \sqrt{2} = 12,19 \text{ A}, \quad (5.2.1)$$

$$U_{амп} = U \cdot \sqrt{2} = 220 \cdot \sqrt{2} = 311,13 \text{ B}. \quad (5.2.2)$$

Для проверки работы электропривода построим графики переходных процессов нашего электропривода для токов статора и напряжения.

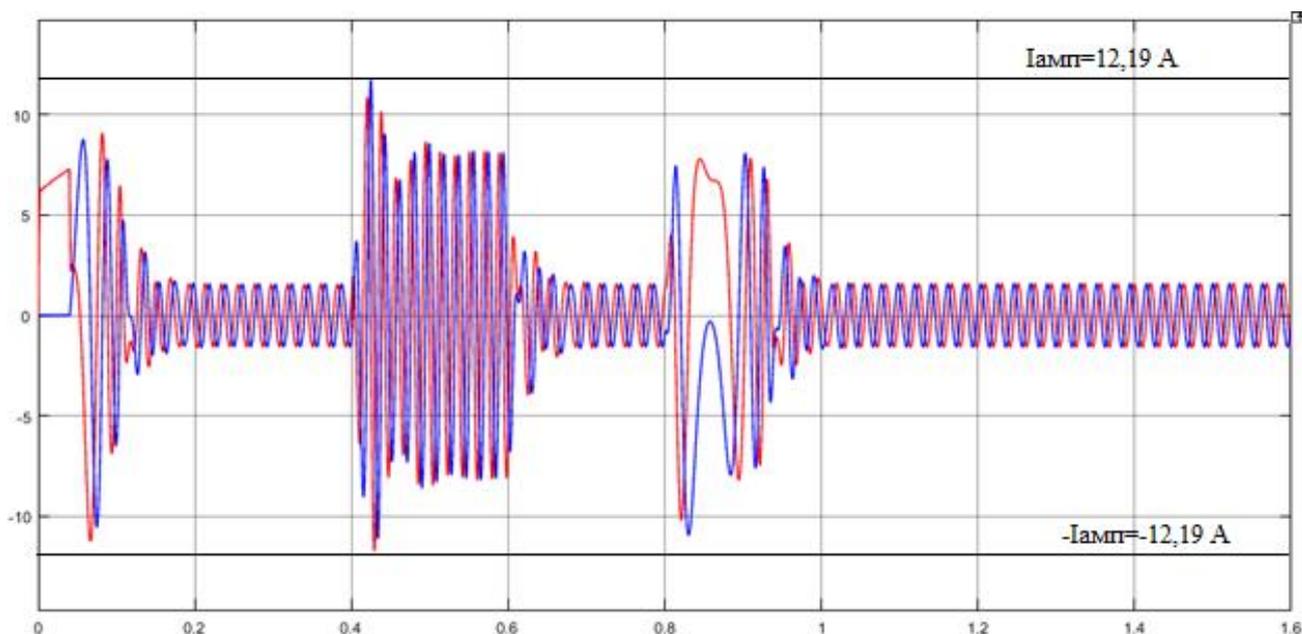


Рисунок 39 – Переходный процесс для токов статора I_α, I_β

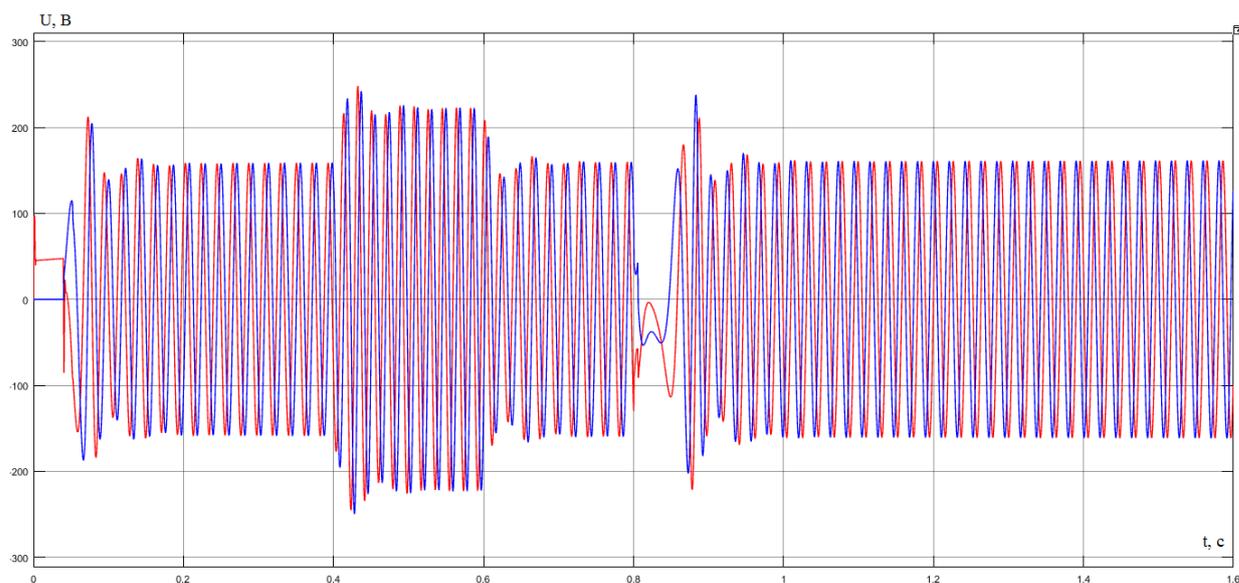


Рисунок 40 – Переходный процесс для напряжения

Из графиков изображенных на рисунках 39 – 40 видно что условия правильной работы электропривода выполняются.

5.3 Проверка работоспособности контура скорости в составе имитационной модели.

Для более точной работы имитационной модели подаем задание контура скорости с задержкой на $t=0,04$ с, так как в этот период времени потокосцепление имеет номинальное значение.

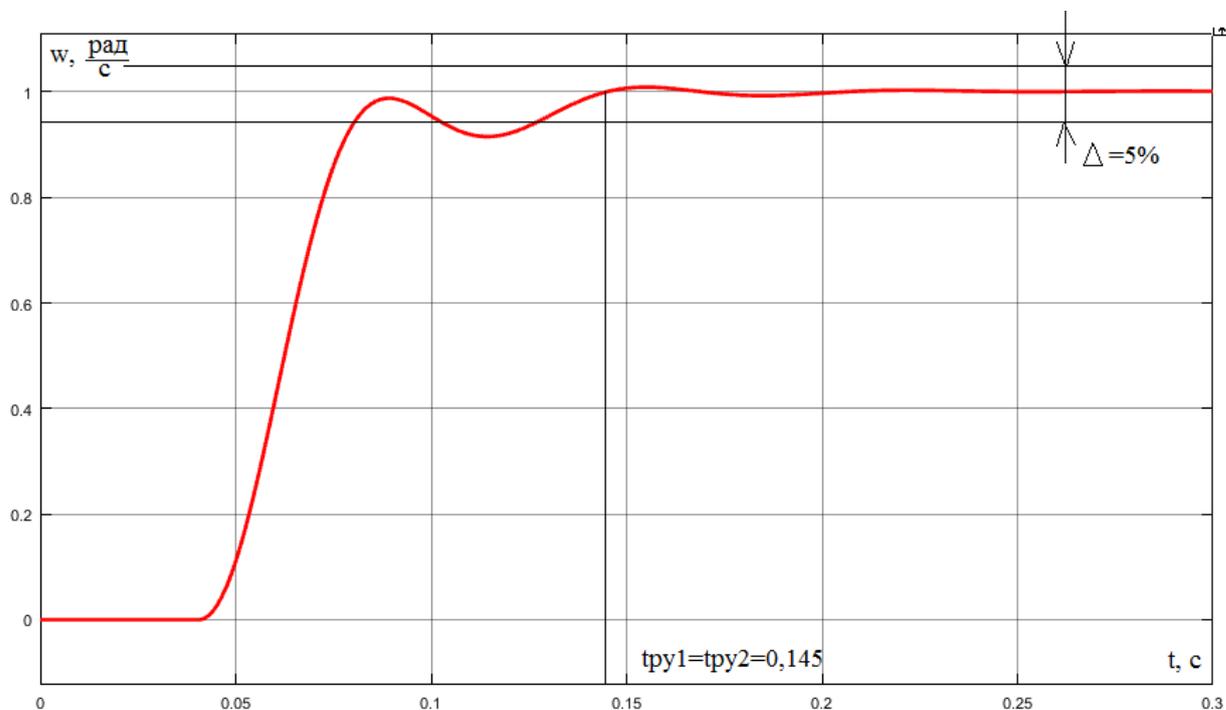


Рисунок 41 – Переходный процесс контура скорости в составе имитационной модели

Из графика видно что на контур потокосцепления сильно влияет контур скорости. Для того чтобы улучшить показатели качества, заменим фильтр на задатчик интенсивности (ЗИ). ЗИ настраиваем опытным путем.

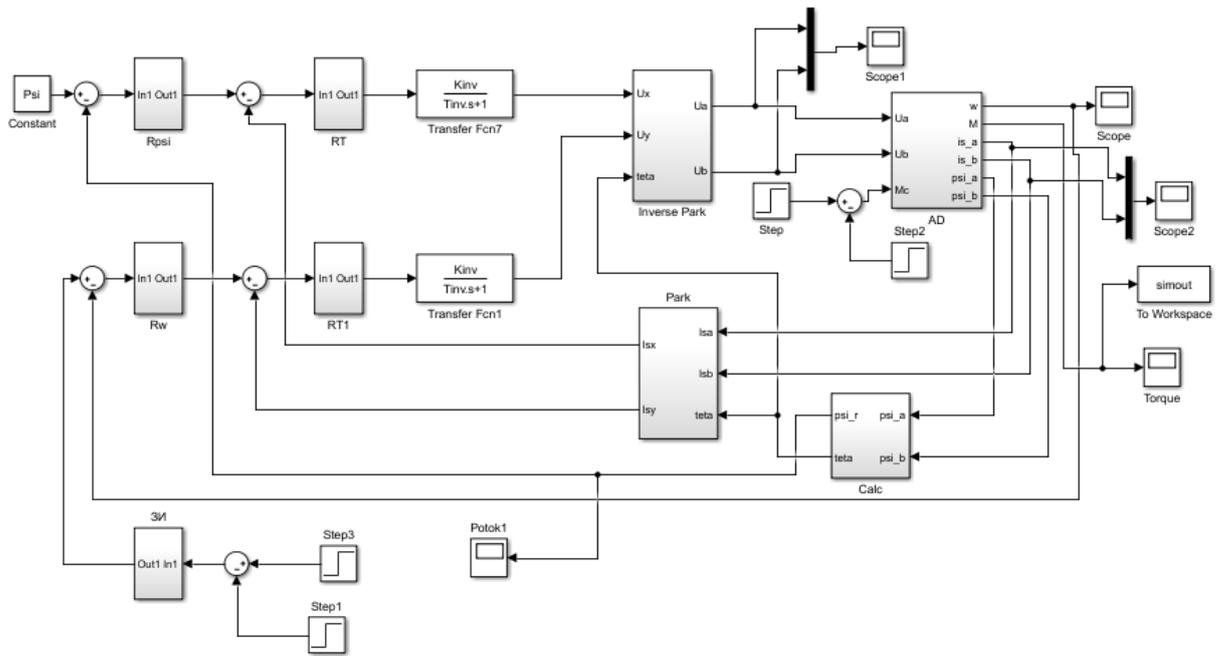


Рисунок 42 – Имитационная модель электропривода

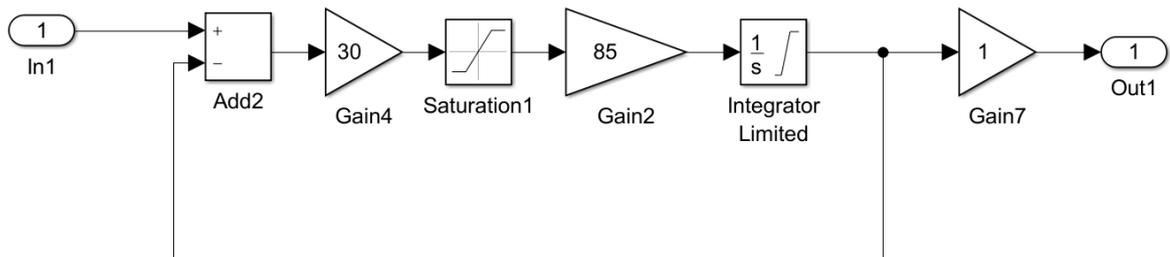


Рисунок 43 – Структурная схема ЗИ

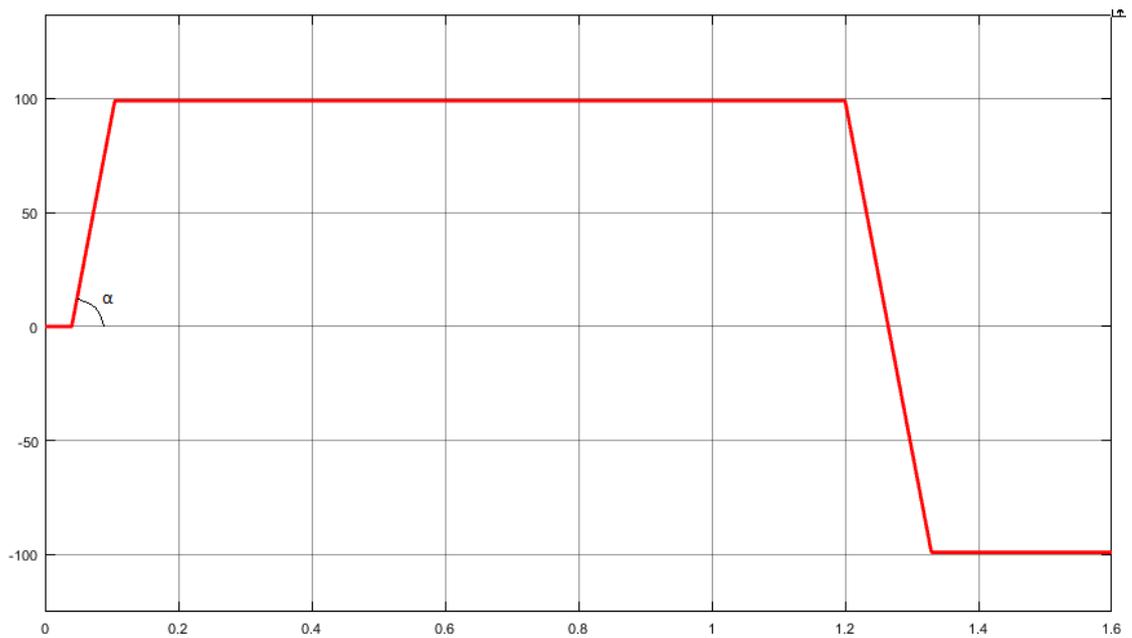


Рисунок 44 – Диаграмма ЗИ

Путем экспериментальных исследований было выявлено, что оптимальный угол наклона (ускорение) соответствует значению

