

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

Школа Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение школы (НОЦ) Электроэнергетики и электротехники

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

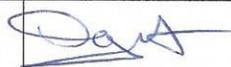
Тема работы
<i>Электропривод трубопроводной арматуры на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами</i>

УДК 62-83:621.646

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А97	Жих Сергей Романович		29.05.23

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Однокопылов Иван Георгиевич	к.т.н.		30.05.23

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН ШБИП ТПУ	Якимова Татьяна Борисовна	к.э.н.		30.05.23

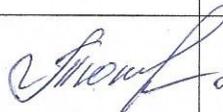
По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель ООД ШБИП	Черемискина Мария Сергеевна			30.05.23

Нормоконтроль (при наличии)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника	Тютеева Полина Васильевна	к.т.н.		30.05.23

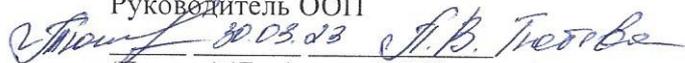
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника Промышленная электротехника и автоматизация Электропривод и автоматика	
Код компетенции СУОС	Наименование компетенции СУОС
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для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

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

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

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП


 (Подпись) (Дата) (ФИО)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
5A97	Жих Сергей Романович

Тема работы:

<i>Электропривод трубопроводной арматуры на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами</i>	
<i>Утверждена приказом директора (дата, номер)</i>	<i>Приказ № 27-88/с от 27.01.2023</i>

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	<i>25.05.2023</i>
--	-------------------

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 функционированию (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p>	<p>Материалы преддипломной практики, техническая литература, техническая документация.</p>
<p>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке <i>(аналитический обзор литературных источников 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>Введение, описание технологического процесса, обоснование и выбор системы электропривода, выбор элементов и расчет параметров электропривода, разработка и исследование имитационной модели электропривода, практические исследования электропривода, разработка раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», разработка раздела «социальная ответственность», заключение</p>
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>имитационная модель электропривода, динамические характеристики электропривода</p>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Старший преподаватель отделения общетехнических дисциплин Черемискина Мария Сергеевна
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кандидат экономических наук отделения отделения социально-гуманитарных наук Якимова Татьяна Борисовна
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
Все разделы выпускной квалификационной работы были написаны на русском языке	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	30.01.2023
--	------------

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Однокопылов Иван Георгиевич	к.т.н		30.03.23

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5A97	Жих Сергей Романович		30.01.23

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

Студенту:

Группа	ФИО
5А97	Жих Сергей Романович

Школа	Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	Направление/специальность	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Бакалавриат		

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

1. Стоимость ресурсов: материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	<i>Стоимость выполняемых работ, материальных ресурсов, согласно применяемой техники и технологии, в соответствии с рыночными ценами.</i>
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	<i>30 % премии; 20 % надбавки; 16% накладные расходы; 1,3 районный коэффициент</i>
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	<i>Общий режим налогообложения. Единый тариф страховых взносов – 30%</i>

Тема вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	<i>Проведение SWOT – анализа применения электропривода</i>
2. Планирование и формирование бюджета	<i>Определение трудоемкости работ; Формирование плана и графика разработки; Формирование бюджета затрат на научное исследование.</i>
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности	<i>Определение ресурсоэффективности исследования</i>

Тема графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет
4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности

выдачи задания для раздела по линейному графику

30.01.2013

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Татьяна Борисовна	канд. экон. наук	<i>ely</i>	<i>30.01.13</i>

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А97	Жих Сергей Романович	<i>СР</i>	<i>30.01.13</i>

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа .5A97		ФИО Жих Сергей Романович.	
Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение (НОЦ)	Электроэнергетика и электротехника
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Тема ВКР:

Электропривод трубопроводной арматуры на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при эксплуатации 	<p><i>Объект исследования - электропривод на базе синхронного двигателя, управляющий трубопроводной арматурой.</i></p> <p><i>Область применения - регулирующая трубопроводная арматура.</i></p> <p><i>Рабочая зона: <u>производственное помещение/полевые условия</u></i></p> <p><i>Размеры помещения – 5x5x5 м</i></p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны – 1. Электропривод трубопроводной арматуры</i></p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне – настройка приводе, управление трубопроводной арматурой</i></p>
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – ТК РФ. Глава 15. Рабочее время. Общие положения; – ГОСТ Р ИСО 26000-2012. Руководство по социальной ответственности; – N 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» – ГОСТ 12.2.032-78. «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»
<p>2. Производственная безопасность при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов 	<p>Вредные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Повышенный уровень шума - Повышенная вибрация - Отклонение показателей микроклимата - Недостаток естественного света - Недостаточная освещенность рабочей зоны <p>Опасные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Поражение электрическим током - Поражение вращающимися элементами электропривода - Пожар <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Защитные диэлектрические перчатки - Шлемы, каски, специальные шапки - Защитные очки - Защитное заземление, ограждения - Автоматическое отключение
<p>3. Экологическая безопасность при эксплуатации</p>	<p><i>Отходы, образующиеся в ходе жизненного цикла электрических машин.</i></p> <p><i>Вредные выбросы в атмосферу – химические выделения, выход из строя электронных элементов,</i></p> <p><i>Вредные выбросы в литосферу – бытовой мусор,</i></p>

	<i>Вредные выбросы в гидросферу – жидкие отходы в результате пользования водопроводом.</i>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации	Возможные ЧС – природные (наводнение, землетрясение) Наиболее типичные ЧС – техногенные (возникновение пожара (загорания) и электропоражение)
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

30.01.23

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Черемискина Мария Сергеевна			<i>30.01.23</i>

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5A97	Жих Сергей Романович		<i>30.01.23</i>

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
 Уровень образования бакалавр
 Отделение школы (НОЦ) Электроэнергетики и электротехники
 Период выполнения осенний / весенний семестр 2022/2023 учебного года

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
5А97	Жих Сергей Романович

Тема работы:

<i>Электропривод трубопроводной арматуры на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами</i>
--

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	<i>25.05.2023</i>
--	-------------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
22.05.2023	Основная часть	60
15.05.2023	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
18.05.2023	Социальная ответственность	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Однокопылов Иван Георгиевич	к.т.н		<i>30.01.23</i>

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП/ОПОП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тютева Полина Васильевна	к.т.н		<i>30.01.23</i>

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А97	Жих Сергей Романович		<i>30.01.23</i>

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит: 106 с., 51 рис., 20 табл., 21 источник.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОПРИВОД, СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ, ТРУБОПРОВОДНАЯ АРМАТУРА, ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ.

Объектом исследования является: электропривод трубопроводной арматуры на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами

В процессе исследования были произведены расчеты регуляторов контуров тока, скорости и положения для синхронного электропривода, проведены испытания на стенде, со снятием показаний. Моделирование проводилось в программной среде MathLab Simulink.

В работе также были рассмотрены вопросы техники безопасности и экологичности проекта, проведено технико-экономическое обоснование выполненного проекта.

При оформлении выпускной квалификационной работы были использованы следующие программы: Microsoft Office Word, Microsoft Office PowerPoint.

Оглавление

Введение.....	12
1. ОБЗОР ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ.....	14
1.1 Типы трубопроводной арматуры.....	14
1.2 Выбор электропривода	20
1.3 Выбор редуктора	22
1.4 Выбор системы управления	24
1.5 Представление электрической машины в подвижной системе координат dq , ориентированной по вектору магнитного потока ротора.	25
2. РАСЧЕТ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	29
2.1 Математическое описание синхронного двигателя в постоянными магнитами.....	29
2.1.1 Особенности синхронного двигателя с постоянными магнитами.....	29
2.1.2. Векторная диаграмма и структурная схема синхронного двигателя с постоянными магнитами	30
2.2 Параметры силовой части электропривода.....	33
2.3. Настройка регулятора контура тока.....	34
2.4. Настройка регулятора контура скорости.....	36
2.5. Настройка регулятора контура положения	37
3. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ.....	39
3.1 Описание модели.....	39
3.2 Исследование основных режимов работы электропривода	44
4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	61
4.1. Калибровка датчика положения	61
4.2. Особенности регулирования положения	64
4.3. Испытания двигателя на стенде.....	66
4.4. Различие симитированной модели с реальным электроприводом.....	69
5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	71
5.1. Потенциальные потребители результатов исследования.....	71
5.2. Анализ конкурентных технических решений	72
5.3. Технология QuaD	74

5.4. SWOT-анализ.....	76
5.5. Планирование работ по научно-техническому исследованию.....	79
5.5.1. Структура работ в рамках научного исследования.....	79
5.5.2. Определение трудоемкости выполнения работ.....	80
5.6. Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	83
5.6.1. Основная заработная плата исполнителя темы.....	83
5.6.2. Расчет дополнительной заработной платы.....	85
5.6.3. Отчисления во внебюджетные фонды.....	85
5.6.4. Накладные расходы.....	86
5.6.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.....	86
5.7. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	87
6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	91
6.1. Введение.....	91
6.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	91
6.3. Производственная безопасность.....	93
6.4. Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	94
6.4.1. Опасные и вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего.....	94
6.4.2. Повышенный уровень шума.....	95
6.4.3. Недостаточная освещенность рабочей зоны.....	96
6.4.4. Опасные и вредные производственные факторы, связанные с электрическим током.....	98
6.5. Экологическая безопасность.....	98
6.5.1. Защита селитебной зоны.....	99
6.5.2. Защита атмосферы.....	99
6.5.3. Защита гидросферы.....	99
6.5.4. Защита литосферы.....	99
6.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	100
6.7. Выводы по разделу.....	101
Заключение.....	103
Список используемой литературы.....	104

Введение

В современном мире стоит важнейшая задача стремительного развития путем решения технологических проблем, расширения возможностей, обновления компонентов тех или иных технических единиц, а также автоматизация процесса производства, начиная от простейшей операции, заканчивая промышленными комплексами. Производителям и потребителям приходится изучать сложнейшие вопросы разработки, внедрения и усовершенствования оборудования.

Основной тенденцией борьбы с такими проблемами является развитие и продвижение в производство автоматизированного электропривода, который, в свою очередь, расширяется в применении двигателей с высокими энергетическими параметрами, контролируемых преобразователей энергии, а также качественной и надежной станции управления. Все это в комплексе дает возможность повысить как производительность рабочих структур, так и качество изготавливаемых изделий при использовании различных исполнений приводов трубопроводной арматуры. По сравнению с другими видами приводов, электроприводу присущ ряд достоинств: простота реализации преобразования электрической энергии в механическую, ее экономичность, простая поставка электропитания к рабочей зоне, достойные параметры регулирования электропривода.

Регулирующая трубопроводная арматура на основе электропривода, позволяет отслеживать и контролировать состояние трубопроводной арматуры, своевременно прекратить поставку того или иного ресурса или возобновить данный процесс, управлять давлением, а также объемами перемещаемых жидкостей и газов. Использование такого вида приводов позволяет повысить уровень надежности и безопасности производства, урегулировать проблемы, возникающие от человеческого фактора, и понизить цену производства продукции.

Сегодня электропривод применяется в совершенно различных видах промышленной и хозяйственной деятельности. Одной из главных причин, почему стал использоваться именно такой вид приводов, является простой способ его автоматизации. Сегодня электропривод представляет из себя сложную структуру, состоящую из разных частей: электродвигательного устройства, преобразовательного устройства, управляющего устройства и передаточного устройства. К данному комплексу можно также отнести всевозможные датчики для реализации замкнутых цепей управления, наборы выключателей.

В современности стало расти понятие автоматизированный электропривод, так как требования управления и регулирования производственным процессом становятся жестче со временем. Сегодня такие системы не просто позволяют преобразовывать энергию движения заряженных частиц в механическую энергию, а реализовывать сложные алгоритмы управления и контроля, позволяющие получить желаемые режимы работы, а также снизить энергопотребление без снижения качества и производительности производства.

1. ОБЗОР ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

1.1 Типы трубопроводной арматуры

Трубопроводная арматура – устройство, располагаемое в трубопроводе и предназначенное для регулирования, перекрытия, отсечки, смешивания или общим словом – управления потоком жидкости или газа. Основным принципом работы является изменение площади проходного сечения. Различают трубопроводные арматуры по видам, типам и функциональным назначениям. Рассмотрим подробнее, данные разделы.

По функциональному назначению делятся на:

1. **Запорная.** Поступательное движение рабочего органа из одного крайнего положения в другое. Основное ее предназначение состоит в перекрытии потока с заданной герметичностью по требованию технологического процесса.

2. **Регулирующая.** Поступательное движение рабочего органа в любое положение с заданной точностью. Предназначена для управления и регулирования рабочих параметров путем изменения расхода или проходного сечения.

3. **Обратная.** Рассчитана для предотвращения протекания обратного потока при изменении направления его движения при помощи плотного перекрытия трубы.

4. **Предохранительная.** Является защитной мерой для оборудования и трубопровода. Предотвращает недопустимое повышение давление, сбрасывая излишки рабочей среды через массоотвод.

5. **Распределительно-смесительная.** Используется для направления потоков рабочей среды по определенным направлениям или их смешивания либо посредством разделения основного входящего потока на два или более, либо – объединения нескольких в общий выходной поток при определенном положении затвора.

6. **Фазоразделительная.** Предназначена для разделения потоков рабочей среды с различной плотностью или находящихся в различных фазовых состояниях.

7. **Комбинированная.** Является объединением из перечисленных видов. Например, запорно-регулирующая, запорно-обратная, невозвратно-запорная и невозвратно-управляемая.

Кроме назначений, также имеются различные типы арматуры, различающихся между собой рабочим органом: задвижки, краны, клапаны.

Одним из самых популярных типов трубопроводной арматуры - задвижка. Это промышленная трубопроводная арматура, запорный орган которой перемещается возвратно-поступательно перпендикулярно оси потока рабочей среды [1]. Задвижки широко применяют во многих областях промышленности для перекрытия потоков газообразных или жидких сред в трубопроводах с диаметрами условных проходов от 50 до 2000 мм при рабочих давлениях 0,4 - 20 МПа и температурах среды до 450°C. Иногда задвижки изготавливают и на более высокие давления. Запирающий элемент обычно находится в крайних положениях «открыто» и «закрыто». Также возможно применение задвижек для двухпозиционного (дискретного) регулирования потока рабочей среды. Перекрытие рабочего потока в задвижках осуществляется за счет запорного элемента, перегораживающего поток. Принцип работы задвижки изображен на рисунке 1.

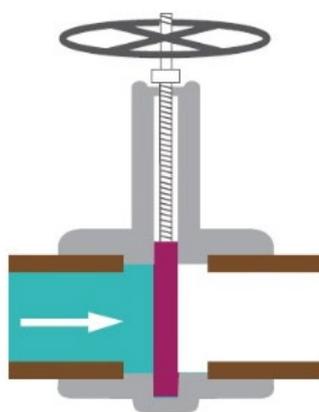


Рис. 1. Принцип работы задвижки

По видам различают несколько групп трубопроводной арматуры:

- **Неавтоматизированная (ручная).** Управление осуществляется путем передачи вращения от ручного дублера, который приводит во вращение оператор самостоятельно. Часто встречается данный вид в местах, где не предусмотрены условия для работы электронных устройств.

- **Автоматизированная.** Управление осуществляется путем механической передачи, как правило, через редуктор. Инициатором для преобразования во вращение может являться как любой посторонний источник энергии, так и рабочая среда. Система не является самонастраиваемой и требует действий оператора в своей работе.

- **Автоматическая.** Содержит в себе принцип работы, как в автоматизированной. Участие оператора в данном случае состоит только в однократном запуске системы.

Наиболее распространенным приводом в данной отрасли является регулируемый электропривод. Данный тип получил широкое применение во всех областях промышленности и продолжает стремительно развиваться по сей день. Можно описать его, как электромеханическую систему, которая управляет параметрами, определенными по технологическому процессу. В зависимости от того, как будет осуществлено управление такой системой, так будут изменяться параметры регулируемой рабочей среды, такие как температура, давление и так далее.

Ко всем технологическим процессам предъявляются требования, и электропривод не остается без них. Сформулируем правила, определяющие правильность работы современного электропривода:

- **Надежность.** Надежность заключается в выполнении определенных функций в оговоренных условиях за определенный промежуток времени. Без данной характеристики электропривода рассмотрение других не имеет смысла. Именно поэтому требование надежности является основополагающим показателем качественной системы.

- **Точность.** Данный показатель является важнейшим для применения управляемого электропривода. Точность характеризуется статическим отклонением финального значения величины от требуемого. В любой области жизнедеятельности всегда присутствует погрешность, так как идеальные показания получить невозможно. В данном пункте говорится о выполнении приводом функций с такой погрешностью, которая допускается тем или иным технологическим процессом.

- **Быстродействие.** Данный параметр проявляется в том, как быстро система умеет реагировать на изменения в технологическом процессе. Не всегда привод должен иметь высокое быстродействие. Например, слишком быстрое трогание с места лифта будет довольно травмоопасно. Поэтому данная характеристика должна обеспечиваться согласно требованиям технологического процесса.

- **Качество динамических процессов.** Имеется в виду, выполнение определенных правил выходных величин при их протекании во времени. Если взять пример из предыдущего пункта, то необходимо обеспечить такие показатели динамики, чтобы человек даже не чувствовал, что поднимается или опускается. Одними из главных показателей качества являются время переходного процесса и перерегулирование.

- **Энергетическая эффективность.** В современном мире без данного параметра не обойтись. Характеризуется он расходом электрической энергии на получение итогового технологического результата. Можно по-другому сказать, что это есть отношение полезной работы к затраченной (КПД). Необходимо всегда знать, с какой эффективностью работает привод, так как всегда существуют потери. Также и нельзя допускать, чтобы работа, совершаемая для получения продукта, во много раз не превосходила требуемой, достаточной.

- **Совместимость.** Данная характеристика приобрела свою ценность лишь в последнее время, когда в состав электропривода стали входить преобразователи для подключения к системе электроснабжения и

информационной системе. Заключается ее суть в том, чтобы при наведении высших гармоник в сеть это не сильно влияло на работу другого оборудования.

Для трубопроводной арматуры электропривод стал наиболее часто выбираемым видом привода, так как он позволяет получить необходимое управление с заданными параметрами и автоматизацию самого технологического процесса. Одним из основных удобств является дистанционное регулирование, управление, диагностика, а также позиционирование арматуры.

Вышеперечисленные понятия относятся к электроприводу в целом, но также стоит отметить, что касаясь такого управления трубопроводной арматуры требуется внести еще некоторые требования к данному типу привода детально:

- Обеспечение задаваемого момента
- Обеспечение задаваемой скорости вращения
- Обеспечение высокой точности перемещения выходного звена (позиционный электропривод)
- Возможность ручного управления при помощи дублера в случае аварийной ситуации
- Возможность приема передачи команд как с местного поста управления встроенного привода так дистанционно с пульта управления оператора
- Вывод необходимых параметров и результатов переходных процессов на индикационную панель блока электропривода и на пульт оператора

Необходимо отметить, что функции, которые выполняет электропривод запорной арматуры, являются типичными для данного технологического процесса, но могут не являться таковыми для других. Ниже приведены данные выполняемые операции:

- Автоматическое точное отключение в конечных положениях. После того, как оператор либо с местного, либо с дистанционного поста управления подает сигнал на открытие или закрытие, привод начинает движение запорного органа до определенного момента. Существуют конечные положения, в которых запускается механизм отключения. Применяется несколько способов реализации. Первый из них заключается в том, что система отключает привод, как только запорный орган достигнет заданной точки. Второй же заключается в считывании момента на валу, и система принимает решение остановить привод при определенном превышении данного параметра. На практике широкое распространение получил второй способ, так как он позволяет уплотнить арматуру, обеспечив требуемую герметичность.

- Функции защиты. Отключение по моменту используется не только для остановки в конечном положении, но также и для защиты от перегрузок на всем пути и от чрезмерного момента. Если на закрывающий элемент в промежуточном положении действует высокий крутящий момент, например, из-за заземленного предмета, выключение сработает при достижении максимального отключающего момента.

- Датчики температуры необходимы для защиты двигателя от перегрева, а также для отслеживания увеличения тока двигателя. Термовыключатели или термисторы с положительным температурным коэффициентом довольно надежно выполняют эту задачу. Они срабатывают при превышении предела температуры, и система управления выключает двигатель.

- Регулирование процессов. Электроприводы оснащены полноценными регуляторами (ПИД-регуляторы). Особенно это важно для удаленных установок, привод может взять на себя задачи программируемого логического контроллера и регулировать процессы самостоятельно. В таком случае нет необходимости дополнительно устанавливать ПЛК.

1.2 Выбор электропривода

Применительно к регулирующей арматуре, нашли широкое применение такие привода, которые обладают рядом достоинств: малые габариты, возможность создания требуемого крутящего момента и поддержание его постоянства во время движения, возможность дистанционного управления и простоту.

Несколько десятков лет назад для таких целей использовались двигатели постоянного тока независимого возбуждения. Они имеют подходящие характеристики, но имеют существенный недостаток, из-за которого в современном мире выходят из круга внимания. Щеточно-коллекторный узел часто приходит в негодность, на нем теряется много энергии, а также он является источником искрения. Взамен таким электроприводам пришли привода, на основе переменного тока.

Практически в любой отрасли применяется асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Характеристики у него явно хуже: небольшой момент, затягивание задвижки и возможная просадка напряжения сети при неправильно подобранной мощности, а также введение реактивной составляющей в сеть при его использовании делают его не лучше вышеописанного ДПТ НВ. Но он очень прост в использовании, поэтому его применяют практически везде.

В последнее время все больше находят применение синхронные электропривода с постоянными магнитами. Такие двигатели лишены обмотки в роторе, что позволяет снизить массу и убрать электрические потери в ней. Также они обладают постоянством скорости при набросе нагрузки. Синхронный двигатель имеет преимущество по реактивной мощности, при $\cos(\varphi) = 1$ он питается только активным током, также он может выступать в качестве компенсатора реактивной энергии.

Ротор представляет собой постоянный магнит, полюса которого притягиваются вращающимся полем статора, вследствие чего создается крутящий момент. Благодаря этому в таких двигателях отсутствует скольжение.

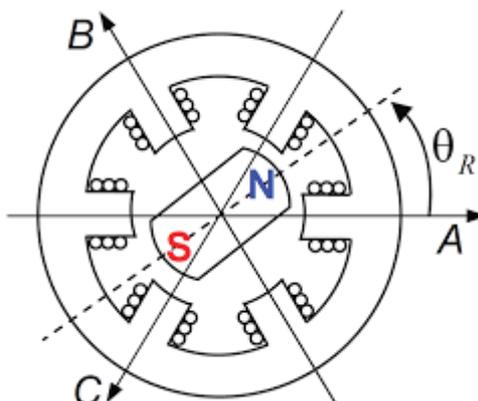


Рис. 2. Принцип работы синхронного двигателя с постоянными магнитами

Для текущих исследований был выбран синхронный электродвигатель Калужского электромеханического завода ДСМ-0,75-1000-1-Д-У2. Технические характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики

Наименование показателя	Значение
Марка	ДСМ-0,75-1000-1-Д-У2 220В
Полезная мощность, кВт	0,75
Номинальная частота вращения, об/мин	1000
Номинальный вращающий момент, Нм	7,2
Амплитудное/действующее напряжение, В	311/220
Амплитудный/действующий ток, А	3,96/2,8
Частота питающей сети, Гц	133,33
Число фаз	3
Соединение фаз	Y – «Звезда»
Число пар полюсов	8

КПД, %	80%
Коэффициент мощности $\cos(\varphi)$	0,99
Крепление	IM3681
Степень защиты	IC40
Сопротивление обмотки статора, Ом	1,4
Потокосцепление от постоянных магнитов, мВс	182,916
Индуктивность обмотки статора в оси d, мГн	3,768
Индуктивность обмотки статора в оси q, мГн	6,287
Момент инерции ротора, кг/м ²	$0,951 \cdot 10^{-3}$

1.3 Выбор редуктора

Редукторы являются необходимой частью, чтобы передавать нужное усилие.

Различают несколько видов и типов, которые отличаются как способом передачи крутящего момента, так и конструктивными особенностями. Можно выделить несколько типов редукторов:

- Цилиндрический редуктор. Он отличается небольшими размерами и энергоэффективностью. Это оборудование используется в самых разных промышленных целях, но в основном применяется для выполнения тяжелых задач. Цилиндрический редуктор широко распространен в производстве пластмасс, цемента, резины и других отраслях тяжелой промышленности. Маломощные приложения, такие как дробилки, экструдеры, охладители и конвейеры, могут извлечь выгоду из этого материала.

- Цилиндрический редуктор необычен тем, что он установлен под углом, что позволяет большему количеству зубьев взаимодействовать в одном направлении во время движения. Это обеспечивает непрерывную связь в течение определенного времени.

- Конический редуктор. Этот вид редуктора отличается наличием ряда изогнутых зубьев, расположенных на конусообразной поверхности вблизи обода устройства. Конический редуктор используется для создания вращательного движения между непараллельными валами. Обычно применяется в карьерах, горнодобывающей промышленности и на конвейерах.

