

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 (специальность) 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение школы (НОЦ) Отделение электроэнергетики и электротехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЛЕНТОЧНОГО ВЕСОДОЗАТОРА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

УДК 62-83-523:681.26

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM07	Рындин Павел Станиславович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Александр Юрьевич	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП	Клемашева Елена Игоревна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

По разделу на иностранном языке:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Воробьева Виктория Владимировна	к.ф.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Гарганеев Александр Георгиевич	д.т.н., профессор		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ

13.04.02 электроэнергетика и электротехника

Код результата	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий.
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла.
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, выработывая командную стратегию для достижения поставленной цели.
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном языке, для академического и профессионального взаимодействия.
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия.
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки.
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки.
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы.
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен выбирать серийные и проектировать новые объекты профессиональной деятельности.
ПК(У)-2	Способен применять методы создания и анализа математических моделей, позволяющих прогнозировать свойства и поведение объектов профессиональной деятельности.
ПК(У)-3	Способен разрабатывать, реализовывать и осуществлять контроль выполнения технических и организационных мероприятий, направленных на энергосбережение и повышение энергетической эффективности.
ПК(У)-4	Способен формулировать технические задания, анализировать различные варианты и искать компромиссные решения.
ПК(У)-5	Способен проектировать и организовывать учебный процесс по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий.

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

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Гарганеев А.Г.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации <i>(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)</i>
--

Студенту:

Группа	ФИО
5AM07	Рындин Павел Станиславович

Тема работы:

Асинхронный электропривод ленточного весодозатора непрерывного действия	
Утверждена приказом директора (номер, дата):	344-50/с 10.12.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p>	<p>Разработка электропривода ленточного весодозатора непрерывного действия, предназначенного для весового дозирования кокса или железосодержащей руды; Электродвигатель с параметрами:</p> <p style="margin-left: 20px;">$P_{ном} = 5,5 \text{ кВт}$ - номинальная мощность;</p> <p style="margin-left: 20px;">$U_{1н} = 380 / 220 \text{ В}$ - номинальное напряжение;</p> <p style="margin-left: 20px;">$S_{ном} = 4\%$ - номинальное скольжение;</p> <p style="margin-left: 20px;">$\cos(\Phi) = 0,91$ - коэффициент мощности;</p> <p style="margin-left: 20px;">Число пар полюсов $2 \cdot p = 2$ ($p=1$);</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов)</i></p>	<p>Теоретические сведения о ленточных весодозаторах; Выбор и расчет мощности электродвигателя; Моделирование короткозамкнутого асинхронного двигателя во вращающейся системе координат; Моделирование схемы в среде MATLAB Simulink; Разработка структурной схемы асинхронного электропривода с векторным управлением; Разработка функциональной схемы электропривода на базе асинхронного двигателя и преобразователя частоты.</p>
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Черемискина Мария Сергеевна
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Клемашева Елена Игоревна
Раздел на иностранном языке	Воробьева Виктория Владимировна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение; назначение, устройство и принцип работы асинхронного электропривода ленточного весодозатора непрерывного действия; заключение.	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Александр Юрьевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM07	Рындин Павел Станиславович		

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

Группа	ФИО
5AM07	Рындин Павел Станиславович

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение (НОЦ)	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	1. Анализ и оценка конкурентоспособности НИ; 2. SWOT-анализ.
2. Разработка устава научно-технического проекта	1. Цели и результат проекта. 2. Организационная структура проекта. 3. Ограничения и допущения проекта.
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	1. Формирование плана разработки; 2. Разработка графика Ганта. 3. Формирование бюджета затрат НИ. 4. Определение рисков проекта.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Проведение оценки экономической эффективности, ресурсоэффективности и сравнительной эффективности различных вариантов исполнения

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Сегментирование рынка
2. Оценка конкурентоспособности технических решений
3. Диаграмма FAST
4. Матрица SWOT
5. Иерархическая структура работ
6. График проведения НТИ
7. Проектная организационная структура

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП	Клемашева Елена Игоревна	канд.экон.наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM07	Рындин Павел Станиславович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 5AM07		ФИО Рындин Павел Станиславович	
Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение (НОЦ)	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/ специальность	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Тема ВКР:

Электропривод ленточного весодозатора непрерывного действия	
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:</i> электропривод ленточного весодозатора непрерывного действия.</p> <p><i>Область применения:</i> предприятия металлургической, горнорудной, химической промышленности.</p> <p><i>Рабочая зона:</i> промышленный цех, склад, ангар.</p> <p><i>Размеры помещения:</i> производственное помещение 3x2,5</p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> установка электропривода ленточного весодозатора, трансформатор.</p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования,</i> осуществляющиеся в рабочей зоне: запуск электродвигателя, настройка электропривода в соответствии с необходимыми параметрами работы ленточного весодозатора.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения 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"> – Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018); – ГОСТ 12.2.033-78 «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ стоя»; – МР 2.2.7.2129-06 «Режимы труда и отдыха работающих в холодное время года на открытой территории или в неотапливаемых помещениях»; – МР 2.2.8.0017-10 «Гигиена труда. Средства коллективной и индивидуальной защиты. Режимы труда и отдыха работающих в нагревающем микроклимате в производственном помещении и на открытой местности в теплый период года»
<p>2. Производственная безопасность при эксплуатации</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Вредные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Повышенный уровень шума; – неудовлетворительный микроклимат (температура, влажность, подвижность воздух); – Повышенный уровень вибрации; – Повышенный уровень производственной пыли; – Недостаток естественного света. <p>Опасные производственные факторы:</p>

	<p>– Электрический ток.</p> <p>Средства коллективной защиты:</p> <ul style="list-style-type: none"> - к средствам защиты от повышенного уровня шума относятся устройства: звукоизолирующие, звукопоглощающие; глушители шума; автоматического контроля и сигнализации; - к средствам защиты от повышенного уровня вибрации относятся устройства: виброизолирующие, виброгасящие и вибропоглощающие; автоматического контроля и сигнализации; - к средствам защиты от поражения электрическим током относятся: оградительные устройства; устройства автоматического контроля и сигнализации; изолирующие устройства и покрытия; устройства защитного заземления и зануления; устройства автоматического отключения; предохранительные устройства; - к средствам нормализации воздушной среды относят: устройства для поддержания нормируемой величины барометрического давления; вентиляции и очистки воздуха; кондиционирования воздуха; локализации вредных факторов; отопления; автоматического контроля и сигнализации; дезодорации воздуха. - к средствам нормализации освещения производственных помещений и рабочих мест относятся: источники света; осветительные приборы; светозащитные устройства; <p>Средства индивидуальной защиты:</p> <ul style="list-style-type: none"> - средства защиты органов дыхания: респираторы; - одежда специальная защитная: накидки; плащи, полуплащи; халаты; - средства защиты ног: сапоги; сапоги с удлиненным голенищем; ботинки; полуботинки. - средства защиты рук: рукавицы; перчатки; полуперчатки. - средства защиты головы: каски защитные; шлемы, подшлемники; - средства защиты глаз: очки защитные. - средства защиты лица: щитки защитные лицевые - средства защиты органа слуха: противושумные шлемы; противושумные вкладыши; противושумные наушники. <p><i>В работе будет производиться расчет системы искусственного освещения.</i></p>
<p>3. Экологическая безопасность при эксплуатации</p>	<p><i>Воздействие на литосферу:</i> загрязнение почвы вредными и химически опасными материалами.</p> <p><i>Воздействие на гидросферу:</i> загрязнение подземных вод и недр, поверхностных водотоков различными вредными веществами.</p> <p><i>Воздействие на атмосферу:</i> загрязнение атмосферы производственной пылью.</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации</p>	<p><i>Возможные ЧС:</i> пожар (возгорание); взрыв; разрушение конструкции цеха, склада; Землетрясение;</p> <p><i>Наиболее типичная ЧС:</i> пожар (возгорание).</p>
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p>	

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM07	Рындин Павел Станиславович		

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение электроэнергетики и электротехники
 Период выполнения: осенний / весенний семестр 2021/2022 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.12.2021 г.	Литературный обзор	5
15.02.2022 г.	Общие вопросы разработки и теоретические сведения	10
10.03.2022 г.	Расчет мощности электродвигателя	10
12.04.2022 г.	Моделирование схемы в MATLAB Simulink	10
21.04.2022 г.	Разработка структурной электрической схемы	10
02.05.2022 г.	Разработка функциональной схемы ЭП и ПЧ	20
15.05.2022 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
20.05.2022 г.	Социальная ответственность	10
25.05.2022 г.	Раздел на английском языке	5
27.05.2022 г.	Оформление результатов работы и выводов по работе. Формирование файла дипломной работы	10
28.05.2022 г.	Итог	100

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Александр Юрьевич	К.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гарганеев Александр Георгиевич	Д.Т.Н.		

Реферат

Настоящая выпускная квалификационная работа, содержит 157 страниц пояснительной записки, а также 40 таблиц, 43 рисунка и 31 источник использованной литературы.

Магистерская диссертация посвящена вопросам разработки электропривода ленточного весодозатора непрерывного действия, предназначенного для весового дозирования кокса или железосодержащей руды. Рассмотрены основы технологии производства агломерата и подготовки агломерационной шихты.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, весодозатор непрерывного действия, электропривод, преобразователь частоты, дозирование.

Актуальность данной работы обусловлена широким применением на производстве различных дозаторов, оптимизирование данного процесса позволяет значительно повысить качество технологического процесса.

Выбран двигатель переменного тока, для которого рассчитаны параметры схемы замещения и рассмотрены законы векторного управления скоростью асинхронного двигателя.

В выпускной квалификационной работе выбран преобразователь частоты Danfoss VLT 5016. Построены имитационные модели и произведен расчет переходных процессов.

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

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

Техническое задание

Разработать электропривод ленточного весодозатора непрерывного действия, предназначенного для весового дозирования кокса или железосодержащей руды.

К главному электроприводу ленточного весодозатора непрерывного действия предъявляются следующие требования:

- электропривод должен обеспечивать нормальную работу при питании от промышленной сети трехфазного переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 380 В. Максимальное отклонение напряжения питающей сети +10% -15%;
- электропривод должен обеспечивать работу электродвигателя в первом квадранте;
- режим работы электропривода – длительный (S1);
- диапазон регулирования скорости не менее 1:60;
- время разгона до рабочей скорости не более 3с;
- погрешность скорости при изменении нагрузки не более 2%;
- максимальное напряжение управления 10 В;
- электропривод должен быть безопасен и удобен в эксплуатации, иметь систему защит и сигнализацию;
- климатическое исполнение и категория размещения должны соответствовать условиям УХЛ4 по ГОСТ 15150-69.

Оглавление

Введение	15
1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС.....	17
1.1 Технологический процесс подготовки агломерата для доменного производства	17
1.1.1 Технологический процесс приготовления агломерата	17
1.1.2 Технологический процесс подготовки шихты.....	20
1.1.3 Важность процесса дозирования как элемента технологического процесса.....	21
1.1.4 Характеристики весодозаторов.....	23
1.2 Устройство и принцип действия ленточного весодозатора непрерывного действия	26
1.3 Требования, предъявляемые к весодозаторам.....	30
2 ПРОЕКТНО - РАСЧЁТНАЯ ЧАСТЬ.....	34
2.1 Кинематическая схема механизма	34
2.2 Расчёт и выбор мощности электродвигателя ленточного весодозатора непрерывного действия.....	36
2.2.1 Общие положения	36
2.2.2 Расчёт мощности двигателя	36
3 ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ	40
3.1 Расчёт основных параметров и характеристик асинхронного электродвигателя	40
3.2 Расчет параметров силовой цепи	40
3.3 Моделирование короткозамкнутого асинхронного двигателя во вращающейся системе координат	49
4 ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ	53
4.1 Принципы построения статических преобразователей частоты для электроприводов переменного тока	53
4.2 Разработка замкнутой системы регулирования скорости с векторным управлением	57
4.3 Оптимизация системы автоматического управления регулируемого электропривода.....	67
4.3.1 Расчет параметров силовой цепи	67
4.3.2. Оптимизация контура тока.	70
4.3.3. Оптимизация САР скорости.....	78
4.4 Исследование нелинейной САУ РЭП	82
5 ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ DANFOSS VLT 5016.....	87

5.1	Предпроектный анализ	90
5.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования	90
5.1.2	Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	91
5.1.3	FAST-анализ.....	93
5.1.4	SWOT-анализ.....	97
5.1.5	Оценка готовности проекта к коммерциализации	100
5.1.6	Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	102
5.2	Инициация проекта.....	103
5.3	Планирование управления научно-техническим проектом.....	105
5.4	Бюджет научного исследования	109
5.4.1	Основная заработная плата	110
5.4.2	Отчисления во внебюджетные фонды.....	111
5.4.3	Накладные расходы.....	111
5.4.4.	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	111
5.5	Организационная структура проекта	113
5.5.1	План управления коммуникациями проекта	113
5.5.2	Реестр рисков проекта	113
5.6	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности.....	114
5.6.1	Оценка абсолютной эффективности исследования	114
5.6.2	Оценка сравнительной эффективности исследования	120
6	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	123
	Введение.....	123
6.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности..	123
6.2	Производственная безопасность.....	125
6.2.1	Анализ опасных и вредных факторов на рабочем месте.....	125
6.2.2	Микроклимат.....	126
6.2.3	Шум и вибрация.....	128
6.2.4	Освещение	129
6.2.5	Повышенный уровень производственной пыли	133
6.2.6	Электробезопасность.....	133
6.3	Экологическая безопасность работы	135
6.4	Защита в чрезвычайных ситуациях	136
	Вывод по разделу	138
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	140

ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	154
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	157

Введение

Электропривод – это управляемая электромеханическая система. Ее назначение-преобразование электрической энергии в механическую энергию и обратно и управление этим процессом. Электропривод всегда имеет два канала – силовой и информационный. По первому транспортируется преобразуемая энергия, по второму осуществляется управление потоком энергии, а также сбор и обработка сведений о состоянии и функционировании системы, диагностика ее неисправностей. Таким образом, энергетическую основу производства в настоящее время составляет электропривод, технический уровень которого определяет эффективность функционирования технологического оборудования.

На современном этапе технического развития существенно возрастает роль автоматизированного электропривода, который в значительной степени стал определять прогресс в областях техники и технологии, связанных с воспроизводством механических движений, получаемых путем электромеханического преобразования энергии. Многообразие технологического оборудования и технических требований к характеру и качеству механических движений, с одной стороны, обеспечило прогресс в развитии теории и практики электропривода, а с другой стороны, привело к большому разнообразию систем электроприводов: от массового для объектов с относительно простыми движениями, до специальных со сложными и точными движениями.