$$\alpha = 151,5 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

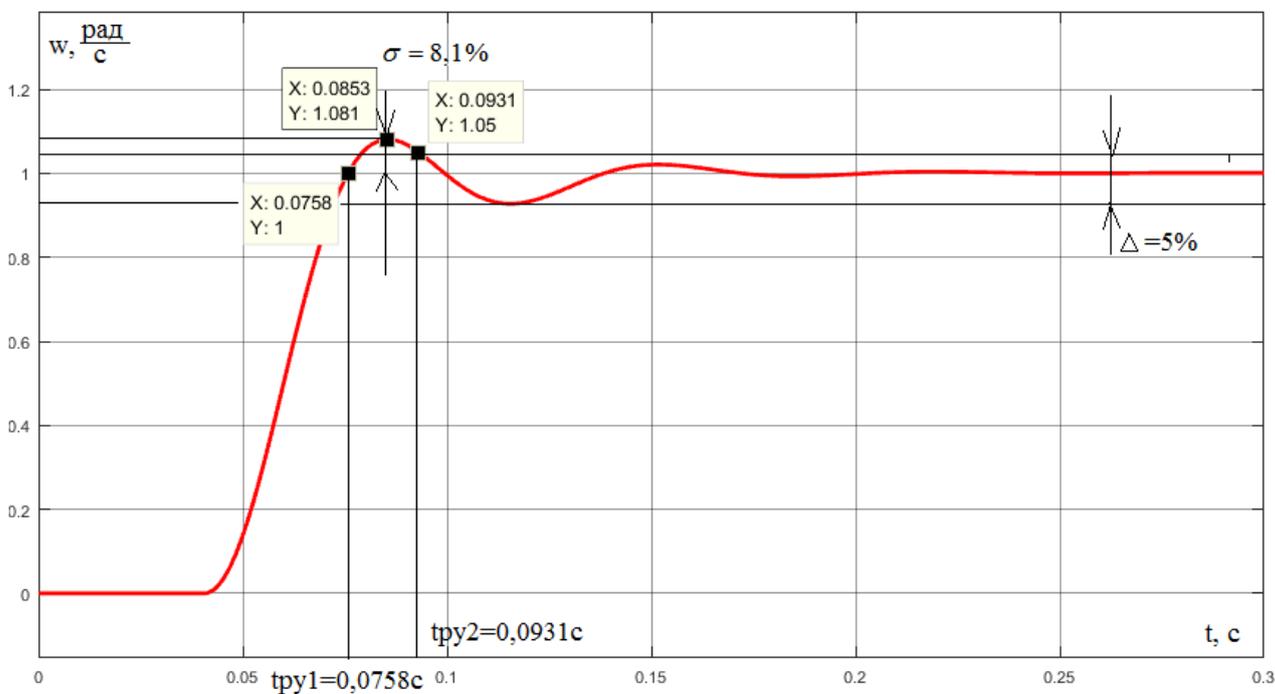


Рисунок 45 – Переходный процесс контура скорости в составе имитационной модели

Сведем теоретические, экспериментальные показатели качества работы линеаризованного контура скорости и экспериментальные показатели качества работы контура скорости в составе имитационной модели в таблицу 10. Так как у нас присутствует задержка по времени $t=0,04\text{с}$, то для правильного получения переменных t_{py1} и t_{py2} необходимо вычесть эти $0,04$ из полученных опытным путем результатов.

Таблица 10 – Показатели качества переходных процессов по управлению линеаризованного контура скорости

$t_{\text{пу}1}^{(5)}, \text{с}$	$t_{\text{пу}2}^{(5)}, \text{с}$	$\sigma, \%$	$\Delta\omega_{\text{уст}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_{\text{п}}^{(\Phi)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_{\text{п}}^{(M)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$
Ожидаемые показатели					
0,0224	0,048	8,1	0	125	90
Результаты моделирования контура скорости					
0,028	0,0485	9,7	0	122	100
Результаты моделирования имитационной модели					
0,0358	0,0531	8,1	0	-	-

Сравнивая показатели качества переходного процесса в контуре скорости можно сказать, что значения сошлись с допустимой погрешностью.



Рисунок 46 – Переходный процесс для скорости

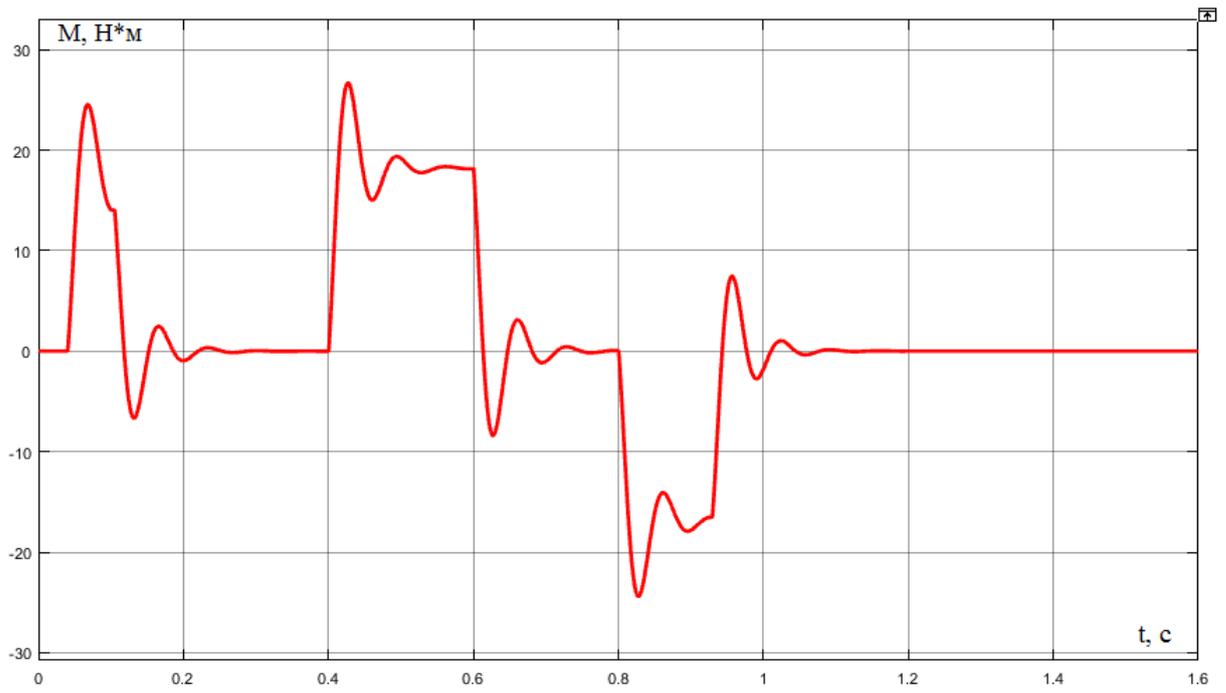


Рисунок 47 – Переходный процесс для момента

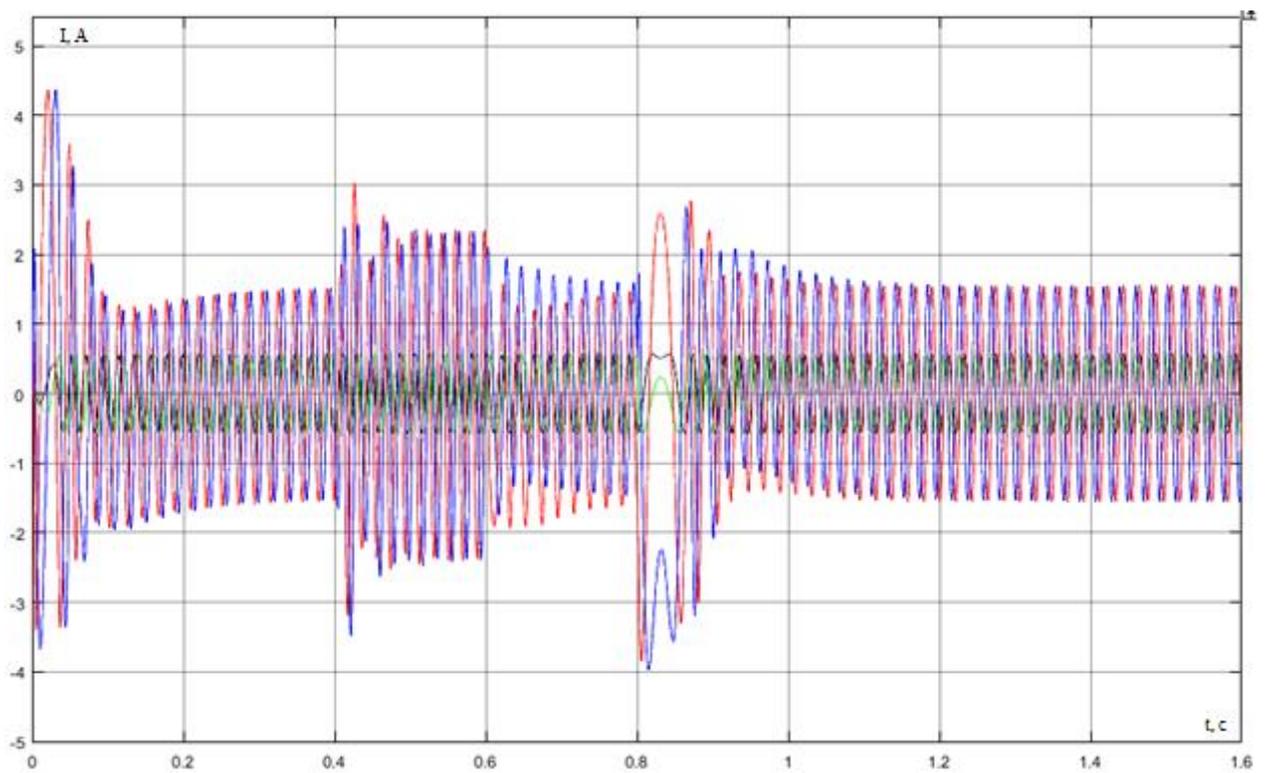


Рисунок 48 – Переходный процесс для тока

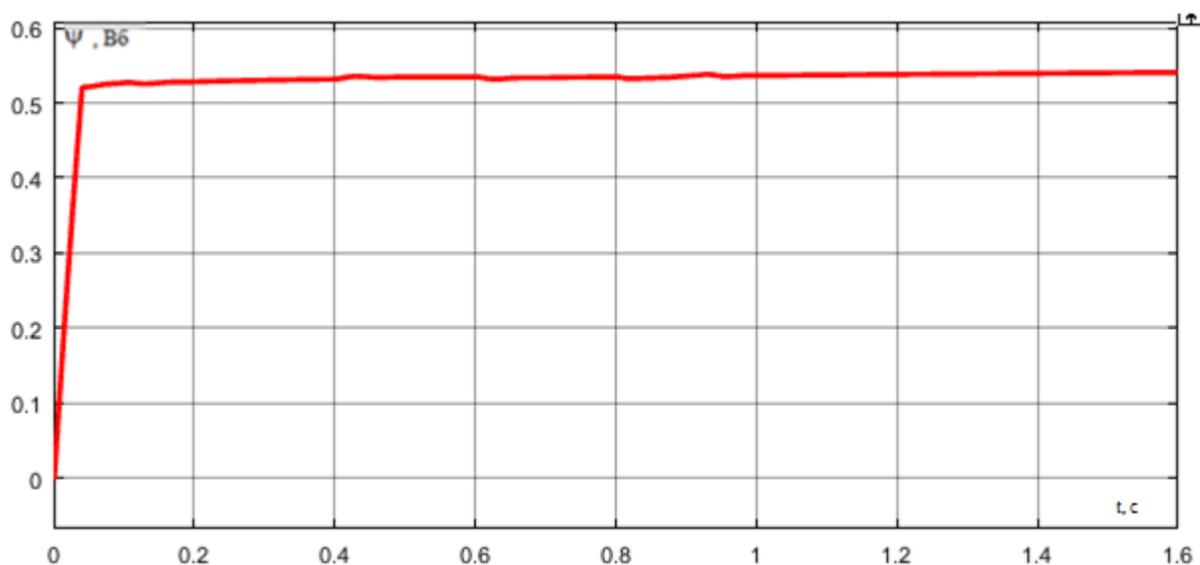


Рисунок 49 – Переходный процесс для потока

5.4 Имитация работы задвижки

Технологический процесс, обеспечиваемый ЭПЗА, заключается в перемещении запорного органа с заданной скоростью и моментом между двумя фиксированными положениями. Управление технологическим процессом перекрытия участка трубопровода задвижкой сводится к заданию скорости и момента электропривода в зависимости от положения штока, а также сигнала о наличии нормального и аварийного состояния выполнения перекрытия сечения. При пуске необходимо выбрать зазор редуктора на малой скорости, после чего выйти на рабочую скорость. Скорость перемещения определяется требованиями к технологическому процессу и задает минимальное быстродействие срабатывания затвора. При подходе к конечному положению необходимо перейти на низкую скорость для предотвращения гидравлического удара в трубе. Рекомендуемая диаграмма задания величин моментограничения и скорости в зависимости от положения представлена на рисунке 50.