- Червячные редукторы. Червячные редукторы приводят в движение тяжелые задачи. Эти редукторы используются в тех случаях, когда необходимо снизить скорость между непересекающимися осевыми валами. В этом типе промышленных редукторов используется червячное колесо большого диаметра. Червяк или винт соединяется с зубьями на внешней стороне редуктора. Благодаря винтообразному движению, вызванному вращением червяка, колесо движется аналогичным образом. Большинство таких редукторов используется в тяжелой промышленности, например, в производстве удобрений, химикатов и минералов.

- Планетарный редуктор. Три или четыре планетарные шестерни окружают солнечную шестерню в центре планетарного редуктора. Все они удерживаются вместе кольцевой шестерней с внутренними зубьями. Такая конструкция позволяет планетарной системе передач создавать высокий крутящий момент на небольшой площади за счет равномерного распределения мощности между шестернями. Этот тип редуктора преобладает в передовых технологиях, таких как роботы и 3D-печать.

- Планетарный редуктор идеально подходит для точных приложений благодаря своей долговечности, точности и особой функциональности. Этот тип редуктора повышает долговечность и производительность вашего оборудования. Планетарные редукторы выпускаются в сплошном или полом исполнении и с различными вариантами крепления, такими как фланец, вал или лапа.

- Волновой редуктор. Это тип механической системы передачи, в которой используется гибкий шлиц с внешними зубьями, который

деформируется вращающимся эллиптическим плунжером для зацепления с внутренними зубьями внешнего шлица.

Волновой редуктор имеет ряд преимуществ перед традиционными, такими как косозубые или планетарные передачи, в том числе:

- отсутствие люфта
- компактность и малый вес
- высокие передаточные числа
- возможность изменения передаточных чисел в стандартном корпусе
- хорошее разрешение и отличная повторяемость
- высокий крутящий момент
- соосность входного и выходного вала

Высокие передаточные числа возможны при небольшом объеме (соотношение от 30:1 до 320:1 возможно в том же пространстве, в котором планетарные редукторы обычно дают только соотношение 10:1).

К недостаткам относится склонность к "закручиванию" (кручение пружины) в области низкого крутящего момента.

Волновой редуктор широко используется в робототехнике и аэрокосмической промышленности. Она может обеспечивать понижение передачи, но также может использоваться для увеличения скорости вращения или для дифференциальной передачи.

Для данной задачи выбираем волновой редуктор с промежуточными телами качения.

1.4 Выбор системы управления

Рассмотренный выше принцип действия синхронного двигателя с постоянными магнитами является не очень эффективным, так как приходится «тянуть» ротор за полем статора. Способов управления таким двигателем существует целое множество (скалярное, векторное, с различными контурами и

т.д.). Необходимо выбирать из тех соображений, какая именно задача поставлена.

Большинство электроприводов реализуются без какой-либо системы управления, обычным пуском, так как не ставятся требования по регулированию. Но в сферах, где необходимо четкое позиционирование или соблюдение усилия, заданной скорости и многих других параметров, чаще всего используют систему с обратными связями. Они же в свою очередь помогают понять конкретное состояние электропривода.

Самым эффективным способом управления является векторное, ориентированное по вектору потокосцепления ротора. Принцип состоит в том, чтобы электромагнитное поле статора уже не влекло за собой поле магнитов, чтобы заставить вращаться вал, а толкало его. Из курса физики известно, что если ток, протекающий по проводнику, и силовые линии магнитного поля перпендикулярны, то на проводник будет действовать максимальная сила Ампера, и проводник оттолкнется. Так как обмотка статора жестко закреплена, то толкаться и вследствие этого вращаться будет ротор. Для этого необходимо знать положение вала, чтобы определить, как направлены силовые линии магнитного поля ротора. Тогда на статоре можно создавать такой вектор тока, который будет перпендикулярен им. В качестве датчика положения используется синусно-косинусный датчик, показывающий положение электрического угла между двумя соседними полюсами.

1.5 Представление электрической машины в подвижной системе координат dq , ориентированной по вектору магнитного потока ротора.

Для нашего понимания привычна трехфазная система, где сигнал меняется гармонически. При рассмотрении такой системы вводят абстрактный вектор, вращающийся относительно неподвижных осей.

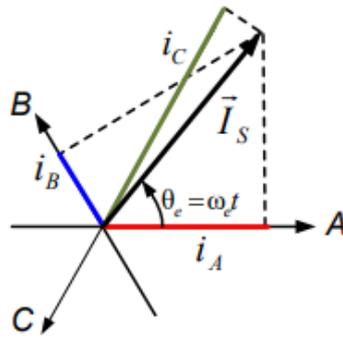


Рис. 3. Ток электродвигателя в осях abc

Как видно из рисунка, токи в фазах являются проекциями данного вращающегося вектора на оси, расположенные друг относительно друга в 120 градусов. В симметричной системе сумма проекций должна равняться нулю. Для простого человека, привыкшего к сети переменного тока, такой вид представления является оптимальным, так как сразу можно увидеть, что сигнал синусоидален с определенной амплитудой и частотой. Но для системы управления, которая только успела обработать одно значение сигнала, приходится тут же работать с абсолютно другим. Причем это происходит с частотой в несколько раз больше частоты входного сигнала. Чтобы абстрагироваться от такого рода проблем, изобрели преобразования, с помощью которых можно упростить систему. Будем рассматривать постепенный переход от данной схемы к подвижной.

Если принять ось α , совпадающую с осью A, и ось β , ей перпендикулярную, то получится неподвижная система координат $\alpha\beta$.

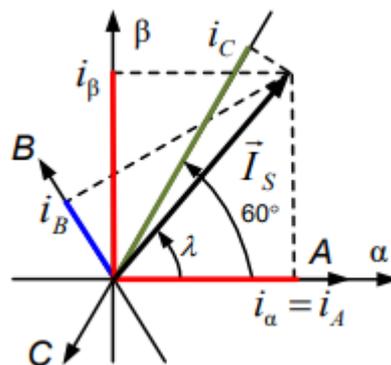


Рис. 4. Ток электродвигателя в неподвижной системе координат $\alpha\beta$

От описанных выше проблем она нас не спасает, но снижает количество уравнений, которые необходимо решать, и, как следствие, получается два регулятора, вместо трех по каждой фазе. Можно представить данную систему координат, как неподвижную, закрепленную на статоре. Формулы, по которым происходят преобразования, представлены ниже:

$$\begin{cases} i_\alpha = i_A \\ i_\beta = \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_A = i_\alpha \\ i_B = -\frac{1}{2}i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta \\ i_C = -\frac{1}{2}i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta \end{cases}$$

То гениальное, что придумало человечество - это вращать систему координат. Ниже приведена картинка и формулы преобразования из неподвижной системы координат $\alpha\beta$ во вращающуюся XY .

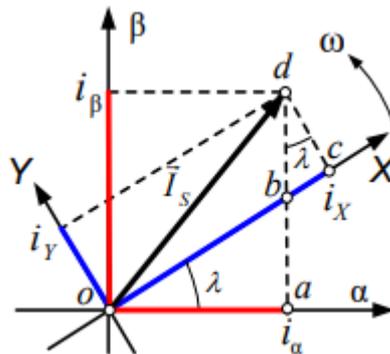


Рис. 5. Ток электродвигателя во вращающейся системе координат XY

$$\begin{cases} i_X = i_\alpha \cos(\lambda) + i_\beta \sin(\lambda) \\ i_Y = -i_\alpha \sin(\lambda) + i_\beta \cos(\lambda) \end{cases}$$

Такое преобразование может показаться странным или ненужным, но его смысл будет пояснен ниже, после того, как будет совершен переход к вращающейся системе координат dq , ориентированной по вектору магнитного потока ротора.

Преобразование ABC=>dq вытекает из вышеописанных преобразований, для этого они и описывались.

$$\begin{cases} i_d = \left(\frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}}\right) \sin(\lambda) + i_A \cos(\lambda) \\ i_q = \left(\frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}}\right) \cos(\lambda) - i_A \sin(\lambda) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_A = i_d \cos(\lambda) - i_q \sin(\lambda) \\ i_B = \frac{\sqrt{3}}{2} (i_q \cos(\lambda) + i_d \sin(\lambda)) - \frac{1}{2} i_A \\ i_C = -\frac{\sqrt{3}}{2} (i_q \cos(\lambda) + i_d \sin(\lambda)) - \frac{1}{2} i_A \end{cases}$$

Опишем смысл таких манипуляций. Раньше приходилось в прямом смысле следить за системой, чтобы регулировать ее. Теперь можно представить, что система координат жестко зафиксирована с ротором. Если вращается вектор тока, то с такой же скоростью вращается наша система координат, следовательно вектор тока для нее неподвижен. Мы исключаем гармоническую составляющую, что гораздо упрощает процесс регулирования. При этом амплитуда и фаза управляемого вектора определяются двумя скалярными величинами его проекций на оси координат вращающейся системы. Для управления строят векторный регулятор на основе двух скалярных регуляторов его проекций.

2. РАСЧЕТ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

2.1 Математическое описание синхронного двигателя в постоянными магнитами

2.1.1 Особенности синхронного двигателя с постоянными магнитами

Статор СДПМ выполняется из шихтованной электротехнической стали с тремя обмотками, которые сдвинуты на 120 градусов, также как и у статора асинхронного двигателя. К обмоткам статора подключается трехфазное синусоидальное напряжение сети или преобразователя переменного тока. Схема включения обмоток синхронного двигателя представлена на рисунке 6 [2].

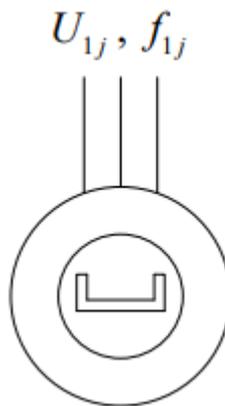


Рис. 6. Условное графическое обозначение синхронного трехфазного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов

Синхронным двигателям с постоянными магнитами характерен большой воздушный зазор, а также низкая степень насыщения. Поэтому нелинейность магнитной цепи не учитывается.

В модель двигателя без учета магнитной цепи вводятся некоторые допущения:

1. Потери в стали отсутствуют;
2. У магнито-мягкого материала магнитопровода бесконечная магнитная проницаемость;
3. Запасенная магнитная энергия, которая используется для описания электрической машины, рассматривается как энергия статического магнитного поля;

Магнитная проницаемость воздушного зазора представляется в виде произведения магнитной проницаемости статора и ротора [2].

2.1.2. Векторная диаграмма и структурная схема синхронного двигателя с постоянными магнитами

На рисунке 7 представлена векторная диаграмма, поясняющая процессы, которые происходят в двигателе [2].

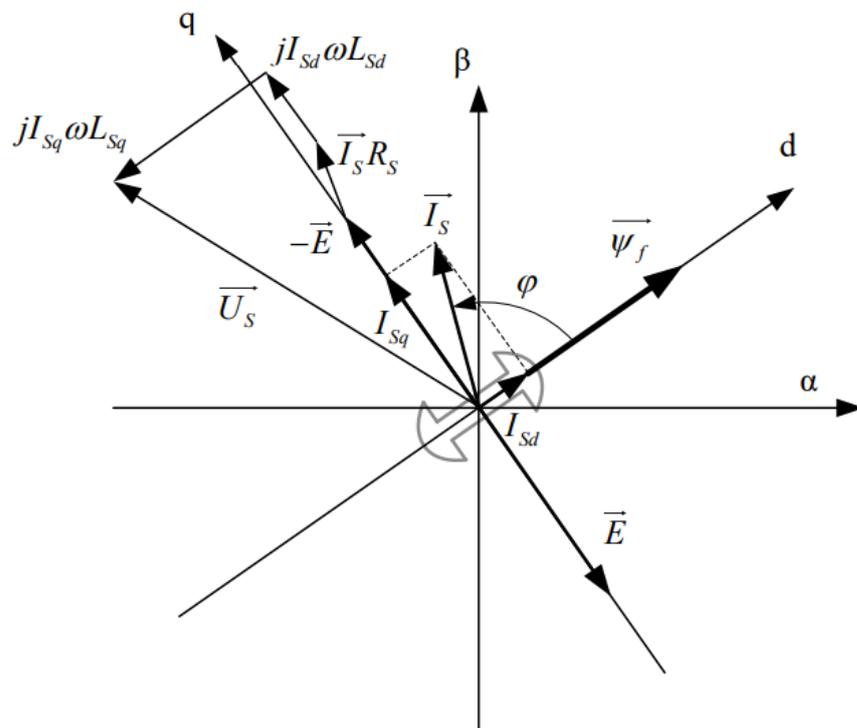


Рис. 7. Векторная диаграмма СДПМ

Ротор двигателя создает потокосцепление Ψ_f , равное произведению числу витков обмотки статора на поток ротора. Вектор этого потокосцепления направлен по оси ротора d от положительного полюса к отрицательному и отстает от вектора тока на угол скручивания φ .

Постоянный поток вращающегося ротора создает в обмотках статора вектор ЭДС, который направлен под прямым углом к потоку. Амплитуду этого вектора можно определить через следующее выражение:

$$E = \psi_f \omega$$

где ω – электрическая скорость вращения, определяющаяся по формуле:

$$\omega = Z_p \omega_R$$

где ω_R – скорость вращения ротора, рад/с;

Z_p – число пар полюсов двигателя.

Из рисунка 3 можно записать следующее векторное соотношение:

$$\vec{U}_S = -\vec{E} + \vec{I}_S R_S + j\omega(\vec{I}_{Sd} L_{Sd} + \vec{I}_{Sq} L_{Sq})$$

Где \vec{U}_S – вектор напряжения статора, В

\vec{I}_S – вектор тока статора, А

\vec{I}_{Sd} и \vec{I}_{Sq} – составляющие вектора тока на оси dq, А

L_{Sd} и L_{Sq} – индуктивность статора по осям dq, мГн

R_S – сопротивление обмотки статора, Ом

Статорное напряжение уравновешивается ЭДС и падением напряжения на активном и реактивном сопротивлениях статорной обмотки.

Момент двигателя создается взаимодействием тока и потокосцепления статора. Учитывая фазность и число пар полюсов, он равен произведению этих векторов.

Для трехфазного двигателя справедливо следующее выражение:

$$M = \frac{3}{2} Z_p \vec{I}_S \times \vec{\psi}_S$$

В проекции на оси dq получаем:

$$M = \frac{3}{2} Z_p (I_{sd} \psi_d - I_{sq} \psi_q)$$

где ψ_d и ψ_q – потокосцепление статора по осям dq, Вб.

Данные потокосцепления выражаются по следующим формулам:

$$\psi_d = L_{sd} I_{sd} + \psi_f$$

$$\psi_q = L_{sq} I_{sq}$$

С учетом этих выражений перепишем уравнение для момента в следующем виде:

$$M = \frac{3}{2} Z_p (I_{sq} \psi_f + I_{sd} I_{sq} (L_{sd} - L_{sq}))$$

Пренебрегая магнитными потерями, уравнения равновесия статора синхронного двигателя во вращающейся системе координат dq имеет следующий вид:

$$\begin{cases} U_{sd} = L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} + R_s I_{sd} - \omega L_{sq} I_{sq} \\ U_{sq} = L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} + R_s I_{sq} + \omega L_{sd} I_{sd} + \omega \psi_f \end{cases}$$

Выражая из системы ток, получаем:

$$\begin{cases} \frac{dI_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_{sd}} (U_{sd} + \omega L_{sq} I_{sq} - R_s I_{sd}) \\ \frac{dI_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_{sq}} (U_{sq} - \omega L_{sd} I_{sd} - R_s I_{sq} - \omega \psi_f) \end{cases}$$

Условие механического равновесия описывается выражением:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c$$

На основе полученных уравнений можно построить структурную схему синхронного двигателя с постоянными магнитами (рисунок 8).

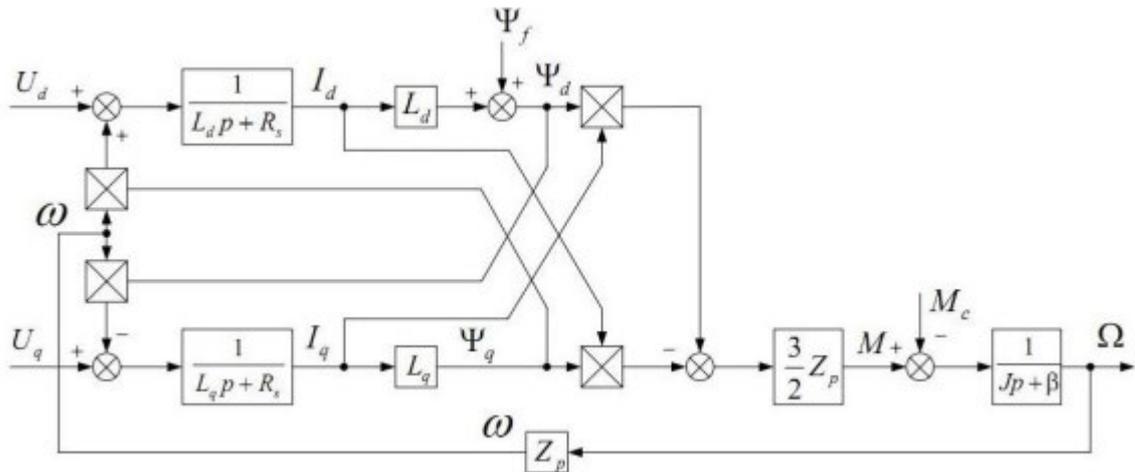


Рис. 8. Структурная схема СДПМ во вращающейся системе координат dq

2.2 Параметры силовой части электропривода

Между током и моментом двигателя есть коэффициент, связывающий эти величины:

$$c = \frac{M_H}{I_H} = \frac{7,2}{2,8} = 2,57$$

Для двигателя задан максимальный амплитудный ток $I_{max} = 12$ А. С помощью коэффициента полученного выше можно найти максимальный момент входного звена:

$$M_{max} = c I_{max} = 2,57 \cdot \frac{12}{\sqrt{2}} = 21,8$$

Зная значение максимального и номинального момента, найдем значение перегрузочной способности:

$$K_m = \frac{M_{max}}{M_H} = \frac{21,8}{7,2} = 3,02$$

Для синхронного двигателя с постоянными магнитами справедливо соотношение:

$$\frac{I_{max}}{I_H} = \frac{P_{max}}{P_H}$$

Исходя из этого, определим максимальную мощность двигателя:

$$P_{max} = \frac{P_H I_{max}}{I_H} = \frac{750 \cdot 12}{2,8 \cdot \sqrt{2}} = 2272 \text{ Вт}$$

2.3. Настройка регулятора контура тока

Структурная схема контура тока приведена на рисунке 9. Контур I_d , I_q отличаются друг от друга индуктивностью. Оптимизацию проведем на примере контура I_q .

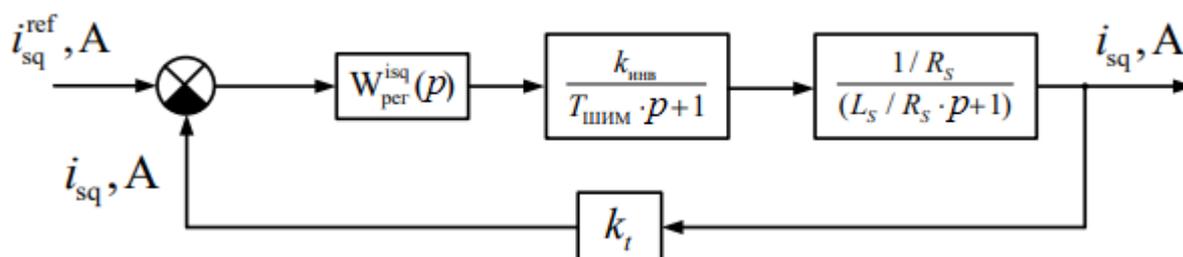


Рис. 9. Структурная схема контура тока

Оптимизация проводится без учёта влияния обратной связи по ЭДС двигателя и влияния изменения угла между вектором потока от постоянных магнитов и вектором напряжений.

Учитывая, что динамические свойства датчика тока определяются пропорциональным звеном, запишем передаточную функцию объекта управления:

$$W_{оуq}(p) = \frac{k_{инв} \cdot 1/R_s \cdot k_t}{(T_{ШИМ}p + 1)(T_{эq}p + 1)}$$

где $k_{инв}$ – коэффициент усиления инвертора, при питающем напряжении стороны постоянного тока, равный $U_{dc}/2 = 311/2 = 155,5$

k_t – коэффициент обратной связи по току, принимаем равным 1

$T_{ШИМ}$ – постоянная времени инвертора, при частоте ШИМ 5кГц:

$$T_{ШИМ} = \frac{1}{5000} = 0,0002 \text{ сек}$$

$T_{эq}$ – электромагнитная постоянная времени по оси q.

Настройка регулятора будет производиться на модульный оптимум. Желаемая передаточная функция разомкнутого контура, настроенного на модульный оптимум:

$$W_{\text{мо}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)}$$

Выразим передаточную функцию регулятора из правила последовательного соединения блоков:

$$W_{\text{мо}}(p) = W_{\text{регq}}(p) \cdot W_{\text{оу}}(p)$$

$$W_{\text{регq}}(p) = W_{\text{мо}}(p) \cdot \frac{1}{W_{\text{оу}}(p)} = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} \cdot \frac{(T_{\text{ШИМ}}p + 1)(T_{\text{эq}}p + 1)}{k_{\text{ИНВ}} \cdot 1/R_s \cdot k_t}$$

Выбираем T_{μ} таким, чтобы была компенсация большей постоянной времени. Рассчитаем $T_{\text{эq}}$ для выбора малой некомпенсируемой постоянной времени.

$$T_{\text{эq}} = \frac{L_q}{R_s} = \frac{6,287 \cdot 10^{-3}}{1,4} = 0,0045 \text{ сек}$$

Принимаем $T_{\mu} = T_{\text{ШИМ}}$, тогда электромагнитная постоянная времени подлежит компенсации:

$$W_{\text{регq}}(p) = \frac{R_s T_{\text{эq}}}{2T_{\text{ШИМ}}k_{\text{ИНВ}}k_t} \cdot \frac{(T_{\text{эq}}p + 1)}{T_{\text{эq}}p}$$

Получаем ПИ-регулятор со следующими параметрами:

$$K_{pq} = \frac{R_s T_{\text{эq}}}{2T_{\text{ШИМ}}k_{\text{ИНВ}}k_t} = \frac{1,4 \cdot 0,0045}{2 \cdot 0,0002 \cdot 155,5 \cdot 1} = 0,101$$

$$T_{iq} = T_{\text{эq}}$$

Посчитаем также для d составляющей:

$$K_{pd} = \frac{R_s T_{\text{эд}}}{2T_{\text{ШИМ}}k_{\text{ИНВ}}k_t} = \frac{1,4 \cdot \frac{3,768 \cdot 10^{-3}}{1,4}}{2 \cdot 0,0002 \cdot 155,5 \cdot 1} = 0,06$$

$$T_{id} = T_{\text{эд}}$$

2.4. Настройка регулятора контура скорости

Структурная схема контура скорости приведена на рисунке 10.

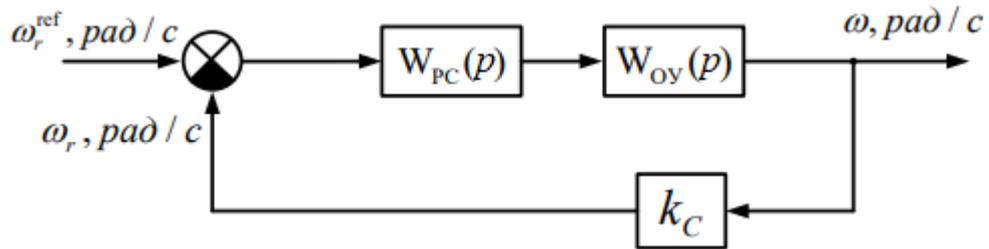


Рис. 10. Структурная схема контура скорости

Контур скорости строится над контуром тока q , так как именно он является моментобразующим. Запишем передаточную функцию объекта управления:

$$W_{oy}(p) = W_{кт}(p) \cdot \psi_f \cdot \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \frac{1}{Jp} \cdot k_c$$

где $W_{кт}(p)$ – передаточная функция замкнутого контура тока

k_c – коэффициент обратной связи по скорости, принимаем равным единице

Распишем передаточную функцию контура тока:

$$W_{кт}(p) = \frac{1}{2T_{шим}p(T_{шим}p + 1) + 1} = \frac{1}{2T_{шим}^2p^2 + 2T_{шим}p + 1}$$

Так как $2T_{шим}^2p^2 \approx 0$, то можно принять:

$$W_{кт}(p) = \frac{1}{2T_{шим}p + 1}$$

$$W_{oy}(p) = \frac{\frac{3}{2}Z_p\psi_fk_c}{Jp(2T_{шим}p + 1)}$$

Настройка регулятора будет производиться на симметричный оптимум

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура, настроенного на симметричный оптимум:

$$W_{co}(p) = \frac{4T_{\mu}p + 1}{8T_{\mu}^2 p^2 (T_{\mu}p + 1)}$$

Выразим передаточную функцию регулятора из правила последовательного соединения блоков:

$$W_{co}(p) = W_{pc}(p) \cdot W_{oy}(p)$$

$$W_{pc}(p) = W_{co}(p) \cdot \frac{1}{W_{oy}(p)} = \frac{4T_{\mu}p + 1}{8T_{\mu}^2 p^2 (T_{\mu}p + 1)} \cdot \frac{Jp(2T_{\text{ШИМ}}p + 1)}{\frac{3}{2}Z_p\psi_f k_c}$$

Принимаем $T_{\mu} = 2T_{\text{ШИМ}}$, тогда:

$$W_{pc}(p) = \frac{J}{\frac{3}{2}Z_p\psi_f k_c \cdot 4T_{\text{ШИМ}}} \cdot \frac{(8T_{\text{ШИМ}}p + 1)}{8T_{\text{ШИМ}}p}$$

Получаем ПИ-регулятор со следующими параметрами:

$$K_p = \frac{J}{\frac{3}{2}Z_p\psi_f k_c \cdot 4T_{\text{ШИМ}}} = \frac{0,912 \cdot 10^{-3}}{\frac{3}{2} \cdot 8 \cdot 0,189 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 0,0002} = 0,5026$$

$$T_i = 8T_{\text{ШИМ}}$$

2.5. Настройка регулятора контура положения

Структурная схема контура положения представлена на рисунке 11.