Весьма важную роль, как в производительности оборудования, так и в качестве продукции играет совершенство электропривода. Кроме того, в современных условиях весьма актуальными являются проблемы экономичности и надёжности работы электропривода. Всё это достигается путём усовершенствования электродвигателей, преобразователей, аналоговых и цифровых схем управления, коммутационной аппаратуры и элементов защиты. Год от года усилиями рабочих, инженеров и техников, учёными научно-исследовательских и проектных институтов непрерывно совершенствуется технология производства, создается новое более производительное

оборудование с автоматизированным электроприводом. Ведутся работы над созданием новых систем с микропроцессорным автоматическим управлением. Расширение и усложнение выполняемых электроприводом функций, применение новых средств требуют высокого уровня подготовки специалистов, занятых монтажом, наладкой и эксплуатацией электроприводов. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в теории и практике регулируемого электропривода переменного тока, массовым промышленным регулируемым электроприводом продолжает оставаться электропривод постоянного тока, имеющий ряд преимуществ. Во-первых, это высокая надежность, экономичность широкий диапазон регулирования, плавность регулирования и высокое быстродействие. Во-вторых, существует большое количество комплектно поставляемых приводов постоянного тока, что обеспечивает высокую монтажную готовность и надежность, а также инвариантность их к изменениям в элементной базе или технологическом процессе. В-третьих, они просты в обслуживании и настройке. В состав регулируемого электропривода входят электродвигатель, силовой полупроводниковый преобразователь, силовой трансформатор, автоматический выключатель или предохранители. Регулируемый электропривод является основой для разработки следящего электропривода, обеспечивающего воспроизведение заданных траекторий движения рабочего органа производственного механизма.

Назначение электропривода ленточного весодозатора непрерывного действия – обеспечить требуемую скорость подачи сыпучих материалов (масса за время) для более качественной подготовки смеси.

Целью данной работы является: разработка электропривода предназначенного для весового дозирования кокса или железосодержащей руды согласно требованию технического задания, математическое моделирование и исследование при помощи различных программных средств.

1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

1.1 Технологический процесс подготовки агломерата для доменного производства

Для повышения качества производства черного металла в доменном производстве, обычно используется не сырая железосодержащая руда, а специально подготовленный агломерат. Для производства агломерата используют специальные агломерационные машины.

Агломерация – это термический процесс окусковывания измельченных материалов, являющихся железосодержащей частью руды, путем их спекания, с целью придания свойств, необходимых для доменной плавки.

Процесс агломерации основан на горении топлива в слое спекающегося материала, при просасывании через него воздуха при помощи эксгаустеров (дымососов). В результате сгорания развивается высокая температура (около 1500 С°). Зерна руды обезвоживаются, образуя жидкие и полужидкие фазы, с которыми происходят химические превращения входящих в них соединений. Материал спекается и при дальнейшей подаче воздуха остывает и быстро кристаллизуется, образуя, пористый спек – агломерат.

1.1.1 Технологический процесс приготовления агломерата

На рисунке 1 приведена условная схема, поясняющая технологический процесс производства агломерата металлургического производства. В бункера 1, которые находятся в корпусе шихтовых бункеров, подают железосодержащую часть шихты, а также и другие компоненты шихты. Кокс подвергают предварительному дроблению в корпусе измельчения топлива на конусной дробилке, после по конвейеру он поступает валковую дробилку, а затем в корпус шихтовых бункеров. Известняк аналогично подвергают предварительному дроблению в корпусе дробления известняка на молотковой дробилке, откуда он поступает также в корпус шихтовых бункеров. На каждую агломерационную машину приходится около двух десятков шихтовых бункеров емкостью по

50 м³ каждый. Бункера оборудованы питателями, переоборудованными под ленточные измерители веса – весодозаторы.

По технологической схеме дозирование компонентов шихты (коршуновского концентрата, смеси аглоруд, отходов металлургического производства, флюса, и топлива) производится из шихтовых бункеров 1, ленточными весодозаторами 2 на ленточный конвейер 3. Затем компоненты шихты поступают в барабанный смеситель 4, который находится в корпусе первичного смешивания. После ленточным транспортером 5 шихта перемещается в окомковыватель 6, где ее компоненты перемешиваясь и увлажняясь, окомковываются.

Далее подготовленная таким образом шихта подается в бункера распределители 7, где грохочением из шихты выделяют крупную фракцию, а затем остальную часть шихты. Уложенная таким образом на непрерывно движущуюся ленту из колосниковых тележек шихта поступает под зажигательный горн 8, где специальным устройством производится поджигание топлива (находящийся в шихте кокс) в увлажненной смеси шихтовых материалов и благодаря непрерывному просасыванию через шихту воздуха эксгаустерами 17 происходит спекание шихты. На каждую агломерационную машину приходится по два эксгаустера, которые выполнены на синхронных двигателях переменного тока.

Эксгаустер, с помощью вакуум-камер, создает разрежение под рабочей ветвью агломерационной машины, что обеспечивает удаление в атмосферу через дымовую трубу 18 газообразных продуктов сгорания. На участке газового коллектора 15 между агломерационной машиной и эксгаустерами продукты сгорания очищаются в газоочистительном устройстве 16 от пыли и просыпа шихты. С выхода агломерационной машины агломерат поступает на валковую дробилку 11, где происходит его дробление. Затем его отправляют на самобалансный (горячий) грохот 12, где крупный агломерат отделяется от мелкого и поступает снова на дробление, а мелкий агломерат поступает с грохота в охладитель 13.

После охлаждения агломерат подвергается грохочению на стационарном грохоте 14, где он разделяется на годный продукт и возврат, а также выделяется агломерат крупностью менее 120 мм для подстилочного слоя (постели), подаваемого на колосники специальных тележек агломерационной машины. После сортировки кондиционный агломерат транспортерами направляется в доменное производство.

Согласно технологической инструкции [1] в соответствии с требованиями доменной плавки агломерат должен иметь:

- постоянный с наименьшими отклонениями от базового состава химический состав;
- высокую механическую прочность;
- минимальное содержание мелочи.

Таким образом, для выплавки чугуна необходим качественный агломерат и, следовательно, для его качественного приготовления необходимо приготовить шихту с определенными концентрациями составных компонентов, то есть с определенным химическим составом.

1.1.2 Технологический процесс подготовки шихты

Основными исходными материалами, входящими в состав шихты, для производства агломерата являются:

- мелкая сырая железная руда;
- железорудный концентрат (продукт обогащения бедных руд);
- марганцевая руда;
- отходы металлургического производства (колосниковая пыль, окалина, чугунная стружка, возврат - продукт отсева мелочи от готового агломерата, шлам – железо содержащий осадок при мокром обогащении руды или мокром удалении пыли);
- флюсы – дробленый известняк и доломит;
- топливо – дробленый кокс, антрацит, угольная пыль.

В процентном соотношении состав шихты для изготовления агломерата приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Процентное соотношение состава шихты

Компонент шихты	Содержание, %
Коршуновский концентрат	66
Смесь аглоруд	21
Марганцевые добавки	2,5
Известняк	5,5
Коксовая мелочь	5

С целью повышения качества агломерата компоненты шихты проходят предварительную подготовку. Компонент измельчается и проходит операцию усреднения. Содержание химических элементов в каждом из используемых компонентов должно быть постоянно, но поступающем на производство сырье возможно значительное колебание химического состава. Поэтому постоянство достигается за счет усреднения компонентов на складе. Усреднение материала достигается послойной укладкой материала в штабель, непрерывно движущейся в челночном режиме работы разгрузочной тележкой и забора материала из полученного штабеля грейфером в разрез уложенным слоям. Рабочая площадь разбита на два участка, в первом формируется штабель, во втором происходит забор усредненного материала.

1.1.3 Важность процесса дозирования как элемента технологического процесса

Анализ работы металлургических предприятий показывает, что одним из факторов, оказывающих решающее влияние на технико-экономические показатели основных металлургических переделов, является качество подготовки шихты. Хорошо подготовить шихту – это, значит, обеспечить ее оптимальный гранулометрический состав и оптимальную влажность и, главное, определить и точно выдержать оптимальный химический состав шихты.

Если эти требования выполняются, то, конечно, при условии поддержания соответствующих технологических режимов агрегатов, перерабатывающих шихту, минимальны потери металлов в отвальные шлаки

доменной плавки, минимальны расходы дорогостоящих флюсующих добавок, топлива и электроэнергии, максимальна производительность агрегатов при высоком качестве выходных продуктов. Если же шихта не обладает перечисленными свойствами, то, как бы хорошо ни велись технологические процессы по ее переработке, достигнуть высоких технико-экономических показателей не удастся.

Так, для обеспечения высоких технико-экономических показателей доменной плавки необходимо, чтобы колебания содержания железа в агломерате не превышали 0,5% (абс.). Выполнить столь высокие требования можно только при высококачественном управлении процессами подготовки шихты, обеспечивающем компенсацию как возмущений по количественным соотношениям между компонентами шихты, так и возмущений по составу исходных материалов.

Поэтому проекты шихтоподготовительных цехов и отделений как неотъемлемую часть предусматривают системы автоматического дозирования. При этом значительно повышаются удельный вес, значимость этих участков, роль, которую они играют в цикле производства металлов.

Высокие темпы научно-технического прогресса, как в металлургии, так и в производстве приборов и средств автоматизации, а также в применении вычислительной техники создали условия для создания новых средств и методов контроля массы, автоматических приборов и систем аналитического контроля.

Возрастающие требования к интенсивности металлургических процессов, качеству получаемых продуктов, все больший учет экономических аспектов металлургического производства настоятельно требуют дальнейшего совершенствования систем автоматического дозирования.

Основные направления усовершенствования систем автоматической дозировки, следующие:

- переход от стабилизации массовых расходов дозируемых материалов или соотношений между ними к автоматической стабилизации химического

- состава шихты, основанной на прямом аналитическом контроле компонентов шихты и самой шихты;
- переход от стабилизации и регулирования мгновенных значений расходов компонентов шихты к управлению их усредненными значениями, при котором управляющие воздействия формируются по интегрально-накопительной информации;
 - использование системного подхода к автоматизации процессов дозирования в рамках создания АСУТП металлургического производства, включающего соответствующее шихтоподготовительное отделение. Это вызывается требованиями по обеспечению баланса между поступающими и расходуемыми потоками материалов. Для обеспечения непрерывности технологического процесса переработки этих материалов на всех этапах производства от исходного состояния до стадии конечного продукта, используется единая поточно-транспортная система (ПТС) подачи шихтовых материалов, включающая в себя совокупность вместилищ и транспортных средств.

В заключение этого раздела проиллюстрируем важность процесса дозирования как элемента технологического процесса на примере агломерационного производства черной металлургии. С внедрением систем автоматического дозирования компонентов шихты по массе точность дозирования возросла примерно на 50% и составляет (на разных фабриках и для разных продуктов) от $\pm 1,5$ до ± 4 процентов. В то же время качество агломерата (в частности содержание в нем железа, зависит от состава шихты) повысилось только на 10—17%. Таким образом, видим, что применение весодозаторов уже дает повышение качества продукции, но будущее связано с применением анализаторов химического состава дозируемых компонентов.

1.1.4 Характеристики весодозаторов

Для выполнения процесса весового дозирования различных материалов применяются самые различные типы устройств дозирования. Все они

независимо от их деления на различные группы по способу состоят из следующих основных узлов рисунок 2: питающего бункера и устройства; взвешивающего устройства; разгружающего устройства. Необходимо учитывать, что кроме точности, в процессе дозирования требуется обеспечивать заданную производительность, совместную работу нескольких агрегатов и др. Поэтому при дозировании между весоизмерительным устройством и бункером предусматривается установка специального устройства – питателя. Питатели состоят из трех основных узлов: рабочего органа, привода и несущей конструкции.

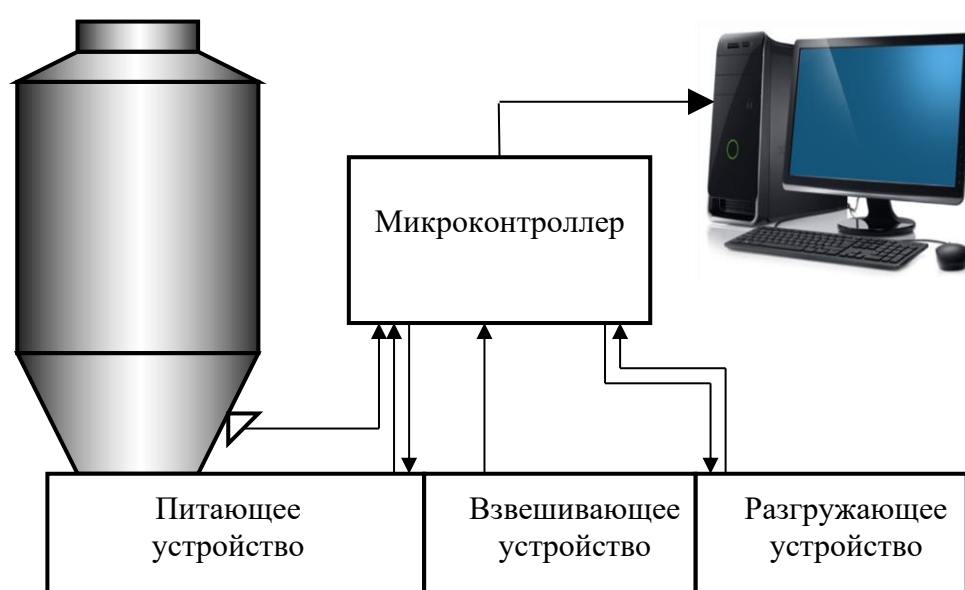


Рисунок 1 – Функциональная схема устройства весодозаторов

В качестве рабочих органов в существующих конструкциях питателей используются транспортеры, барабаны, тарелки, лотки и т.д. По характеру перемещения рабочего органа питатели делятся на питатели конвейерного типа (ленточные, пластинчатые, цепные – материал из бункера вытаскивается лентой конвейера, скорость подачи материала изменяется изменением скорости движения транспортерной ленты.); питатели с вращательным движением рабочего органа (шнековые – материал из бункера выбирается шнеком, скорость подачи материала изменяется изменением скорости вращения шнека; тарельчатые – материал из бункера подается на диск и сбрасывается с диска центробежной силой, скорость подачи материала изменяется изменением

скорости вращения диска; барабанные – материал из бункера выбирается барабаном, скорость подачи материала изменяется изменением скорости вращения барабана) и питатели с колебательным движением рабочего органа (кареточные, поршневые и маятниковые). По способу установки питатели делятся на стационарные и передвижные. Наиболее часто используются стационарные питатели. Передвижные питатели применяются, например, в тех случаях, когда материал хранится в батарее бункеров, расположенных по прямой линии над конвейером, по мере опорожнения одного бункера питатель передвигается и устанавливается у выпускного отверстия другого бункера.

Питатели обычно приводятся в действие электродвигателями. Вращение приводного вала питателя осуществляется через редуктор. Если регулирование производительности осуществляется без изменения скорости перемещения рабочего органа, то применяется трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. В системе, автоматического дозирования с точностью даже несколько процентов привод питателя должен строиться на базе двигателя постоянного тока. Регулирование частоты вращения вала двигателя в этом случае должно осуществляться изменением силы тока якоря. С этой целью применяют управляемые тиристорные преобразователи. Это существенно упрощает привод питателей и способствует расширению области применения автоматических дозаторов.