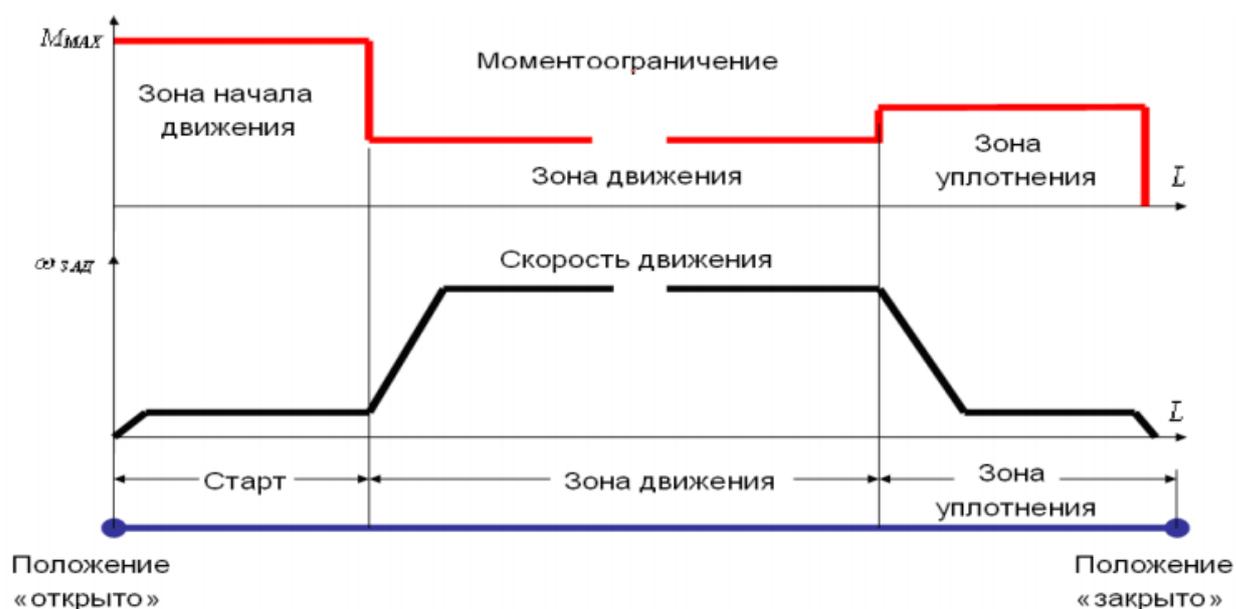


Рисунок 50 – Диаграмма задания моментоограничения и скорости

Во время пуска требуется развитие момента, достаточного для преодоления сил заклинивания запорного органа в седле и сил сухого трения.

В начале движения момент ограничивается для того, чтобы не повредить корпус. Для задвижки требуется создать момент соответствующий паспортному. Если двигатель не может двигаться с места, то срабатывает сигнал об аварии. При этом возможны две ситуации:

1. Если концевой выключатель не сработал, значит задвижку заклинило.
2. При срабатывании концевого выключателя и превышении момента выше допустимого говорит о том, что двигатель попал в уплотнение. Это считается нормальным режимом работы (режим уплотнения).

Адекватное определение крайних положение важно для оператора для правильного ведения технологического процесса.

Остановка электропривода зависит от положения штока и от технологического процесса.

Момент ЭП ограничивается в определенном диапазоне:

$$\begin{cases} M > M_{\text{ОТРЫВА}} \\ M < M_{\text{МАХ}} \end{cases}$$

где M – момент на валу электропривода; $M_{ОТРЫВА}$ – момент трогания из уплотненного состояния, обеспечивающий начало движения; M_{MAX} – максимально допустимый момент на валу электропривода, не приводящий к ухудшению эксплуатационных свойств арматуры.

Построим модель нагрузки задвижки в пакете MATLAB Simulink и введем ее в имитационную модель.

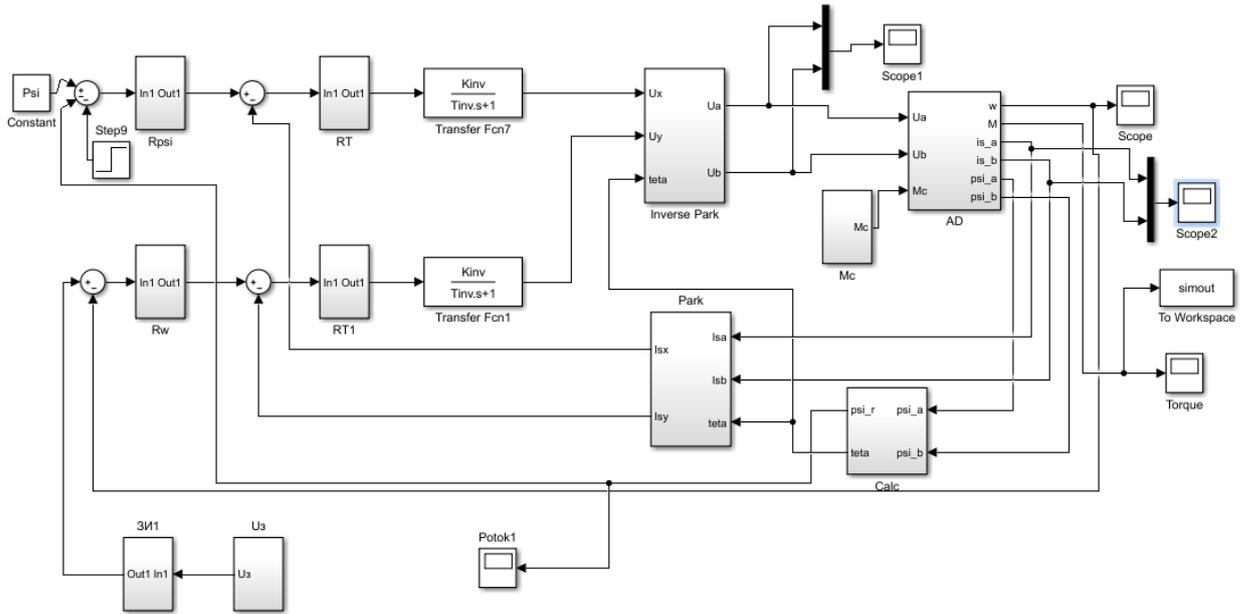


Рисунок 51 – Имитационная модель электропривода

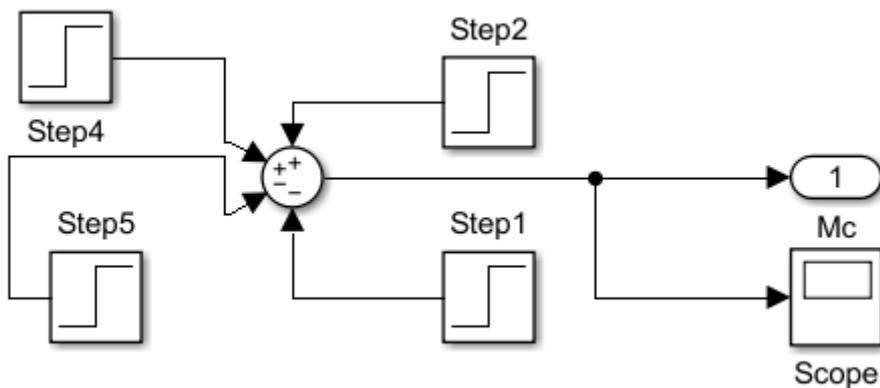


Рисунок 52 – Модель нагрузки запорной арматуры

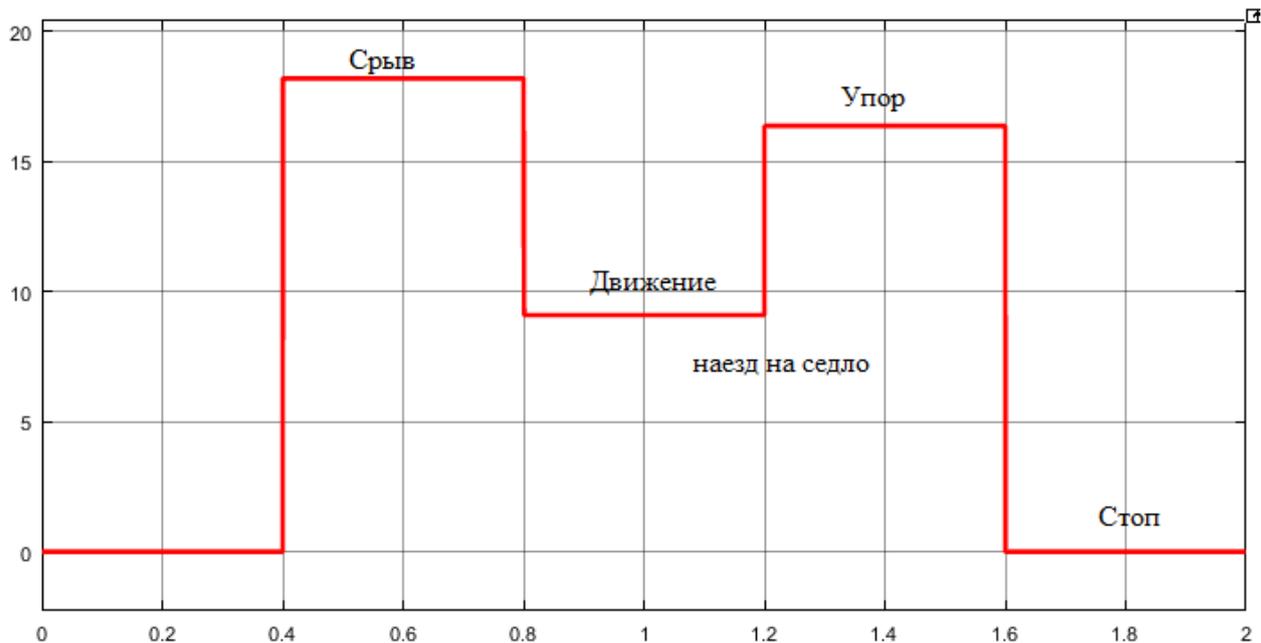


Рисунок 53 – Диаграмма задания моментограничения

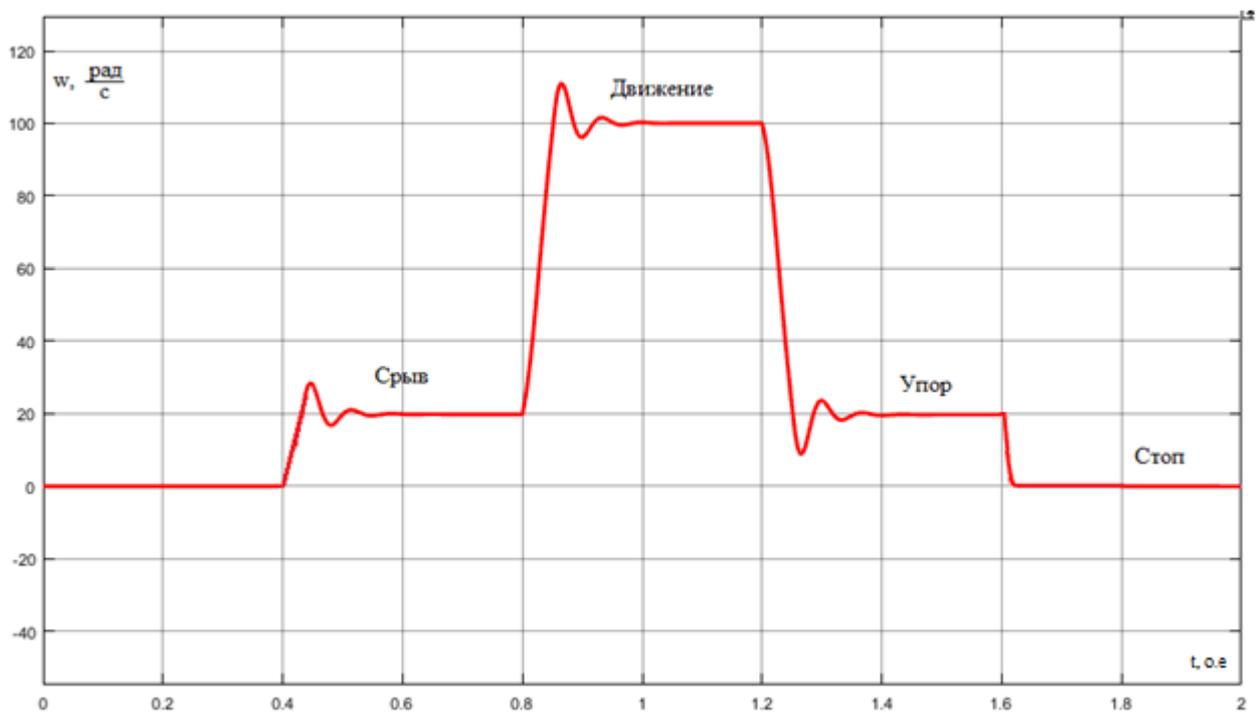


Рисунок 54 – Переходный процесс для скорости

На рисунке 54 изображен переходный процесс для скорости электропривода. В момент времени 0,4с характеристика имеет значение скорости равное 20% от номинального. В этот момент времени происходит срыв запорного органа задвижки. Скорость электропривода выбирается с тем учетом, чтобы не повредить запорный орган. Далее скорость выходит на

номинальное значение и происходит перемещения запорного органа. В момент времени 1,2с клин наезжает на седло, скорость ЭП снижается и происходит уплотнение запорного органа. После срабатывания конечных выключателей электропривод отключается.