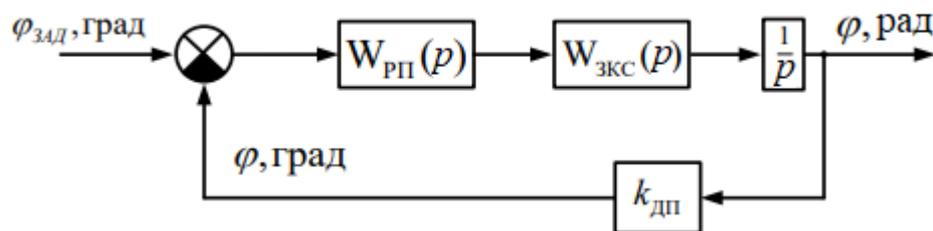


Рис. 11. Структурная схема контура положения

Коэффициент обратной связи преобразует сигнал из единиц измерения радиан в градусы. Запишем передаточную функцию объекта управления:

$$W_{oy}(p) = W_{кс}(p) \cdot \frac{1}{p} \cdot k_{дп}$$

где $k_{дп}$ – коэффициент обратной связи по положению

В соответствии с вышеизложенным принципом, передаточную функцию замкнутого контура скорости можно представить в виде:

$$W_{кc}(p) = \frac{1}{4T_{ШИМ}p + 1}$$

Настройка регулятора будет производиться на модульный оптимум. Тогда передаточная функция регулятора будет иметь следующий вид:

$$W_{рп}(p) = W_{мо}(p) \cdot \frac{1}{W_{оу}(p)} = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} \cdot \frac{(4T_{ШИМ}p + 1)p}{k_{дп}}$$

Принимаем $T_{\mu} = 4T_{ШИМ}$, тогда:

$$W_{рп}(p) = \frac{1}{4T_{ШИМ}k_{дп}}$$

Получается П-регулятор, но стоит отметить, что при такой настройке обязательно будет перерегулирование, так как сам оптимум на это рассчитан. Это означает, что запорный орган передавит и повредит конструкцию трубы или арматуры. Чтобы это нивелировать, увеличим постоянную времени контура.

$$K_p = \frac{1}{32 \cdot 4T_{ШИМ}k_{дп}} = 0,68$$

3. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

3.1 Описание модели

Для имитирования процессов работы была использована программа Matlab Simulink. Моделирование показано на рисунке 12.

Модель состоит из блока двигателя «PMSM» (Permanent Magnets Synchronous Machine), координатных преобразований, блока векторной широтно-импульсной модуляции, блока преобразователя, областей заданий соответствующих входных величин, показаний и наброса нагрузки, ПИ-регулятора тока, ПИ-регулятора скорости, блока компенсации и П-регулятора положения.

Данная имитационная модель содержит ряд допущений: нет мертвого времени переключения ключей, отсутствует широтно-импульсная модуляция, параметры питающей сети являются идеальными (мощность бесконечно большая, ток и напряжение синусоидальны). Данные допущения являются приемлемыми для такого типа расчетов.

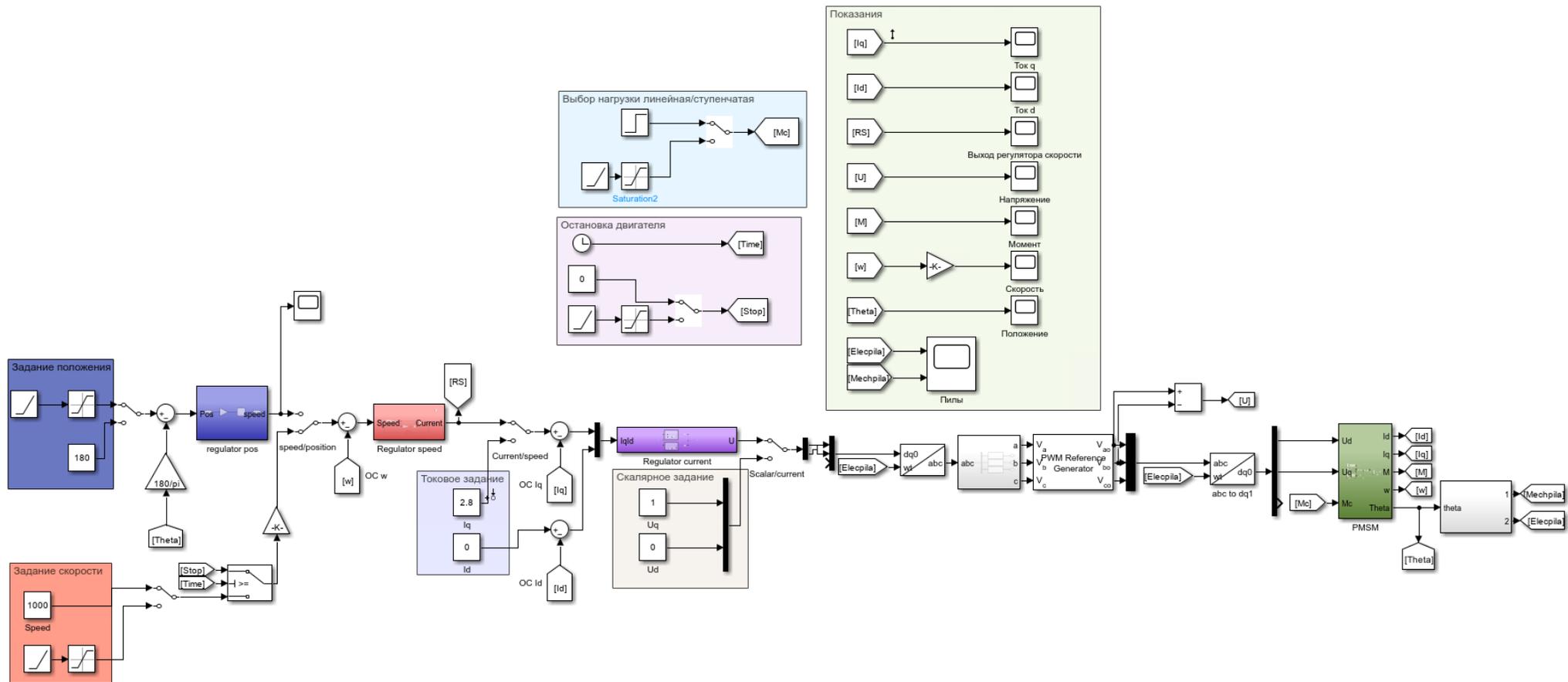


Рис. 12. Модель электропривода трубопроводной арматуры

Блок двигателя составлен по вышеизложенной системе уравнений. Внешний вид и содержимое показано на рисунках 13 и 14 соответственно.

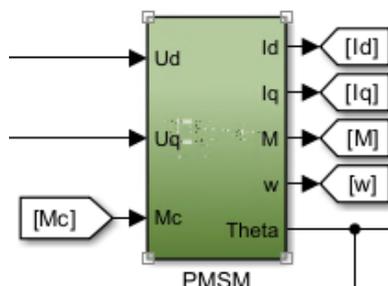


Рис. 13. Блок двигателя

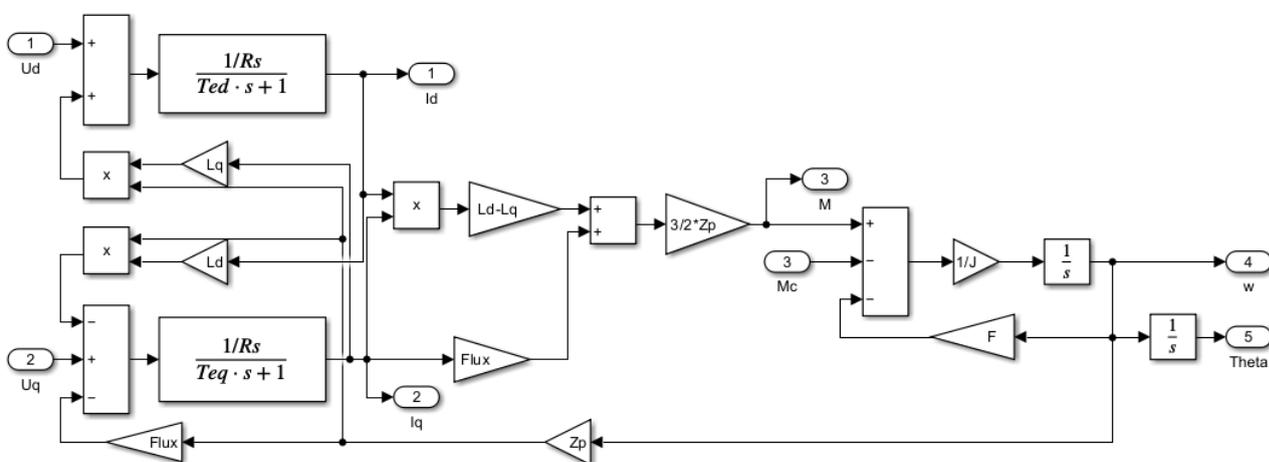


Рис. 14. Содержимое блока двигателя

Для снятия показаний, используются метки. Выходными данными с двигателя являются токи d и q , момент вращения, скорость и угол положения.

Блоки координатных преобразований необходимы для перехода из трехфазной системы к двухфазной, ориентированной по вектору потокосцепления ротора.

Блок векторной широтно-импульсной модуляции преобразует входной сигнал в векторный. Данное решение помогает полностью использовать звено постоянного тока, в отличие от синусоидальной ШИМ.

Блок преобразователя состоит из трех передаточных функций, имитирующих задержку переключения ключей и усиления входного сигнала. Содержимое представлено на рисунке 15.

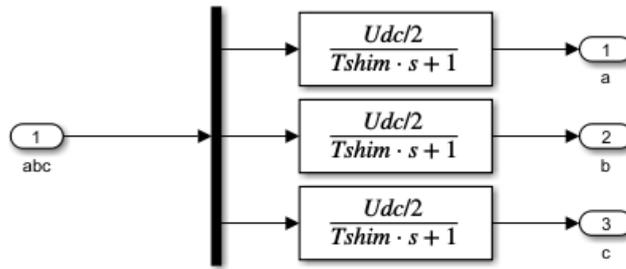


Рис. 15. Блок преобразователя

Блоки регуляторов выполнены одинаково, их содержимое покажем на основе регулятора скорости на рисунке 16.

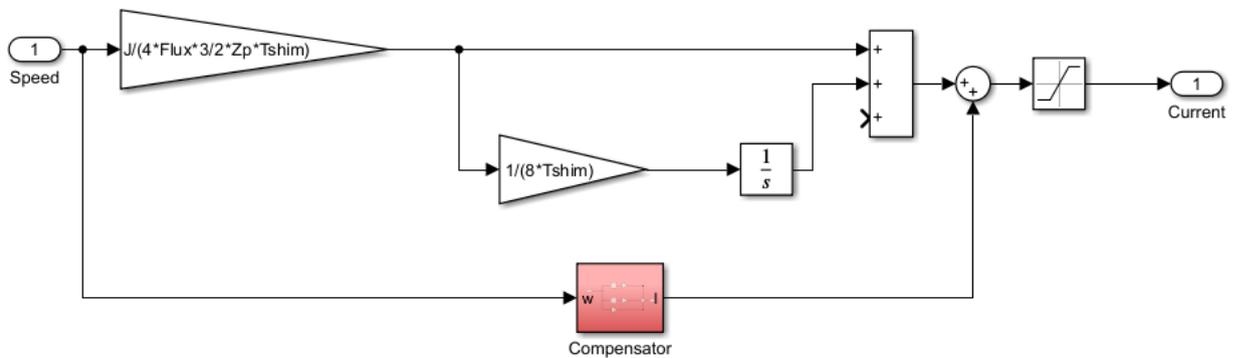


Рис. 16. ПИ-регулятор скорости

В данной работе была введена компенсация тока при набросе нагрузки, потерях на трение, инерцию [3]. Так как ток в двигателе подвергается различным операциям, а именно: делится на момент инерции, отбавляется момент нагрузки, трение – все это негативно сказывается на работе как двигателя, так и регуляторов, что мешает получить требуемые характеристики. Блок вычисляет надбавку, которую необходимо добавить в выходе регулятора скорости, чтобы нивелировать данные явления. Содержимое представлено на рисунке 17.

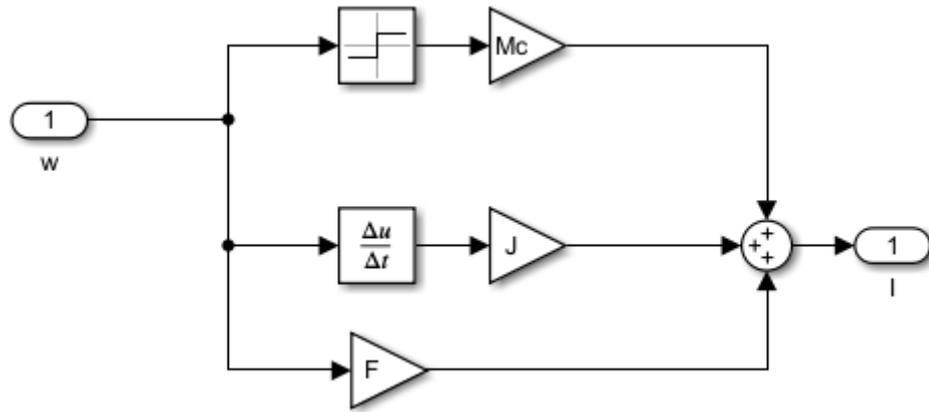


Рис. 17. Содержимое блока компенсации потерь

Нужно отметить, что для преобразователей Парка необходимо знать положение ротора. Для обеспечения корректной работы всей схемы необходимо, чтобы датчик угла поворота ротора после прохождения начальной позиции обнулялся и начинал считать заново. А так как этого не происходит, на выходе был добавлен алгоритм для обнуления датчика. График, показывающий положение электрического и механического угла представлен на рисунке 18.

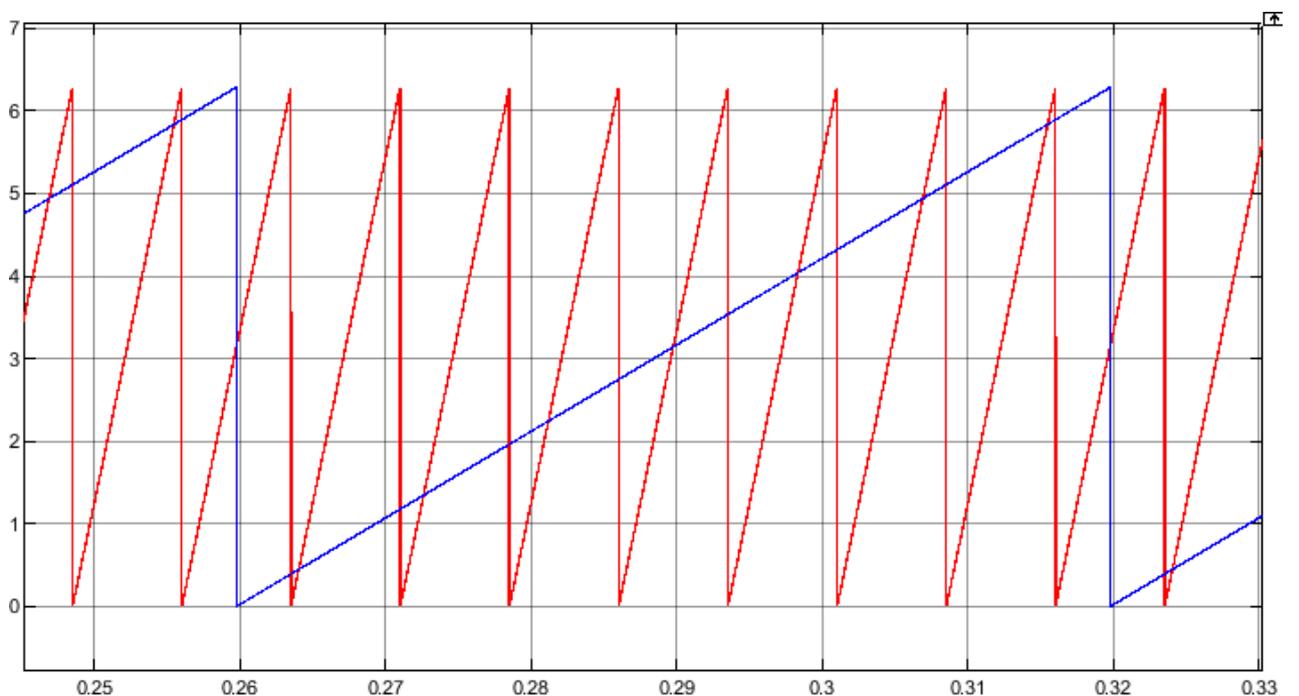


Рис. 18. Изменение углов поворота с течением времени

Из рисунка 18 видно, что на один механический поворот приходится 8 электрических, а так как число пар полюсов двигателя равно тоже 8, то можно сделать вывод, что сигнал, поступающий на преобразователи Парка верный.

3.2 Исследование основных режимов работы электропривода

Для того, чтобы перейти к рассмотрению переходного процесса контура скорости, рассмотрим адекватность работы контура тока.

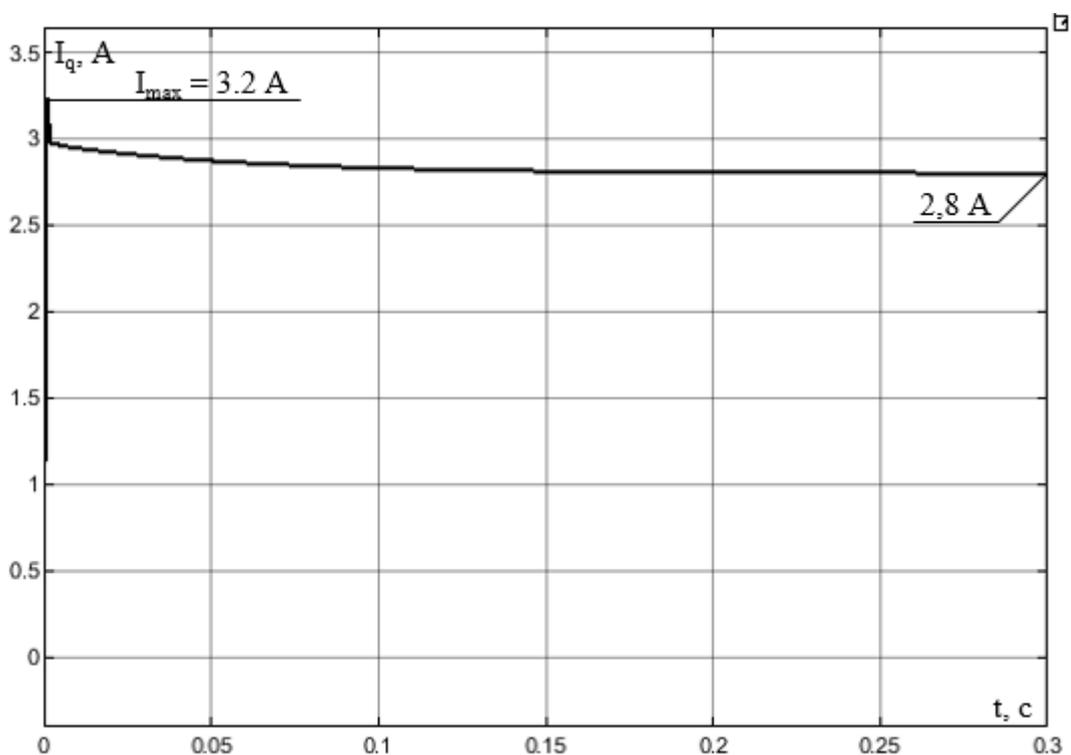


Рис. 19. Работа контура тока

Как можно заметить, ток уходит в установившееся значение 2,8 А. При пуске наблюдается небольшое перерегулирование и плавный переход в установившееся значение.

Рассмотрим переходные процессы в контуре скорости при пуске, набросе нагрузки и остановке двигателя.

Для начала оценим работу регулятора контура скорости, для этого уберем из схемы ограничитель на выходе регулятора и компенсатор потерь.

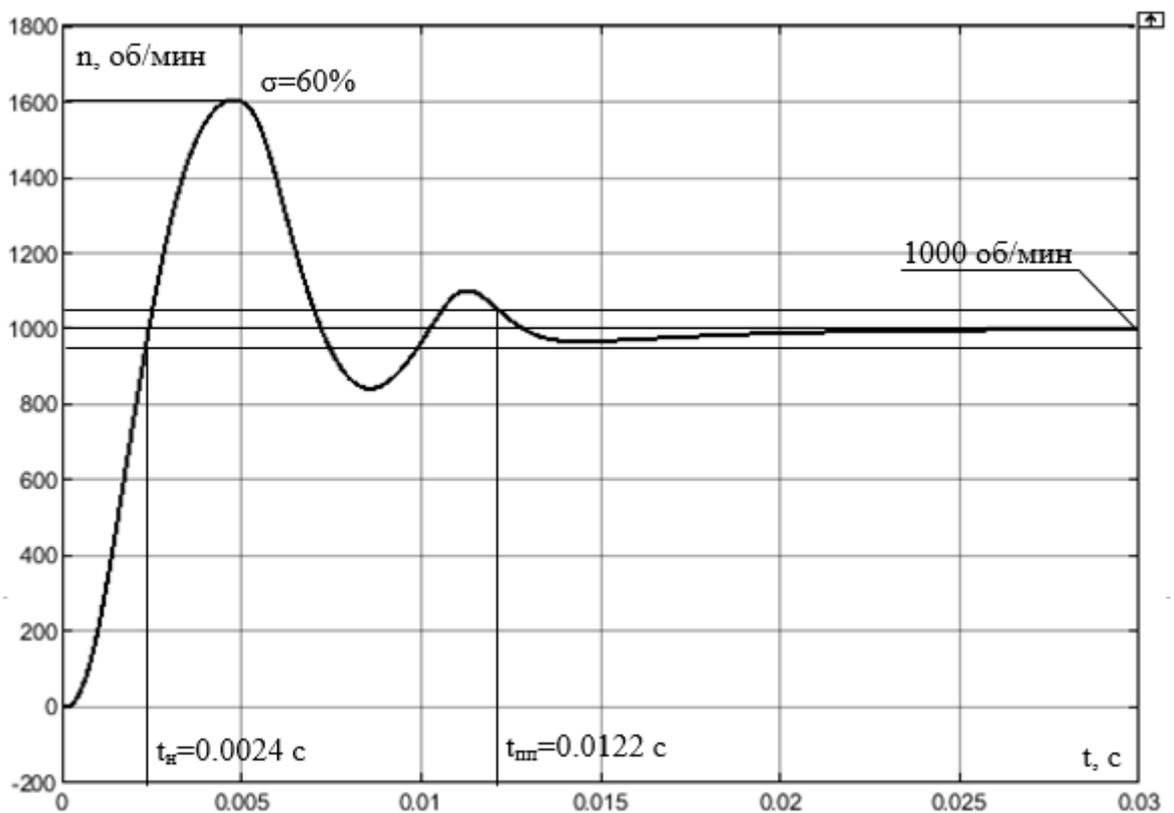


Рис. 20. Пуск двигателя в контуре скорости

Как видно из переходного процесса, скорость выходит в установившееся значение, но имеется очень большое перерегулирование, превышающее норму симметричного оптимума (40%). Так как в схеме не учтены потери на трение, инерцию, допущения контура тока, поэтому при таком расчете это допустимо. Время переходного процесса составило 0.0122 секунд. Система астатическая, работает корректно.