При точности дозирования, составляющей десятые доли процента, привод питателя должен строиться как высококачественная следящая система. Закон управления в такой системе должен быть таким, чтобы скорость подачи материала согласовывалась с процессом его взвешивания. В конечном итоге именно те порции материала, которые подаются в устройство измерения веса при подходе к заданному весу, и определяют успех всей операции дозирования. Следовательно, речь идет о перемещении ничтожно малых количеств материала. В то же время, исходя из требований обеспечения необходимой производительности, питатели комплектуются достаточно мощными двигателями. Чтобы обеспечить подачу мощным питателем при окончании

процесса взвешивания малых порций материала, и требуется высококачественная следящая система.

По принципу действия взвешивающего устройства дозаторы делятся на следующие два типа:

- весодозаторы непрерывного действия – обеспечивают взвешивание непрерывного движущего потока материала;
- весодозаторы дискретного действия – дозирование производится порциями определенной массы. Материал засыпается во взвешивающий бункер и при достижении заданной массы бункер опорожняется.

Основными техническими характеристиками при выборе весодозаторов являются:

- режим взвешивания (непрерывный или дискретный)
- весовая производительность Q , т/ч.
- объемная производительность V , м³/ч.
- объем питающего бункера $V_{\text{бунк}}$, м³.
- точность дозирования материала S , %.

1.2 Устройство и принцип действия ленточного весодозатора непрерывного действия

Одноагрегатный ленточный весодозатор непрерывного действия «СИГМА – ДНК2» предназначен для непрерывного весового дозирования сыпучих материалов в локальных системах и в автоматизированных системах управления технологических процессов на предприятиях металлургической, горнорудной, химической промышленности, промышленности строительных материалов и других отраслей промышленности.

Данный весодозатор выполнен (рисунок 3) на основе ленточного питателя конвейерного типа и представляет собой обычный транспортер с питающим бункером и встроенной взвешивающей платформой. Рабочим органом является прорезиненная конвейерная лента, огибающая два барабана – приводной и натяжной. Рабочая (верхняя) ветвь ленты лежит на опорных роликах или скользит по неподвижному металлическому настилу, а холостая

(нижняя) ветвь свободно провисает между барабанами. Над лентой расположены неподвижные борты, препятствующие растеканию материала в стороны. Все элементы конвейера смонтированы на металлической раме. Перед выпускным отверстием бункера (горловиной) расположена заслонка, позволяющая грубо регулировать подачу материала питателем. Точное автоматическое дозирование строится на базе электропривода постоянного тока с регулированием в первой зоне.

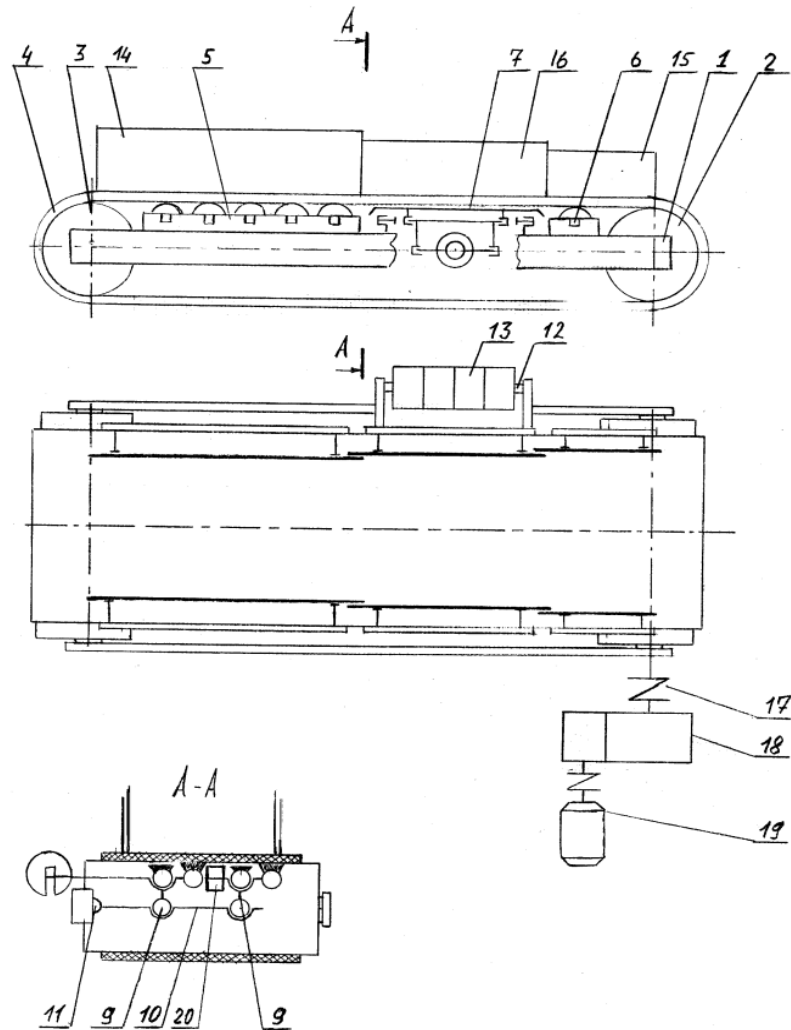


Рисунок 2 – Устройство и внешний вид ленточного весодозатора

Дозатор весовой состоит (см. рисунок 3) из несущей рамы 1, приводного барабана 2, натяжного барабана 3. Конвейерная лента 4, перемещается по грузоприёмной 5, сбрасывающей 6 и взвешивающей 7 платформам.

Взвешивающая платформа 7 расположена между грузоприёмной платформой 5 и сбрасывающей платформой 6 с фиксированным зазором и опирается на качающиеся относительно шарнира Т-образные рычаги 9, которые образуют 4-х звеньевой механизм с плоскопараллельным перемещением.

Тяга 10, соединяющая вертикальные плечи Т-образных рычагов, упирается в тензо-резисторный силоизмерительный датчик 11. Т-образные рычаги расположены в плоскости, перпендикулярной направлению движения ленты 4. На свободных концах одной пары рычагов 9 установлены постоянные контргрузы 20. Свободные концы второй пары Т-образных рычагов связаны планкой 12, на которой установлен объёмный контргруз 13, выполненный в виде набора гирь. Контргруз 13, помимо частичной компенсации тары, применяется для тарирования весового механизма дозатора. Коэффициент передачи рычагов от этих грузов на тензо-резисторный силоизмерительный датчик равен 2,5. При установке съёмного груза в 8кг, датчик нагружается усилием в 20 кгс.

Площадки 5, 6 и 7 имеют регулировочные винты, с помощью которых они выставляются на одном уровне по отношению к бочкам барабанов.

Ведомый барабан имеет натяжное устройство, с помощью которого, попеременно вращая винты с одной и другой стороны рамы, устанавливается необходимое натяжение ленты, а также устраняется сход ленты за счёт изменения перекоса барабана.

Приводной барабан посредством муфты 17 соединён с редуктором 18, приводящимся во вращение от электродвигателя 19.

Конвейер весовой снабжён бортами 14, 15, 16, расположенными соответственно на грузоприёмной 5, сбрасывающей 6 и взвешивающей 7 платформах. Борты снабжены резиновыми уплотнениями для предотвращения просыпки материала. Для чистки наружной и внутренней поверхностей ленты конвейер снабжён скреблами.

Принцип работы дозатора основан на стабилизации заданной производительности по принципу:

$$Q = G \cdot V = \text{const},$$

где: Q – производительность, кг/с;

G – масса материала на 1 м ленты, кг;

V – мгновенная скорость ленты, м/с.

При работе электродвигателя материал конвейерной лентой выносится из бункера и проходит взвешивающую платформу. Электрический сигнал пропорциональный величине массы находящегося на платформе материала поступает в систему дозирования. Одновременно в систему поступает электрический сигнал от тахогенератора или импульсного датчика электродвигателя, пропорциональный частоте его вращения, следовательно, пропорциональный скорости ленты. Произведение двух величин (G и V) сравнивается с заданной производительностью и в случае отклонения система вырабатывает регулирующее воздействие на изменение частоты вращения электродвигателя. Таким образом, плавное автоматическое изменение производительности осуществляется регулированием скорости в диапазоне от 0,1 до 6 м/мин.

Сигнал с тензодатчика обрабатывается специальным микропроцессором, который вычисляет производительность потока и прошедшую массу. Информация поступает в центральную ЭВМ. Микропроцессор может работать в режиме весов и дозатора. При дозировании в него вводится заданная производительность, которую он выдерживает, воздействуя через электропривод постоянного тока на скорость вращения двигателя питателя. Микропроцессор может работать и с любым асинхронным управляемым приводом, имеющим аналоговый вход.

Описанный выше одноагрегатный ленточный непрерывного действия «СИГМА – ДНК2» имеет следующие технологические характеристики:

- весовая производительность $Q = 80$ т/ч.
- объемная производительность $V = 200$ м³/ч.

- объем питающего бункера $V_{\text{бунк}} = 50 \text{ м}^3$.
- точность дозирования материала $S = 2 \%$.

Весодозатор может применяться везде, где необходимо измерять прошедшую массу сыпучего материала в потоке: загрузка автотранспорта, учет прошедшей массы зерна при спиртовом производстве, на мельницах, пивоваренных заводах, при производстве комбикормов и формировании помольных партий на мельницах.

Рассмотрим основные требования, предъявляемые к ленточным весодозаторам в металлургическом производстве.

1.3 Требования, предъявляемые к весодозаторам

Все элементы, входящие в состав электропривода, а именно: электродвигатель, механизм передачи движения от электродвигателя на барабаны, аппаратура и схема управления работой электродвигателя – должны удовлетворять следующим требованиям, вытекающим из технологического процесса и условий эксплуатации:

- электропривод должен обеспечивать нормальную работу при питании от промышленной сети трехфазного переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 380 В. Максимальное отклонение напряжения питающей сети +10% -15%;
- электропривод должен обеспечивать работу одного электродвигателя в первом квадранте;
- погрешность скорости при изменении нагрузки не более 2%;
- максимальное напряжение управления 10 В.;
- режим работы электропривода – длительный (S1);
- климатическое исполнение и категория размещения должны соответствовать исполнению УХЛ4 по ГОСТ 15150-69;
- электропривод дозатора необходимо рассчитывать на тяжелые условия эксплуатации: высокая запыленность, (то есть выделяется большое

- количество пыли, содержащей частицы извести, металла, кокса), диапазон рабочих температур от минус 5 до плюс 40 С°;
- в период наладки весодозатора, связанный с установкой конвейерной ленты настройкой оборудования, скорость должна быть значительно ниже рабочей скорости и не превышать 1 м/мин с тем, чтобы избежать возможных несчастных случаев с обслуживающим персоналом;
 - следует учесть, что момент, требуемый от двигателя, определяется величиной действующих сил трения, вследствие чего его величина может, значительно изменяться, поэтому необходимо стабилизировать скорость независимо от момента;
 - перегрузочная способность электропривода не менее 2;
 - разгон двигателя из состояния покоя до рабочей и наладочной скорости должен осуществляться плавно по причине большой динамической нагрузки с целью сохранения механических узлов дозатора. Время разгона до рабочей скорости не менее 3 секунд;
 - управление двигателем в режиме наладки производят при помощи кнопки наладка с установкой наладочной скорости встроенным потенциометром. При этом двигатель работает только тогда, когда нажата эта кнопка, и останавливается, как только она отпускается;
 - переход между рабочими скоростями дозатора должен осуществляться плавно, по причине большой динамической нагрузки с целью сохранения механических узлов дозатора;
 - система настройки и регулировки рабочей скорости должна позволять осуществлять бесступенчатое регулирование в диапазоне от 0,1 до 6 м/мин. Следовательно, диапазон регулирования скорости не менее 1:60;
 - электропривод должен быть безопасен и удобен в эксплуатации, иметь систему защит и сигнализацию;
 - при пуске необходимо предусмотреть звуковую сигнализацию пуска с целью предупреждения работающего персонала;

- в электрооборудовании необходимо предусмотреть блокировки, исключающие возможность пуска конвейера на рабочую скорость при открытых защитных щитах или решетках;
- для остановки дозатора, связанной с появлением в процессе работы неисправностей, влекущих за собой нарушение процесса порчу оборудования и угрозу безопасности обслуживающего персонала, необходимо предусматривать устройства автоматического выключения, обеспечивающие быструю остановку конвейера дозатора. Автоматическое выключение электродвигателя должно обязательно предусматриваться в случае попадание рабочего в опасную зону;
- в некоторых случаях аварийное отключение конвейера может осуществляться при помощи кнопки аварийного выключения, устанавливаемой на дозаторе или пульте управления, а так же барьерного выключателя;
- схема управления электропривода должна содержать приборы и аппараты, позволяющие осуществлять постоянный контроль скорости, мощности потребляемой электродвигателем, напряжение питающей сети. Все элементы управления должны обеспечивать удобное, надёжное и безопасное обслуживание при заправке, и т.д.;
- электропривод должен быть экономичен, иметь не высокую себестоимость и высокий коэффициент полезного действия в процессе работы;
- электропривод ленточного весодозатора включен в единую поточно-транспортную систему. Обеспечивающую непрерывность производства агломерата. Поэтому должен иметь два основных режима работы:
 1. Автоматизированный режим. Сигнал задания на скорость движения поступает из АСУ, там же вырабатываются сигналы включения. В АСУ уходят сигналы с тахогенератора и тензодатчика;
 2. Режим ручного управления. Задание на скорость движения поступает с пульта стационарного (местного) управления ленточными весодозаторами. Пуск и остановка производятся с пульта в частичной взаимосвязи с другими элементами ПТС.

- основным режимом работы является автоматизированный режим. В случае отказа АСУ оператором производится переключение на ручной режим стабилизации скорости.
- Время выхода на рабочую скорость из состояния покоя не более 5 секунд исходя из взаимосвязи с другими элементами поточно-транспортной системы производства.

Наряду с изложенными выше требованиями необходимо учитывать следующее: в отделениях подготовки шихты, выделяется большое количество пыли, содержащей частицы извести, металла, кокса. Проникновение этой пыли в электродвигатели и аппаратуру управления вызывает преждевременный выход её из строя и обусловленный этим простой. По этой причине необходимо устанавливать электродвигатели в защитном исполнении, продуваемые. Аппаратуру исполнения размещать в пыли не продуваемых шкафах и пультах управления.

2 ПРОЕКТНО - РАСЧЁТНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Кинематическая схема механизма

Кинематические схемы механической части электроприводов промышленных агрегатов могут быть весьма сложными, состоящими из нескольких инерционных масс и соединяющих их упругих связей. На практике многомассовую упругую механическую систему удастся свести к двухмассовой или одномассовой. В линеаризованных системах с целью упрощения расчетов используется одномассовая схема замещения.