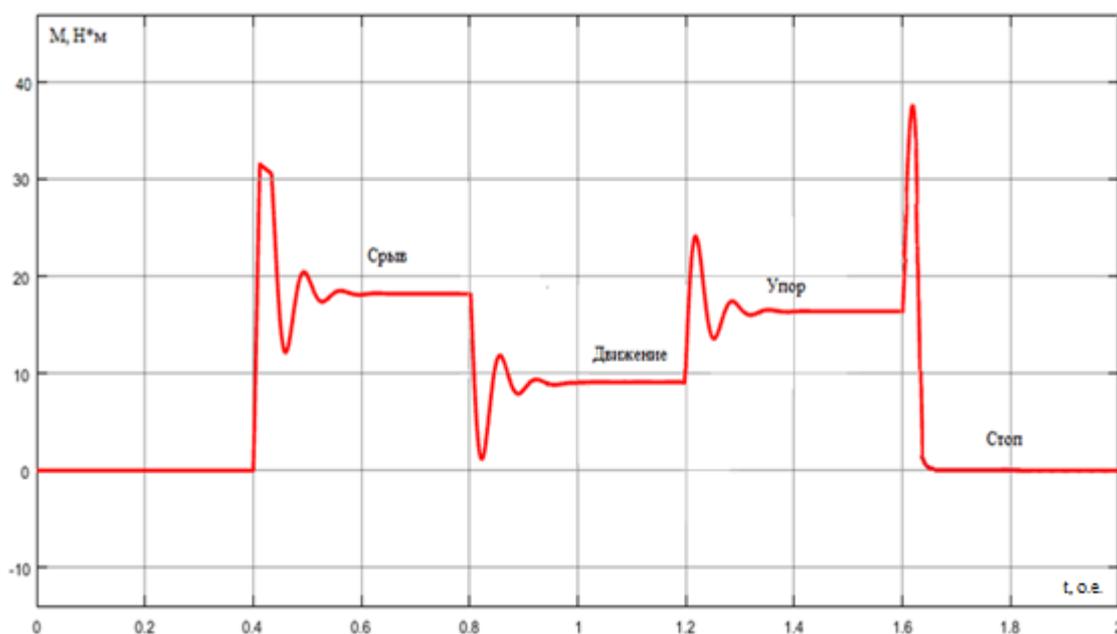


Рисунок 55 – Переходный процесс для момента

На рисунке 55 изображен переходный процесс для момента ЭП. В момент времени 0,4с электропривод создает момент срыва, для того чтобы преодолеть силы заклинивания запорного органа в седле и сил сухого трения. После этого момент падает и перемещения штока происходит при номинальном значении. В момент времени 1,2с происходит наезд на упор и далее идет уплотнение запорного органа, в следствии чего момент ЭП увеличивается. При срабатывании концевого выключателя ЭП останавливается.

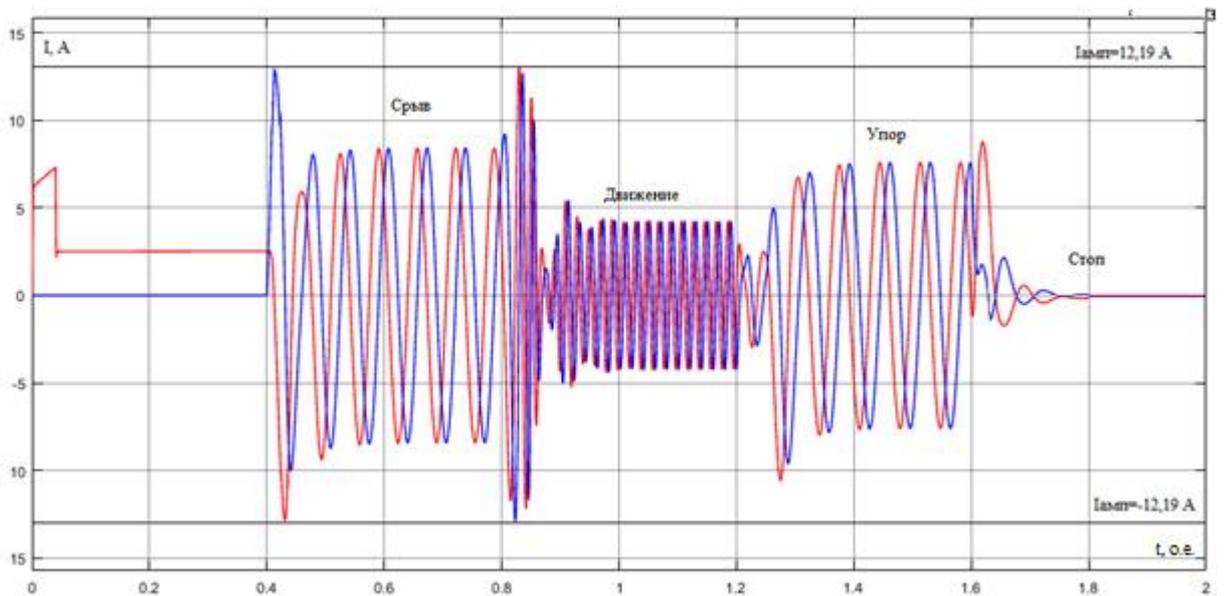


Рисунок 56 – Переходный процесс для тока

По графику, изображенному на рисунке 56 видно, что основной цикл технологического оборудования не превышает максимальное значение по току.

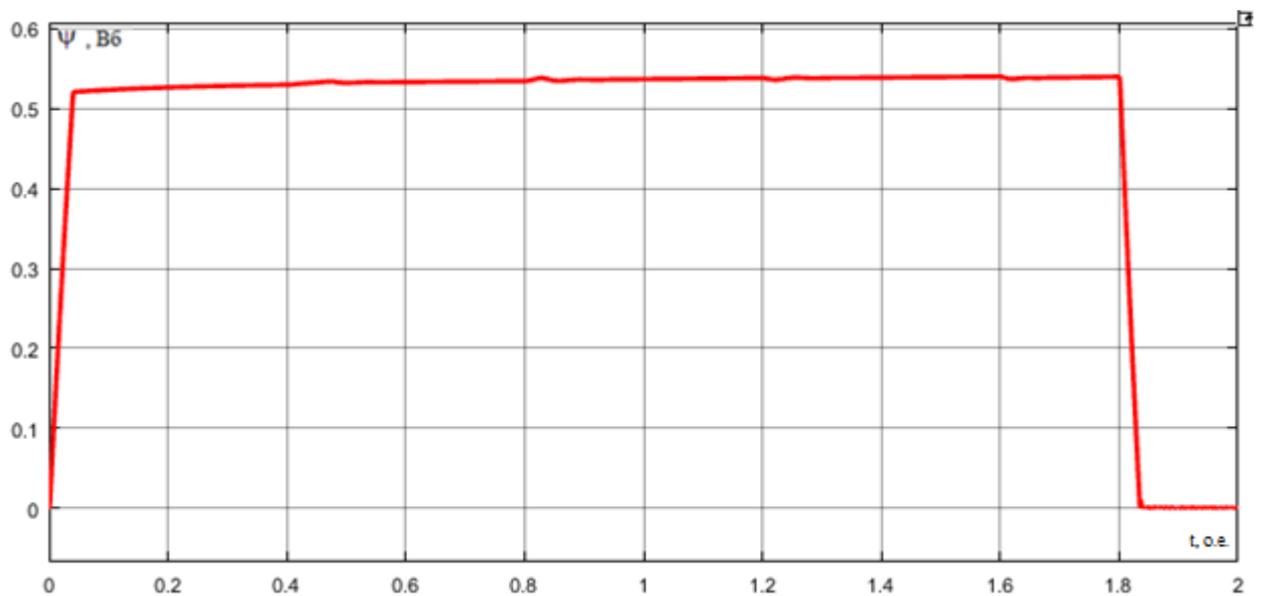


Рисунок 57 – Переходный процесс для потока

По графику изображенному на рисунке 57 видно что на всем промежутке потокосцепление соответствует номинальному значению.

Для реверса все процессы происходят аналогичным образом, только при этом двигатель вращается в обратную сторону.

6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела является обоснование целесообразного использования технического проекта, выполняемого в рамках магистерской диссертации, при этом рассматриваются планово-временные и материальные показатели процесса проектирования.

6.1 Планирование работ технического проекта

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках технического задания;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения работ.

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и инженер. На каждый вид запланированных работ установлена соответствующая должность исполнителя.

Номерам этапов соответствуют следующие виды выполняемых работ, представленные в таблице 11.

Таблица 11 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя	Продолжительность, дн
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Инженер, научный руководитель	1
Выбор направления технического проектирования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	3
Расчеты и проектирование электропривода	3	Проектирование системы управления электропривода	Инженер	32
	4	Расчет двигателя	Инженер	30
	5	Проведение графических построений и обоснований	Инженер, научный руководитель	2
Обобщение и оценка результатов	6	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер, научный руководитель	2
Оформление отчета по техническому проектированию	7	Составление пояснительной записки	Инженер	20
	8	Проверка выпускной квалификационной работы руководителем	Инженер, научный руководитель	4

Продолжительность выполнения проекта составит 94 рабочих дня.

Из них:

9 дней – продолжительность выполнения работ руководителем;

94 дня – продолжительность выполнения работ инженером.

Наиболее удобным и наглядным в данном случае является построение ленточного графика проведения технических работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками,

характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ [19].

График строится для ожидаемого по длительности исполнения работ в рамках технического проекта, с разбивкой по месяцам и декадам за период времени подготовки магистерской диссертации. На основе таблицы 11 строим план – график проведения работ.

Таблица 12 - Диаграмма Ганта

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _{кј} , кал.дн	Продолжительность выполнения работ													
				Фев.		Март			Апр.			Май			Июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление ТЗ	Инженер, НР	2	■													
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	3	■	■												
3	Проектирование системы офисного освещения	Инженер	37		■	■	■	■	■								
4	Расчет источника питания	Инженер	30					■	■	■	■						
5	Проведение графических построений и обоснований	Инженер, НР	2									■					
6	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер, НР	2									■	■				
7	Составление пояснительной записки	Инженер	20										■	■	■		
8	Проверка ВКР	Инженер, НР	3													■	

Исходя из составленной диаграммы, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает 12 декад, начиная со второй декады февраля, заканчивая первой декадой июня. Учитывая вероятностный характер оценки трудоемкости, реальная продолжительность работ может быть как меньше (при благоприятном стечении обстоятельств), так и несколько превысить указанную продолжительность (при неблагоприятном стечении обстоятельств).

Далее по диаграмме Ганта можно предварительно оценить показатели рабочего времени для каждого исполнителя.

6.2 Смета затрат на проектирование

Смета затрат на проект ($K_{ТП}$) включает в себя материальные затраты, амортизацию, затраты на заработную плату, на социальные нужды, прочие и накладные затраты.

$$K_{ТП} = K_{мат} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о} + K_{пр} + K_{накл}, \quad (6.2.1)$$

где $K_{мат}$ – материальные затраты;

$K_{ам}$ – амортизация компьютерной техники;

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

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

$K_{пр}$ – прочие затраты;

$K_{накл}$ – накладные затраты.

6.2.1 Материальные затраты

В данной работе материальные затраты принимаем в размере 1000 рублей на канцелярские товары.

6.2.2 Затраты на амортизацию

Так как для работы над магистерской диссертацией используется компьютерная техника, посчитаем ее амортизацию.

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot Ц_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}}, \quad \text{где} \quad (6.2.2.1)$$

$T_{исп.кт}$ – время использования компьютерной техники (90 дней);

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

$Ц_{кт}$ – цена компьютерной техники (25000 руб);

$T_{сл}$ – срок службы компьютерной техники (5 лет).

$$K_{ам} = \frac{90}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 684,93 \text{ руб.} \quad (6.2.2.2)$$

6.2.3 Затраты на заработную плату

Вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также компенсационные и стимулирующие выплаты, затраты на заработную плату (для инженера и НР).

$$Kз / пл = ЗПинж + ЗПнр \quad (6.2.3.1)$$

$$ЗПмес = ЗПо \cdot K1 \cdot K2, \text{ где} \quad (6.2.3.2)$$

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

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

$ЗПо$ – месячный оклад (для доцента 26300 руб., для инженера 17000 руб.).

Для научного руководителя:

$$ЗПмес = 27300 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 39039 \text{ руб.} \quad (6.2.3.3)$$

Для инженера:

$$ЗПмес = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.} \quad (6.2.3.4)$$

$$ЗПор = \frac{ЗПмес}{21} \cdot n, \text{ где} \quad (6.2.3.5)$$

21 – число рабочих дней в месяц;

n – фактическое число дней в проекте.