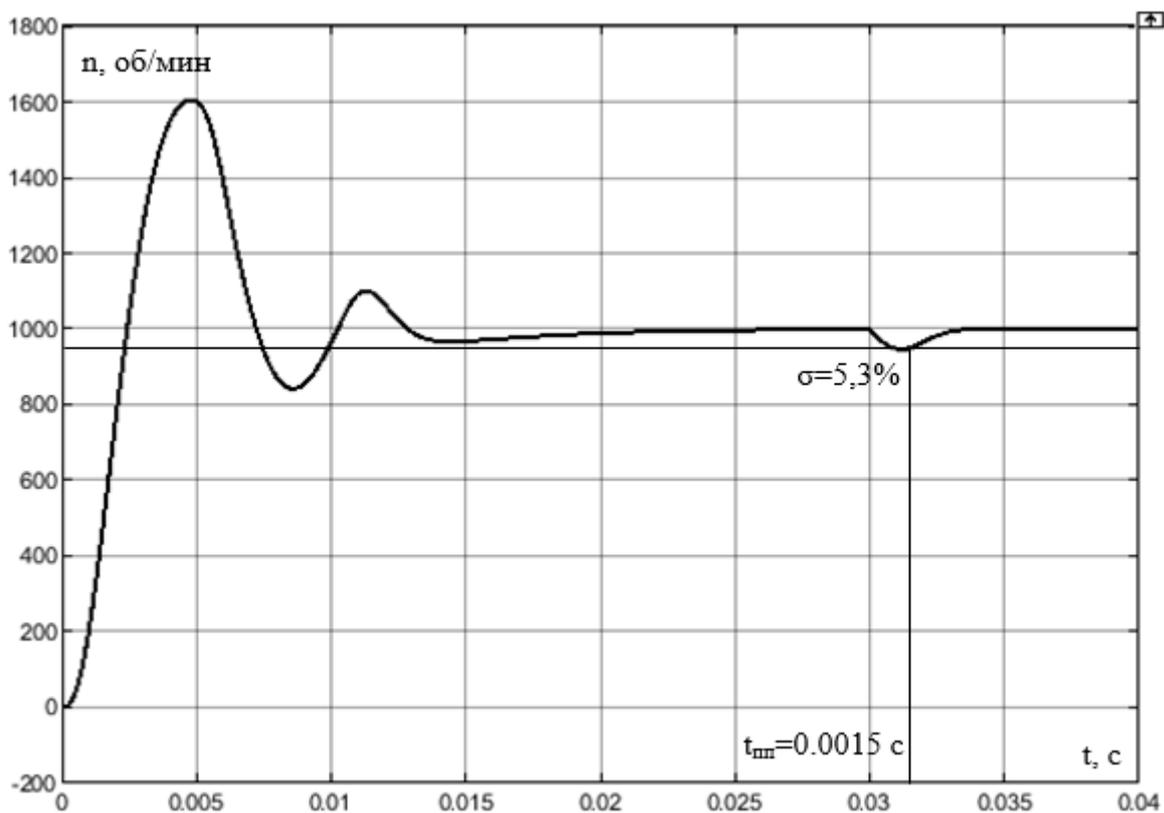


Рис. 21. Переходный процесс при набросе нагрузки

На рисунке видно, что при нагрузке двигателя в момент 0.03 секунды происходит просадка скорости до 947 об/мин. Векторное управление позволило снова поднять скорость двигателя до заданного значения. Время, за которое скорость вернулась к номинальному значению, составило 0,0015 секунды.

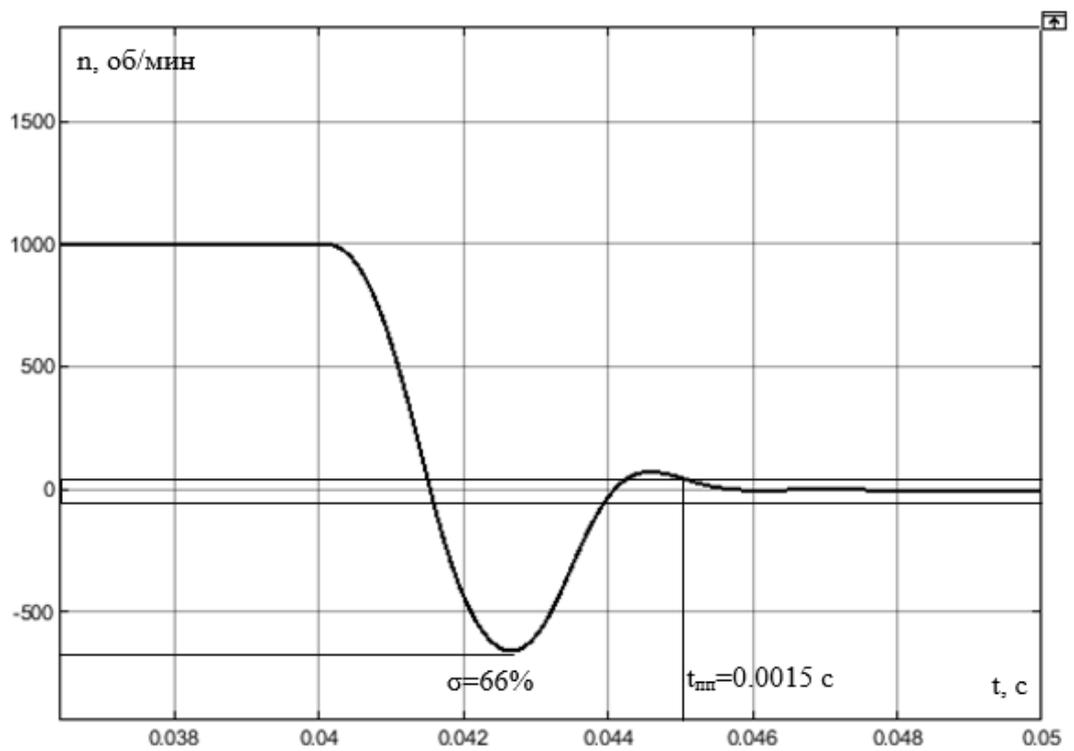


Рис. 22. Переходный процесс остановки двигателя

Остановка двигателя проходит успешно за 0,0015 секунд, перерегулирование в данном случае составило 66%.

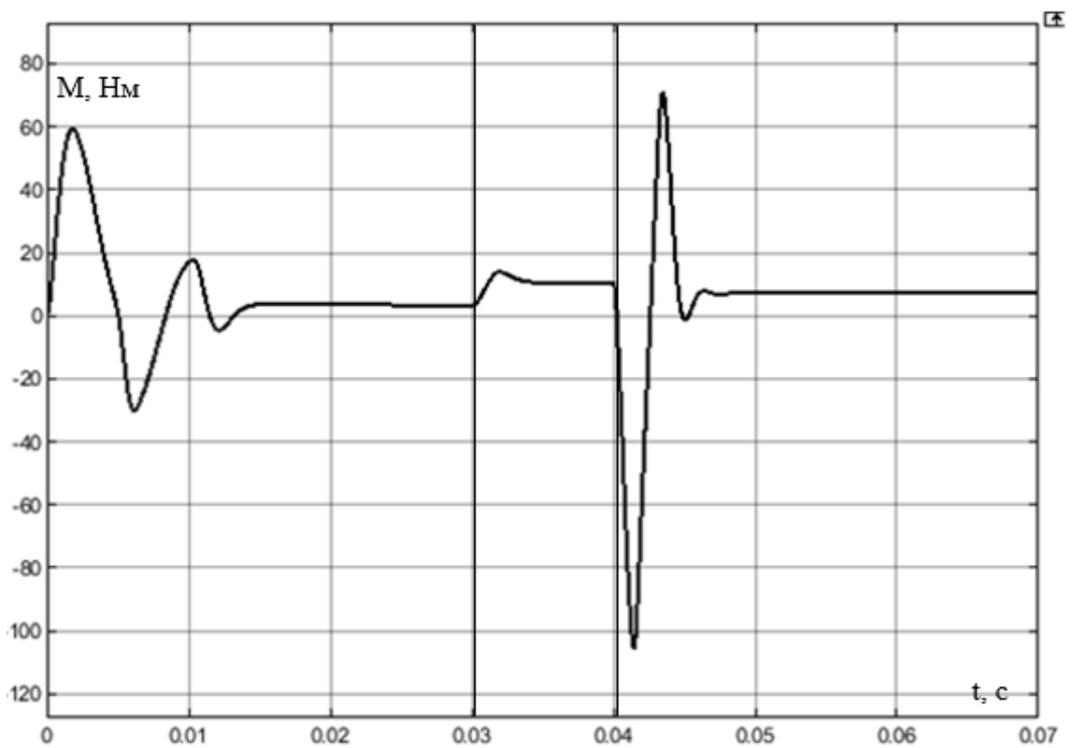


Рис. 23. График переходного процесса момента двигателя

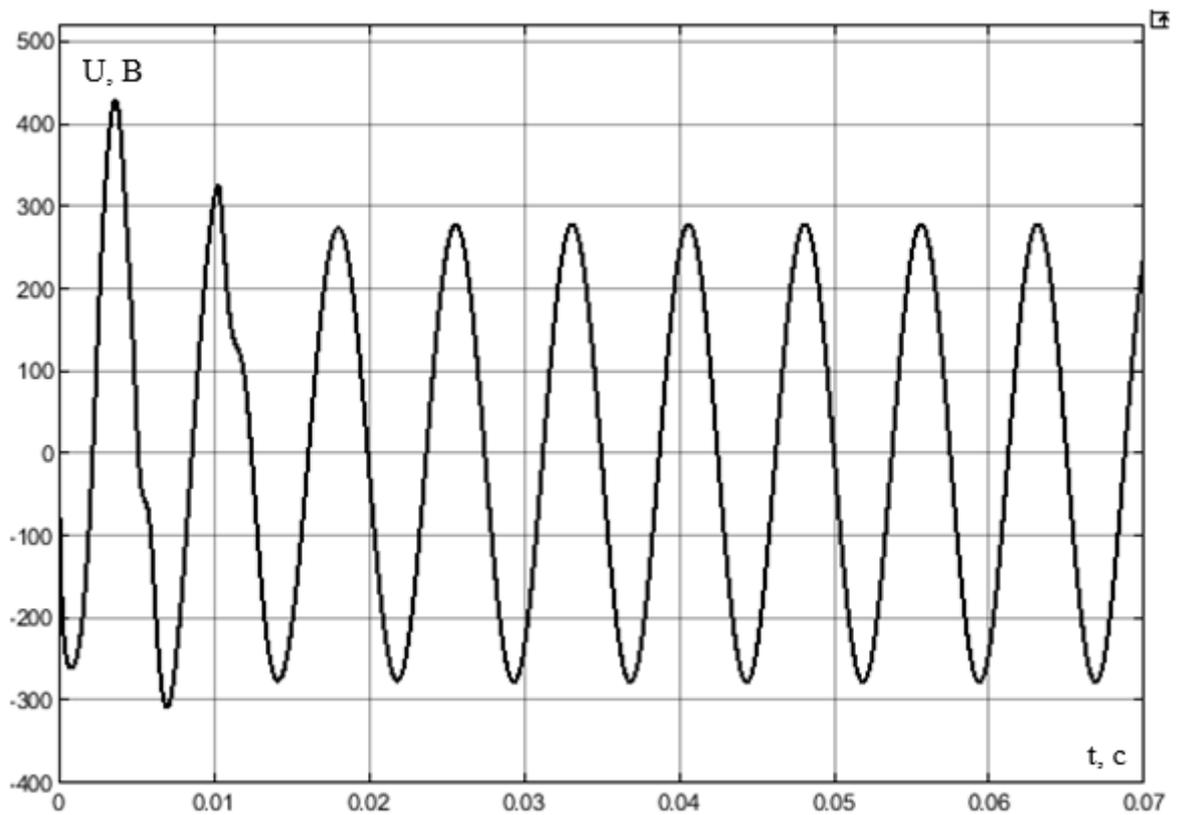


Рис. 24. Линейное напряжение фаз статора двигателя

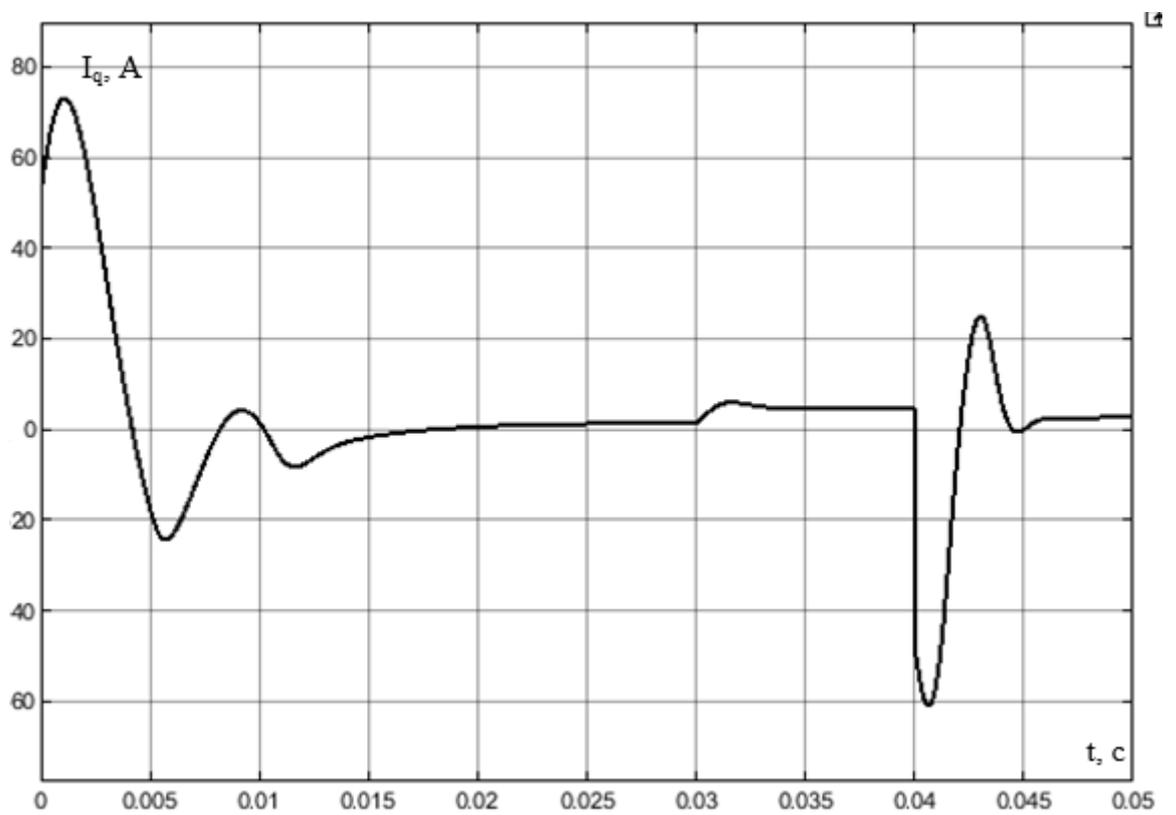


Рис. 25. Выходной сигнал регулятора скорости

По сигналу с регулятора скорости можно оценить причину больших скачков момента и скорости. При пуске, набросе нагрузки и остановке задание тока быстро меняется, чтобы скомпенсировать ошибку, тем самым добиваясь необходимого значения контролируемой величины. Регулятор выдает очень большие значения при пуске и остановке. Такие значения не могут получиться в реальности, поэтому в дальнейшем будем компенсировать данную проблему.

Включим в цепь компенсатор потерь, описанный выше и оценим, как это повлияет на переходные процессы двигателя.

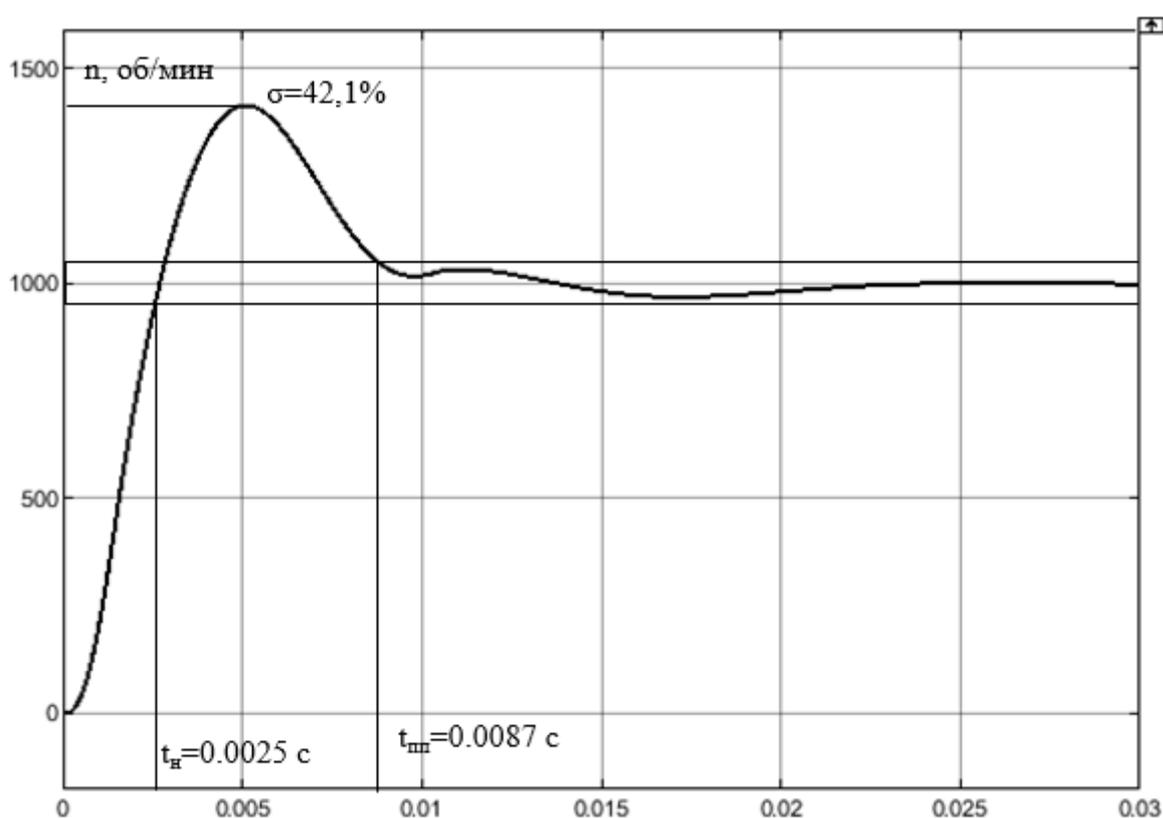


Рис. 26. Пуск с компенсацией потерь

Как можно заметить, компенсация помогла сгладить характеристику, что является определенным плюсом. Время переходного процесса теперь составляет 0,0087 секунды. Перерегулирование 42,1%, что говорит о положительном влиянии компенсации на систему.

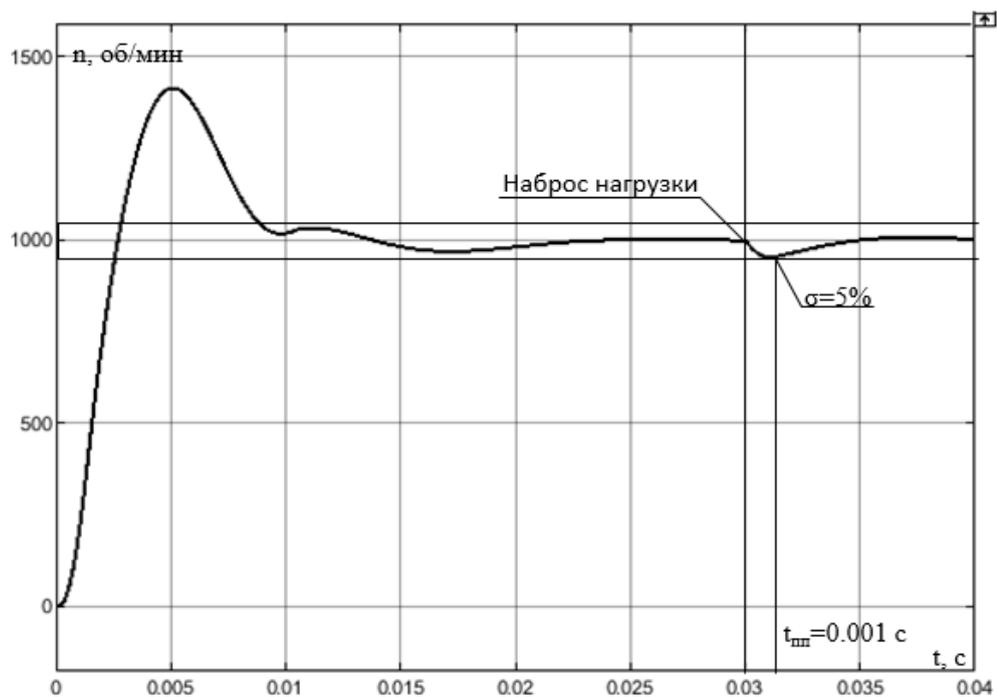


Рис. 27. Наброс нагрузки при компенсации потерь

На рисунке видно, что вид процесса поменялся не сильно, возбуждение системы также обрабатывается регулятором и сигнал возвращается в исходное состояние. Перерегулирование составило 5%, что говорит о хорошем качестве регулирования. Время переходного процесса 0.001 с.

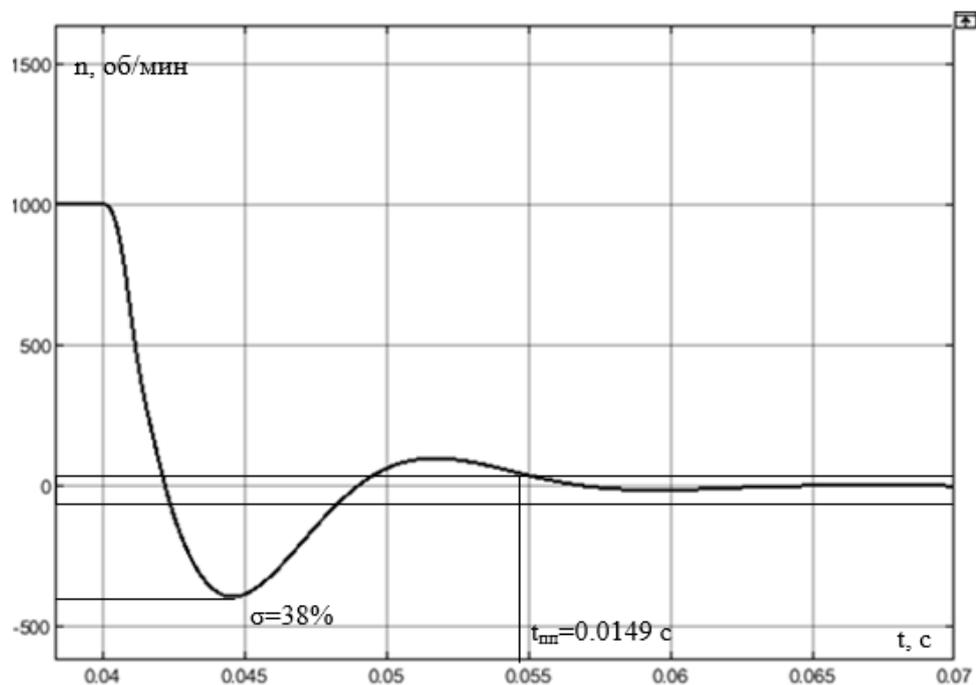


Рис. 28. Остановка двигателя с компенсацией потерь

Компенсация потерь позволила снизить перерегулирование до 38%, время переходного процесса 0.0149 с. Во всех случаях, компенсация помогла снизить негативные влияния, что свидетельствует о правильной настройке.

Так как регулятор скорости выдает задание на регулятор тока, во много раз превышающее предельно допустимый 12 А. Введем в выход регулятора скорости ограничение по току.