Упрощенная кинематическая схема механизма имеет вид, приведенный на рисунке 4, и включает в себя:

- 1 – Тахогенератор;
- 2 – Электродвигатель;
- 3 – Жесткая муфта;
- 4 – Редуктор;
- 5 – Муфта;
- 6 – Конвейерный механизм.

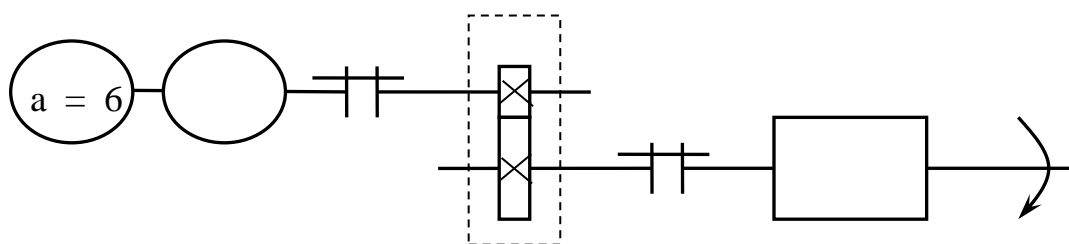


Рисунок 3 – Кинематическая схема механизма

Сделав допущение, что все элементы кинематической схемы реального механизма абсолютно жесткие и между ними отсутствуют зазоры, представим структурную схему механической системы электропривода в виде простейшей одномассовой рисунок 5.

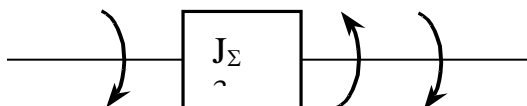


Рисунок 4 – Одномассовая структурная схема замещения механизма

При переходе к одномассовой системе необходимо привести все параметры системы к одной массе (вал двигателя). Приведение осуществляется из закона сохранения запаса кинетической энергии в системе. В данном случае эквивалентный момент инерции определяется по формуле

$$J_{\Sigma} = J_{дв} + J'_m + J_p + \frac{J''_m}{i_p^2} + \frac{J_M}{i_p^2}, \quad (1)$$

где $J_{дв}$ – момент инерции двигателя;

J_p – момент инерции редуктора (согласно технических параметров редуктора $J_p = 0,008 \text{ кг/м}^2$);

i – передаточное число редуктора ($i = 400$);

J'_m, J''_m – моменты инерции соединительных муфт

(принимая $J'_m = 0,1 \cdot J_{дв}$ и $J''_m = 0,1 \cdot J_M$);

J_M – момент инерции механизма конвейера (согласно техническому паспорту весодозатора «СИГМА – ДНК2» $J_M = 34,5 \text{ кг/м}^2$).

Максимальную частоту вращения вала двигателя определим по формуле

$$n_{дв.тр} = \frac{60 \cdot V \cdot i}{2\pi \cdot R_б} = \frac{60 \cdot 0,1 \cdot 400}{2 \cdot \pi \cdot 0,185} = 2066 \text{ об/мин}, \quad (2)$$

где $R_б$ – радиус приводного барабана;

V – максимальная требуемая линейная скорость движения ленты.

2.2 Расчёт и выбор мощности электродвигателя ленточного весодозатора непрерывного действия

2.2.1 Общие положения

Правильный выбор мощности приводных двигателей является необходимым условием надёжной и экономической работы электропривода.

Установка двигателей большей, чем требуется мощности, связана с увеличением их габаритов, массы, стоимости, снижением коэффициента загрузки, а это в свою очередь вызывает ухудшение коэффициента полезного действия. Установка двигателей меньшей мощности по сравнению с требуемой может привести: к недопустимой перегрузке, к повышению температуры отдельных частей сверх допустимой нормами, к сокращению срока их службы.

Поэтому для обеспечения нормальной работы электродвигателя необходимо, чтобы его мощность соответствовала требуемой, определяемой на основании технологических параметров оборудования.

2.2.2 Расчёт мощности двигателя

Расчет мощности приводного двигателя проведем по методике описанной в [3], позволяющей ориентировочно рассчитать мощность приводного двигателя для ленточного конвейера. Учет дополнительных потерь, учитывающих трение об взвешивающую платформу, произведем в соответствии с [5].

Согласно [3], требуемая мощность приводного двигателя определяется по формуле

$$P_{дв.т} = \frac{P_{\delta}}{\eta_{ред}}, \quad (3)$$

где $\eta_{ред}$ – коэффициент полезного действия редуктора, (согласно [5] принимаем $\eta_{ред} = 0,96$);

P_{δ} – мощность на валу приводного барабана определяется по формуле

$$P_{\delta} = (P_1 + P_{дон}) \cdot k_3, \quad (4)$$

где k_3 – коэффициент запаса согласно [3] принимаем $k_3 = 1,2$;

$P_{\text{доп}}$ – дополнительные затраты мощности (на трение груза о борта, придание грузу кинетической энергии и очистные устройства). Согласно [5] для небольших конвейеров, мощность дополнительных потерь составляет приблизительно 15% от основной мощности P_1 ;

P_1 – основная мощность определяется по формуле

$$P_1 = W_0 \cdot V, \quad (5)$$

где V – линейная скорость движения ленты конвейера, согласно техническому заданию $V = 0,1$ м/с;

W_0 – необходимое тяговое усилие для приведение во движение ленты конвейера определяется по формуле

$$W_0 = W_1 + W_2 + W_3, \quad (6)$$

где W_1 – тяговое усилие для приведения в движение ленты транспортного конвейера ориентировочно определяется по формуле

$$W_1 = k \cdot L_r \cdot (q_r + 2 \cdot q_l + q_p) \cdot w_p' \cdot \cos \beta \pm q_r \cdot \sin \beta, \quad (7)$$

где β – угол наклона конвейера к горизонту, $\beta = 0$ т.к. конвейер расположен горизонтально;

w_p' – распределенный коэффициент сопротивления движению ленты при тяжелых условиях эксплуатации согласно [5] принимаем $w_p' = 0,05$;

L_r – расстояние между осями приводного и натяжного барабанов;

k – Коэффициент позволяющий учитывать сосредоточенные силы сопротивления движению. Он уменьшается с увеличением длинны конвейера, так как при этом уменьшается доля сосредоточенных усилий, согласно [5] при длине конвейера 3-4 метра рекомендуется принимать $k = 10$;

q_r – распределенная линейная нагрузка создаваемая транспортируемым грузом, при известной производительность конвейера (согласно техническому заданию $Q = 80$ т/ч) определяется по формуле

$$q_z = \frac{Q \cdot g}{3,6 \cdot V} = \frac{80 \cdot 9,81}{3,6 \cdot 0,1} = 2180 \text{ Н/м} \quad (8)$$

($g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения);

$q_{л}$ – распределенная линейная нагрузка создаваемая лентой грузом, при известной ширине ленты (согласно техническому паспорту весодозатора «СИГМА – ДНК2» $B = 1,2 \text{ м}$) и ее весовой характеристике ($\gamma = 15 \text{ кг/м}^2$) определяется по формуле

$$q_{л} = B \cdot \gamma \cdot g = 1,2 \cdot 15 \cdot 9,81 = 176,6 \text{ Н/м}; \quad (9)$$

q_p – распределенная линейная нагрузка от вращающихся частей роликовых опор, при известной массе роликовой опоры (согласно техническому паспорту весодозатора «СИГМА – ДНК2» $m_p = 26 \text{ кг}$) и их количестве ($N = 6 \text{ шт}$) определяется по формуле

$$q_z = \frac{N \cdot m_p \cdot g}{Lr} = \frac{6 \cdot 26 \cdot 9,81}{3,2} = 477,8 \text{ Н/м}. \quad (10)$$

Подставив полученные значения в формулу 7, определяем необходимое тяговое усилие для приведения в движение ленты транспортного конвейера $W_1 = 10 \cdot 3,2 \cdot (2180 + 2 \cdot 176,6 + 477,8) \cdot 0,05 = 4817,6 \text{ Н}$.

Тяговое усилие, создаваемое в пункте загрузки питателя W_2 , возникает при загрузке ленточных конвейеров сыпучими материалами вследствие трения о стенки загрузочной воронки и дополнительного давления на приемную платформу под действием материала питающего бункера. Ориентировочно определяется по формуле

$$W_2 = \varepsilon \cdot V_{\text{бунк}} \cdot \rho_{\text{мат}} \cdot g \cdot w_p'' \quad (11)$$

где $V_{\text{бунк}}$ – объем питающего бункера дозатора (согласно техническому паспорту весодозатора «СИГМА – ДНК2» $V_{\text{бунк}} = 50 \text{ м}^3$);

$\rho_{\text{мат}}$ – насыпная плотность дозируемого материала (согласно техническому заданию $\rho_{\text{мат}} = 1050 \text{ кг/м}^3$);

ε – коэффициент учитывающий конструкцию загрузочной воронки питающего бункера согласно [5] принимаем $\varepsilon = 0,93$.

w_p'' – коэффициент сопротивления движению ленты по грузоприемной платформе при тяжелых условиях эксплуатации согласно [5] принимаем $w_p'' = 0,05$. Тогда подставив значения в формулу 11, получим

$$W_2 = 0,93 \cdot 50 \cdot 1050 \cdot 9,81 \cdot 0,05 = 23948,6 \text{ Н.}$$

Тяговое усилие создаваемое в пункте взвешивания W_3 , возникающее вследствие трения между лентой с грузом и взвешивающей платформой. Ориентировочно определяется по формуле

$$W_3 = L_{\text{вп}} \cdot (q_{\Gamma} + q_{\text{л}}) \cdot w_p''', \quad (12)$$

где $L_{\text{вп}}$ – длина взвешивающей платформы (согласно техническому заданию $L_{\text{вп}} = 0,8 \text{ м}$);

w_p''' – коэффициент сопротивления движению ленты по платформе при тяжелых условиях эксплуатации согласно [5] принимаем $w_p''' = 0,32$. Подставив значения в формулу 12, получим значение тягового усилия создаваемого в пункте взвешивания

$$W_3 = 0,8 \cdot (2180 + 176,6) \cdot 0,32 = 603,3 \text{ Н.}$$

При этом необходимое полное тяговое усилие на приводном барабане для приведения в движение ленты конвейера

$$W_0 = W_1 + W_2 + W_3 = 4817,6 + 23948,6 + 603,3 = 29369,5 \text{ Н.}$$

Основная мощность по формуле 5

$$P_1 = W_0 \cdot V = 29369,6 \cdot 0,1 = 2937 \text{ Вт.}$$

Мощность на валу приводного барабана по формуле 4

$$P_{\sigma} = (P_1 + P_{\text{дон}}) \cdot k_3 = 1,15 \cdot 2937 \cdot 1,2 = 4053 \text{ Вт.}$$

Требуемая мощность приводного двигателя формуле 3

$$P_{\text{дв.м}} = \frac{P_{\sigma}}{\eta_{\text{ред}}} = \frac{4053}{0,96} = 4222 \text{ Вт.}$$

3 ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

3.1 Расчёт основных параметров и характеристик асинхронного электродвигателя

Электропривод с асинхронным двигателем является самым массовым видом привода в промышленности, коммунальном и сельском хозяйстве. Такое положение определяется простотой изготовления и эксплуатации АД, их меньшими по сравнению с двигателями постоянного тока массой, габаритами и стоимостью, надёжностью в работе.

Из-за трудности охлаждения асинхронный двигатель выбираем на 25 – 50% больше расчетной мощности двигателя.

$$P_{\text{АД}} = (1,25 \div 1,5) \cdot P_{\text{РАСЧ}} = 1,25 \cdot 4222 = 5278 \text{ Вт};$$

Выбираем электродвигатель типа АИР100L2У2ИМ1081, со следующими паспортными данными [6]:

- номинальная мощность $P_{\text{НОМ}} = 5,5 \text{ кВт}$;
- номинальное напряжение $U_{\text{ИН}} = 380/220 \text{ В}$;
- номинальное скольжение $s_{\text{НОМ}} = 4\%$;
- коэффициент полезного действия $\eta = 85,7\%$;
- коэффициент мощности $\cos(\varphi) = 0,91$;
- кратность максимального момента $K_{\text{МАКС}} = M_{\text{МАКС}}/M_{\text{НОМ}} = 2,2$;
- кратность пускового момента $K_{\text{П}} = M_{\text{П}}/M_{\text{НОМ}} = 2$;
- кратность минимального момента $K_{\text{МИН}} = M_{\text{МИН}}/M_{\text{НОМ}} = 1$;
- кратность пускового тока $K_{\text{I}} = I_{\text{П}}/I_{\text{НОМ}} = 7,5$;
- число пар полюсов $2 \cdot p = 2$ ($p = 1$).

3.2 Расчет параметров силовой цепи

Для расчета характеристик асинхронного двигателя, как правило, пользуются его математической моделью, которая в общем случае представляется различными схемами замещения. Наиболее простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя является T-образная схема замещения (см. рисунок б).

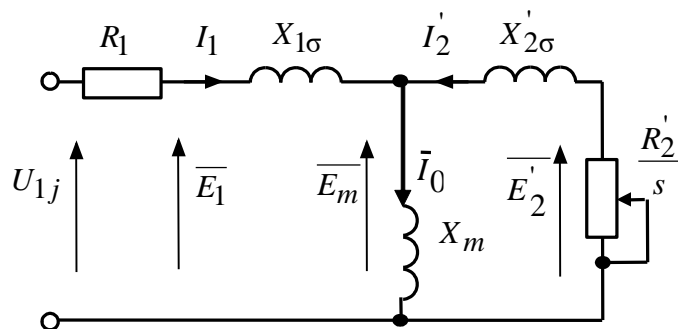


Рисунок 6 – Схема замещения асинхронного двигателя

На рис. 6 приняты следующие обозначения:

U_{1j} – фазное напряжение обмотки статора;

R_1 – активное сопротивление обмотки статора;

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

I_1 – ток обмотки статора;

E_1 – ЭДС обмотки статора;

R_2' – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;

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

I_2' – ток обмотки ротора, приведенный к обмотке статора;

$s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ – скольжение;

$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 / z_p$ – синхронная угловая скорость;

ω – угловая скорость асинхронного двигателя;

z_p – число пар полюсов;

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

E_m – ЭДС от главного магнитного потока машины;

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

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие принятой схеме замещения:

$$\bar{U}_{1j} - \bar{E}_m - j \cdot X_{1\sigma} \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 = 0;$$

$$\bar{E}_m + j \cdot X_{2\sigma}' \cdot \bar{I}_2' + R_2' \cdot \bar{I}_2' / s = 0;$$

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

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений, удовлетворяющая системе уравнений, изображена на рисунке 7.