Для научного руководителя:

$$ЗПор = \frac{39039}{21} \cdot 9 = 16731 \text{ руб.} \quad (6.2.3.6)$$

Для инженера:

$$ЗПор = \frac{24310}{21} \cdot 94 = 108816 \text{ руб.} \quad (6.2.3.7)$$

$$Kз / пл = 16731 + 108816 = 125547 \text{ руб.} \quad (6.2.3.8)$$

6.2.4 Затраты на социальные нужды

Затраты организации по обязательным и добровольным взносам в органы государственного страхования, пенсионного фонда, фонда медицинского страхования от затрат на оплату труда работников, занятых в производстве продукции, работ, услуг в непроизводственной сфере в соответствии с порядком, установленным законодательством.

Затраты на социальные нужды берем в размере 30% от $Kз/пл$.

$$Kc.o. = \frac{Kз / пл \cdot 30\%}{100\%} = \frac{125547 \cdot 0,3}{1} = 37664,1 \text{ руб.} \quad (6.2.4.1)$$

6.2.5 Прочие затраты

Прочие затраты принимаются в размере 10% от ($K_{мат} + K_{ам} + Kз/пл + Kc.o$)

$$K_{пр} = \frac{(K_{мат} + K_{ам} + Kз / пл + Kc.o.) \cdot 10\%}{100\%}, \quad (6.2.5.1)$$

$$K_{пр} = \frac{(1000 + 684,93 + 125547 + 37664,1) \cdot 0,1}{1} = 16489,6 \text{ руб.}$$

6.2.6 Накладные затраты

Затраты, не связанные прямо с производством отдельного изделия или вида работы и относимые на весь выпуск продукции. К ним относятся: расходы на содержание, эксплуатацию и текущий ремонт зданий, сооружений и оборудования; отчисления на социальное страхование и другие обязательные платежи; содержание и заработную плату административно-управленческого персонала; расходы, связанные с потерями от брака и простоев и др.

Накладные расходы принимаются в размере 200% от $Kз/пл$.

$$K_{накл} = \frac{Kз / пл \cdot 200\%}{100\%}, \quad (6.2.6.1)$$

$$K_{\text{накл}} = \frac{125547 \cdot 2}{1} = 251094 \text{ руб.}$$

Сведем полученные результаты в таблицу 13.

Таблица 13 – Смета затрат на проект

№	Элементы затрат	Стоимость, руб.
1	Материальные затраты	1000
2	Амортизация компьютерной техники	684,93
3	Затраты на заработную плату	125547
4	Затраты на социальные нужды	37664,1
5	Прочие затраты	16489,6
6	Накладные расходы	251094
	Итого:	432479,63

Смета затрат на проект:

$$K_{\text{III}} = 1000 + 684,93 + 125547 + 37664,1 + 16489,6 + 251094 = 432479,63 \text{ руб.}$$

Данный технический проект направлен на расчет электропривода задвижки на базе системы «ПЧ с векторным управлением – асинхронный двигатель». Рассчитаны параметры двигателя, его естественные и искусственные характеристики.

В пакете MATLAB Simulink 16 построена имитационная модель двигателя и модель нагрузки запорной арматуры. Результаты моделирования соответствуют ожидаемым показателям качества.

7. Социальная ответственность

Безопасность труда – это система законодательных актов, социально – экономических, организационных, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

В программу охраны труда входит внедрение на всех предприятиях современных средств техники безопасности и обеспечение санитарно – гигиенических условий, устраняющих производственный травматизм и профзаболевания.

7.1 Анализ опасных вредных производственных факторов

Согласно [19] опасные и вредные производственные факторы при монтаже, настройке и эксплуатации разработанного устройства можно выделить следующие опасные и вредные факторы, разделенные на две группы:

- физические (напряжение питания, поступающее с блока питания, неудовлетворительное освещение, опасность возникновения пожара, опасный уровень напряжения и др.);
- психофизиологические (умственное перенапряжение, эмоциональные перегрузки).

Опасные физические производственные факторы, указывают на воздействия, оказываемые рабочей средой, промышленной, производственной техникой и т.д. согласно [19] одним из факторов производственной опасности этой группы является напряжение сети 220 В, необходимое для питания светильника.

Следующим фактором производственной опасности этой группы является:

- температура воздуха рабочей зоны,
- недостаточная освещенность рабочей зоны;
- влажность воздуха;
- повышенный уровень электромагнитных излучений возникающий во

время работы ПЭВМ.

Психофизиологические факторы характеризуют влияние производственного процесса на человека и состояние его работоспособности.

К опасным психофизиологическим и вредным производственным факторам относятся:

- статические;
- динамические и нервно-психологические перегрузки (умственное перенапряжение, утомление, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

Согласно [27] работа по разработке электропривода запорной арматуры в основном носит умственный характер. Возможны нагрузки организма в результате того, что основное положение разработчика, сборщика и настройщика электропривода имеет сидячий характер.

Восприятие большого объема информации при работе с ПЭВМ, её анализ в ходе разработки также способствует возникновению перенапряжений организма, в частности нервной системы, нервно-мышечного аппарата рук, шеи, плеч, спины, напряжению зрительного аппарата. В связи с этим появляются боли, зрительная усталость, раздражительность, общее утомление. Неправильное оформление рабочего места, а также и всего помещения может значительно снизить производительность труда.

7.2 Требования безопасности

7.2.1 Требования электробезопасности

Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля, статического электричества.

Требования безопасности, эргономики и технической эстетики относятся к задачам совместимости конструкции устройства с человеком при эксплуатации и ремонте, с целью сохранения жизни и здоровья

операторов и ремонтного персонала, снижения утомляемости при работе. Меры электробезопасности регламентируются [20]. Для обеспечения электробезопасности должны быть выполнены следующие мероприятия:

- Руки должны быть чистыми и сухими, так как величина тока, проходящего через человека, зависит от состояния кожи, а также площади соприкосновения с токоведущими частями (грязь и влага ее увеличивают);
- Нельзя прикасаться к источнику питания сразу двумя руками или одной рукой при этом касаться токопроводящей поверхности (металлического корпуса устройства), так как степень поражения электрическим током зависит от пути его прохождения. Наиболее опасным является путь тока от руки к руке – через область сердца и легких;
- Ремонт с заменой деталей необходимо выполнять при отключении питания привода от сети 220 В;
- Не рекомендуется оставлять без присмотра включенные и еще не настроенные устройства — это может вызвать пожар;
- В помещении лаборатории, где работает сборщик, необходимо наличие заземления корпусов всех приборов. В соответствии с [26], п. 1.7.65. сопротивление заземления в любое время года не должно превышать 4 Ом. Заземляющие проводники должны быть видимыми, а места их стыковки скреплены резьбовыми соединениями;
- Рабочее место сборщика оборудуется отдельными щитками сетевого напряжения, все металлические части которых, должны быть надежно заземлены;
- При проведении работ необходимо пользоваться исправным инструментом с изолированными ручками. Необходимо постоянно следить за состоянием изолирующих накладок на используемых инструментах и приспособлениях. По окончании работы необходимо отключить все потребители электроэнергии от питающей сети;

- Ежедневно должны проводиться влажная уборка и проветривание помещения. Это предотвращает скопление пыли и ее попадание под кожухи электрооборудования что, в свою очередь, приводит к утечке тока и замыканию на землю;
- Согласно [22], способом защиты от статических разрядов является заземление оборудования и антиэлектростатическая обработка.

Для предотвращения электротравматизма недостаточно только организационных мер, здесь требуются также технические меры:

- обеспечение недопустимости токоведущих частей, находящихся под напряжением, для случайного прикосновения. С этой целью токоведущие части необходимо располагать, на недоступной высоте, широко применяется ограждение и изоляция токоведущих частей;
- применение защитного заземления и зануления электроустановок;
- автоматическое отключение, применение пониженного напряжения, двойной изоляции и др.;
- применение специальных защитных средств — переносных приборов и приспособлений, средств индивидуальной защиты.

7.2.2 Защита в чрезвычайных ситуациях

В помещении, где производилась выпускная квалификационная работа, имеется электропроводка напряжением 220 вольт, предназначенная для питания вычислительной техники и освещения. При неправильной эксплуатации оборудования и коротком замыкании электрической цепи может произойти возгорание, которое грозит уничтожением техники, документов и другого имеющегося оборудования.

Данное помещение относится к категории Д (наличие твердых сгораемых вещей) [25].

Необходимо проводить следующие пожарно-профилактические мероприятия [25]:

- организационные мероприятия, касающиеся технического процесса с учетом пожарной безопасности объекта;

- эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию имеющегося оборудования;
- технические и конструктивные, связанные с правильным размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов.

Организационные мероприятия:

1. Противопожарный инструктаж обслуживающего персонала;
2. Обучение персонала правилам техники безопасности;
3. Издание инструкций, плакатов, планов эвакуации.

Эксплуатационные мероприятия:

1. Соблюдение эксплуатационных норм оборудования;
2. Обеспечение свободного подхода к оборудованию;
3. Содержание в исправном состоянии изоляции токоведущих проводников.

К техническим мероприятиям относится соблюдение противопожарных требований при устройстве электропроводок, оборудования, систем отопления, вентиляции и освещения. В коридоре имеется порошковый огнетушитель типа ОП-5, рубильник, на двери приведен план эвакуации в случае пожара, и, на досягаемом расстоянии, находится пожарный щит.

Наиболее дешевым и простым средством пожаротушения является вода, поступающая из обычного водопровода. Для осуществления эффективного тушения огня используют пожарные рукава и стволы, находящиеся в специальных шкафах, расположенных в коридоре. В пунктах первичных средств огнетушения должны располагаться ящик с песком, пожарные ведра и топор.

Если возгорание произошло в электроустановке, для его устранения должны использоваться огнетушители углекислотные типа ОУ-2, или порошковые типа ОП-5. Кроме устранения самого очага пожара нужно, своевременно, организовать эвакуацию людей.

7.2.3 Требования пожарной безопасности

Для предупреждения возникновения пожара в лаборатории проводятся следующие мероприятия:

- курение разрешено только в специально оборудованных местах, где имеются урны;
- проходы, и выходы постоянно содержатся в хорошем состоянии, не загромождаются и имеют свободный проход для людей и эвакуации оборудования лаборатории;
- спецодежда обслуживающего персонала хранится в специально предназначенном для нее месте;
- все лаборатории и другие помещения обеспечены первичными средствами пожаротушения;
- работа в лаборатории с легковоспламеняющимися и горючими веществами без наличия приточно-вытяжной вентиляции строго воспрещается;
- запрещается в лаборатории оставлять без присмотра включенными приборы и оборудование.

При обнаружении возгораний или пожара оперативный персонал согласно регламента:

- вызывает пожарную команду;
- оповещает руководство предприятия;
- производит необходимые отключения и заземления оборудования;
- встречает пожарную команду, производит инструкцию по ПТБ;
- выдает разрешение (допуск) на тушение пожара;
- выдает средства защиты;
- заземляет пожарную машину и ствол.

В каждом цехе должна быть разработана инструкция о конкретных мерах пожарной безопасности, противопожарном режиме и план эвакуации персонала из помещений.

Пути эвакуации персонала категорически запрещается загромождать оборудованием. На путях эвакуации устанавливаются указатели и световые табло.

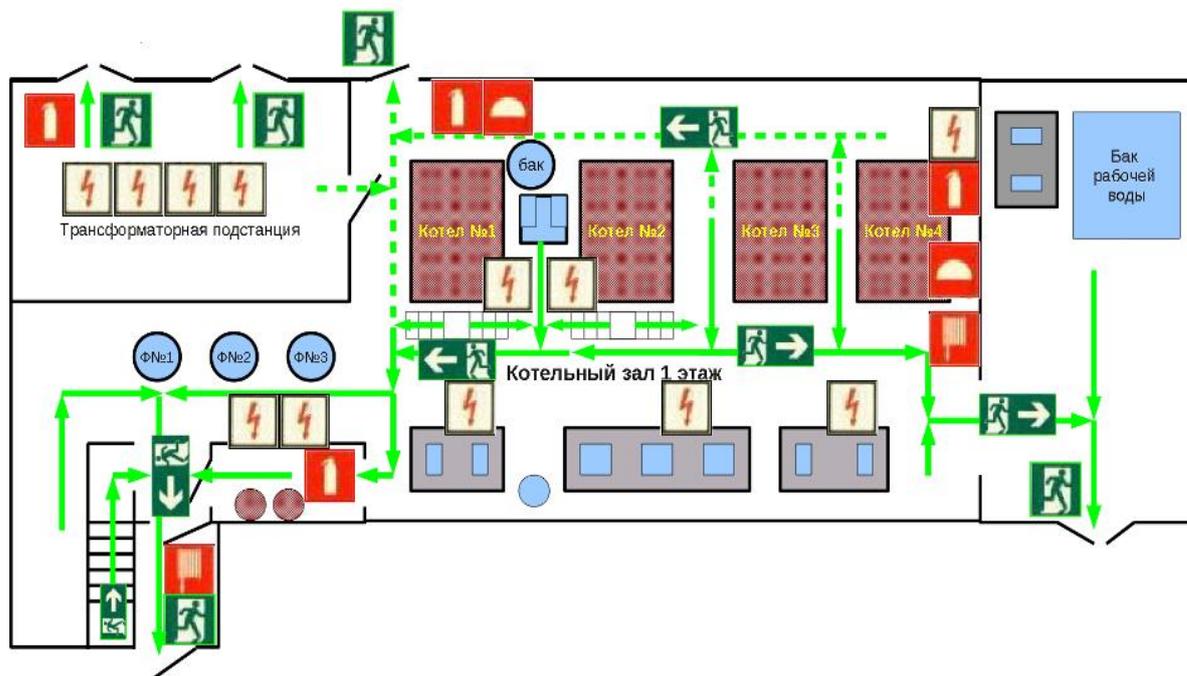


Рисунок 58. – Пример плана эвакуации персонала.