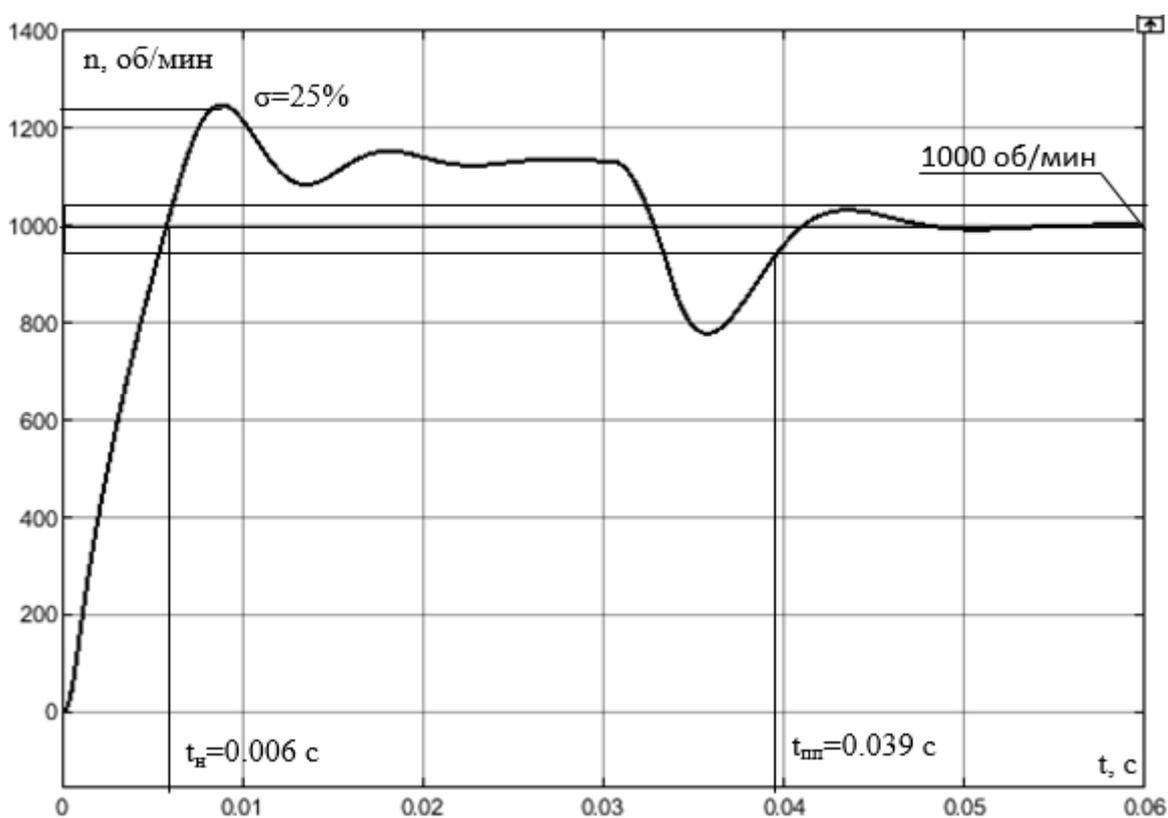


Рис. 29. Пуск двигателя с ограничителем

При пуске на переходном процессе наблюдаются колебания и резкое снижение скорости. По сравнению с предыдущими результатами процесс длится дольше, время нарастания уже составляет 0.006 с., а все время переходного процесса 0.039 с. Это происходит по причине нехватки тока для быстрого разгона. По этой же причине снижается перерегулирование до 25%. Скорость уходит в установившееся значение, что соответствует правильной работе контура.

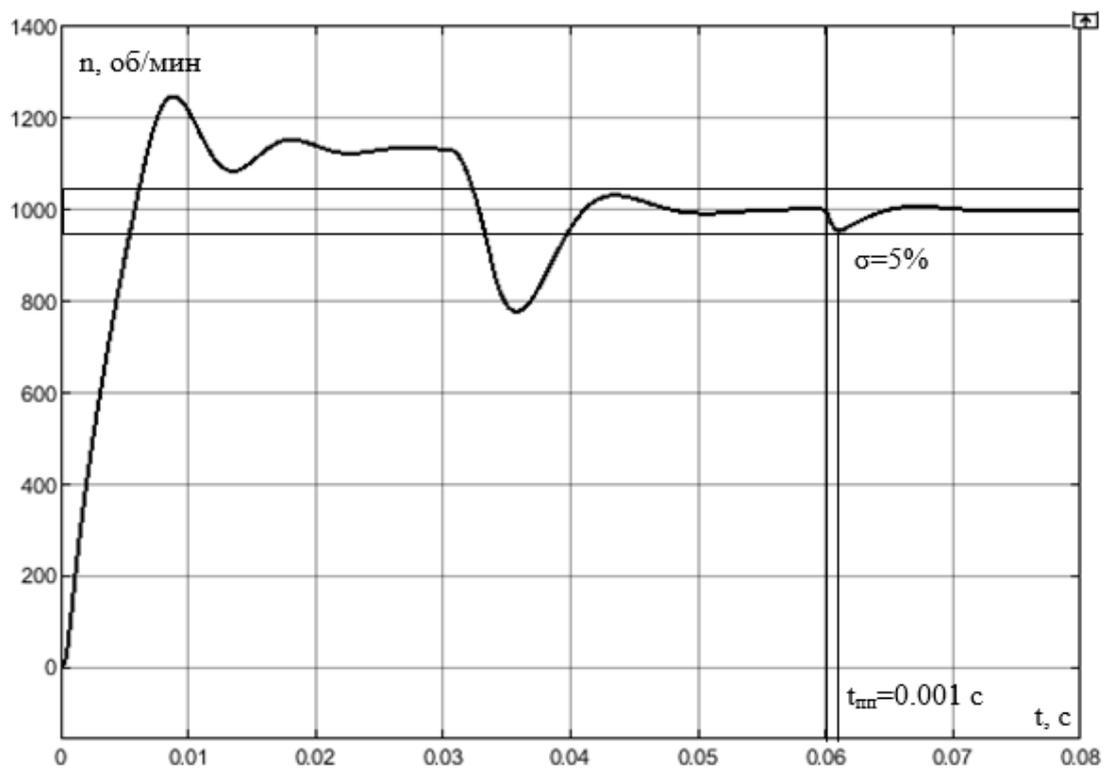


Рис. 30. Наброс нагрузки с ограничителем

Наброс нагрузки проходит также, так как ток не выходит за данные ему рамки.

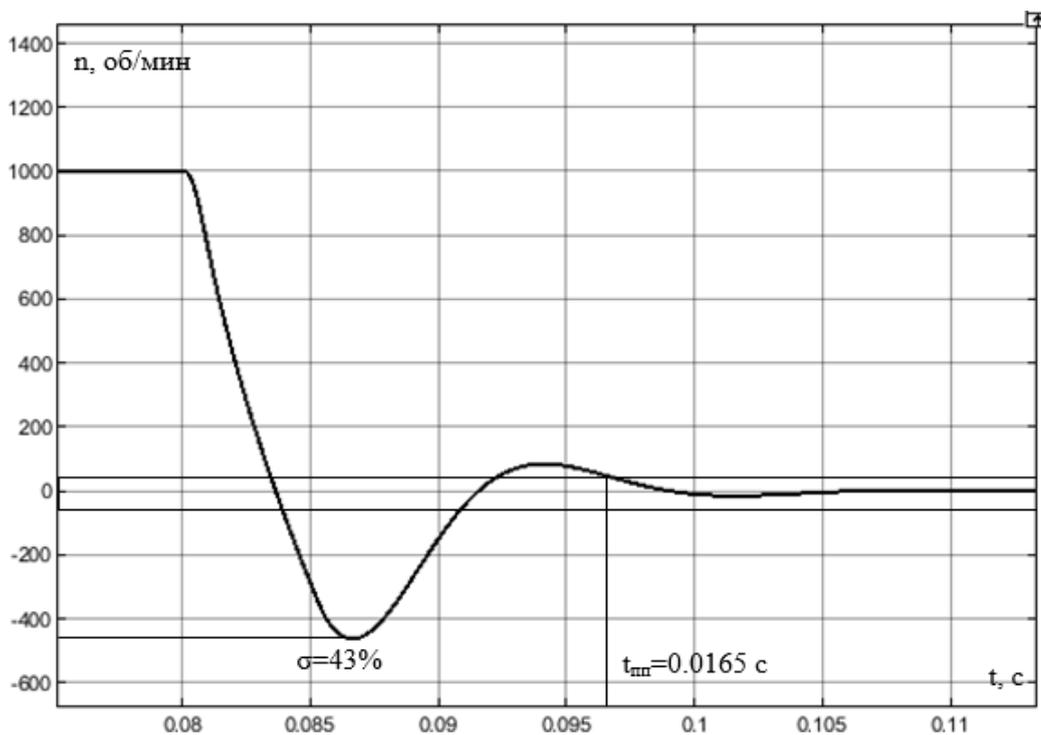


Рис. 31. Остановка двигателя с ограничителем

Остановка двигателя происходит дольше, что естественно при ограничении тока. Остановка прошла за 0.0165 с., перерегулирование повысилось до 43% по причине того, что предел тока не дает быстро компенсировать резкий спад по скорости.

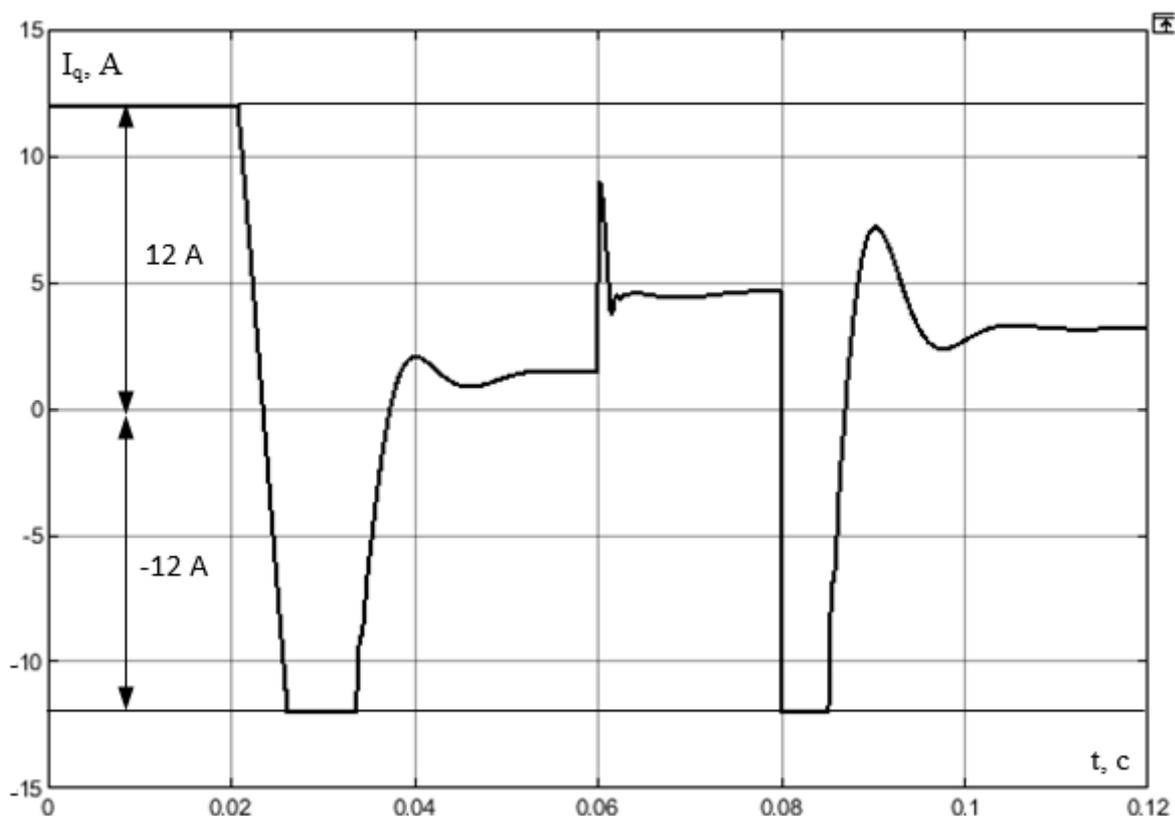


Рис. 32. Работа регулятора скорости

По графику видно, что задание на регулятор скорости ограничивается тем значением, что мы задали - 12 А.

Так как процессы, связанные с перерегулированием во всех вышерассмотренных случаях не является нормой, было решено ввести задатчик интенсивности для пуска и остановки двигателя.

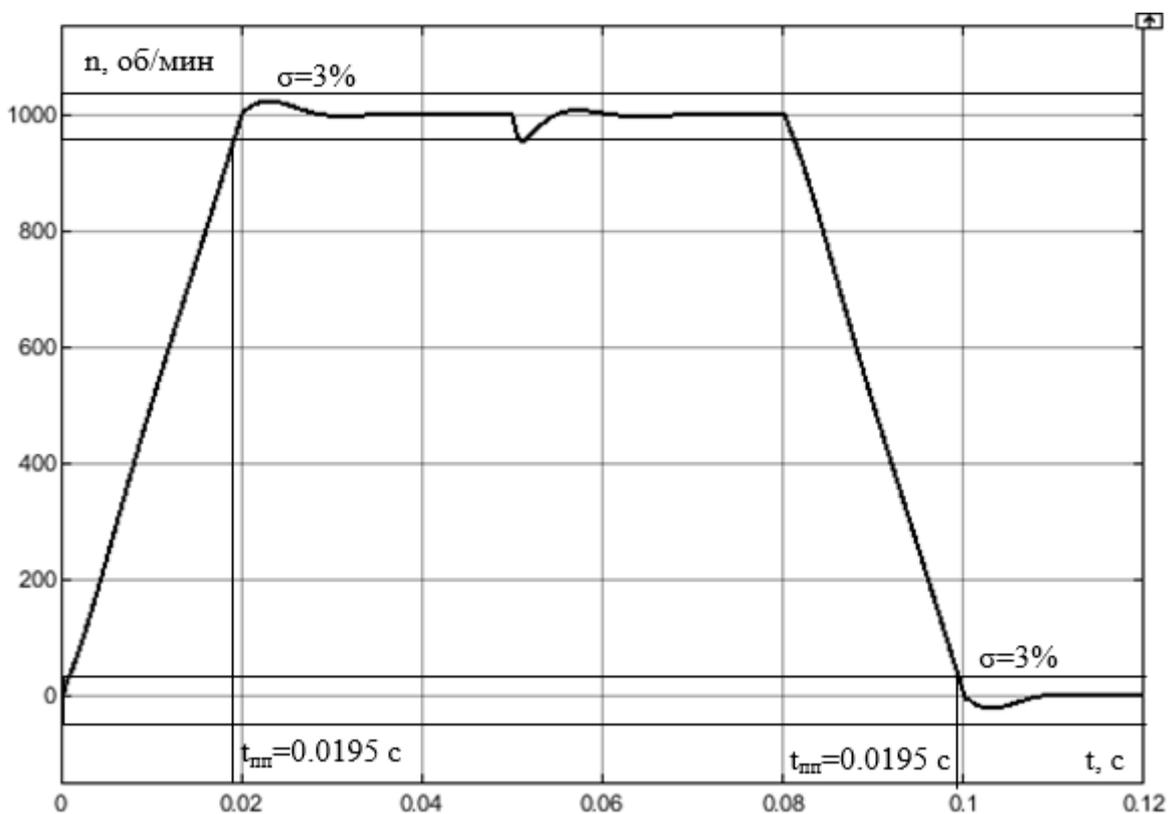


Рис. 33. Пуск и остановка двигателя с ЗИ

Задатчик интенсивности позволил избежать высокого перерегулирования путем увеличения времени переходного процесса.

Таким образом был рассмотрен контур скорости, настроены регуляторы и введены компенсатор и ограничитель с задатчиком интенсивности. Теперь можно перейти к режиму положения, который является приоритетным для приводов регулирующей арматуры. Данный контур является внешним для скорости и должен давать задание на вращение вала двигателя, а значит и запорного органа, в определенную позицию.

Для начала проведем анализ работы системы подчиненного регулирования трех контуров. Для этого уберем ограничения и посмотрим на три выходные величины, которыми управляет наша система: ток, скорость и положение. Так как необходимо рассмотреть только вид переходных процессов, введены масштабные коэффициенты.

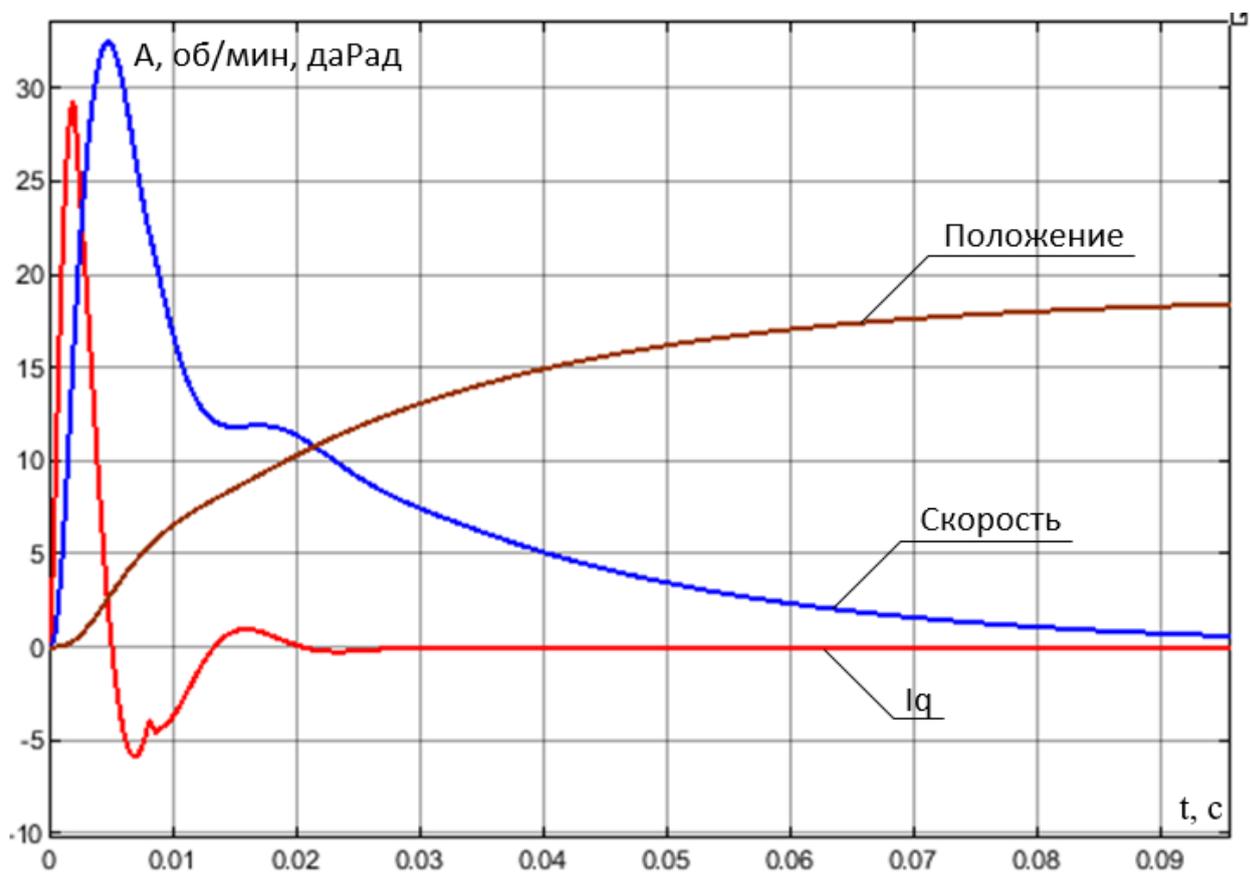


Рис. 34. Переходный процесс при подчиненном регулировании

Из рисунка можно увидеть, как в первый момент времени появляется всплеск тока, что естественно, так как он является инициатором всего движения. Ток преобразуется в момент, а далее в скорость. Так как задание на ток идет от регулятора скорости и каждый раз это значение уменьшается, то можно видеть, как пик тока приходится на некоторое значение скорости. Далее регулятор понимает, что скорость больше, чем эта точка, и начинает снижать ток в надежде, что скорость вернется обратно. Теперь, когда уже ток меняет свой знак, то и двигатель начинает тормозить. Пик двигателя приходится именно на точку смены знака тока. Далее можно наблюдать картину, как скорость постепенно уменьшается, так как регулятор видит, что идет постепенное приближение положения к заданному. Подчиненное регулирование работает верно.

Рассмотрим два случая, когда траектория движения включает равноускоренную и равнозамедленную зону и когда помимо данных двух присутствует прямолинейное движение.

Чтобы получить две зоны, длина пути, который должен «пройти» привод, должна быть такой, чтобы скорость не успела достичь установившегося значения и продолжать движение с ним. Для лучшего вида, значение положения увеличено в 10 раз.

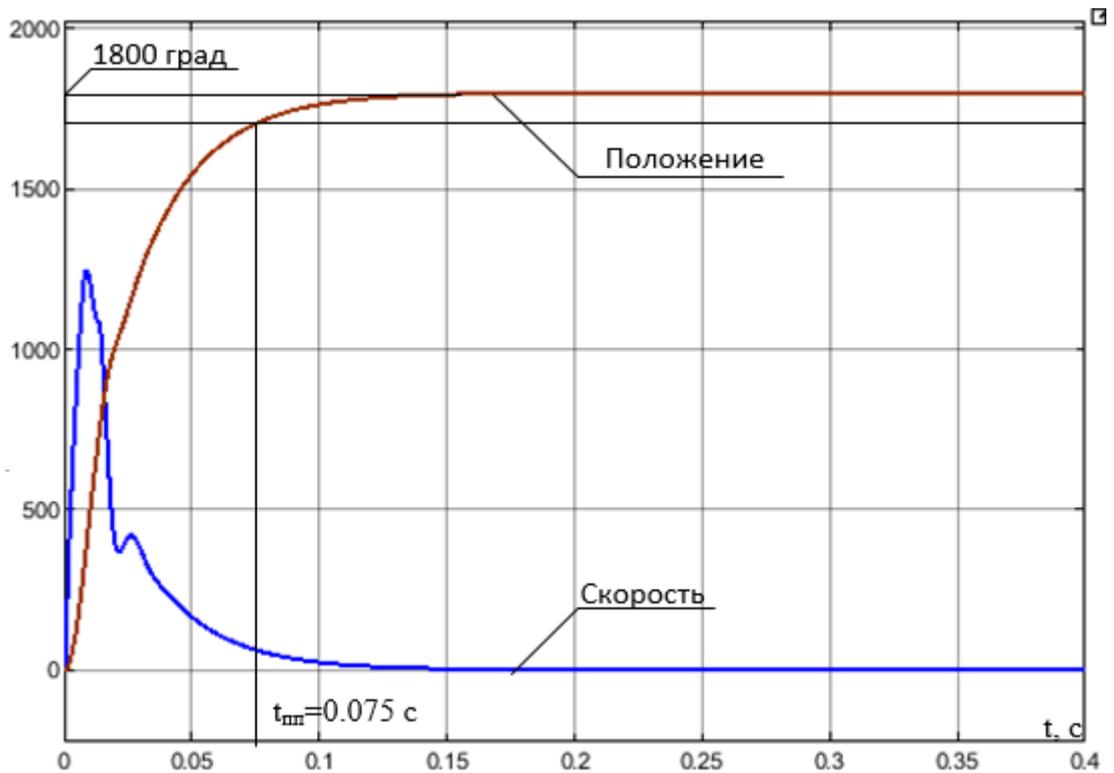


Рис. 35. Положение и скорость при малой траектории движения

Скорость меняется на всем пути, следовательно, имеется и ускорение. Движение с постоянной скоростью отсутствует, поэтому нет прямолинейного участка на графике положения. Как и был настроен контур положения, на характеристике отсутствует перерегулирование и время переходного процесса составляет 0,075 с.

Теперь рассмотрим случай, когда скорость установится, для этого зададим в положение в 10 раз большее. Масштабные коэффициенты при этом уберем.

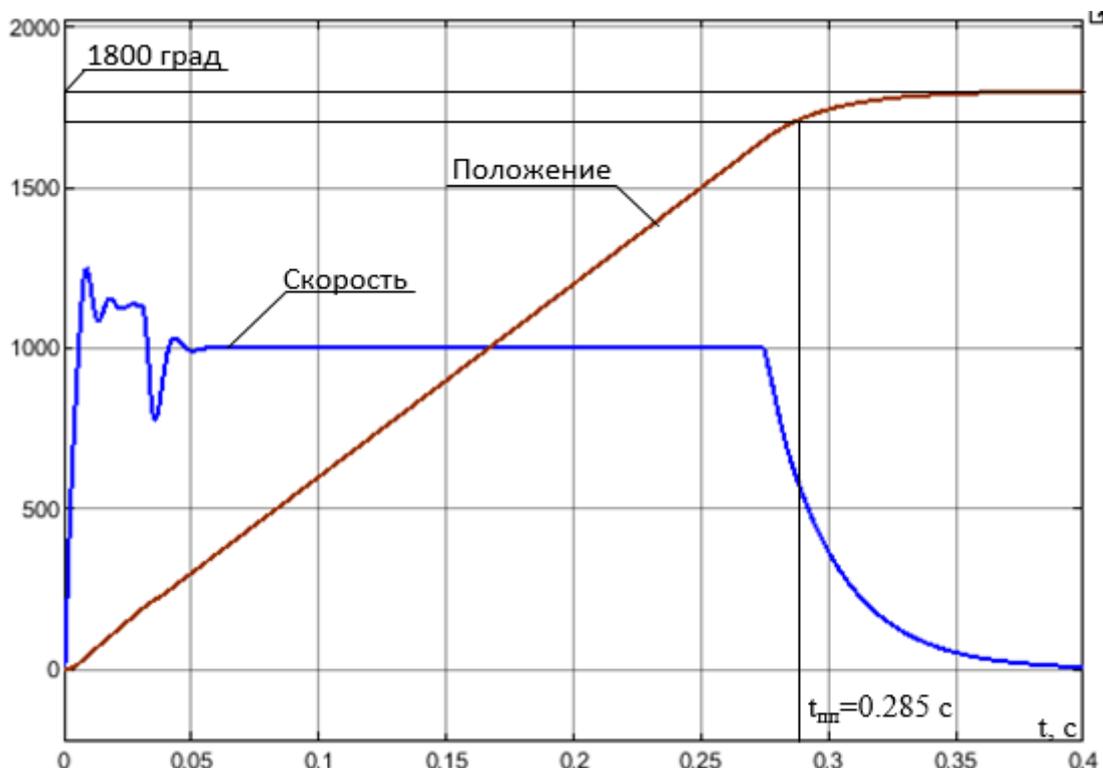


Рис. 36. Положение и скорость при большой траектории движения

Можно увидеть прямолинейный участок. Так как скорость постоянная, то и положение увеличивается прямолинейно с определенным углом наклона.