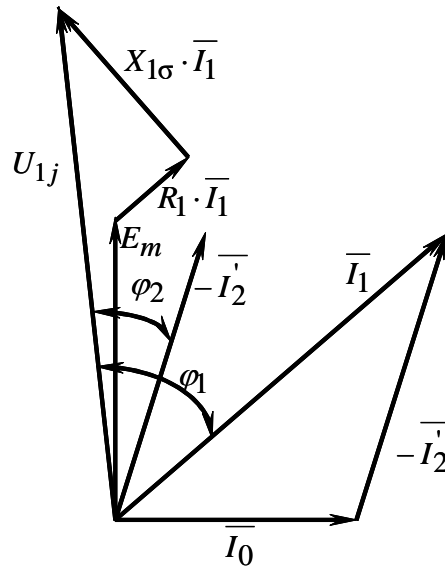


Рисунок 7 - Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Наиболее простым, дешевым и надежным электрическим двигателем является асинхронный короткозамкнутый двигатель (АД), поэтому его использование в регулируемом электроприводе представляет особый интерес. В данном электродвигателе возможности регулирования аналогичные возможностям изменения напряжения на якоре двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, в асинхронном электроприводе обеспечиваются путем изменения частоты напряжения и тока статорной обмотки. Для реализации этих возможностей необходимо осуществлять питание статорной обмотки двигателя от управляемого преобразователя частоты [12].

Наиболее эффективные способы регулирования скорости связаны с изменением его синхронной скорости.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} \quad (13)$$

Из (13) следует, что возможно применение двух способов регулирования:

- 1 – изменение частоты f_1 обмоток статора;
- 2 – изменение числа пар полюсов.

При частотном регулировании скорости АД следует отметить, что с одновременным изменением частоты напряжения статора изменяется и поток

асинхронного двигателя. В некоторых случаях для поддержания постоянства потока АД одновременно с изменением частоты f_1 меняют и напряжение обмоток статора U_1 или его ЭДС E_1 [13].

$$\Phi_1 = \frac{E_1}{K \cdot f_1} \approx \frac{U_1}{K \cdot f_1} \quad (14)$$

При изменении частоты и напряжения стремятся их регулировать в такой пропорции, чтобы рабочее скольжение двигателя было минимальным. В этом случае будут минимальны и потери в двигателе.

Согласно требованиям технологического процесса для электропривода ленточного весодозатора непрерывного действия необходимо применение такого закона управления, при котором бы величина критического момента электропривода оставалась постоянной. Близким к требуемым характеристикам обладает закон $\frac{U}{f} = \text{const}$, однако за счет падения напряжения на активном сопротивлении статора критический момент уменьшается с уменьшением частоты питающего напряжения, так как происходит увеличение тока статора. Однако, использование IR-компенсации (введение положительной обратной связи по току) позволяет компенсировать данный недостаток, и получить постоянное значение критического момента электропривода при различных частотах, что и необходимо для данного случая управления.

Определим параметры T-образной схемы замещения асинхронного двигателя [13] по его каталожным данным.

Скорость идеального холостого хода

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot 3,142 \cdot 50}{1} = 314,159 \frac{\text{рад}}{\text{с}} ;$$

Номинальный ток двигателя

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} \cdot \cos(\varphi_{\text{н}}) \cdot \eta_{\text{н}}} = \frac{5,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,91 \cdot 0,875} = 10,466 \text{ А} ;$$

Современные асинхронные двигатели проектируются таким образом, что наибольший КПД достигается при нагрузке на 10 – 15 % меньше номинальной. Коэффициент мощности при нагрузке равной $0,75 \cdot P_{\text{н}}$ значительно отличается от мощности при номинальной нагрузке, причем это отличие сильно зависит от

мощности двигателя и для известных серий асинхронных двигателей с достаточной для практики точностью подчиняется зависимости, приведённой на рисунке 16.

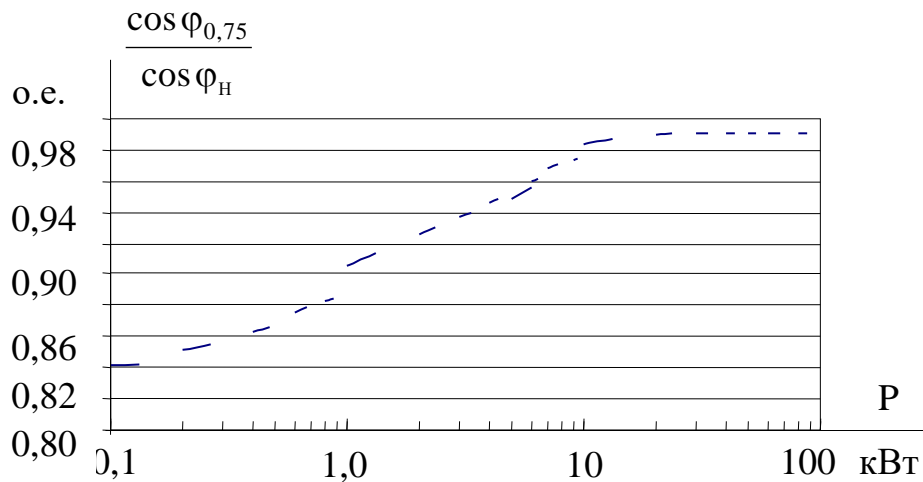


Рисунок 8 - Зависимость $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_H$ от мощности асинхронных двигателей

Определим ток статора при частичной нагрузке

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot \cos(\varphi_{p_*}) \cdot \eta_{p_*}} = \frac{0,75 \cdot 5,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,875} = 8,249 \text{ А}, \quad (15)$$

где $\cos(\varphi_{p_*})$ -коэффициент мощности при частичной нагрузке;

η_{p_*} - КПД при частичной нагрузке;

$p_* = P/P_H$ -коэффициент загрузки двигателя. Так как современные асинхронные двигатели проектируются таким образом, что наибольший КПД достигается при нагрузке на 10-15% меньше номинальной, поэтому принимаем $p_* = 0,75$.

Ток холостого хода асинхронного двигателя находится из выражения

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left[\frac{p_* \cdot I_{1H} \cdot (1 - s_H)}{1 - p_* \cdot s_H} \right]^2}{1 - \left[\frac{p_* \cdot (1 - s_H)}{1 - p_* \cdot s_H} \right]^2}} = \sqrt{\frac{8,249^2 - \left[\frac{0,75 \cdot 10,466 \cdot (1 - 0,04)}{1 - 0,75 \cdot 0,04} \right]^2}{1 - \left[\frac{0,75 \cdot (1 - 0,04)}{1 - 0,75 \cdot 0,04} \right]^2}} = 4,142 \text{ А}$$

Из формулы Клосса определяем соотношение для расчета критического скольжения

$$S_K = S_H \cdot \frac{K_{\text{МАКС}} + \sqrt{(K_{\text{МАКС}})^2 - (1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (K_{\text{МАКС}} - 1))}}{1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (K_{\text{МАКС}} - 1)} =$$

$$= 0,04 \cdot \frac{2,2 + \sqrt{2,2^2 - (1 - 2 \cdot 0,04 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,04 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1)} = 0,185 \quad (16)$$

где $\beta=1$.

Значения коэффициентов C_1 и A_1

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot K_i \cdot I_{\text{IH}}} = 1 + \frac{4,142}{2 \cdot 7,5 \cdot 10,466} = 1,03 ;$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{\text{IH}}^2 \cdot (1 - S_H)}{2 \cdot C_1 \cdot K_{\text{МАКС}} \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,04)}{2 \cdot 1,03 \cdot 2,2 \cdot 5,5 \cdot 10^3} = 5,59 .$$

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

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{S_K}\right) \cdot C_1} = \frac{5,59}{\left(1 + \frac{1}{0,185}\right) \cdot 1,03} = 0,847 \text{ Ом} .$$

Активное сопротивление статорной обмотки можно определить по формуле:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,03 \cdot 0,847 \cdot 1 = 0,873 \text{ Ом} .$$

Определим параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{S_K^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,185^2} - 1^2} = 5,308 .$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_{\text{КН}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 5,308 \cdot 1,03 \cdot 0,847 = 4,631 \text{ Ом} .$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора

$$X_{2\text{H}}' = 0,58 \cdot \frac{X_{\text{КН}}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{4,631}{1,03} = 2,61 \text{ Ом} .$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки

$$X_{1\text{H}} = 0,42 \cdot X_{\text{КН}} = 0,42 \cdot 4,631 = 1,947 \text{ Ом} .$$

По найденным активным и индуктивным сопротивлениям определяем величину критического скольжения

$$\text{-Двигательный режим } S_K = \frac{C_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2}} = \frac{1,03 \cdot 0,847}{\sqrt{0,873^2 + 4,631^2}} = 0,185;$$

$$\text{-Генераторный режим } S_K = \frac{C_1 \cdot R'_2}{-\sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2}} = \frac{1,03 \cdot 0,847}{-\sqrt{0,873^2 + 4,631^2}} = -0,185;$$

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

$$E_1 = \sqrt{(U_{IH} \cdot \cos(\varphi_{IH}) - R_1 \cdot I_{IH})^2 + (U_{IH} \cdot \sin(\varphi_{IH}) - X_{IH} \cdot I_{IH})^2} = \\ = \sqrt{(220 \cdot 0,91 - 0,873 \cdot 10,466)^2 + (220 \cdot 0,415 - 1,947 \cdot 10,466)^2} = 203,77 \text{ В.}$$

Индуктивное сопротивление намагничивания

$$X_{\mu H} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{203,77}{4,142} = 49,189 \text{ Ом.}$$

Используя найденные параметры схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором серии АИР100L2У2ИМ1081 произведем расчет и построение механических характеристик, для частот $f=50$ Гц; $f=40$ Гц; $f=30$ Гц; $f=20$ Гц. Данные, требуемые для расчета, сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Требуемые для расчета параметры схемы замещения

Заданные величины	Условное обозначение	Единица измерения	Численное значение
Активное сопротивление обмотки статора	R_1	Ом	0,873
Активное сопротивление обмотки ротора	R'_2	Ом	0,847
Индуктивное сопротивление статорной обмотки	X_1	Ом	1,947
Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенной к обмотки статора	X'_2	Ом	2,61
Индуктивное сопротивление намагничивания	$X_{\mu H}$	Ом	49,189

Для расчета электромеханических характеристик используем выражение

[13]

$$I_{1j}(s) = \sqrt{I_0^2 + \Gamma_{2j}(s)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot \Gamma_{2j}(s) \cdot \sin(\varphi_2(s)_j)}, \text{ где} \quad (17)$$

$$\sin(\varphi_2(s))_j = \frac{X_{KH} \cdot f_{j^*}}{\sqrt{(R_{\text{ЭКВ}} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{KH}^2 \cdot f_{j^*}^2)}} ; \quad (18)$$

$$\Gamma_{2j}(s) = \frac{U_{1j}}{\sqrt{(R_{\text{ЭКВ}} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{KH}^2 \cdot f_{j^*}^2) + (\frac{R_{\text{ЭКВ}} \cdot R_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{j^*}})^2}} . \quad (19)$$

Задаёмся несколькими значениями частоты вращения ω_i и строим естественную характеристику $\omega=f(M)$

Проведем анализ характеристики. Из графика механической характеристики определяем:

$\omega_0 = 0 \text{ рад/с}$	синхронная скорость;
$M(\omega) = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$	момент ХХ;
$\omega_n = \omega_0 \cdot (1 - s_n) = \frac{3000}{9.55} \cdot (1 - 0.04) = 301,571 \text{ рад/с}$	номинальная скорость;
$M_n = 19,264 \text{ Н} \cdot \text{м}$	номинальный момент;
$s_{кр} = 0.186 \quad \omega_k = 257,5 \text{ рад/с}$	критическое скольжение ;
$M_{\text{макс}} = 41,342 \text{ Н} \cdot \text{м}$	критический момент;
$s = 1$	скольжение в момент пуска;
$M_{\text{п}} = 16,022 \text{ Н} \cdot \text{м}$	пусковой момент;

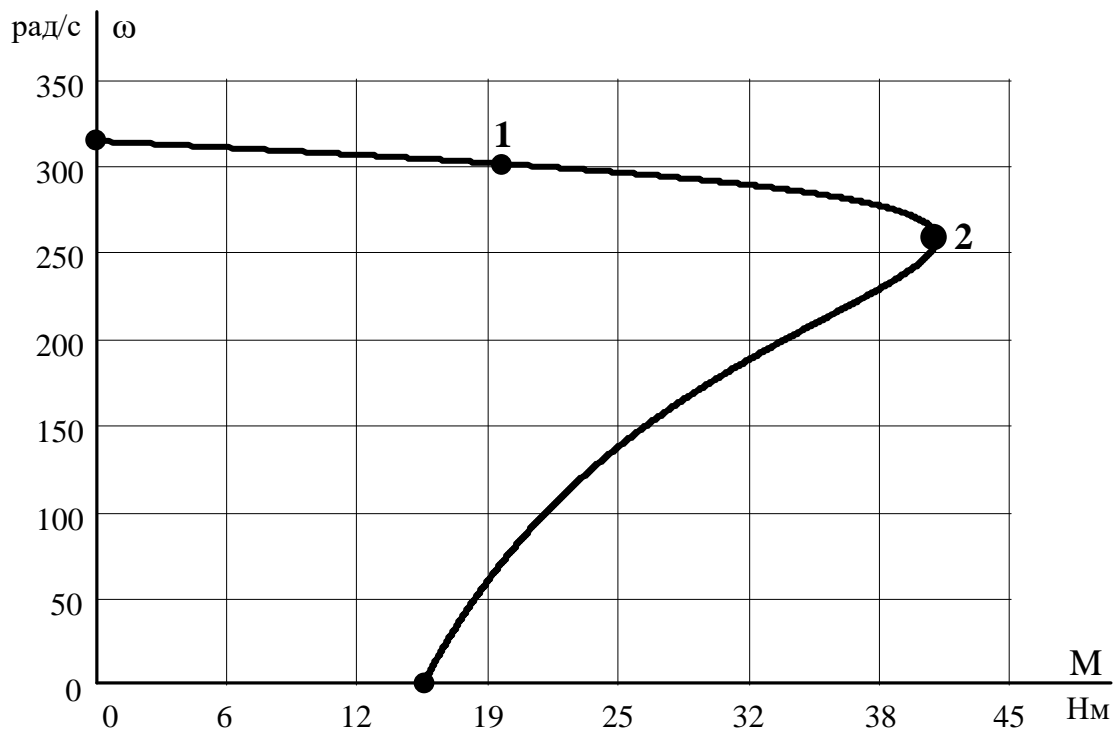


Рисунок 9 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя АИР100L2У2ИМ1081: 1-момент номинальный, 2-момент критический.