Каждый случай пожара (возгорания) должен расследоваться в соответствии с «Инструкцией по расследованию и учету пожаров, происшедших на объектах энергетики» специально назначенной комиссией для установления причин, убытков, виновников возникновения пожара (возгорания) и разработки противопожарных мероприятий для других объектов.

7.2.4 Требования безопасности при работе с персональным компьютером

При работе с ПЭВМ следует соблюдать следующие меры безопасности которые соответствуют [27]

- к работе допускаются лица прошедшие специальное обучение;
- корпус компьютера должен быть обязательно заземлен;
- недопустимо оставлять компьютер включенным без присмотра (за исключением специально оговоренных случаев);

- оснащать мониторы персональных компьютеров прозрачными защитными экранами, которые поглощают большую часть вредных излучений. Это такие поля как: электромагнитное, ионизирующее.

Важным защитным мероприятием также является установление режима труда и отдыха. Утомляемость, воздействие электромагнитных и ионизирующих излучений можно существенно снизить, если соблюдать некоторые рекомендации при работе с компьютером. Во-первых, не рекомендуется работать за компьютером более шести часов в день. Во-вторых, каждый час необходимо делать перерывы на 5-10 минут, а после четырех часов работы за компьютером, необходимо сделать перерыв на обед длительностью не менее часа.

Рекомендуется работать на компьютере при расстоянии от монитора до поверхности глаз, не менее 50 см, что позволяет уменьшить воздействие вредных излучений и снизить утомляемость глаз. Также рекомендуется работать на пониженных яркостях монитора.

7.2.5 Требования к освещенности

Значение освещения в процессе жизнедеятельности и, особенно в производственной деятельности, велико. Оценка освещения рабочей зоны необходима для обеспечения нормированных условий работы в помещениях и проводится в соответствии с [17].

Правильно спроектированное освещение обеспечивает возможность хорошей производственной деятельности.

Наилучшим видом освещения является дневное, солнечное. Но дневной свет не может обеспечить нужное освещение в течении всего рабочего дня, а так же зависит от погодных условий. Поэтому цеха завода обеспечиваются естественным и искусственным освещением.

Искусственное освещение по характеру выполняемых задач делится на:

- рабочее;
- аварийное;
- переносное;

- эвакуационное.

Дополнительное искусственное освещение применяется не только в темное, но и в светлое время суток. В качестве источников искусственного освещения применяются лампы накаливания, светодиодные, люминесцентные и газосветные.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен.

Световой поток лампы накаливания или группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$F = \frac{E_n \cdot K \cdot S \cdot Z}{n \cdot \eta}, \quad (7.2.5.1)$$

где

E_n – нормируемая минимальная освещённость по [18], лк;

S – площадь освещаемого помещения, м²;

K – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т.е. отражающих поверхностей), (наличие в атмосфере цеха дыма), пыли;

Z – коэффициент неравномерности освещения, отношение $E_{cp.}/E_{min.}$. Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1;

n – число светильников;

η - коэффициент использования светового потока, %.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен ρ_c и потолка ρ_n .

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)}. \quad (7.2.5.2)$$

Рассчитав световой поток F , зная тип лампы, выбирается ближайшая стандартная лампа и определяется электрическая мощность всей осветительной системы. Если необходимый поток светильника выходит за пределы диапазона $(-10 \div +20\%)$, то корректируется число светильников и либо высота подвеса светильников.

Размещение светильников в помещении определяется следующими размерами, м:

H – высота помещения;

h_c – расстояние светильников от перекрытия (свес);

$h_n = H - h_c$ – высота светильника над полом, высота подвеса;

h_p – высота рабочей поверхности над полом;

$h = h_n - h_p$ – расчётная высота, высота светильника над рабочей поверхностью.

Исходные данные:

$H = 4$ м, $h_p = 0,8$ м, $h_c = 0,2$ м, $A = 9$ м, $B = 5$ м, $\rho_c = 30\%$; $\rho_n = 50\%$;

$K = 1,5$; $Z = 1,1$, $E_n = 300$ лк.

Расчёт

$$h = H - h_p - h_c = 4 - 0,8 - 0,2 = 3 \text{ м}, \quad (7.2.5.3)$$

где h – расчётная высота, высота светильника над рабочей поверхностью.

$$S = A \cdot B = 9 \cdot 5 = 45 \text{ м}^2, \quad (7.2.5.4)$$

где S – площадь освещаемого помещения, м².

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{30}{3 \cdot 14} = 1,07. \quad (7.2.5.5)$$

По значению i выбирается коэффициент использования освещенности, $\eta = 0,48$.

Разрабатывается план помещения и размещение светильников.

L – расстояние между соседними светильниками или рядами (если по длине (A) и ширине (B) помещения расстояния различны, то они обозначаются LA и LB),

l – расстояние от крайних светильников или рядов до стены. Оптимальное расстояние l от крайнего ряда светильников до стены рекомендуется принимать равным $L/3$.

Выбирается светильник ПВЛ с габаритными размерами 933x204x156 мм.

Расстояние между светильниками L определяется как:

$$L = \lambda \cdot h = 1,5 \cdot 3 = 4,5 \text{ м.} \quad (7.2.5.6)$$

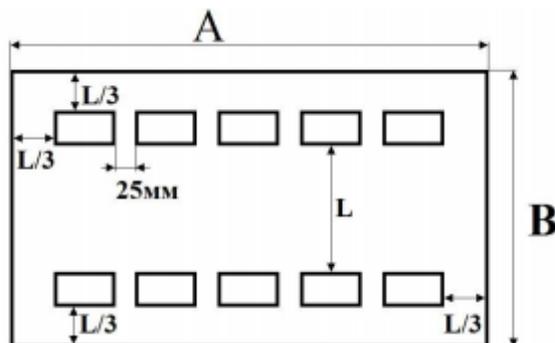


Рисунок 59 – План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Исходя из плана помещения и размещения светильников получается количество светильников равным $n = 10$ (2 ряда светильников по 5 светильников в длину).

$$F = \frac{E_n \cdot K \cdot S \cdot Z}{n \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 1,5 \cdot 45 \cdot 1,1}{10 \cdot 0,48} = 4640 \text{ лм,} \quad (7.2.5.7)$$

По световому потоку выбираем люминесцентную лампу ЛХБ-80. Мощность всей осветительной системы $P = 80$ Вт

7.2.6 Требования к параметрам шума и вибрации

Шум является одним из наиболее распространенных факторов внешней среды, неблагоприятно воздействующих на организм человека и на его нервную систему. У человека ослабляется внимание, ухудшается память. Все это приводит к значительному снижению производительности труда, росту количества ошибок при проведении работ.

Общие требования безопасности шума предусматриваются в [21].

По временным характеристикам шум подразделяется на постоянные,

уровень которых за рабочий день изменяется во времени не более чем на 50Дб, и непостоянные, уровень которых изменяется во времени более чем на 50Дб. Непостоянные шумы подразделяются на:

- колеблющиеся;
- прерывистые;
- импульсные.

Снижение шума, создаваемого на рабочем месте внутренними источниками, а также шума проникающего извне, является очень важной задачей. Снижение шума в источнике излучения можно обеспечить применением упругих прокладок между основанием машины, прибора и опорной поверхностью. В качестве прокладок используются резина, войлок, пробка, различной конструкции амортизаторы. Под настольные шумящие аппараты можно подкладывать мягкие коврики из синтетических материалов, а под ножки столов, на которых они установлены, прокладки из мягкой резины, войлока, толщиной от 6 до 8 мм. Крепление прокладок возможно путем приклейки их к опорным частям.

Возможно также применение звукоизолирующих кожухов. Не менее важным для снижения шума в процессе эксплуатации является вопрос правильной и своевременной регулировки, смазывания и замены механических узлов шумящего оборудования. Снижение уровня шума может быть также достигнуто увеличением звукоизоляции ограждающих конструкций, уплотнением по периметру притворов окон, дверей.

Рациональная планировка помещения, размещение оборудования является важным фактором, позволяющим снизить шум.

Таким образом, для снижения шума создаваемого на рабочих местах внутренними источниками, а также шума, проникающего извне, следует:

- ослабить шум самих источников (применение экранов, звукоизолирующих кожухов);
- снизить эффект суммарного воздействия отраженных звуковых волн (звукопоглощающие поверхности конструкций);

- применять рациональное расположение оборудования;
- использовать архитектурно-планировочные и технологические решения изоляций источников шума.

7.2.7 Требования к параметрам микроклимата

Значительным физическим фактором является микроклимат рабочей зоны, особенно температура и влажность воздуха. Человек постоянно находится в процессе теплового взаимодействия с окружающей средой. Исследования показывают, что высокая температура в сочетании с высокой влажностью воздуха оказывает большое влияние на работоспособность оператора.

В производственных помещениях чаще всего бывает пониженная влажность воздуха. Зимой из-за систем центрального отопления, а летом – из-за применения кондиционеров и вентиляторов. Пониженная влажность воздуха отрицательно сказывается на состоянии кожного покрова человека: кожа теряет влагу, становится сухой и шершавой. При пониженной влажности ощущается сухость во рту, появляется жажда.

Оптимальные нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственного помещения в соответствии с [20] приведены в таблице 14.

Таблица 14 - Значение параметров микроклимата для легких категорий работ

Период Года	Категория работы	Температура, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, не более м/с
Холодный и переходный	легкая	20-23	60-40	0,2
Теплый	легкая	22-25	60-40	0,2

7.2.8 Социальные гарантии для работника

Социальные гарантии - это социально-экономические нормативы, гарантирующие населению признанный обществом уровень потребления, то есть обеспечивающие минимальный стандарт уровня жизни в соответствии с возможностями экономики.

Система социальных гарантий должна удовлетворять следующим требованиям:

- необходимый и достаточный объем;
- обеспеченность финансовыми и материальными ресурсами;
- адресность;
- учет территориальных особенностей;
- механизм доведения до получателя.

Социальные гарантии могут быть общенациональными, региональными, отраслевыми, а источниками их финансирования — федеральный бюджет, бюджетная система субъекта Российской Федерации и внебюджетные фонды. Социальные гарантии обеспечиваются гражданам страны в соответствии с Конституцией.

В отношении трудоспособного населения социальные гарантии должны обеспечивать условия трудовой и деловой активности, защиту прав и свобод наемного работника, нанимателя.

Для основной части населения наемный труд является главным источником средств существования, поэтому система социальной защиты трудоспособного населения должна обеспечивать гарантии в сфере занятости и оплаты труда. Для этого государством устанавливается минимальная оплата труда. В большинстве стран устанавливается минимальная часовая зарплата.

Социальные гарантии в отношении нетрудоспособного населения должны создавать условия для его потребления, учитывая особенности каждой группы.

Поступления из системы социальной защиты делят на три группы:

- денежные выплаты (пенсии, пособия);
- льготы, проявляющиеся в праве на снижение налогов, получение трансфертов в натуральной форме;
- социальные услуги, потребляемые бесплатно или по ценам, не имеющим экономического значения.

Социальные гарантии выполняют различные функции:

- алиментарно-компенсационную, которая обеспечивает поддержание потребления на определенном уровне;
- защитную, которая обеспечивает сохранение условий труда и проживания;
- стимулирующую, которая стимулирует получателя на рост трудовой и деловой активности.

Заключение

Рассчитаны параметры двигателя, его естественные и искусственные характеристики. Для проверки перегрузочных режимов двигателя и инвертора были построены предельные электромеханические характеристики, подробный анализ данных графиков показывает, что для применяемого АД и ПЧ токи ограничиваются максимальным током инвертора.

Проведена оптимизация контуров регулирования системы управления, по итогам оптимизации можно сказать, что ожидаемые показатели качества переходных процессов с результатами моделирования сошлись с допустимой погрешностью.

На основе классической системы векторного управления АД разработана система управления асинхронным ЭП, позволяющая сформировать нагрузочный момент, имитирующий работу компонентов ЗА.

Для исследования работоспособности спроектированной системы проведено её имитационное моделирование в различных эксплуатационных режимах, результаты исследований выполнены в среде MATLAB Simulink 16 и показывают, что разработанный ЭП имеет повышенную точность и эффективность и может с успехом применяться при замене и перенастройке устаревших ЭПЗА.

По итогам исследований модели ЭПЗА определены особенности изменения формы кривой, необходимой для имитации моментных усилий запорной арматуры.

Литература

1. Г. Г. Васильев, Г.Е. Коробков, А.А. Коршак и др. Трубопроводный транспорт нефти – Под редакцией С. М. Вайнштока: Учеб. Для вузов: В 2 т. – М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2002. – Т. 1. – 407 с.
2. Гошко А.И. Арматура трубопроводная целевого назначения. Выбор. Эксплуатация. Ремонт. – М.: Машиностроение, 2003 – 432 с
3. СТО Газпром 2-4.1-212-2008 «ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЕ, ПОСТАВЛЯЕМОЙ НА ОБЪЕКТЫ ПАО "ГАЗПРОМ"» – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://meganorm.ru/Data1/58/58255/index.htm>, свободный. – Загл. с экрана
4. Гарганеев А.Г., Каракулов А.С., Лангараф С.В., Саидов В.С. Особенности применения и принципы построения электроприводов запорной арматуры трубопроводного транспорта нефтепродуктов//Технічна електродинаміка, тематичний випуск, Силова електроніка та енергоефективність, Частина 2, Інститут електродинаміки НАН України, Київ 2006.
5. Ахметов С.А., Сериков Т.П., Кузеев И.Р., Баязитов М.И. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа: Учебное пособие – Под ред. С. А. Ахметова. – СПб.: Недра, 2006. – 868 с.
6. Электропривод трубопроводной арматуры – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://bankpatentov.ru/node/431329>, свободный. – Загл. с экрана
7. Гуревич Д.Ф., Трубопроводная арматура: Справочное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1981. – 368 с.
8. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов: учебное пособие. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод – Томский политехнический университет. –2-е изд., перераб. и доп. – Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2014. –648 с.