В данных опытах можно наблюдать скачок скорости, что может повлечь негативные последствия в виде гидроудара, деформации конструкции и т.д. Чтобы это избежать, было принято использовать задатчик интенсивности. Этим мы сможем добиться регулирования скорости достижения позиции, что решит данную проблему. Рассмотрим две скорости нарастания и увидим, как меняются характеристики.

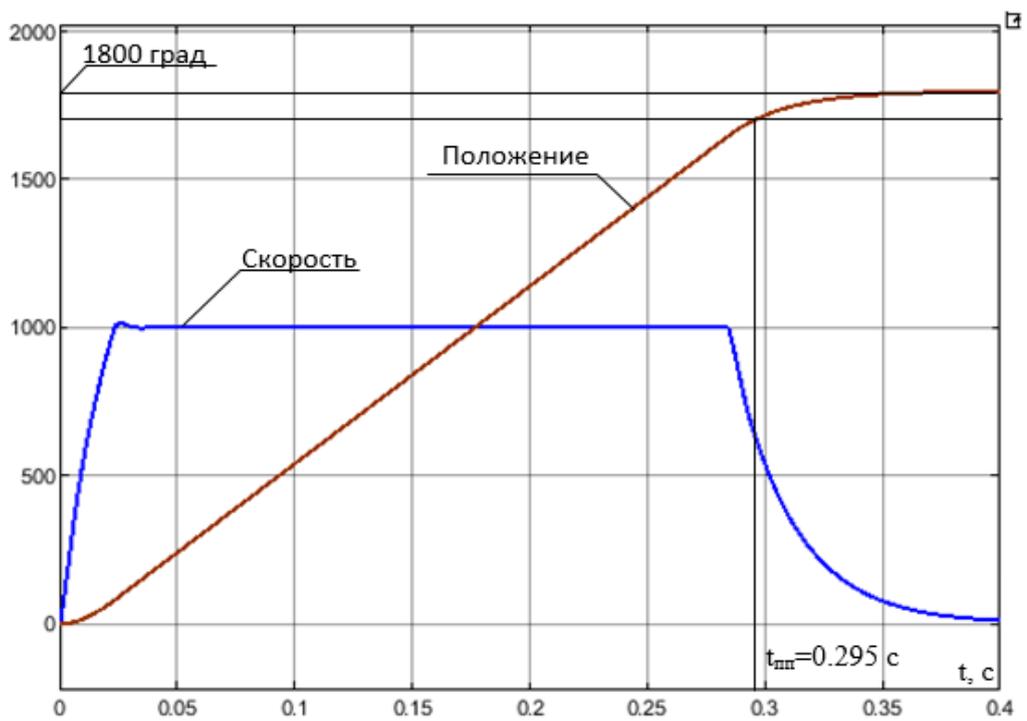


Рис. 37. Переходный процесс с ЗИ 10000 рад/с

Характеристики получились плавными, так как задание на регулятор положения приходит маленькое в первый момент времени, тем самым скорость возрастает мягко.

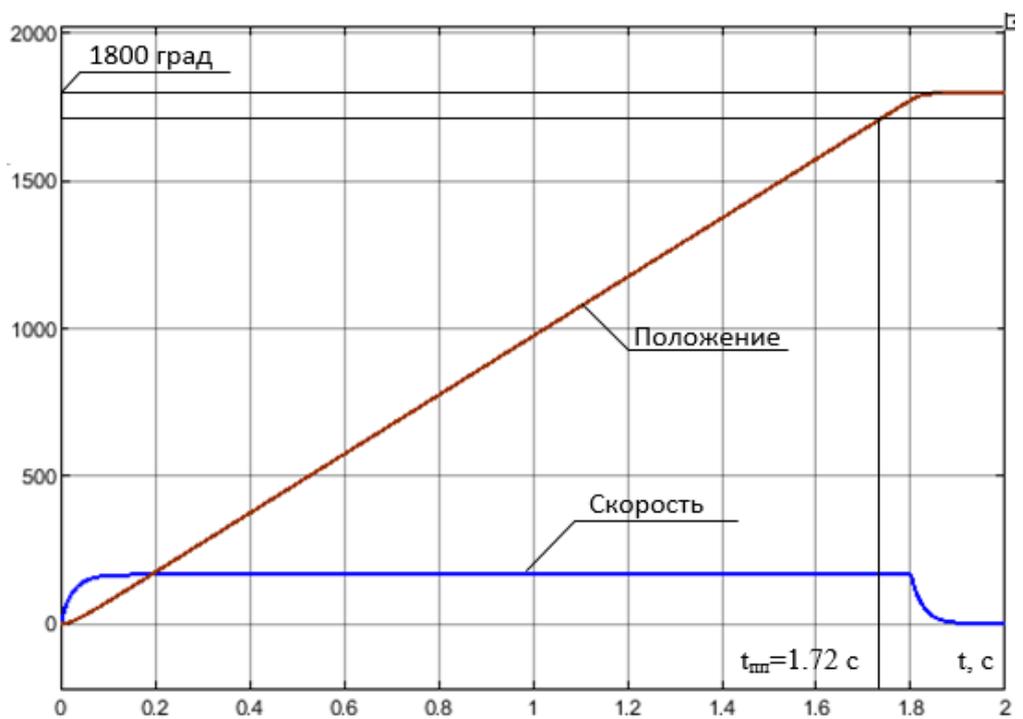


Рис. 38. Переходный процесс с ЗИ 1000 рад/с

Проанализировав данные зависимости, можно сказать, что выставив разный угол наклона задатчика интенсивности, можно управлять скоростью. Чем медленнее возрастает задание на регулятор положения, тем медленнее вал двигателя будет приближаться к установленному значению положения.

Рассмотренный контур положения позволяет сделать вывод о том, что система работает стабильно. Перейдем к анализу процесса уплотнения запорного органа. Уплотнение арматуры выполняют важнейшую функцию, значение которой переоценить невозможно, ведь герметичность определяет надежность трубопроводной арматуры, а потому является ее наиважнейшим качеством.

Введем линейное возрастание момента нагрузки, имитирующего уплотнение.

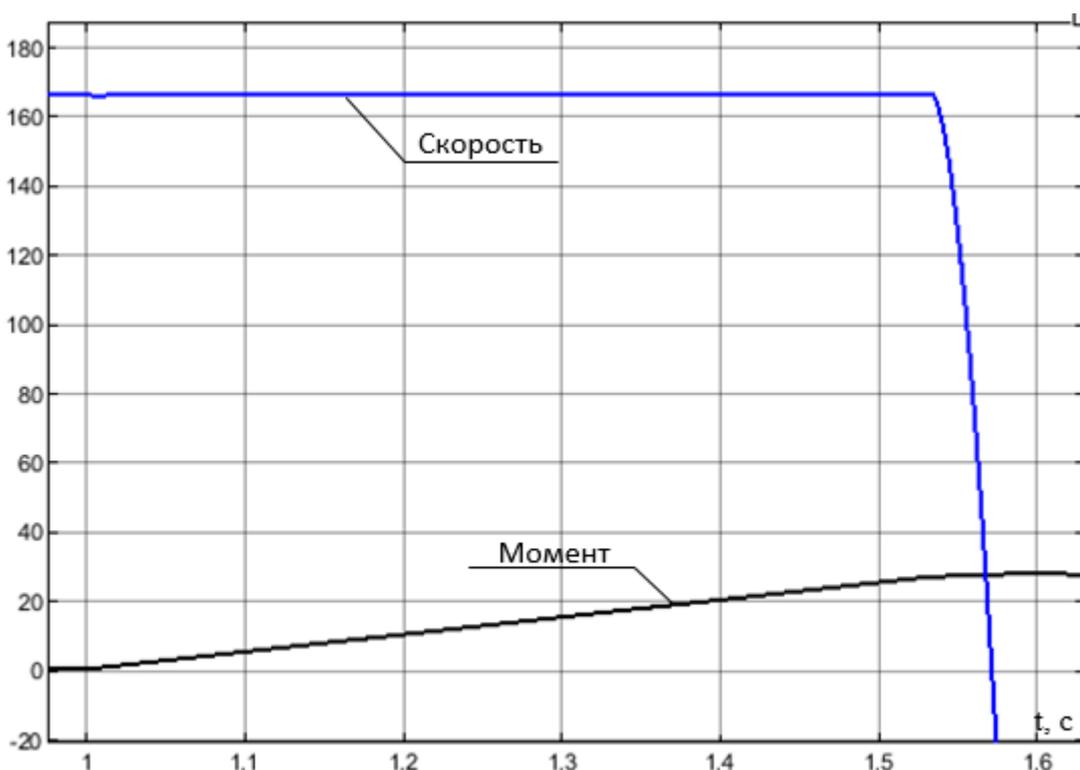


Рис. 39. Скорость и момент нагрузки при уплотнении арматуры

При линейном возрастании можно видеть, что скорость до предельного момента старается держаться на определенном значении, регулятор еще

сопротивляется и система астатическая. Когда момент нагрузки вырос слишком сильно, регулятор скорости уходит в насыщение и не может скомпенсировать данную нагрузку.

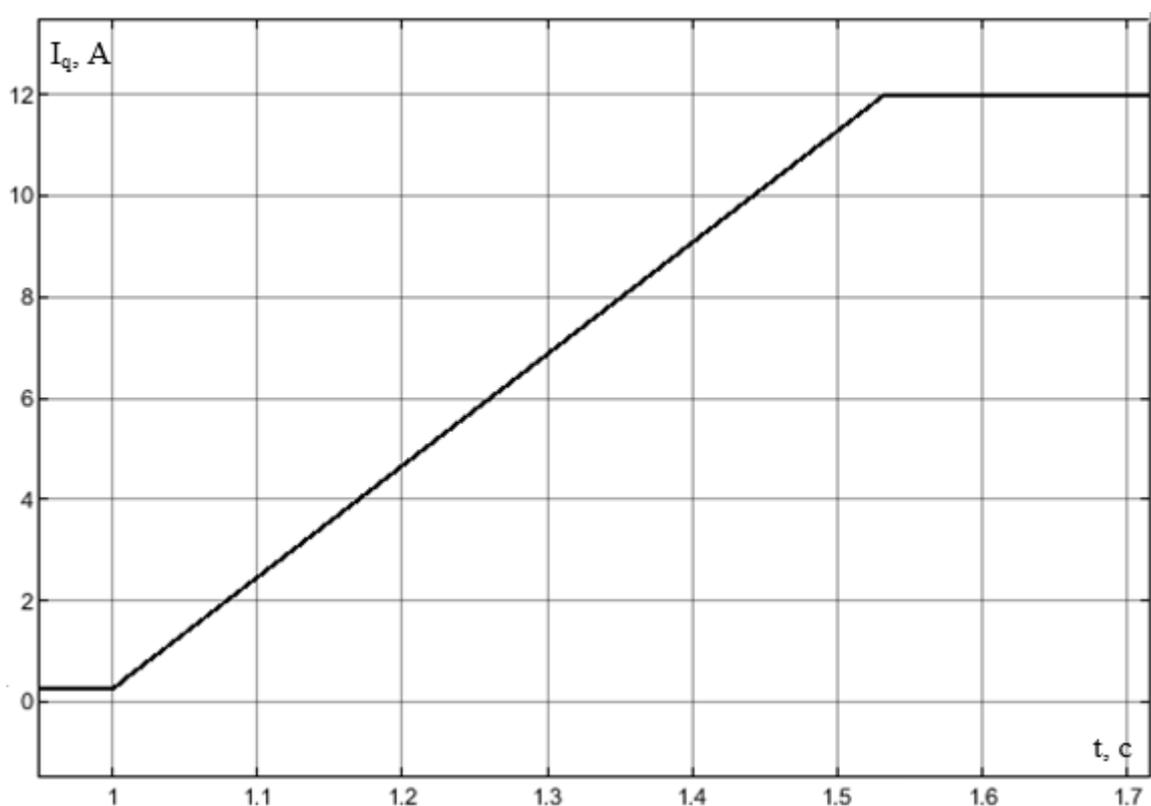


Рис. 40. Выход регулятора скорости при уплотнении

4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Калибровка датчика положения

При испытании двигателя была обнаружена проблема с датчиком положения. Получаемые значения синуса и косинуса положения преобразуются через формулу арктангенса и получается пилообразный сигнал, показанный на рисунке.

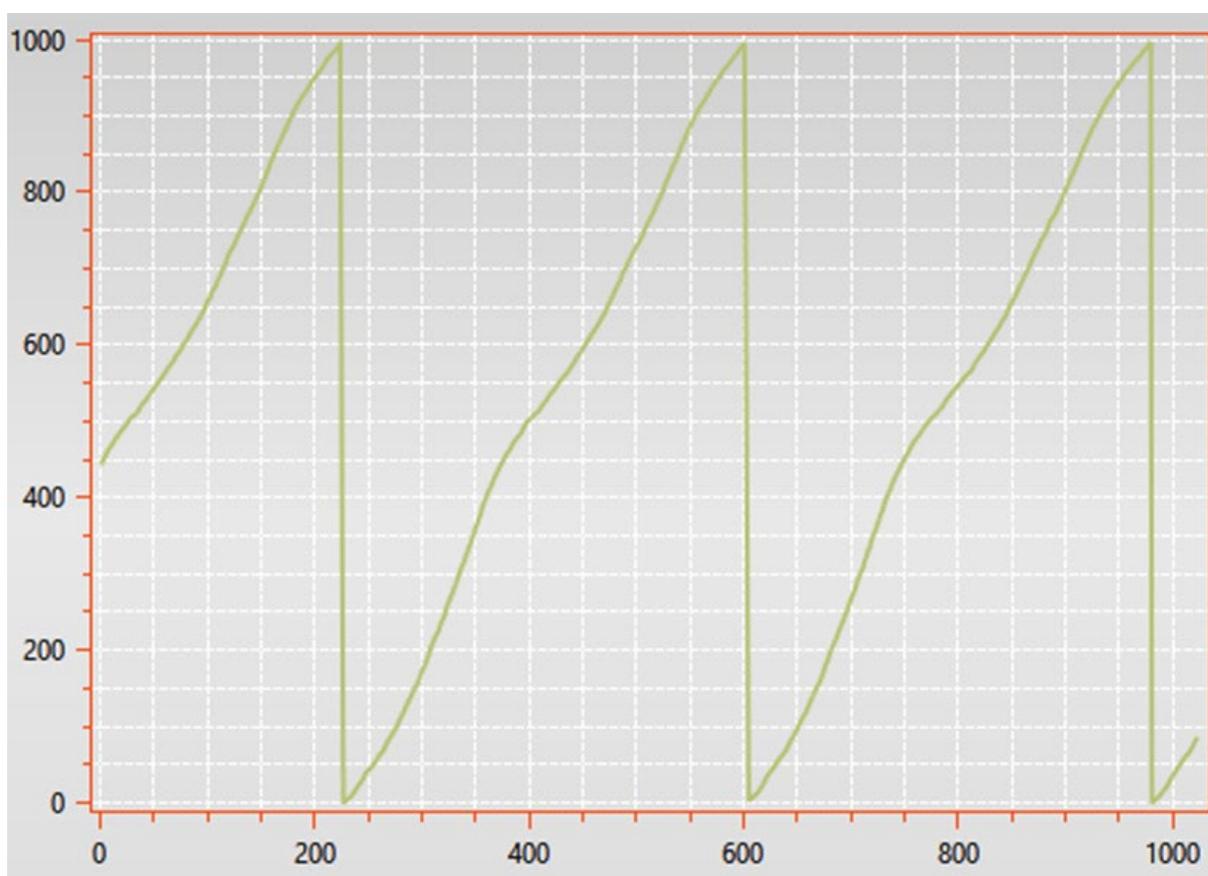


Рис. 41. Пилообразный сигнал

Если проанализировать полученную характеристику, можно заметить, что сигнал имеет существенные искажения, проявляющиеся в отклонениях точек от идеальной прямой линии, а также несимметрии относительно центра. Чтобы понять природу такой обработки данных, необходимо рассмотреть

показания датчика в чистом виде, как они приходят на процессор. Ниже приведен рисунок с сигналами с датчика.

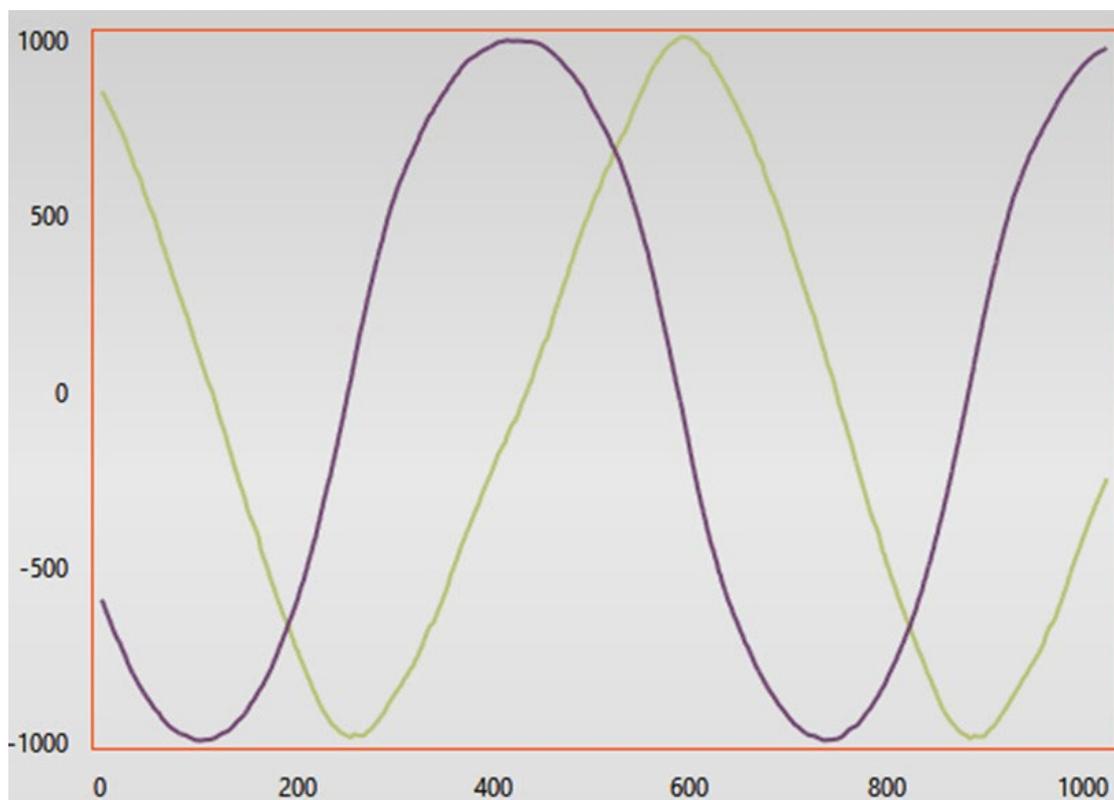


Рис. 42. Сигналы синуса и косинуса с датчика положения

Сразу можно заметить, как отличаются формы сигналов синуса и косинуса. Причиной таких искажений может являться конструктивная особенность крепления датчика внутри двигателя. Также не сразу можно увидеть, что сами сигналы смещены друг относительно друга на некий угол. То есть при положении ротора таковом, что значение синуса сигнала равно единице, значение косинуса при этом не равно нулю, что также является одной из составляющих общей погрешности обработки сигнала. Стоит отметить, что на рисунках выше уже решены проблемы сдвига относительно нуля и масштабирующих коэффициентов. Данные вопросы являются типичными в цифровой обработке сигналов. Здесь же рассматриваются уникальные свойства, которые требуют нетривиальных способов решений.

Если обратиться к документации датчика, то существует несколько способов устранения всех вышеописанных проблем, кроме одной, о которой будет написано ниже. Для решения проблемы неортогональности (сдвига сигналов друг относительно друга), необходимо произвести их замеры при положении 45 и 135 градусов. Затем рассчитывается длина вектора, образованного данными измерениями:

$$M_{45} = \sqrt{X_{45}^2 + Y_{45}^2},$$

$$M_{135} = \sqrt{X_{135}^2 + Y_{135}^2}$$

Где X_{45}, X_{135} – величины сигналов косинуса при 45 и 135 градусах, Y_{45}, Y_{135} – величины сигналов синуса при 45 и 135 градусах, M_{45}, M_{135} – величины длины вектора при 45 и 135 градусах.

По данным показаниям вычисляется угол неортогональности по формуле:

$$\varphi = 2 * \arctan\left(\frac{M_{135} - M_{45}}{M_{135} + M_{45}}\right)$$

Чтобы учесть данный угол, при обработке сигнала синуса, необходимо воспользоваться формулой:

$$Y_{\varphi} = \frac{Y - X * \sin(-\varphi)}{\cos(-\varphi)}$$

Таким образом, устраняется ошибка неортогональности между сигналами. Форма сигналов «острие» и «купол» при этом остается. Практическим методом было замечено, что причиной, по которой синус и косинус имеют такой вид, является влияние третьей гармоники. Необходимо снизить ее влияние на оба сигнала, чтобы получить одинаковую форму сигнала. Данные вычисления проводятся по формуле:

$$Y_{result} = Y_{\varphi} - (Y_{\varphi} - Y_{\varphi harm1}) * K_{harm3_sin},$$

$$X_{result} = X - (X - X_{harm1}) * K_{harm3_cos},$$

Где Y_{result}, X_{result} – окончательно обработанные сигналы датчика; $X_{harm1}, Y_{\varphi harm1}$ –

первые гармоники сигналов; K_{harm3_sin} , K_{harm3_cos} – коэффициенты учета третьей гармоники.

Коэффициенты K_{harm3_sin} и K_{harm3_cos} подбираются таким образом, чтобы придать правильную форму синусу и косинусу. В результате калибровки, получается следующая картина:

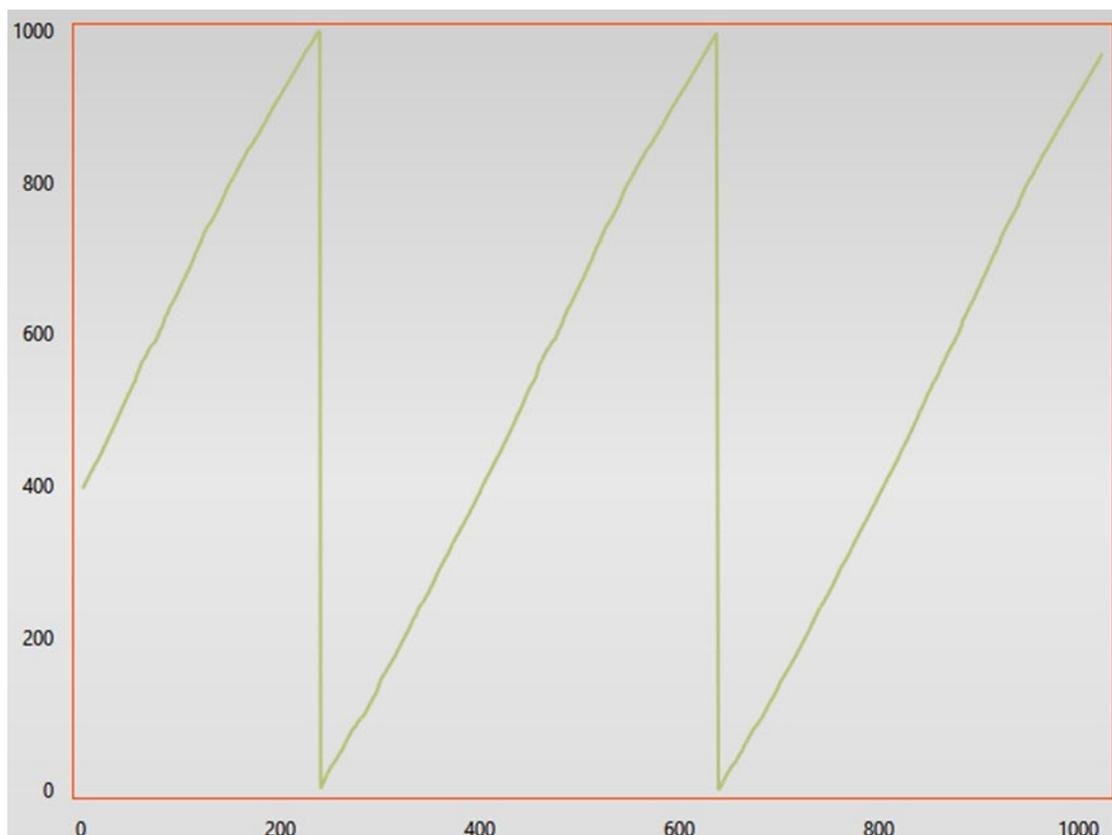


Рис. 43. Откалиброванный сигнал с датчика положения

Как можно заметить, пила стала практически ровной. С таким сигналом уже можно работать.