Эти же точки рассчитаем аналитически:

- | | |
|--|----------------------------|
| $\omega_0 = 0 \text{ рад/с}$ | синхронная скорость; |
| $M = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$ | момент ХХ; |
| $\omega_n = \omega_0 \cdot (1 - s_n) = \frac{3000}{9.55} \cdot (1 - 0.04) = 301,571 \text{ рад/с}$ | номинальная скорость; |
| $M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{5500}{301,571} = 18,24 \text{ Н} \cdot \text{м}$ | номинальный момент; |
| $s_{кр} = 0.186 \quad \omega_k = 255,76$ | критическое скольжение; |
| $M_{\text{макс}} = k_m \cdot M_n = 2.2 \cdot 18,24 = 40,128 \text{ Н} \cdot \text{м}$ | критический момент; |
| $s = 1$ | скольжение в момент пуска; |
| $M_{II} = k_{II} \cdot M_n = 2 \cdot 18,24 = 36,48 \text{ Н} \cdot \text{м}$ | пусковой момент; |

Вывод: Построенный график является верным на большей области построения, т.к. точки, определенные по графику, почти совпадают с

рассчитанными по паспортным данным. Из-за эффекта вытеснения тока момент пусковой не совпадает с рассчитанным.

3.3 Моделирование короткозамкнутого асинхронного двигателя во вращающейся системе координат

Итоговая система уравнений для построения математической модели асинхронного электропривода во вращающейся системе координат [13]

$$\begin{cases} r(1+T_1p)I_{1x} = U_{1x} + x_1'v_{KC}I_{1y} + \frac{k_2}{T_2}\Psi_{2x} + k_2v_r\Psi_{2y} \\ r(1+T_1p)I_{1y} = U_{1y} - x_1'v_{KC}I_{1x} + \frac{k_2}{T_2}\Psi_{2y} - k_2v_r\Psi_{2x} \\ \frac{(1+T_2p)}{T_2}\Psi_{2x} = k_2r_2I_{1x} + (v_{KC} - v_r)\Psi_{2y} \\ \frac{(1+T_2p)}{T_2}\Psi_{2y} = k_2r_2I_{1y} - (v_{KC} - v_r)\Psi_{2x} \\ H \cdot p \cdot v_r = \mu - \mu_c \\ \mu = k_2(\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}) \end{cases} \quad (20)$$

где $T_1 = \frac{x_1'}{r}$.

На рисунке 10 приведена структурная схема линеаризованной модели асинхронного электродвигателя, составленная по системе уравнений (20).

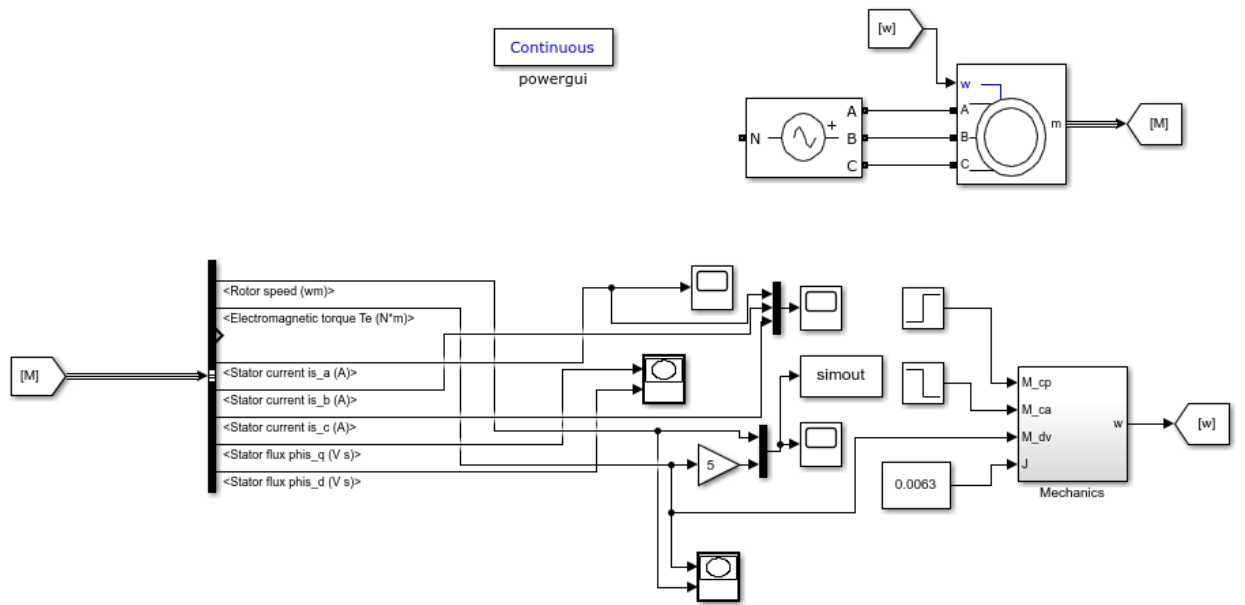


Рисунок 11 – Схема асинхронного электродвигателя в среде Matlab Simulink

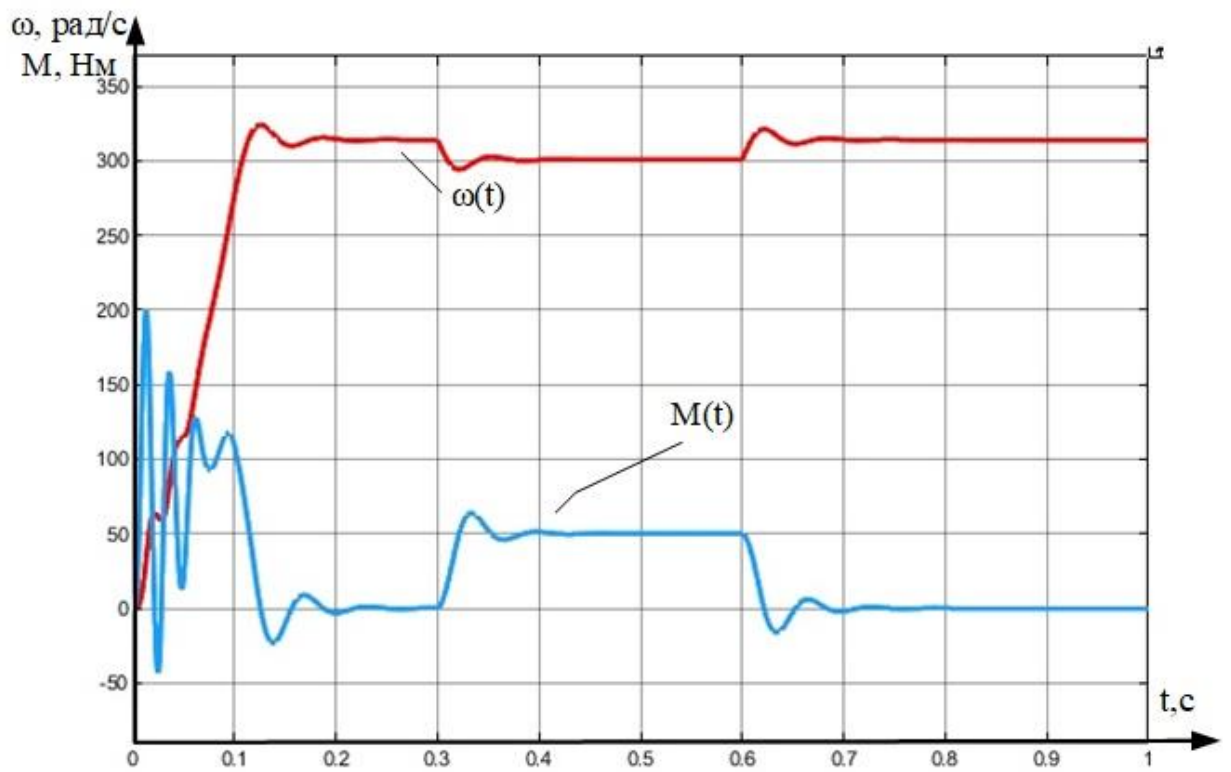


Рисунок 12 – Временная характеристика при пуске АД
на холостом ходу

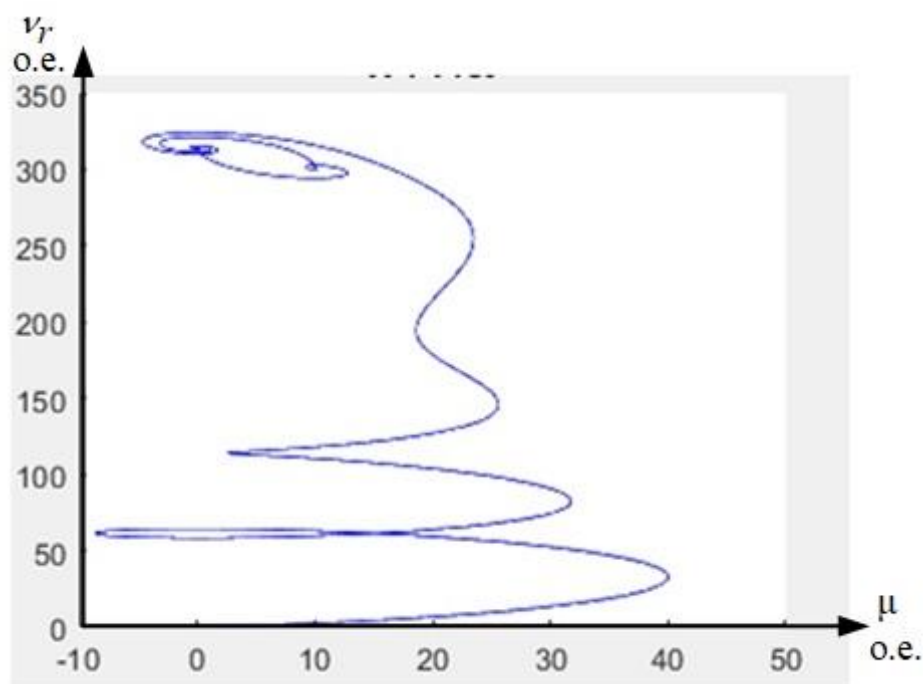


Рисунок 13 – Динамическая механическая характеристика при пуске АД на холостом ходу

Время переходного процесса, $t_{py2}^{(5)} = \tau \cdot t_B = 33 \cdot 0,00318 = 0,105$ с

Перерегулирование, $\sigma = 10\%$.

Установившееся значение скорости $w = v_r \cdot \omega_B = 1 \cdot 314,159 = 314,159$ рад/с.

Установившееся значение момента $M_{уст} = \mu \cdot M_B = 0,012 \cdot 38,08 = 0,46$ Н·м.

Анализ графиков переходных процессов показывает, что пуск двигателя на холостом ходу и без задатчика интенсивности приводит к значительному перерегулированию и колебанию скорости. Кроме этого, наличие колебаний электромагнитного момента во время разгона двигателя неблагоприятно сказывается на механике электропривода и двигателя в целом.

4 ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

4.1 Принципы построения статических преобразователей частоты для электроприводов переменного тока

Преобразователи частоты (ПЧ) для электроприводов преобразуют переменное напряжение питающей сети в переменное трехфазное напряжение с регулируемой частотой, напряжением и током. В настоящее время ПЧ в большинстве случаев выполняется на базе полностью управляемых силовых полупроводниковых ключей: силовых транзисторов, запираемых тиристоров, которые можно как открыть, так и закрыть сигналами, подаваемыми на их управляющие входы [12].

На рисунке 14 представлена функциональная схема электропривода переменного тока с асинхронным двигателем (АД). Напряжение питающей сети поступает на преобразователь частоты (ПЧ), и далее - подаётся на статорные обмотки АД. Микропроцессорная система управления формирует на выходе ПЧ трёхфазное напряжение требуемой частоты и амплитуды, в зависимости от применяемого закона управления АД.

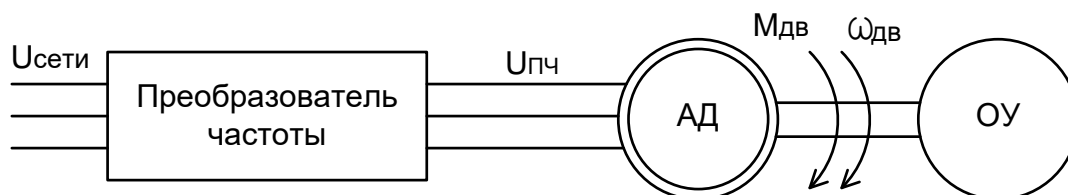


Рисунок 14 – Функциональная схема электропривода переменного тока

Функции управления ПЧ выполняет микроконтроллер, по своим параметрам и архитектуре идентичный с 8хС196МН. Функциональная схема микропроцессорной системы управления показана на рисунке 15.

Система управления преобразователем обеспечивает следующие функции:

- прямое цифровое управление, всеми элементами преобразователя, включая управление силовыми ключами инвертора в режиме ШИМ-модуляции на несущей частоте до 15 кГц;

- сопряжение с внутренними и внешними датчиками аналоговых сигналов в любом удобном для пользователя стандарте (0...10 В, ± 10 В, 4...20 мА, внешний резистор 2 кОм);

- сопряжение с внешней коммутационной аппаратурой рабочих станций и станций группового управления двигателями, с дискретными датчиками технологических переменных через порты ввода/вывода дискретных сигналов, в том числе гальванически развязанные;

- оперативное наблюдение за параметрами привода и технологическими переменными с помощью встроенного пульта управления с отображением текстовой информации на дисплее;

- оперативное управление преобразователем со встроенного пульта, от кнопочной станции, от внешнего контроллера через один из портов дискретных входов или по последовательному каналу линии RS-485.

- просмотр и модификация текущей установленной конфигурации системы управления, а также параметров привода и технологического процесса с пульта управления, с портативного компьютера по интерфейсу RS-232 в реальном времени, с удалённого компьютера или контроллера по интерфейсу RS-485 в реальном времени;

- автоматическое сохранение текущей конфигурации системы управления и заданных параметров в энергонезависимой памяти, возможность быстрого восстановления заводских уставок;

- мониторинг питания, возможность самозапуска привода после восстановления напряжения питания;

- мониторинг всех аварийных ситуаций в приводе с записью кода идентифицированных аварий, а также даты и времени аварии в энергонезависимую память, просмотр листинга аварийных ситуаций с пульта управления или с компьютера по последовательному каналу связи [14].

Выходы модуляторов ШИМ микропроцессорной системы через микросхемы драйверов IGBT подключаются к силовым ключам инвертора. Драйверы выполняют функции согласования между транзисторами IGBT и

управляющими цепями микропроцессорной системы. Кроме того, данные устройства реализуют защитные функции, снимая управляющие импульсы с силовых ключей при пропадании питающего напряжения и перегрузках по току.