9. ГОСТ 51330.0-99. Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 0. Общие требования.
10. Диагностирование арматуры с электроприводом при помощи относительных электрических параметров – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.diaprom.com/publication/?id=5>, свободный. – Загл. с экрана
11. БиВольт – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.beevolt.ru/tinfo.php?id=6175>, свободный. – Загл. с экрана
12. Электротехнический справочник: В 4т. Т.4. Использование электрической энергии / Под общей редакцией профессора МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 8-е изд., испр. и доп. – М.: издательство МЭИ, 2002. – 696 с.
13. Видянев И.Г., Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: Учеб. – метод. пособие. - Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 36 с.
14. Крепша Н.В., Свиридов Ю.В. Безопасность жизнедеятельности: Учеб. – метод. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 145 с.
15. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
16. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны
17. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
18. Федосова В.Д. расчет искусственного освещения: Методич. указания. – Томск: Изд – во ТПУ, 1991. – 23 с.
19. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы.
20. ГОСТ-12.1.019-2009 Электробезопасность.
21. ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

22. ГОСТ 12.4.124-83 ССБТ. Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования.
23. ГОСТ 12.1.012-90. Вибрационная безопасность.
24. ГОСТ 12.1.009-76. ССБТ. Электробезопасность. Термины и определения.
25. ГОСТ 12.1.033-81. ССБТ. Пожарная безопасность. Термины и определения.
26. Правила электроустановок ПУЭ.
27. ГОСТ 12.3.002-75 ССБТ. Процессы производственные. Общие требования безопасности
28. Охрана окружающей среды. Под ред. С.В. Белова. / М.: Высшая школа, 1991. – 128с.
29. Как утилизировать бытовую технику и электронику – [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.ecorb.ru/70>, свободный. – Загл. с экрана
30. ГОСТ 12.1.010 – 76. Основы противопожарной защиты предприятий.
31. Эргономика рабочего места пользователя ПЭВМ – [Электронный ресурс]-режим доступа: http://bgd.alpud.ru/private/glava4/V_4_A_gigienan.htm, свободный. – Загл. с экрана
32. ГОСТ Р 51330.0-99* «Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 0. Общие требования»
33. ГОСТ 14254-96 «Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP)»

Приложение А

Раздел (4)

The gas shut-off valves electric drive

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Рабинович Евгений Евгеньевич		

Консультант кафедры ЭПЭО

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Краснов Иван Юрьевич	к.т.н.		

Консультант кафедры ИЯ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Пташкин Александр Сергеевич	к.ф.н		

Introduction

The electric drive is one of the main components in many areas of modern technical civilization. Various types of electric motors and power converters have found wide application of modern electric drive systems. Electric drives are used to drive pumping compressor units, to control gas flow, as a gate valve drive and for other auxiliary needs in the field of gas fuel transportation.

The efficient and safe operation of the whole gas transportation system directly depends on the fast, accurate and reliable operation of the electric drives (actuators) of the stop valves in the gas industry. Thus, the task of developing and researching electric drives for the control of stop valves in the gas industry is relevant and timely.

This final graduate work is supposed to discuss the solution of issues related to the development and research on the possibilities of using AC asynchronous electric drive systems for the control of shut-off/gate valves.

Gate valve

A gate valve is a valve which opens by lifting a round or rectangular gate/wedge out of the path of the fluid. Gate valves are often used in the gas industry. The flow change occurs near shutoff with a relatively high fluid velocity causing gate and seat wear. Typical gate valves are designed to be fully opened or closed. When fully open, the typical gate valve has no obstruction in the flow path, resulting in very low friction loss. Gate valves are actuated by a threaded stem which connects the actuator (e.g. hand wheel or motor) to the gate. They are characterized as having either a rising or a non rising stem, depending on which end of the stem is threaded. Rising stems are fixed to the gate and rise and lower together as the valve is operated, providing a visual indication of valve position. The actuator takes the form of a nut which is rotated around the threaded stem to move it. Non rising stem valves are fixed to, and rotate with, the actuator, and are threaded into the gate [1].

Construction of a Gate Valve

Gate valves consist of three major components: body, bonnet, and trim. The body is generally connected to the piping by means of flanged, screwed, or welded connections. The bonnet, containing the moving parts, is joined to the body, generally with bolts, to permit cleaning and maintenance. The valve trim consists of the stem, the gate, the wedge, or disc, and the seat rings.

Two basic types of gate valves are the manufactured-wedge type and the double-disc type, and there are several variations within each of these types

Wedge Type

There are four types of wedges: solid, hollow, split, and flexible wedge. The solid wedge is a single-piece solid construction. It does not compensate for changes in seat alignment due to pipe end loads or thermal fluctuations. As such it is most susceptible to leakage. Solid-wedge gate valves are considered the most economical. Almost all small gate valves are solid-wedge gate valves. Solid-wedge gate valves are generally used in moderate to lower pressure-temperature applications. It is common practice to use cast iron or ductile iron solid-wedge gate valves in cold or ambient water lines.

A hollow wedge is a variation of solid wedge with the exception of a hole in the center. The hollow wedge travels along the stem when the threaded stem is rotated, thus opening or closing the valve port.

The flexible wedge is also one-piece construction like a solid wedge, but areas behind the seating surfaces are hollowed out to provide flexibility. This construction compensates for changes in seat alignment for improved seating while maintaining the strength of a solid wedge in the middle. This design offers better leak tightness and improved performance in situations with potential for thermal binding [1].

The split wedge consists of two-piece construction which seats between the tapered seats in the valve body. The two pieces of split wedge seat flat against the valve seats as the stem is moved downward, and they move away from the valve seats when the stem is pulled upward.

In the wedge or disc-wedge types either a tapered solid or tapered split wedge is used. In the rising stem valves, the operating threads are out of direct contact with the fluid or gas. The non-rising stem type is preferred where space is limited and where the fluid passing through the valve will not corrode or erode the threads or leave deposits on the threads. Also, the non-rising stem valve is preferred for buried service. When the valve is closed, the gate disc is wedged on both sides against the seat. In split-wedge gate valves, the two-piece wedge disc is seated between matching tapered seats in the body. This type is preferred where the body seats might be distorted due to pipeline strain.

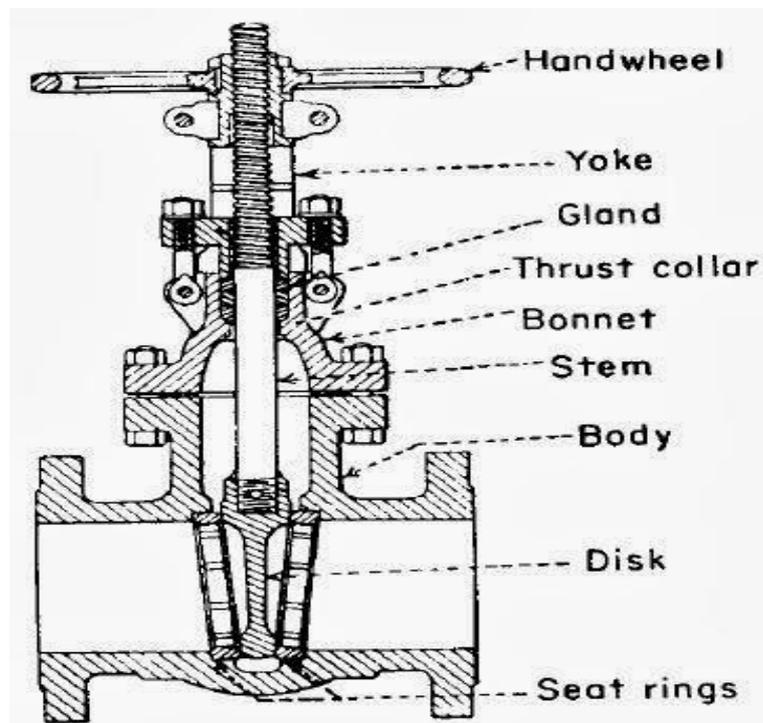


Figure A.1: Rising-stem solid-wedge gate valve

The upper part of the stem is threaded and a nut is fastened solidly to the hand wheel and held in the yoke by thrust collars in the rising-stem type of valve. As the hand wheel is turned, the stem moves up or down [2]. In the non-rising stem valve, the lower end of the stem is threaded and screws into the disc, vertical motion of the stem being restrained by a thrust collar. The rising-stem valve requires a greater amount of space when opened.

However, it is generally preferred because the position of the stem indicates at once whether the valve is open or closed. Non-rising stem valves are sometimes provided with an indicator for this purpose.

Double-Disc Type

The discs are forced against the valve seats by a wedging mechanism as the stem is tightened in the double-disc parallel-seat valves. Some double-disc parallel seat valves employ a design which depends mainly upon the fluid pressure exerted against one side of the disc or the other for its tightness. The major advantage of this type is that the disc cannot be jammed into the body, an action that might make it difficult to open the valve. This is particularly important where motors are used for opening and closing the valve [3].

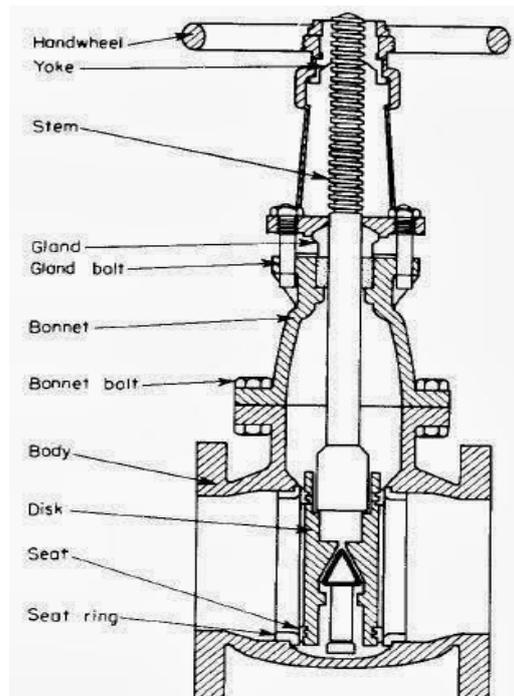


Figure A.2: Double-disc rising-stem flanged-end gate valve

Unlike the wedge in a wedge-gate valve, which only comes into contact nearly closed, each disc in the parallel seat valve slides against its seat while the valve is being opened or closed. Consequently, these components must be made of metals, which do not gall or tear when in sliding contact with each other. The double-disc parallel-seat gate valve is often favored for high-temperature steam service because it is less likely to stick in the closed position as a result of change in temperature.

Conduit Gate Valve

It is also referred to as a slide valve or parallel slide. The disc surfaces are always in contact with the body seats. Like the double-disc or parallel-seated gate valve, its disc seats against the downstream seat, depending on the flow direction. The inside diameter of a conduit gate valve is equal to the inside diameter of the connecting pipe. These valves are used in pipelines where pigs are run through the piping to perform cleaning of buildup deposits or debris. The typical applications of conduit valves include dirty river water with suspended solids or water with sludge or debris.

Conduit gate valves require a large-space envelope because of their longer disc proportions to accommodate both the blank and the spacer halves of the disc assembly. The valve is closed by moving the blank half downward to block the valve port. The spacer is accommodated in the sump part of the valve body. Refer to Fig. 1.

Conduit valves with Teflon (PTFE) seats can be used for low to intermediate temperatures (to 232 °C). Metal-seated valves may be used for temperatures up to 538 °C [3].

Thermal Binding

Thermal binding occurs when a valve is tightly shut off while the high temperature system is in operation. Later when the system is shut down and allowed to cool, thermal contraction of the valve seats move inward more than the wedge shrinkage. This can bind the wedge and seats tight enough to not allow the wedge to unseat or move when the hand-wheel or the valve actuator is activated to open the valve.

Parallel seated gate valves are most suitable for applications having potential for thermal binding. Split-wedge or flexible-wedge type gate valves are expected to perform better than solid-wedge gate valves when thermal binding is a concern.

Pressure Binding

Sometimes in high-temperature applications, the flow medium, such as water or steam, is trapped in the valve bonnet area when the valve is closed for

system shutdown. The valves that do not permit this trapped liquid or the condensate to reenter the piping either upstream or downstream may experience excessive pressures in the bonnet cavity when the system returns to operating temperature. This built-up pressure in the bonnet cavity can prevent the valve from opening and may cause damage to valve parts.

Pressure binding may not occur if the leakage past the upstream seat is adequate to prevent over pressurization of the valve bonnet cavity. The following options offer solutions to this problem:

- Drill a small hole on the upstream side of the disc.
- Install a small manual stop valve between the valve bonnet-neck and the upstream end of the valve. This valve shall be opened during start up.
- Install a small relief valve in the bonnet.