4.2. Особенности регулирования положения

Как было описано выше, скачок скорости в первый момент времени влечет за собой плохие последствия. Поэтому для решения данной проблемы на практике введен задатчик интенсивности, который имеет две зоны около

открытого и закрытого состояний и одну между ними. Суть данного метода проста. Области открытого и закрытого состояний это крайние 5% всего движения электропривода. Скорость нарастания задания на регулятор положения в этих зонах маленькая. Этим приемом достигается плавность нарастания скорости без бросков. Кроме того, данные зоны являются уплотняющими и такие действия помогают получить желаемую герметичность и точность остановки без каких-либо деформаций. Третья же зона является ходовой, где можно увеличить наклон задатчика интенсивности, чтобы быстрее достичь желаемого положения.

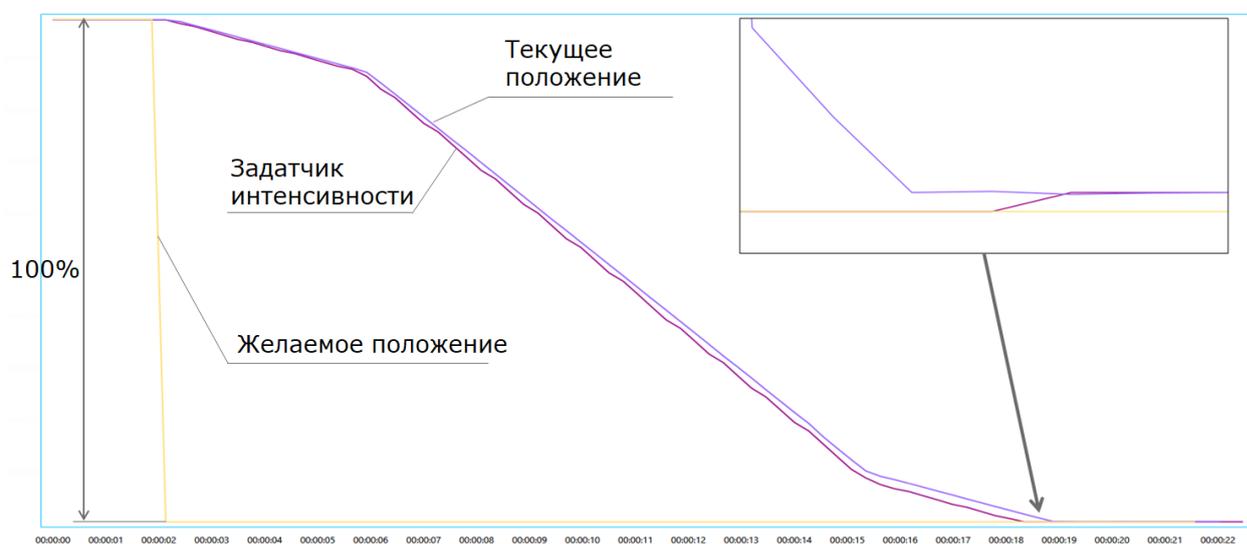


Рис. 44. Регулирование положения в приводе

Из рисунка видно, задавая положение, начинает работать задатчик интенсивности, и привод доезжает до желаемой позиции. Стоит отметить, что в конце пути значение ЗИ, то есть нашей желаемой точки автоматически становится равным текущему состоянию. Таким способом устраняется накапливающаяся ошибка, если бы каждый раз двигатель не доезжал до нужного положения.

4.3. Испытания двигателя на стенде

Испытание проводится на стенде, оборудованном преобразователем частоты фирмы Danfoss, асинхронным двигателем в виде нагрузки и синхронным двигателем, который рассматривается в данной работе. Внешний вид стенда представлен на рисунках



Рис. 45. Преобразователь частоты Danfoss



Рис. 46. Нагрузочный асинхронный двигатель

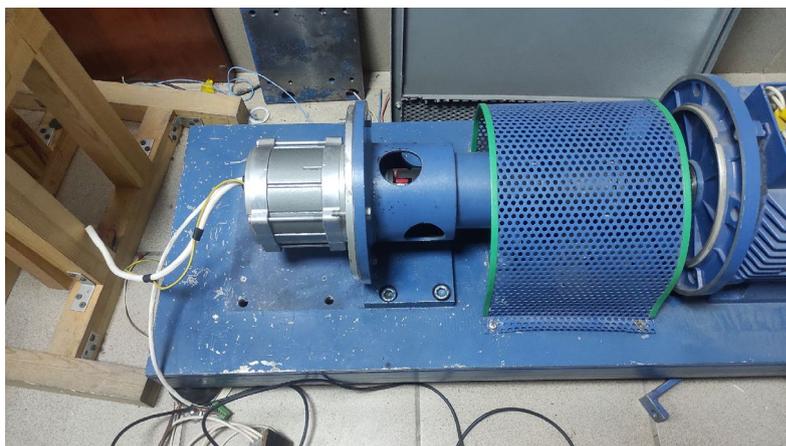


Рис. 47. Испытуемый двигатель

Проходят испытания следующим образом. Асинхронный двигатель с энкодером подключаются к преобразователю частоты, в нем выставляются параметры двигателя, а также выбирается моментный режим. Синхронный двигатель крепится через фланец к лицевой части стенда, предварительно соединив валы муфтой. Синхронный двигатель разгоняется в режиме скорости до установленной и должен ее держать при подаче нагрузки со стороны асинхронного двигателя. Увеличивая момент на преобразователе частоты, увеличивается момент асинхронного двигателя, что оказывает нагрузку на синхронный. Таким образом, возрастает ток. Суть проверки состоит в том, чтобы электропривод сохранял скорость под нагрузкой.

Синхронный двигатель управляется преобразователем частоты производства компании «Мехатроника-Про». Вид платы приведен на рисунке.

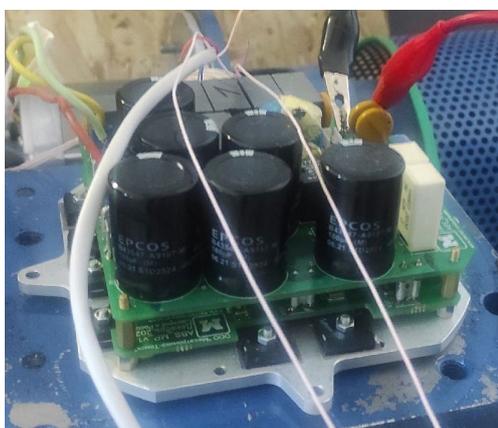


Рис. 48. Преобразователь частоты «Мехатроника-Про»

В основе платы лежит микроконтроллер STM32, в котором написана программа, реализующая алгоритмы управления двигателем. В периферии контроллера имеются таймеры, которые способны реализовывать ШИМ аппаратно, что повышает эффективность кода. Контроллер связывается с внешним устройством (ПК) при помощи протокола MODBUS, через интерфейс RS485. С помощью программы MViewer, разработанной фирмой «Мехатроника-Про», имеется возможность связаться с устройством, настраивать параметры и запускать процесс. Процесс испытания показан на рисунке.

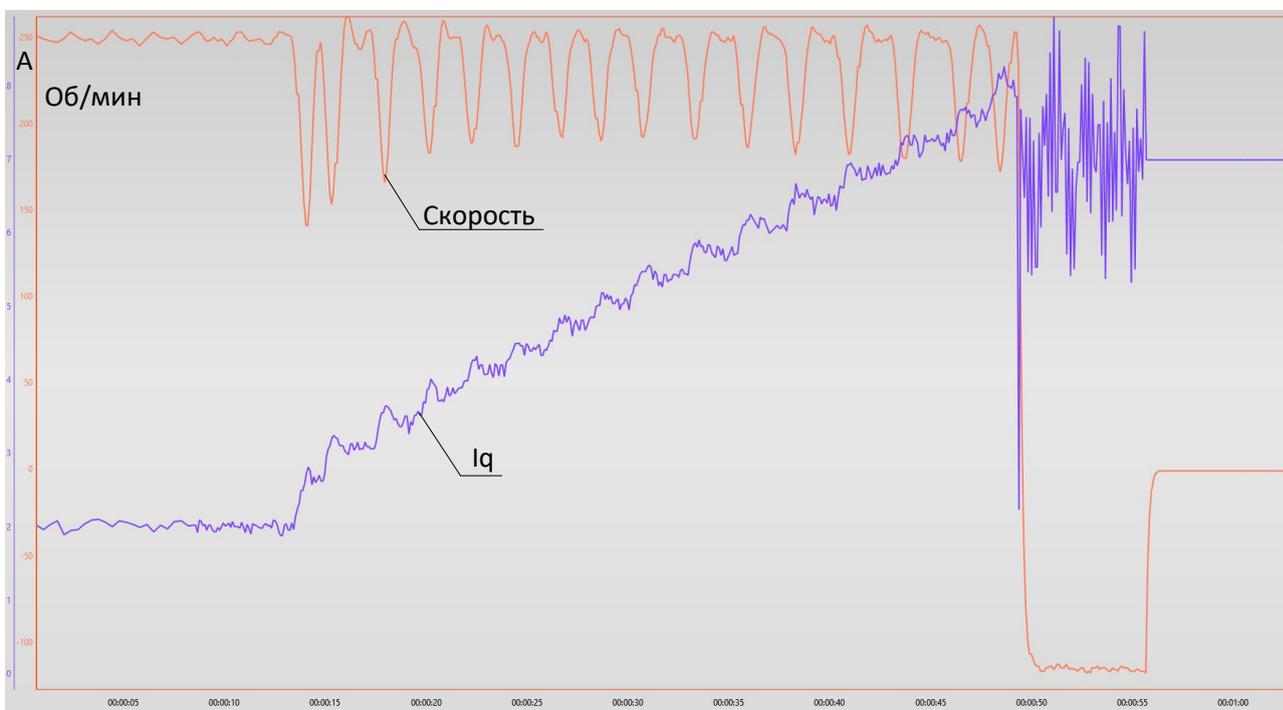


Рис. 49. График испытания на стенде

При уставке скорости 250 об/мин, двигатель стабильно поддерживает данную скорость. Как только на панели преобразователя частоты Danfoss происходит включение асинхронного двигателя, ток в синхронном двигателе возрастает, а скорость резко падает. При повышении момента асинхронного двигателя с определенным шагом ток синхронного двигателя растет, скорость падает, но вскоре восстанавливается, что соответствует правильной работе

регулятора. Дойдя до такого момента, где ток равен 8 А, СД не может пересилить момент, создаваемый АД и меняет знак скорости.

Таким образом был протестирован двигатель на возможность поддерживать скорость под нагрузкой. Максимальный ток, при котором привод смог держать скорость – 8 А.

4.4. Различие симитированной модели с реальным электроприводом

Стоит сказать, что любая симитированная математическая модель не сможет в полной мере описать все процессы, происходящие в реальном объекте. Модель всегда будет содержать допущения, так как учесть все не получится, иначе модель будет очень сложна для понимания и нагромождена большим количеством блоков. Поэтому стоит провести исследование, как отличаются показания реального двигателя, от модели.

Для сравнения выберем фазный ток. Значение тока будет снято при помощи буферного осциллографа. Это необходимо, так как значения, которые были на предыдущих рисунках передавались на низкой частоте для работы всех параметров программы, чтобы не загружать ее. Включая данный осциллограф, микроконтроллер накапливает в буфер точки и отправляет их пакетом через интерфейс.

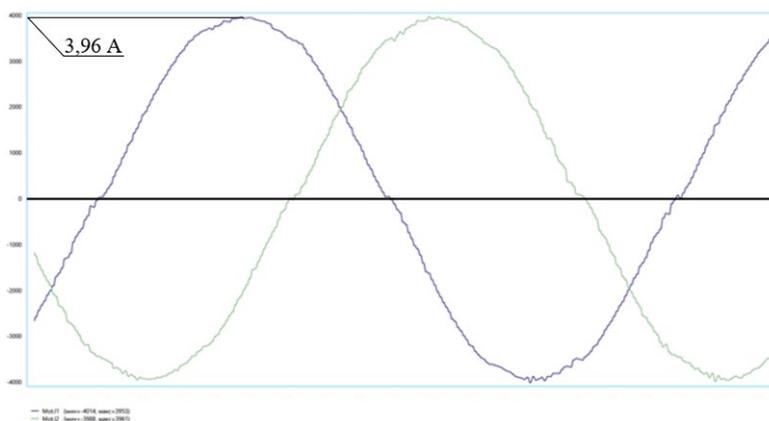


Рис. 50. Фазный ток двигателя в буферном осциллографе

По данной осциллограмме видно, что амплитудное значение тока приблизительно равно 4 А, что совпадает с данными ранее 2,8 А действующее.

Рассмотрим теперь ток в модели matlab.

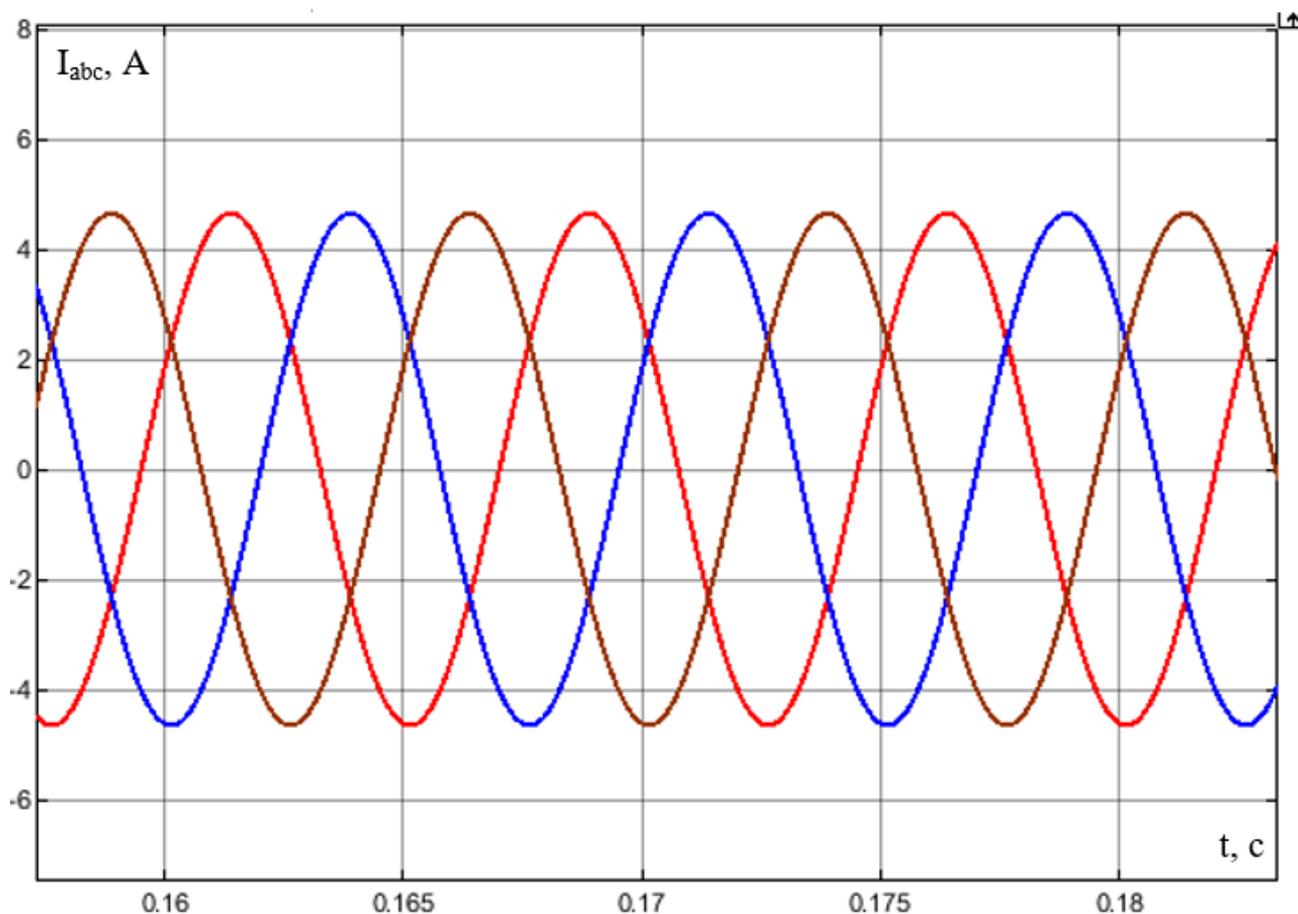


Рис. 51. Ток двигателя в модели

При номинальных параметрах, ток достигает в амплитуде 4.6 А. Это говорит о том, что математическая модель не может во всей полноте отражать сущность реальных процессов, так как невозможно учесть все факторы. Благодаря ней были получены приближенные значения, говорящие о том, что расчеты проведены верно.

5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Цель данного является определение экономического проектирования электропривода запорно-регулирующей арматуры.

- Поставленная цель достигается выполнением следующих задач:
- Составление SWOT-анализа проектировочной работы
- Планирование технико-конструкторских работ
- Определение ресурсной эффективности технического проекта эффективности проекта.

5.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Рассмотрим целевой рынок и проведем сегментирование для изучения потребителей научного исследования.

В данном сегментировании целесообразно провести анализ потребителей по категории предприятий, применяющих трубопроводные арматуры. В зависимости от категории потребителей целесообразно выбрать три наиболее значимых рынка по размеру компании. Сегментирование приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Карта сегментирования применения электроприводов

		Транспортирующие компании	Предприятия перерабатывающие	Объекты ЖКХ	Пищевая промышленность
Размер	Крупные				
	Средние				
	Малые				

Результаты сегментирования:

Потенциальным потребителем результатов исследования являются

различные промышленные предприятия, предприятия ЖКХ и компании, транспортирующие жидкости и газы. В приведенном примере карты сегментирования показано, что на рынке потребления наиболее востребованным является ориентир на крупные предприятия с транспортным магистральным трубопроводом.

5.2. Анализ конкурентных технических решений

Анализ проводится с целью оценки сильных и слабых сторон конкурентных разработок. Для анализа используют следующую информацию о конкурентных электроприводах запорной арматуры:

- Технические характеристики.
- Конкуренетоспособность.
- Цена.
- Качество.
- Уровень шума и т.д.

Электропривод запорной арматуры представляет собой электромеханическое устройство, предназначенное для автоматизации управления трубопроводной арматурой. Наиболее часто такие электроприводы используются для дистанционного управления арматурой: открытия и закрытия, регулирования положения, скорости и момента выходного звена. Главным отличием данного привода от большинства отечественных и зарубежных аналогов является применение синхронного электродвигателя на постоянных магнитах. За счет этого имеются следующие преимущества:

- Меньшие масса и габариты.
- Более высока перегрузочная способность.
- Обширный спектр применения.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		СД 1	Д 1	Д 2	К ₁	К ₂	К ₃
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1.Повышение производительности труда	0,07	5	3	3	20	0,21	0,21
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям)	0,12	4	2	2	0,48	0,24	0,24
3. Помехоустойчивость	0,03	3	2	2	0,09	0,06	0,06
4. Энергоэкономичность	0,11	4	3	3	0,44	0,33	0,33
5. Надежность	0,06	5	4	4	0,3	0,24	0,24
6. Уровень шума	0,03	5	3	3	0,15	0,09	0,09
7. Безопасность	0,03	5	2	2	0,15	0,06	0,06
8. Функциональная мощность (предоставляемые)	0,04	4	4	4	0,16	0,16	0,16
9. Простота эксплуатации	0,04	2	4	4	0,08	0,16	0,16
10. Качество интеллектуального	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
11. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,06	5	0	0	0,3	0	0
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,03	5	4	3	0,15	0,12	0,09
2. Уровень проникновения на рынок	0,03	5	4	3	0,15	0,12	0,09
3. Цена	0,1	2	3	3	0,2	0,3	0,3
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,06	3	4	4	0,18	0,24	0,24
5. Послепродажное обслуживание	0,03	3	3	3	0,09	0,09	0,09
6. Финансирование научной разработки	0,03	4	2	2	0,12	0,06	0,06
7. Срок выхода на рынок	0,03	4	3	4	0,12	0,09	0,12
8. Наличие сертификации разработки	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
Итого	1	78	59	57	23,66	3,02	2,94

Где СД₁–привод с синхронным двигателем с постоянными магнитами;

Д₂– привод с асинхронным двигателем;

Д₃– привод с двигателем постоянного тока;

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \times B_i$$

где K – конкурентоспособность вида; V_i– вес критерия (в долях единицы);

B_i – балл i-го показателя.

По данным оценочной карты можно увидеть, что применение привода с синхронным двигателем с постоянными магнитами является наиболее конкурентоспособным с минимальными издержками.

5.3. Технология QuaD

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение о целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект.

Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации.

Для упрощения процедуры проведения QuaD оценка проводится в табличной форме (таблица 4).

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

Таблица 4 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный	Относительное	Средневзвешенное
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Повышение производительности труда	0,07	95	100	0,95	6,65
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям)	0,12	87	100	0,87	10,44
3. Помехоустойчивость	0,03	90	100	0,9	2,7
4. Энергоэкономичность	0,11	90	100	0,9	9,9
5. Надежность	0,06	97	100	0,97	5,82
6. Уровень шума	0,03	80	100	0,8	2,4
7. Безопасность	0,01	80	100	0,8	2,4
8. Потребность в ресурсах памяти	0,02	75	100	0,75	1,5
9. Функциональная мощность (предоставляемые)	0,04	85	100	0,85	3,4
10. Простота эксплуатации	0,04	98	100	0,98	3,92
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,05	96	100	0,96	4,8
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,06	100	100	1	6
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
1. Конкурентоспособность продукта	0,04	90	100	0,9	3,6
2. Уровень проникновения на рынок	0,04	70	100	0,7	2,8
3. Цена	0,1	65	100	0,65	6,5
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,07	95	100	0,95	6,65
5. Послепродажное обслуживание	0,03	90	100	0,9	2,7
6. Финансирование научной разработки	0,05	78	100	0,78	3,9
7. Срок выхода на рынок	0,03	71	100	0,8	3,2
8. Наличие сертификации разработки	0,04	80	100	0,8	3,2
Итого	1				91,41

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum V_i \cdot B_i = 91,41$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и

перспективности научной разработки;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Значение P_{cp} получилось равным 91,41, что говорит о существенной перспективности данной разработки.

5.4. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Проводится в два этапа.

Таблица 5 – Матрица SWOT

	Сильные стороны проекта: С1. Сократить издержки на обслуживание и контроль за оборудованием; С2. Снизить риски возникновения техногенных аварий и катастроф; С3. Предотвратить выход из строя сложного оборудования и не допустить останов технологических процессов; С4. Предоставить достоверную информацию управляющему звену предприятия; С5. Сформировать гибко планируемые сроки на планово-предупредительные работы и обслуживание; С6. Идентифицировать с высокой долей вероятности причины выхода из строя оборудования; С7. Минимизировать влияние неквалифицированного персонала на расстройство технологического процесса;	Слабые стороны проекта: Сл1. Сложность ремонта оборудования; Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой; Сл3. Проблема с финансированием; Сл4. Дороговизна оборудования;
--	--	--

<p>Возможности: В1. Использовать блок управления для регулирования положения в многооборотных, неполноповоротных и прямоходных задвижках; В2. Широкий спектр применения; В3. Работа электропривода в большом диапазоне температур</p>		
<p>Угрозы: У1. Отсутствие спроса на технологию производства; У2. Импорт отдельных частей для конструкций; У3. Введение дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции; У4. Несвоевременное проведение технического обслуживания и ремонта;</p>		

Описание сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта, его возможностей и угроз производим на основе результатов анализа, проведенного в предыдущих разделах бакалаврской работы. После того как сформулированы четыре области SWOT переходим к реализации второго этапа.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Полученная интерактивная матрицы проекта представлена в таблице 6.

Таблица 6 – Интерактивная матрица проекта

	Сильные стороны							Слабые стороны				
		С1	С2	С3	С4	С5	С6	С7	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
Возможности проекта	В1	0	0	+	+	+	-	0	-	0	0	+
	В2	+	+	+	+	-	0	0	+	0	+	-
	В3	+	+	+	0	0	0	-	-	+	+	0
Угрозы проекта	Сильные стороны							Слабые стороны				
		С1	С2	С3	С4	С5	С6	С7	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	У1	+	+	-	+	0	0	0	-	0	0	+
	У2	-	+	0	+	-	+	0	0	-	+	-
	У3	0	+	+	-	0	-	-	0	-	+	+
У4	-	-	+	+	0	+	0	-	+	-	0	

В рамках третьего этапа составляем итоговую матрицу SWOT-анализа (таблица 7).