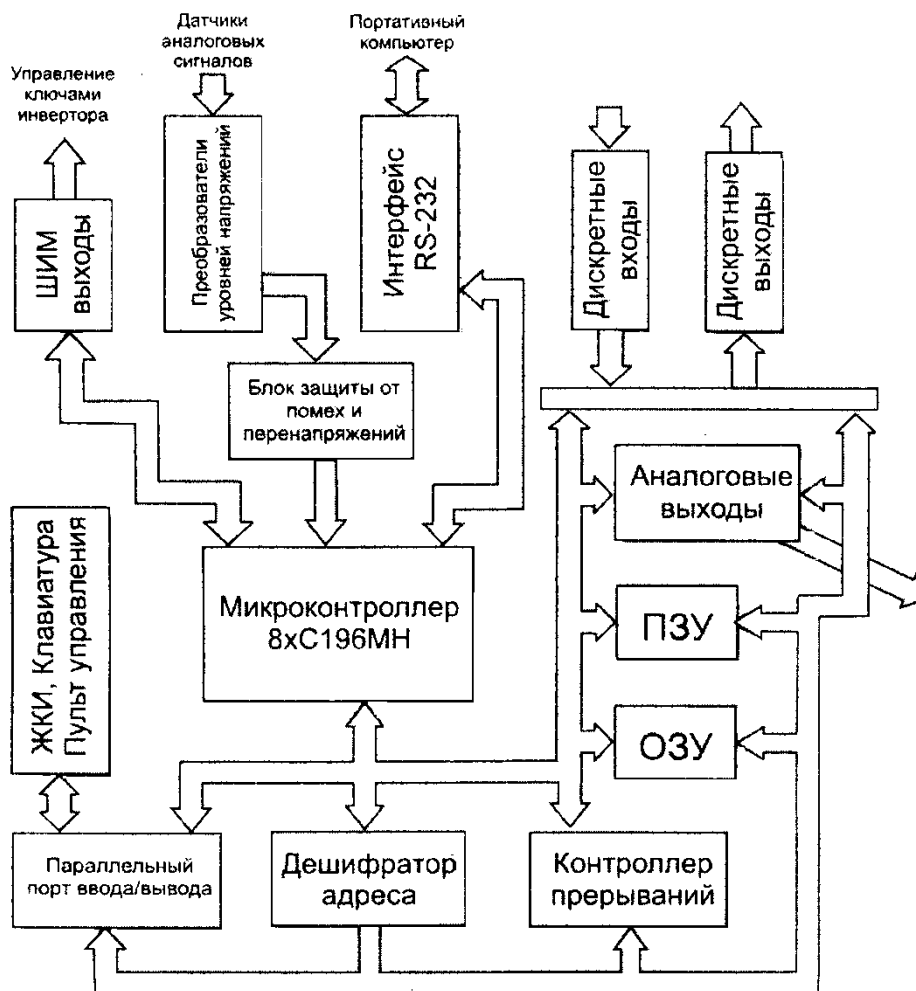


Рисунок 15 – Функциональная схема системы управления ПЧ

На основании проведенных расчетов, выбираем преобразователь частоты «Danfoss VLT 5016 HVAC» (производство фирмы «Danfoss», Германия) со следующими паспортными данными $P_{ном} = 15 \text{ кВт}$;

Выходные параметры:

$$I_{н.тнч.} = 32 \text{ А} ; U_{max} = 380 \text{ В} ;$$

Данный преобразователь частоты имеет следующие характеристики:

- 1) Корпус Compact IP20 или IP54;
- 2) Может изготавливаться без фильтра подавления высоких частот или с фильтром класса А1 и В;

3) Максимальная асимметрия для питающей сети 1,5% от U_H ;

Остальные характеристики приведены в таблице 3

Таблица 3

P_H	15 кВт
Инт.тпч	32 А
$I_{\text{макс}}$	35,2 А
$U_{\text{макс}}$	380 В
f_c	50(60) Гц
$\cos\varphi$	0,99
$I_{\text{кз макс}}$	64 А
$U_{\text{вых}}$	0-100% от $U_{\text{пит}}$
$f_{\text{вых}}$	0-120 Гц
$U_{\text{н.дв}}$	380 В
$f_{\text{дв}}$	50(60) Гц
$M_{\text{пуск}}$	110% в течении 1 мин.
$M_{\text{пуск}}$	160% в течении 1/2 мин.
Запаздывание	0,003 с
Разрешение по f	0,003 Гц
Дрег. скорости	1:1000
Мкр.разг	100%
$M_{\text{перегр.}}$	110%
Время изм. скорости	1-3600 с
Масса, m	21 кг
Влажность при работе	95% без конденсации
токр.	не более 40 °с
t_{min}	0- (-10) °с

Схема подключения преобразователя представлена на рисунке 30

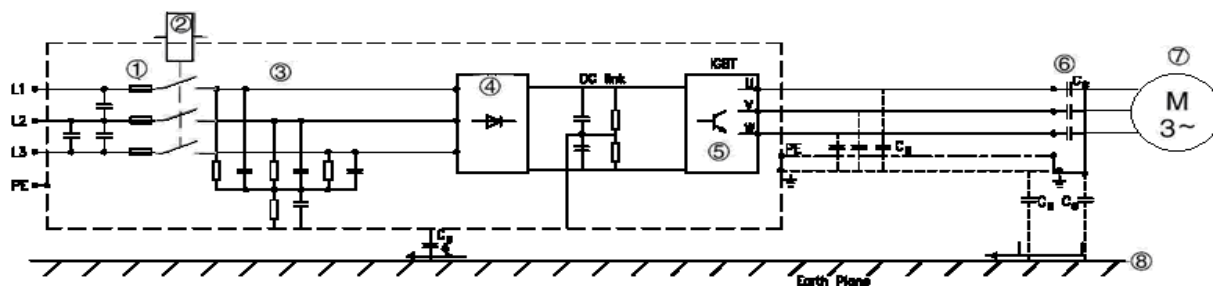


Рисунок 16 – Схема подключения преобразователя: 1 – сетевые предохранители, 2 – главный пускатель, 3 – сетевой дроссель, 4 – сетевой фильтр, 5 – Danfoss VLT 5016 HVAC, 6 – выходной дроссель или фильтр, 7 – электродвигатель, 8 – монтажная панель.

Для такого класса механизмов необходимо применение системы ПЧ – АД с векторным управлением и датчиком скорости, где диапазон регулирования равен 100.

4.2 Разработка замкнутой системы регулирования скорости с векторным управлением

В частотно-регулируемых асинхронных электроприводах векторное управление связано как с изменением частоты и текущих значений переменных (напряжения, тока статора, потокосцепления), так и с взаимной ориентацией их векторов в декартовой системе координат. При этом достигается наиболее качественное регулирование скорости, момента и тока асинхронного двигателя, как в статике, так и динамике. Бездатчиковые системы асинхронных электроприводов с векторным управлением применяются, когда диапазон регулирования скорости асинхронного двигателя не превышает $D \leq 1:100$.

Для механизмов, требующих диапазон регулирования скорости $D \leq 1:100$ (как в случае с рассматриваемым технологическим процессом экструзии) применяются системы векторного управления асинхронным электроприводом без датчика скорости.

Функциональная схема системы электропривода с векторным управлением асинхронным электроприводом без датчика скорости приведена на рис 17.

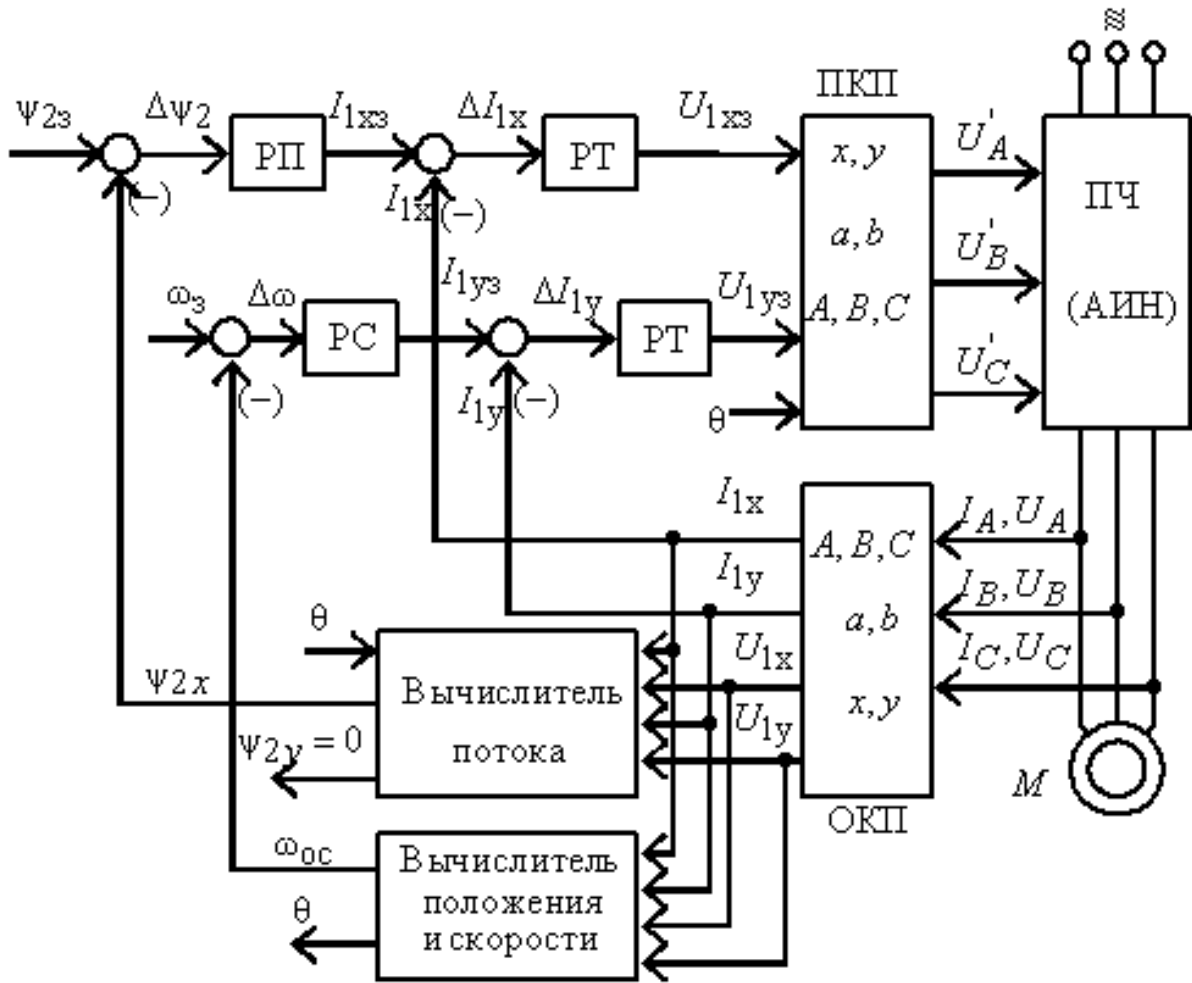


Рисунок 17 - Функциональная схема системы электропривода с бездатчиковым векторным управлением асинхронным электроприводом

Уравнения электромагнитного момента асинхронного двигателя может быть найдено в следующем виде:

$$M = \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2 \cdot X_2'} (\psi_{2x} \cdot I_{1y} - \psi_{2y} \cdot I_{1x}) \quad (21)$$

Если сориентировать систему координат по действительной составляющей потокосцепления ротора ψ_{2x} , то мнимая составляющая вектора потокосцепления ротора ψ_{2y} будет равна нулю. В этом случае момент асинхронного двигателя:

$$M = \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2 \cdot X_2'} (\psi_{2x} \cdot I_{1y}). \quad (22)$$

На основе выражения (22) строятся системы векторного управления асинхронным электроприводом с ориентацией по вектору потокосцепления ротора.

На рис. 17 приняты следующие обозначения физических величин:

$\psi_{2\zeta}$ – сигнал задания потокосцепления ротора;

ω_{ζ} – сигнал задания скорости вращения электропривода;

ψ_{2x} – сигнал, пропорциональный действительной составляющей потокосцепления ротора;

ψ_{2y} – сигнал, пропорциональный мнимой составляющей потокосцепления ротора;

$I_{1x\zeta}$ – сигнал задания действительной составляющей тока обмотки статора;

$I_{1y\zeta}$ – сигнал задания мнимой составляющей тока обмотки статора;

I_{1x} – сигнал, пропорциональный действительной составляющей тока статора асинхронного двигателя во вращающейся системе координат;

I_{1y} – сигнал, пропорциональный мнимой составляющей тока статора асинхронного двигателя во вращающейся системе координат;

$U_{1x\zeta}$ – сигнал задания действительной составляющей напряжения обмоток статора асинхронного двигателя во вращающейся системе координат;

$U_{1y\zeta}$ – сигнал задания мнимой составляющей напряжения обмоток статора асинхронного двигателя во вращающейся системе координат;

U_{1x} – составляющая вектора напряжения обмотки статора, ориентированная вдоль оси x вращающейся системы координат;

U_{1y} – составляющая вектора напряжения обмотки статора, ориентированная вдоль оси y вращающейся системы координат;

I_A, I_B, I_C – токи фаз обмоток статора асинхронного двигателя;

U_A, U_B, U_C – напряжения фаз обмоток статора асинхронного двигателя;

Схема содержит прямой (ПКП) и обратный (ОКП) координатные преобразователи.

В прямом координатном преобразователе управляющие сигналы переводятся в сигналы U'_A, U'_B, U'_C неподвижной системы координат, которые управляют инвертором.

Питание двигателя осуществляется от автономного инвертора напряжения со звеном постоянного тока. Регуляторы потока, скорости и тока выполнены во вращающейся системе координат, а система электропривода построена по принципу подчиненного регулирования.

Обратный координатный преобразователь сначала пересчитывает мгновенные значения напряжений трехфазной системы координат A, B, C в неподвижную систему координат a, jb :

$$U_{1a} = \frac{2}{3} \left[U_{1A} - \frac{1}{2}(U_{1B} + U_{1C}) \right], \quad (23)$$

$$U_{1b} = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_{1B} - U_{1C}).$$

Затем напряжения переводятся во вращающуюся систему координат x, jy :

$$U_{1x} = U_{1a} \cos \theta + U_{1b} \sin \theta, \quad (24)$$

$$U_{1y} = -U_{1a} \sin \theta + U_{1b} \cos \theta. \quad (25)$$

По этим же формулам выполняется обратное преобразование для расчета токов I_{1x}, I_{1y} .

Мгновенное значение пространственных углов поворота векторов потокосцепления, тока и напряжения вычисляются на основании скорости вращения поля статора:

$$\theta = \int_0^t \omega dt. \quad (26)$$

В современных электроприводах переменного тока потокосцепление ротора ψ_{2x} вычисляется через уравнения динамической модели асинхронного двигателя с помощью вычислителей потока различного типа. Уравнение для расчета потокосцепления ротора ψ_{2x} может быть получено из решения системы

уравнений, описывающих работу асинхронного двигателя в динамике во вращающейся системе координат:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\psi_{1x}}{dt} &= U_{1x} - \frac{R_1}{X_1 \cdot \sigma} \left(\psi_{1x} - \frac{X_m}{X_2} \psi_{2x} \right) + \omega_{kc} \cdot \psi_{1y}; \\
 \frac{d\psi_{1y}}{dt} &= U_{1y} - \frac{R_1}{X_1 \cdot \sigma} \left(\psi_{1y} - \frac{X_m}{X_2} \psi_{2y} \right) - \omega_{kc} \cdot \psi_{1x}; \\
 \frac{d\psi_{2x}}{dt} &= -\frac{R_2'}{X_2' \cdot \sigma} \left(\psi_{2x} - \frac{X_m}{X_1} \psi_{1x} \right) + (\omega_{kc} - \omega) \cdot \psi_{2y}; \\
 \frac{d\psi_{2y}}{dt} &= -\frac{R_2'}{X_2' \cdot \sigma} \left(\psi_{2y} - \frac{X_m}{X_1} \psi_{1y} \right) - (\omega_{kc} - \omega) \cdot \psi_{2x}.
 \end{aligned} \tag{27}$$

где

ω – скорость вращения ротора.