Advantages of Gate Valves

1. They have good shutoff characteristics.
2. They are bidirectional.
3. The pressure loss through the valve is minimal.

Disadvantages of Gate Valves

The following are some of the disadvantages of gate valves that must be considered when selecting a gate valve for an application :

1. Gate valves are not quick opening or closing valves. Full-stem travel to open or close a gate valve requires many turns of its hand wheel or an actuator.
2. Gate valves require large space envelope for installation, operation, and maintenance.
3. The slow movement of the disc near the full-closed position results in high-fluid velocities, causing scoring of seating surfaces, referred to as wire drawing. It also causes galling of sliding parts.
4. Some designs of gate valves are susceptible to thermal or pressure binding, depending upon the application.
5. In systems experiencing high-temperature fluctuations, wedge-gate valves may have excessive leakage past the seats due to changes in the angular

relationship between the wedge and the valve seats caused by piping loads on the valve ends.

6. Repair or machining of valve seats in place is difficult [3].

Valve drives (Actuators)

A single facility can have hundreds, if not thousands, of valves to control everything from turbine operation to ventilation, to systems that ensure the safety of personnel and equipment. The valves used can range in size from less than an inch to several feet in diameter. While some of these valves are designed to be operated manually, many of them require some form of automatic or remote operation. Operators and technicians must understand the different types of actuators used to operate these valves, and how these actuators work.

Valve actuators are devices used to position valves. They can be used to fully open and shut a valve, or in an application that requires constant and precise control, such as regulating the flow of fuel to a gas turbine, modulate the position of the valve.

There are many applications that call for the use of actuators, such as :

- Automating a process
- Positioning valves that require large amounts of torque to operate
- Instantaneous operation of systems used to protect personnel and equipment from dangerous conditions
- Use in controlling areas where manual operation is impractical or impossible
- Continually adjusting systems that must maintain desired parameters.

Types

There are three basic types of automatic valve actuators: those that are controlled by pressurized air, by electrical power, or by hydraulic force. Selecting the proper actuator is based on the following considerations:

- The valve application
- The means available to power the actuator
- The speed at which the valve needs to operate
- The amount of force required to operate the valve

- The type of valve to be operated
- The cost versus the benefit for using each type of actuator

Pneumatic

Pneumatic actuators use pressurized air to operate a valve. They do this by applying the force of the air to a piston or a diaphragm attached to the valve stem. Pneumatic actuators are used to provide automatic or semi-automatic valve operation, and are the most popular type in use due to their dependability and simplicity of design.

The advantages of pneumatic actuators include:

- Dependability and simplicity of design
 - Fast stroking speeds
 - Low fire risk
 - Low costs
 - Pressurized air can be stored, so the valves can be operated when power is lost
- The disadvantages of pneumatic actuators include:
- Poor performance at slow speeds,
 - Compressibility of air, which can lead to inconsistent speeds of shaft movement,
 - Impossible to precisely control position, unless fully open or shut.

Due to their simple design, high reliability, and low cost, pneumatic diaphragm actuators are used in many industrial applications. For example, pneumatic diaphragm actuators are often used to control cooling water flow in power plants.

Electric



Figure A.3 : Electric Valve Actuator

Electric actuators include electric motors and solenoid-actuated valves. Electric motors can be used to open, close, and position a valve manually, automatically, or semi-automatically. The motor operates in both directions and drives the valve stem by means of gear couplings. Solenoid valves use electric power to attract a magnetic slug attached to the valve stem and are used in automatic open-close applications [1].

The advantages of electric actuators include:

- No source of pressurized air or fluid required
- Useful where low temperatures could cause freezing of condensation in air supply lines
- Capable of producing very large amounts of torque
- Capable of producing consistent and adjustable operating speeds
- Electric cables are easier than piping to route to an actuator
- The disadvantages of electric actuators include:
 - More expensive and complex than other types of actuators
 - Slower comparative operation speeds
 - Susceptible to a loss of power

- Potential fire hazard

When a facility is located in a cold enough climate, any moisture trapped in pneumatic control lines can freeze, removing control of that valve. In conditions such as this, many facilities will rely on electric motor actuators for reliability and efficiency during extreme temperatures.

Hydraulic

Hydraulic actuators use a pressurized fluid to control valve movement. The hydraulic fluid used is either water or oil and is fed to either one or both sides of a piston to cause movement. Hydraulic valves provide for automatic and semi-automatic valve operation.

The advantages of hydraulic actuators include:

- More powerful than a pneumatic actuator of the same size
- Precise control of valve position
- Capable of converting a small input pressure into a large output pressure
- Incompressibility of the fluid, which means very little energy is lost during operation
- The disadvantages of hydraulic actuators include:
 - External hydraulic pump required
 - Efficiency can be influenced by changes in temperature
 - More expensive and complex than pneumatic actuators
 - Can leak, causing a potential fire hazard

Hydraulic actuators are often used to operate the main stop and control valves for high-pressure steam turbine piping. The actuator's ability to operate the valve against the high-pressure steam, as well as the ability to quickly shut the valve on the loss of control oil, makes hydraulic actuators well suited for this task [4].

General requirements for Shut-off / Gate Valve Actuators

In general, for the control of gate valves the following are used:

- Piston drives (pneumatic, pneumohydraulic and electrohydraulic);
- Pneumatic drives with a jet motor;

- Electric drives with a mechanical gear;
- Manual drives with a mechanical gear;
- Handles (levers), flywheels.
- The drive control system provides remote and local control, including:
- Closing and opening of the valves, stopping the locking device in any intermediate position from the remote and local controls;
- Automatic opening of the electrical circuit by the limit switches when the locking device reaches the end positions;
- Exclusion of the spontaneous movement of the locking device under the influence of the working environment.

Electric drives operate on three-phase alternating current with a voltage of 380 V, 50 Hz, single-phase current of 220 V, 50 Hz (or other - at the request of the customer) and a hand wheel.

The electric parts of all the types of drives have an explosion-proof design of class 1ExdIIBT3 in accordance with GOST R51330.0 and the degree of protection of the enclosure is not lower than IP 66 (IP 55 for solenoids placed in a sealed enclosure) in accordance with GOST 14254, with a double seal and an insulated terminal block. Electrical equipment is operable at 100% relative humidity of the ambient air at a temperature of 25 ° C [4].

The drive, when indicated in the order, works in automatic control systems, with the use of microprocessor technology. The drive's housing is protects against the external environment. Electric drives and control units are earthed in accordance to the requirements of the rules for the installation of electrical equipment [3]. Inside the drive's housing , the parts that need to be lubricated are treated with lubricants and an access device for monitoring and lubrication during operation without disassembling the drive is available.

The drive has devices (eyelets, eyebolts, etc.) for its slinging when mounted on the armature. If the drive is delivered already mounted on the armature, the slinging devices are calculated for the total weight of the armature and the drive. The scheme for slinging and mounting is included in the delivery. The scheme for

slinging the drive or the armature assembly with the drive avoids the possibility of damage to the slings, machine parts and the piping of the armature and drive.

At delivery, the drive is mounted on the armature, if its transportation is possible. In case of a separate delivery of the drive, the supplier is obliged to provide detailed instructions on the installation of the drive and control system.

Electric drives/actuators

Electric drives for the control of shut-off valves/armature have found the greatest popularity in comparison with other drives due to such advantages as the simplicity and reliability of their design, and also owing to the widespread availability of electric power through industries. Figure 13 shows the intelligent electric drive EPC-1000.

Electric drives for shut-off valves can consist of a quarter of a revolving electric drive or a multi-turn drive and a quarter of a reverse gear reducer.

The gearbox/reducer, as a rule, has the following structures:

- worm gearbox;
- spiroid gearbox;
- helical-worm gear reducer.

It is possible to use cylindrical or planetary gearboxes. The gear reducer is placed in a sealed enclosure and its internal parts are greased or oiled.

The gear reducer has a self-locking mechanical transmission. The electric drives have adjustable mechanical stops for the extreme positions of the valve and electric limit switches for the extreme positions of the valve gates. Electric drives automatically shut off the motor when the valve reaches the extreme positions and send a signal to the control board of the electric drive[4].

The limit switches of the electric drive have two separate pairs of contacts to ensure the following operations at the end positions of the locking body:

- stopping the electrical signal to the motor or opening the electric circuit of the drive's starter - the first pair of contacts;
- sending a remote electrical signal after the locking body changes from one end position to the other - the second pair of contacts.

The limit switches of the electric drive ensure reliable switching of the control circuits of the electric drive or, when the circuit is provided with a circuit-breaker, directly to the power supply circuits of the electric drive.

Electric drives have mechanical or (and) electric torque limiters. The setting of the limiting torque values is adjustable. The electric drives disconnect the motor when the torque limits are exceeded at the output shaft at any moment and also at the extreme positions and signal the this to the control panel of the electric drive.

The electric drives hinder movement in the same direction that caused the motor to switch off when the torque limit was reached. The electric control circuit of the electric drive provides for a blocking, which prevents the motor from starting spontaneously.

The electric drives have valve position indicators:

- on the gearbox (the indicator must be mechanically connected to the spindle of the crane);
- on the position indicator of the multi-turn electric drive.

The maximum temperature of the surface of the shells of electrical devices in the electric drive does not exceed 200 ° C (temperature class T3 in accordance with GOST R51330.0). The operating mode of the electric drives is repetitive short-term, not lower than S4, with the duration of the switch-on (PV) of at least 25% in accordance with GOST 183.

The electric drives operate on three-phase AC with a voltage of 380 V, 50 Hz. At the request of the customer it is possible to supply electric drives with other parameters (from 200 to 660 V, 50 Hz).

The cable entry of the electric drives is carried out via a stuffing box or a plug-in device [5].

Electric drives have elements for earthing in accordance with GOST12.2.007.0, and these are made in accordance with GOST21130. Earthing clamps are provided with a device against unscrewing. Resistance between earthing elements and accessible non-conductive metal parts of electric drives, which may be under voltage, does not exceed 0.1 Ohm.



Figure A.4 - Intelligent electric drive EPC-1000 for the multi-functional
Electric drives are classified according to the following characteristics.

1. Requirements for protection against explosion - into normal and explosion-proof versions.
2. By the type of reducer used – drives with worm, gear and planetary gearboxes.
3. By the method of disconnection/switching off in final positions: mechanical with a clutch for torque limitation ; Electric with a maximum current limiting relay; Combined mechanical and electrical.
4. By the method of connection with the stop valves' spindle: a sleeve with a square and a sleeve with cams.

In turn, the torque limiting clutch can be a of one-sided or two-sided action. In addition, the method of operation of the clutch can be: frictional action; With a movable worm; With a radial cam; With an end fist.

Electric drives of 2 groups are manufactured:

1. Drives whose torque clutch is one sided (that is, they only work to close the valve).

2. Drives with a two directional clutch. These drives are universal, they can control any fittings, they are produced with an explosion-proof design, they work both for closing the valve and for opening it. At the present time electric drives of the 2nd group are produced.

Principles of operation :

The operator at the dispatching and operating section of the pipeline by the push of a button controls the limit switch, which drives the motor, the rotation of which is transmitted through the reducer to the output shaft of the drive. The latter rotates the running nut or spindle of the gate valve.

Conclusion

All relevant calculations relating to the electric drive of the valve were carried out on the basis of the "Vector-controlled inverter-asynchronous motor" system in the course of the work. The drive's (actuator's) motor parameters, its natural and artificial characteristics were calculated. Also, a series of graphs were constructed showing limitations on currents corresponding to the rated current and the maximum current of the inverter, the maximum and minimum current of the load, and the long-term current of the motor. At low rotational speeds the long-term permissible current decreases due to the fact that the motor is self-ventilated, and it does not cool as effectively as at high speeds. Figure A.9 shows that the rated current of the inverter is greater than the current values of the long-term load current, and the inverter current value is greater than the maximum drive current. This indicates that the inverter was selected correctly.

Figure A.8 shows the mechanical characteristics with the limitations of the electric drive. The minimum torque, the maximum torque of the drive, and the longest permissible torque are shown. The torque permissible over a long period for the entire frequency range of rotation is greater than the static load torque, therefore, this motor is suitable for the selected mechanism in terms of power and heating.

For proper operation of the system the flux-linkage, current and speed regulators were calculated, the regulators that were chosen are the proportional-integral type. Such kind of regulators ensure the accuracy in the transient processes due to the integral component. Since the motor's power is 2.2 kW, it will not cause a voltage drop in the network, therefore, the current limit will have a positive effect on the motor's life since there will be no overheating of the insulation and further destruction.

The torque during the transient regimes was equal to the torque of the reactive load. Limiting torque allows to reduce mechanical impacts in various kinematic nodes of the system, for example, dynamic impacts in the gearbox when changing the direction of the motor's rotational speed.

References

1. Jatkar K.H., Dhanwe S. Finite Element Analysis of Gate Valve // International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT). - 2013. - Vol. 2, No. 10. - pp. 36–44.
2. Srivastava S., Shet K., Kulkarni S. A comparative study of two methodologies for nonlinear finite element analysis of knife edge gate valve sleeve // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. - 2015. - Vol. 6, No 12. - pp. 81-90.
3. Pujari A., Joshi G., Anyalysis and Design Optimization of Gate Valve Body Using Fea and Stress Anylasis // International Journal of Research in Engineering and Technology. - 2013. - Vol. 3, No 5. - pp. 135-140.
4. Bhaskar P., Gambhire V. Structural Analysis of Gate Valve Body Using F.E.A. // International Journal of Engineering Research & Technology. - 2014. - Vol. 3, No 6. - pp. 135-138
5. Sathishkumar S., Hemanathan R., Gopinath R., Dilipkumar D. Design and Anyalysis of Gate Valve and Seat Ring // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). - 2017. - Vol. 8, No 3. - pp. 131-141.