Таблица 7 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны проекта: С1. Сократить издержки на обслуживание и контроль за оборудованием; С2. Снизить риски возникновения техногенных аварий и катастроф; С3. Предотвратить выход из строя сложного оборудования и не допустить останов технологических процессов; С4. Предоставить достоверную информацию управляющему звену предприятия; С5. Сформировать гибко планируемые сроки на планово-предупредительные работы и обслуживание; С6. идентифицировать с высокой долей вероятности причины выхода из строя оборудования; С7. Минимизировать влияние неквалифицированного персонала на расстройство технологического процесса.</p>	<p>Слабые стороны проекта: Сл1. Сложность ремонта оборудования; Сл2. Отсутствие у потребителей потенциальных квалифицированных кадров по работе с научной разработкой; Сл3. Проблема с финансированием; Сл4. Дороговизна оборудования.</p>
--	---	---

<p>Возможности: В1.Использовать блок управления для регулирования положения в многооборотных, неполноповоротных и прямоходных задвижках; В2.Широкий спектр применения; В3. Работа электропривода в Большом диапазоне температур.</p>	<p>В1С3С4С5 В2С1С2С3С4 В3С1С2С3</p>	<p>В1Сл4 В2Сл1Сл3 В3Сл2Сл3</p>
<p>Угрозы: У1. Отсутствие спроса на технологию производства; У2. Импорт отдельных частей для конструкций; У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции; У4. Несвоевременное проведение технического обслуживания и ремонта.</p>	<p>У1С1С2С4 У2С2С3С6 У3С2С3 У4С3С4С6</p>	<p>У1Сл4 У2Сл3Сл4У3Сл3Сл4 У4Сл2</p>

Из анализа полученных результатов видно, что разработка обладает большим количеством сильных сторон, а также большими возможностями. Основной угрозой является высокая зависимость от импорта составных компонентов привода и высокая стоимость. Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

5.5. Планирование работ по научно-техническому исследованию

5.5.1. Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения проектных работ формируется группа, которая включает в себя руководителя проекта и инженера. Порядок этапов и работ,

распределение исполнителей по этим видам работ приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Перечень этапов работ и распределение исполнителей

	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Описание объекта автоматизации (модернизации)	Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретическое исследование	5	Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП	Инженер
	6	Расчет параметров двигателя модели	Инженер
	7	Выбор способа регулирования скорости	Инженер
	8	Расчет предельных характеристик системы	Инженер
	9	Разработка математической модели системы АУ ЭП	Инженер
	10	Оптимизация САР электропривода	Инженер
	11	Разработка программы имитационного моделирования	Инженер
Теоретическое исследование	12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
Проведение ОКР			
Разработка технической документации и проектирование	13	Технико-экономические расчеты	Инженер
	14	Вопросы безопасности и экологичности проекта	Инженер
	15	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической)	Инженер

5.5.2. Определение трудоемкости выполнения работ

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

Все рассчитанные значения представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	T_{min} , чел-дни		T_{max} , чел-дни		$T_{ож}$, чел-дни		Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер				
Составление и утверждение технического задания	1		2		2		2		4	
Подбор и изучение материалов по теме		5		8		7		7		11
Описание объекта автоматизации (модернизации)		3		4		4		4		7
Календарное планирование работ по теме	3		5		4		4		7	
Разработка структурной принципиальной схемы ЭП		4		9		6		6		10
Расчет параметров двигателя и модели		4		6		5		5		8
Выбор способа регулирования скорости		2		4		8		8		12
Расчет предельных характеристик системы «преобразователь»		2		4		3		3		5
Разработка математической модели системы АУ ЭП	3		6		5		5		8	
Оптимизация САР электропривода		4		8		6		6		10
Разработка программы имитационного моделирования		5		8		7		7		11
Оценка эффективности полученных результатов	2		3		3		3		5	
Технико-экономические расчеты		3		7		5		5		8
Вопросы безопасности и экологичности проекта		3		7		5		5		8
Составление пояснительной записки		1		3		2		2		4

В качестве графика инженерных работ можно использовать диаграмму Ганта. Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Исходя из диаграммы продолжительности работ, определяется участие каждого специалиста рабочей группы в разработке проекта: руководитель 7 дней, дипломник 86 дней, 15 выходных дней и 4 праздничных дня, общее количество 112 дней.

Строим календарный план-график (таблица 10).

Таблица 10 – Календарный план-график проведения проектирования

№	Вид работ	Исполнители	T_{ki} дн	Продолжительность выполнения работ													
				фев.		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение технического задания	Рук.	4	■													
2	Подбор и изучение материалов по	Инженер	11	■	■												
3	Описание объекта автоматизации	Инженер	7		■												
4	Календарное планирование работ по теме	Рук.	7			■	■										
5	Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП	Инженер	10				■	■									
6	Расчет параметров двигателя и модели	Инженер	8					■	■								
7	Выбор способа регулирования скорости	Инженер	12						■	■							
8	Расчет предельных характеристик системы	Инженер	5							■							
9	Разработка математической модели системы АУ ЭП	Рук.	3								■						
10	Оптимизация САР электропривода	Инженер	10								■	■					
11	Разработка программы имитационного	Инженер	11									■	■				
12	Оценка эффективности полученных результатов	Рук.	2											■			
13	Технико-экономические расчеты	Инженер	8												■		
14	Вопросы безопасности и экологичности проекта	Инженер	8												■	■	
15	Составление пояснительной записки	Инженер	4													■	
	Общее время на проект		111														
	Время работы инженера		95														
	Время работы руководителя		16														

5.6. Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

Все необходимое оборудование и материалы имеются в лаборатории НПФМехатроника-ПРО, поэтому расчет материальных затрат и затрат на спец. оборудование не проводится.

5.6.1. Основная заработная плата исполнителя темы

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20–30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы представлен в таблице 10.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату и рассчитывается по формуле:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

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

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

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

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб. Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = 53594 \cdot \frac{10,4}{237} = 2351 \text{ руб}$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн (таблица 11).

Таблица 11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	52	52
- выходные дни	14	14
- праздничные дни		
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни	14	14
Действительный годовой фонд рабочего времени	237	237

Месячный должностной оклад работника (руководителя):

$$Z_m = Z_{tc} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 27484 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 53594 \text{руб}$$

где Z_{tc} – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30 процентов от Z_{tc});

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчет основной заработной платы представлен в таблице 12.

Таблица 12 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Z_{tc} ,руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m ,руб.	$Z_{дн}$,руб.	T_p ,раб. дн.	$Z_{осн}$,руб.
Руководитель	27484	0,3	0,2	1,3	53594	2351	16	37616
Инженер	17808	0,3	0,2	1,3	34725	1523	95	144685
Итого								182301

5.6.2. Расчет дополнительной заработной платы

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

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} = 0,12 \cdot (37616 + 144685) = 21876 \text{ руб}$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы, принятый на стадии проектирования за 0,12.

5.6.3. Отчисления во внебюджетные фонды

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0,302 \cdot (37616 + 4514) = 12723 \text{ руб}$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Отчисления во внебюджетные фонды

	Основная заработная	
Руководитель проекта	37616	4514
Студент	144685	17362
Коэффициент отчислений во		0,302
Итого		
Руководитель		12723
Инженер		48938

5.6.4. Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов. Их величина определяется по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\sum \text{статей}) \cdot k_{\text{нр}}$$

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

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%. Накладные расходы составили:

$$Z_{\text{накл}} = (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + Z_{\text{внеб}}) \cdot 0,16 = (182301 + 21876 + 61661) \cdot 0,16 = 259508 \cdot 0,16 = 42534,08 \text{ руб.}$$

5.6.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведено в таблице 14.

Таблица 14 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб
1. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	182301
2. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	21876
3. Отчисления во внебюджетные фонды	61661
4. Накладные расходы	42534
5. Затраты на научные и производственные командировки	-
6. Контрагентские расходы	-
7. Бюджет затрат НТИ	308372

5.7. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования определяется как:

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}$$

где $I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Стоимость всего проекта не меняется в зависимости от исследуемого типа двигателя, т. к. трудозатраты равны для всех трех вариантов. Поэтому интегральные показатели финансовой эффективности равны:

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{СД1}} = I_{\text{фин.р}}^{\text{Д2}} = I_{\text{фин.р}}^{\text{Д3}} = 1$$

Ресурсоэффективность проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum_{i=1}^n a_i \times b_i$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания

n – число параметров сравнения.

Результаты расчёта интегрального показателя ресурсоэффективности схем приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Сравнительная оценка характеристик вариантов проекта

Критерии / Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Электропривод постоянного тока	Асинхронный электропривод	Синхронный электропривод
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	3	3	5
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,10	2	2	4
3. Помехоустойчивость	0,10	2	2	3
4. Энергосбережение	0,15	3	3	4
5. Надежность	0,25	4	4	5

6. Материалоемкость	0,15	4	4	4
Итого	1	3,2	3,2	4,4

Рассчитаем показатель ресурсоэффективности:

$$I_{p-CD1} = 5 \cdot (0,25 + 0,25) + 4 \cdot (0,1 + 0,15 + 0,15) + 3 \cdot 0,1 = 4,4$$

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

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{испi}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{CD1} = \frac{I_{p-CD1}}{I_{фин.р}^{CD1}} = \frac{4,4}{1} = 4,4$$

$$I_{D2} = \frac{I_{p-CD2}}{I_{фин.р}^{D2}} = \frac{3,2}{1} = 3,2$$

$$I_{D3} = \frac{I_{p-D3}}{I_{фин.р}^{D3}} = \frac{3,2}{1} = 3,2$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных (таблица 16).

Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп2}}{I_{исп1}}$$

Таблица 16 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	СД1	Д2	Д3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,4	3,2	3,2
3	Интегральный показатель эффективности	4,4	3,2	3,2
4	Сравнительная эффективность вариантовисполнения	1	0,727	0,727

На основе проведенных расчетов и значений интегральных показателей эффективности можно сделать вывод о том, что применение асинхронных электроприводов и приводов с двигателями постоянного тока для управления трубопроводной арматурой хоть и по сей день остается хорошим способом, синхронный электропривод является более эффективным вариантом решения данной задачи. Переход к электроприводу с синхронным двигателем с постоянными магнитами наиболее целесообразен в момент реструктуризации производства или в тех производственных процессах, где применение других представленных способов нецелесообразно. Также переход к СДПМ желателен для повышения эффективности производства в долгосрочном периоде.

6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

6.1. Введение

Целью данного раздела является описание обеспечения безопасности и экологичности лаборатории НПФ Мехатроника - ПРО, в которой исследуются режимы работы электропривода запорной арматуры с применением синхронного двигателя с постоянными магнитами.

В разделе будет рассмотрено обеспечение необходимых условий труда в соответствии с действующими нормативными документами, а также вопросы производственной и экологической безопасности и безопасности в чрезвычайных ситуациях.

Площадь рабочего помещения составляет 125 кв.м, на которой размещается 7 персональных рабочих места с ПК и 4 экспериментальных стенда.

Основным рабочим оборудованием для исследования электропривода является ПК с необходимыми программными средствами и исследуемый синхронный двигатель запорной арматуры.

6.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Трудовые отношения регулируются Трудовым кодексом Российской Федерации [4]:

- Продолжительность рабочей недели не должна превышать 40 часов в неделю (пятидневная с двумя выходными, выходные дни: суббота и воскресенье). Работнику предоставляется право лично устанавливать время и режим рабочего дня путем утверждения индивидуального графика работы с работодателем. Работнику предоставляется ежегодный отпуск с сохранением места работы (должности) и среднего заработка в количестве 28 календарных

дней.

- Месячная заработная плата работника, отработавшего за этот период норму рабочего времени и выполнившего трудовые обязанности, не может быть ниже установленного федеральным законом минимального размера оплаты труда.

- Дисциплина труда - обязательное для всех работников подчинение правилам поведения, определенным в соответствии с настоящим Кодексом, иными федеральными законами, коллективным договором, соглашениями, локальными нормативными актами, трудовым договором.

Работник научно-производительной фирмы дает согласие на обработку персональных данных и имеет право на доступ к его персональным данным в порядке, определенном статьей 14 Федерального закона от 27.07.2006 № 152-ФЗ

«О персональных данных» [5]. Согласие может быть отозвано в любое время на основании личного письменного заявления.

Согласно «ГОСТ 12.2.032-78. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования», место для работы за ПК и взаиморасположение всех его элементов должно соответствовать антропометрическим, физическим и психологическим требованиям. При компоновке рабочей зоны инженера следует учитывать следующие организационные мероприятия:

- Обеспечить высоту рабочей поверхности в пределах 680-760 мм, высоту поверхности с клавиатурой примерно 650 мм.

- Рабочее место с ПЭВМ, при работе, вызывающей значительное умственное напряжение, рекомендуется изолировать перегородками от других работников в помещении.

- конструкция рабочего стола должна позволять осуществить оптимальное расположение необходимых предметов труда и оборудования, согласно требованиям, предъявляемым к рабочему процессу [6].

6.3. Производственная безопасность

В данном разделе рассматривается и анализируется ряд вредных и опасных факторов, возникающих и влияющих на разработку, изготовление и эксплуатацию. Во время исследования часто возникают определенные вредные и опасные факторы, которые нужно регулировать и соблюдать по ГОСТу 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы, Классификация»(таблица 17).

Таблица 17 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
Опасные и вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего	Опасные и вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего, устанавливаются
Повышенный уровень шума	СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к
Отсутствие или недостаток необходимого естественного освещения	обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [7].
Отсутствие или недостатки необходимого искусственного освещения	Требования к неблагоприятным характеристикам шума устанавливаются ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности [8].
Опасные и вредные производственные факторы, связанные с электрическим током	Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [9].
	Требования к обеспечению средств защиты работника от поражения электрическим током устанавливаются ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация [10].

6.4. Анализ опасных и вредных производственных факторов

6.4.1. Опасные и вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего

Показатели микроклимата вызывают заболевания в зависимости от того, как они изменяются. Неблагоприятные значения микроклиматических показателей могут стать причиной снижения производственных показателей в работе, привести к заболеваниям работающих.

Например, повышение температуры, относительной влажности воздуха, уменьшение скорости его движения приводят к уменьшению теплообмена, перегреву организма, расстройству нервной системы. Понижение температуры, повышение относительной влажности, скорости движения воздуха приводят к увеличению теплообмена, переохлаждению организма, также к расстройству нервной системы.

Показатели микроклимата:

- Температура воздуха;
- Скорость движения воздуха;
- Относительная влажность воздуха;
- Мощность теплового излучения.

Оптимальные и допустимые нормы микроклимата представлены в таблице 18 [11].

Таблица 18 – Оптимальные и допустимые нормы микроклимата

Оптимальные нормы			
Сезон года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	21-23	60-40	0,1
Теплый	22-24	60-40	0,1

Допустимые нормы			
Сезон года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	19-24	75-15	0,1-0,2
Теплый	20-28	75-15	0,1-0,3

Для достижения оптимальных показателей микроклимата впро

– Оборудование помещений системами обогрева.

Установка различных типов радиаторов, конвекторов, систем с тепловентиляторами.

– Установка различных систем очистки, вентиляции и кондиционирования воздуха.

– Использование воздушных завес.

6.4.2. Повышенный уровень шума

В лаборатории рядом с рабочим местом, источником шума являются лабораторные установки.

Шум, возникающий при работе производственного оборудования и превышающий нормативные значения, воздействует на центральную и вегетативную нервную систему человека, органы слуха. Основное физиологическое воздействие шума заключается в том, что повреждается внутреннее ухо, возможны изменения скорости дыхания, а также изменения кровяного давления, сужение кровеносных сосудов, расширение зрачков глаз.

Допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука и эквивалентные уровни звука и звукового давления на рабочих местах производственных помещений представлены в таблице 19 [8].

Таблица 19 – Допустимые уровни шума

Помещения, рабочие места	Уровни звукового давления (ДБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	уровни звука, дБА
Помещения для размещения шумного оборудования	103	91	83	77	73	70	68	66	64	80

Для защиты от шума предусматриваются:

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

6.4.3. Недостаточная освещенность рабочей зоны

Источниками света могут быть как естественные, так и искусственные объекты. Свет влияет на физиологическое состояние человека, правильно организованное освещение стимулирует протекание процессов высшей нервной деятельности и повышает работоспособность. При недостаточном освещении человек работает менее продуктивно, быстро устает, растет вероятность ошибочных действий, что может привести к травматизму. В зависимости от длины волны, свет может оказывать возбуждающее (оранжево-красный) или успокаивающее (желто-зеленый) действие

Естественное освещение помещений осуществляется посредством проникновения дневного света через световые проемы в наружных

ограждающих конструкциях. Главной особенностью естественного освещения является его изменчивость в широких диапазонах в зависимости от времени дня и года, ряда других факторов. Длительное пребывание в условиях дефицита естественного света приводит к нарушению физиологического равновесия в организме человека и развитию патологического состояния, получившего название «световое голодание». Наименьшие нормативные значения коэффициента естественного освещения для производственных помещений при совмещенном освещении представлены в таблице 20 [9].

Таблица 20 – Наименьшие нормативные значения коэффициента естественного освещения для III разряда зрительных работ

Разряд зрительных работ	Нормативные значения коэффициента естественного освещения $e_n, \%$ при совмещенном освещении	
	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении
III	2,02	0,7

Искусственное освещение используется с целью проведения работ в темное время суток, а также в дневное время, при условии невозможности обеспечить нормированное значение коэффициента естественного освещения. Для искусственного освещения применяют электрические люминесцентные светильники, в данном случае 10 штук, размер каждого составляет 60 x 60 см, которые располагаются над рабочими поверхностями равномерно

По нормативу [9] освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

6.4.4. Опасные и вредные производственные факторы, связанные с электрическим током

Опасность поражения человека электрическим током оценивается величиной тока, проходящего через его тело, или напряжением прикосновения. Это означает, что опасность поражения током зависит от схемы включения человека в цепь, напряжения сети, режима нейтрали, степени изоляции токоведущих частей от земли, емкости линии, рода тока и т.д. Электрический ток вызывает местные и общие нарушения в организме. Местные изменения проявляются ожогами ткани в местах выхода и входа электрического тока. При воздействии тока высокого напряжения возможны расслоение тканей, их разрыв, иногда полный отрыв конечности [12].

Для обеспечения защиты от поражения электрическим током применяют следующие методы:

- Изоляция токоведущих частей.
- Изоляция рабочего места.
- Заземление
- Зануление рабочего места.
- Защитное отключение.
- Использование средств индивидуальной защиты (диэлектрические ботинки, перчатки, резиновые коврики, инструмент с изолированными рукоятками).

6.5. Экологическая безопасность

В процессе исследования и при работе исследуемого оборудования возможны различные источники загрязнения окружающей среды.

6.5.1. Защита селитебной зоны

В целях обеспечения безопасности населения и в соответствии с Федеральным законом "О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения" от 30.03.1999 № 52-ФЗ [13], вокруг объектов и производств, являющихся источниками воздействия на среду обитания и здоровье человека устанавливается специальная территория с особым режимом использования, размер которой обеспечивает уменьшение воздействия загрязнения на атмосферный воздух (химического, биологического, физического) до значений, установленных гигиеническими нормативами.

6.5.2. Защита атмосферы

В процессе разработки и эксплуатации в помещении могут выделяться различные газообразные отходы, например, испарения в процессе пайки, химические выделения, входящие в состав вышедших из строя конденсаторов и иных электронных элементов и т.п. Перед выбросом воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения.

6.5.3. Защита гидросферы

Также имеются регулярные жидкие отходы, которые образуются в результате пользования водопроводом, туалетом и т.д. Такие отходы поступают в городскую канализацию и далее проходят стандартный процесс очистки на очистных сооружениях.

6.5.4. Защита литосферы

При обращении с твердыми отходами: бытовой мусор (отходы бумаги,

отработанные специальные ткани для протирки офисного оборудования и экранов мониторов, пищевые отходы); отработанные люминесцентные лампы; офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства – надлежит руководствоваться Постановлением Администрации г. Томска от 11.11.2009 г. №1110 (с изменениями от 24.12.2014): бытовой мусор после предварительной сортировки складировать в специальные контейнеры для бытового мусора (затем специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку); утратившее потребительские свойства офисное оборудование передают специальным службам (предприятиям) для сортировки, вторичного использования или складирования на городских мусорных полигонах

6.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В процессе производства и эксплуатации синхронного электропривода наиболее вероятными являются чрезвычайные ситуации техногенного характера, а именно, возникновение пожара.

Основными причинами пожаров являются [14]:

- причины электрического характера (короткие замыкания, перегревпроводов);
- удар молнии;
- разряд зарядов статического электричества.

Существенную роль в пожарной безопасности электроустановок играют правильный выбор и режим работы электрооборудования с учетом пожароопасности и взрывоопасности помещений, применение молниеотводов и отводов электростатических зарядов.

Место проведения исследования, согласно классификации производств попожарной опасности [15], относится к классу Б, в связи с наличием горючих волокон или пыли. Наиболее вероятным источником взрыва может послужить короткое замыкание.

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

Во избежание ЧС необходимо проводить комплекс организационных и технических мероприятий по пожарной профилактике. Системы взрыво- и пожаросигнализации также являются эффективным методом профилактики пожаров.

6.7. Выводы по разделу

В данном разделе были определены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности труда. Так же рассмотрены вредные факторы при производстве и эксплуатации электропривода. Были описаны организационно– технические мероприятия, которые способствуют снижению влияния вредных факторов на человека.

Далее было выявлено влияние электропривода на окружающую среду как при производстве, так и при эксплуатации. И рассмотрена наиболее вероятная чрезвычайная ситуация на данном производстве.

Помещение лаборатории НПФ Мехатроника-ПРО в отношении опасности поражения людей электрическим током является помещением без повышенной опасности, в котором отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность [16]. По взрывопожарной и пожарной опасности помещение относится к категории Б (взрывопожароопасное).

Специалисты по охране труда субъектов электроэнергетики, контролирующие электроустановки, должны иметь группу V по электробезопасности и допускаются к выполнению должностных обязанностей в порядке, установленном для электротехнического персонала [17].

Категория тяжести труда на предприятии относится к группе Ib (энергозатраты организма 140-174 Вт). Это такие работы, которые производятся сидя, стоя или связаны с ходьбой, или сопровождаются

физическим напряжением.

Электропривод трубопроводной арматуры относится к IV категории объекта, оказывающего негативное воздействие на окружающую среду [18].

Заключение

Целью выпускной квалификационной работы являлось исследование электропривода трубопроводной арматуры на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами. Были рассмотрены основные типы трубопроводной арматуры с их преимуществами и недостатками, а также был произведен обоснованный выбор электропривода и редуктора.

Для исследуемого электропривода была рассчитана силовая часть, произведена оптимизация контуров тока, контура скорости и контура положения. Опираясь на требования, предъявляемые к электроприводу трубопроводной арматуры, было принято решение использовать отечественный двигатель марки ДСМ-0,75-1000-1-Д-У2. Характеристики данного двигателя очень хорошо подходят для управления трубопроводной арматурой.

Промежуточным результатом работы стала разработка имитационной модели синхронного электропривода в программе Matlab Simulink. В данной программной среде было реализовано векторное управление выбранным двигателем, произведены процессы пуска, останова и наброса нагрузки. Не менее важной частью является рассмотрение процесса уплотнения, которое также было симитировано в Matlab Simulink.

Конечным результатом данной работы стал анализ переходных процессов, полученных в ходе испытаний исследуемого электропривода, который дал понять, что разработанный электропривод соответствует всем техническим требованиям.

Список используемой литературы

1. Производственно-техническая компания «НОРМАТИВ» [Электронный ресурс]: Классификация трубопроводной арматуры по области применения – URL: <https://normativ.spb.ru/articles/klassifikaciya-truboprovodnoy-armaturi/> (Дата обращения 13.05.2023)
2. Вольдек А.И. Электрические машины: учеб. для вузов. – 2-ое изд., перераб. и доп. - Л.: Энергия, 1974.
3. Основы регулируемого электропривода: антиучебник. – URL: http://privod.news/files/anti_end.pdf (Дата обращения 15.05.2023)
4. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 25.02.2022). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901807664>. – Текст: электронный.
5. Федеральный закон "О персональных данных" от 27.07.2006 N 152-ФЗ (последняя редакция). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901990046>. – Текст: электронный.
6. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003913>. – Текст: электронный.
7. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115>. – Текст: электронный.
8. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200118606>. – Текст: электронный.
9. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054197>. – Текст: электронный.
10. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200000277>. – Текст: электронный.

11. ГОСТ 12.1.005-88. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003608>. – Текст: электронный.
12. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200161238>. – Текст: электронный.
13. Федеральный закон "О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения" от 30.03.1999 N 52-ФЗ (последняя редакция). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901729631>. – Текст: электронный.
14. ГОСТ Р 22.0.01-2016. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Основные положения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200136692>. – Текст: электронный.
15. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200071156>. – Текст: электронный.
16. Правила устройства электроустановок (от 2003-01-01). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030216>. – Текст: электронный.
17. ПРИКАЗ от 15 декабря 2020 года N 903н. Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573264184>. – Текст: электронный.
18. ПОСТАНОВЛЕНИЕ от 31 декабря 2020 года N 2398. Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573292854>. – Текст: электронный.
19. ООО НПО «Сибирский машиностроитель» [Электронный ресурс]: Малогабаритные взрывозащищенные электроприводы «ГУСАР» с интегрированной системой управления Э33, Томск, 2016 г. URL: <https://www.nposibmach.ru/product/cable/s-elektronnoj-sistemoj-upravleniya-e33/#> (дата обращения: 10.05.2022).

20. Калачев И.Ю. Векторное регулирование (Заметки практика) - 2013, 78 с.

21. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Челябинск: ЮУрГУ, 2004 – 328 с.