ψ_{1x} – составляющая вектора потокосцепления обмотки статора, ориентированная вдоль оси x вращающейся системы координат;

ψ_{1y} – составляющая вектора потокосцепления обмотки статора, ориентированная вдоль оси y вращающейся системы координат;

σ – коэффициент рассеяния.

Вычислитель потока решает совместно систему уравнений (27) относительно составляющих вектора потокосцепления ротора во вращающейся системе координат при $\omega_k = 2 \cdot \pi \cdot f_1$, (28)

где f_1 – частота напряжения обмоток статора двигателя.

В основу принципа построения систем векторного управления положено математическое описание асинхронного двигателя в неподвижной системе координат a, jb :

$$\begin{aligned}
\frac{d\psi_{1a}}{dt} &= U_{1a} - \frac{R_1}{X_1 \cdot \sigma} \left(\psi_{1a} - \frac{X_m}{X_2} \psi_{2a} \right); \\
\frac{d\psi_{1b}}{dt} &= U_{1b} - \frac{R_1}{X_1 \cdot \sigma} \left(\psi_{1b} - \frac{X_m}{X_2} \psi_{2b} \right); \\
\frac{d\psi_{2a}}{dt} &= -\frac{R'_2}{X'_2 \cdot \sigma} \left(\psi_{2a} - \frac{X_m}{X_1} \psi_{1a} \right) - \omega \cdot \psi_{2b}; \\
\frac{d\psi_{2b}}{dt} &= -\frac{R'_2}{X'_2 \cdot \sigma} \left(\psi_{2b} - \frac{X_m}{X_1} \psi_{1b} \right) + \omega \cdot \psi_{2a}; \\
\Psi_{1a} &= L_1 \cdot i_{1a} + L_m \cdot i_{2a} \\
\Psi_{2b} &= L_1 \cdot i_{1b} + L_m \cdot i_{2b}
\end{aligned} \tag{29}$$

Если предположить, что составляющие потокосцепления ротора ψ_{2a} и ψ_{2b} в неподвижной системе координат известны, то можно определить его модуль и угол поворота

$$\begin{aligned}
\psi_2 &= \sqrt{\psi_{2a}^2 + \psi_{2b}^2}, \\
\theta_\psi &= \arctg \left(\frac{\psi_{2b}}{\psi_{2a}} \right).
\end{aligned} \tag{30}$$

Зная угол поворота θ_ψ , можно легко вычислить синхронную скорость вращения двигателя, взяв производную от (30)

$$\omega = \frac{d\theta_\psi}{dt} = \frac{d \left(\arctg \left(\frac{\psi_{2b}}{\psi_{2a}} \right) \right)}{dt}. \tag{31}$$

Производная от $\arctg \alpha$ может быть найдено в виде [23]

$$\frac{d(\arctg \alpha)}{dt} = \frac{1}{1 + \alpha^2} \cdot \frac{d\alpha}{dt}. \tag{32}$$

Если $\alpha = \frac{\psi_{2b}}{\psi_{2a}}$, тогда

$$\omega = \frac{\psi_{2a}^2}{\psi_{2b}^2} \cdot \left(\frac{\psi_{2a} \frac{d\psi_{2b}}{dt} - \psi_{2b} \frac{d\psi_{2a}}{dt}}{\psi_{2a}^2} \right) \tag{33}$$

Угол поворота θ вычисляется на основании скорости вращения поля статора в соответствии с (25).

Если система электропривода с векторным управлением с датчиком, то могут использоваться импульсные (частотные) датчики скорости, частота импульсов напряжения, на выходе которых пропорциональна скорости вращения двигателя

$$f_{dc} = \frac{z_p \cdot \omega}{2 \cdot \pi}, \quad (34)$$

где z_p – число меток импульсного датчика скорости.

Вычислитель скорости определяет скорость непосредственным счетом импульсов датчика скорости BR из (34) на высокой скорости вращения электропривода и по периоду на низкой скорости, заполняя период $T_{\bar{a}\bar{n}} = 1/f_{\bar{a}\bar{n}}$ импульсами высокой частоты. Угол поворота θ вычисляется на основании скорости вращения поля статора в соответствии с (25).

Система уравнений для составления структурной схемы АД с короткозамкнутым ротором в системе координат, вращающейся со скоростью ω_k , имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{1x} &= R' \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot I_{1x} - \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2x} - L'_1 \cdot \omega_{\hat{e}} \cdot I_{1y} - \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2y} \\ U_{1y} &= R' \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot I_{1y} - \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2y} + L'_1 \cdot \omega_{\hat{e}} \cdot I_{1x} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} \\ 0 &= (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2x} - L_m \cdot I_{1x} - T_2 \cdot (\omega_{\hat{e}} - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2y} \\ 0 &= (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2y} - L_m \cdot I_{1y} + T_2 \cdot (\omega_{\hat{e}} - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2x} \\ M &= \frac{3}{2} \cdot K_2 \cdot z_p \cdot (\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}) \\ p \cdot \omega &= \frac{1}{J} \cdot (M - M_C) \end{aligned} \right\}, \quad (35)$$

где $K_2 = \frac{L_m}{L_2}$, $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$, $T_1 = \frac{L'_1}{R'} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R'}$, $R' = R_1 + R_2 \cdot \frac{L_m}{L_2}$, $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$, $L' = \sigma \cdot L_1$.

Если во вращающейся системе координат совместить ось x с вектором потокосцепления ротора, то $|\bar{\Psi}_2| = \Psi_{2x}$, $\Psi_{2y} = 0$ и система (35) приобретает вид:

$$\left. \begin{aligned}
I_{1x} &= \frac{1/R'}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \left[U_{1x} + \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2x} + L'_1 \cdot \omega_{\hat{e}} \cdot I_{1y} \right] \\
I_{1y} &= \frac{1/R'}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \left[U_{1y} - K_2 \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} - L'_1 \cdot \omega_{\hat{e}} \cdot I_{1x} \right] \\
\Psi_{2x} &= \frac{L_m}{T_2 \cdot p + 1} \cdot I_{1x} \\
\omega_{\hat{e}} &= z_p \cdot \omega + \frac{L_m}{T_2} \cdot \frac{I_{1y}}{\Psi_{2x}} \\
M &= \frac{3}{2} \cdot K_2 \cdot z_p \cdot \Psi_{2x} \cdot I_{1y} \\
\omega &= \frac{1}{J \cdot p} \cdot (M - M_C)
\end{aligned} \right\} \quad (36)$$

Систему регулирования скорости целесообразно рассматривать и реализовывать в системе координат, связанных с обобщенным вектором Ψ_2 . Система регулирования скорости должна быть двухкоординатной. Канал регулирования потокосцепления Ψ_{2x} содержит два апериодических звена

$W(p) = \frac{1/R'}{T_1 \cdot p + 1}$ и $W(p) = \frac{L_m}{T_2 \cdot p + 1}$. Канал регулирования тока i_{1y} и момента

содержит одно апериодическое звено $W(p) = \frac{1/R'}{T_1 \cdot p + 1}$.

Поэтому система регулирования канала потокосцепления Ψ_{2x} должна строиться как двухконтурная система подчиненного регулирования, каждый из контуров которой настраивается на модульный оптимум с применением ПИ-регуляторов, компенсирующих соответствующие апериодические звенья.

Канал регулирования тока i_{1y} и момента содержит одно апериодическое звено и настраивается на модульный оптимум.

Для построения качественной системы регулирования скорости действие перекрестных связей в структурной схеме двигателя должно быть скомпенсировано введением соответствующих компенсирующих сигналов. В результате образуются два независимых канала регулирования, в которых

параметры регуляторов рассчитываются известными методами. Структурная схема такой системы показана на рисунке.

Преобразователь частоты в такой системе должен представлять собой транзисторный инвертор напряжения с синусоидальной ШИМ–модуляцией на высокой несущей частоте.

Практическая реализация асинхронного электропривода с векторным управлением связана с определенными техническими трудностями, обусловленными необходимостью измерения потокосцепления Ψ_2 , а также необходимостью применения прецизионных координатных преобразователей.

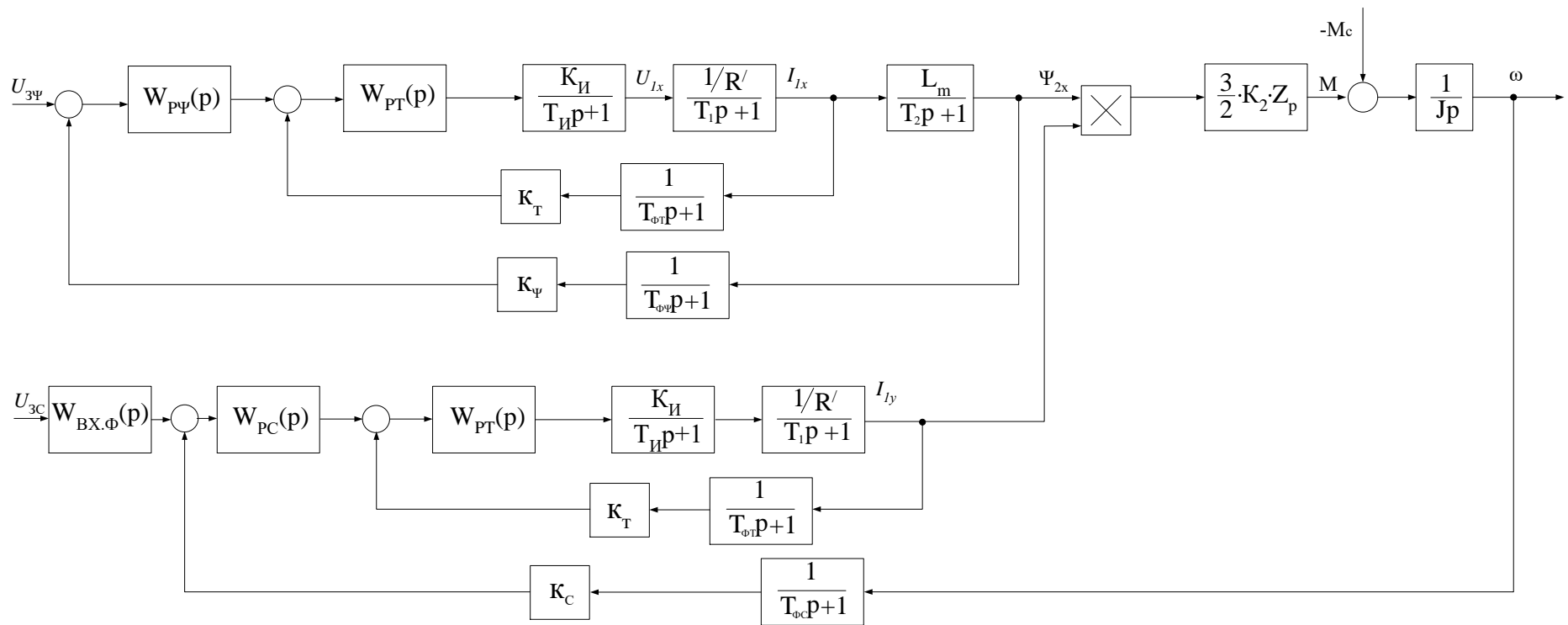


Рисунок 18 – Структурная схема асинхронного электропривода с векторным управлением

4.3 Оптимизация системы автоматического управления регулируемого электропривода

4.3.1 Расчет параметров силовой цепи

1) Коэффициент обратной связи по току

$$k_{mx} = k_{my} = \frac{U_{эп.макс}}{I_{эп.макс}} = \frac{10}{35,2} = 0,284 \text{ В/А} ,$$

принять $U_{эп.макс} = 10 \text{ В}$;

2) Коэффициент обратной связи по потокосцеплению

$$k_{\Psi} = \frac{U_{э\Psi.макс}}{\Psi_n} = \frac{10}{0,9419} = 10,61 \text{ В/Вб} ,$$

принять $U_{э\Psi.макс} = 10 \text{ В}$,

$$\begin{aligned} \Psi_n &= \frac{M_{эм.н}}{\frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \frac{X_{\mu n}}{X_{\mu n} + X'_{2н}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1н}^2 - I_0^2}} = \\ &= \frac{18,24}{\frac{3}{2} \cdot 1 \cdot \frac{49,19}{49,19 + 2,6} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{10,47^2 - 4,14^2}} = 0,9419 \text{ Вб} \end{aligned} ;$$

$$M_{эм.н} = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{5500}{301,571} = 18,24 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

3) Коэффициент обратной связи по скорости

$$k_c = \frac{U_{зс.макс}}{\omega_{эп.макс}} = \frac{10}{314,159} = 0,032 \text{ В} \cdot \text{с/рад} ,$$

принять $U_{зс.макс} = 10 \text{ В}$;

4) Минимальное время запаздывания в вычислении мгновенного значения тока статора можно определить исходя из положения теоремы В. А. Котельникова. Искажение информации не произойдет при выполнении следующего условия:

$$k_k \cdot f_n \leq f_{то}$$

где f_n – несущая частота инвертора напряжения;

f_{m0} – частота вычислений мгновенного значения тока статора;

$k_K \geq 2$ – коэффициент.

Тогда минимальное время запаздывания в вычислении мгновенного значения тока статора

$$T_{m0} \geq \frac{1}{f_{m0}} = \frac{1}{k_K \cdot f_H}.$$

Высокая несущая частота f_H инвертора приближает ток статора двигателя к синусоидальному. Это одна из причин, из-за которой несущую частоту работы инвертора увеличивают до десятков килогерц. Однако чрезмерное увеличение несущей частоты приводит к увеличению коммутационных потерь в ключах инвертора. Оптимальное значение несущей частоты должно обеспечивать близкое к синусоидальному значению тока статора при приемлемых коммутационных потерях в ключах инвертора. Как правило, в современных инверторах напряжения несущая частота находится в диапазоне от 5 кГц до 20 кГц и определяется на практике при окончательной настройке преобразователя.

Принимаем значение несущей частоты $f_H = 10000$ и $k_K = 2$

тогда период вычислений тока статора

$$T_{m0} \geq \frac{1}{f_{m0}} = \frac{1}{k_K \cdot f_H} = \frac{1}{2 \cdot 10000} \geq 0,00005.$$

Для исключения случайностей в вычислении тока статора двигателя его сглаживают фильтрами. В этом случае окончательно принимаем

$$T_{\mu m0} = 5 \cdot T_{m0} = 5 \cdot 0,00005 = 0,00025 \text{ с} ,$$

принять $n_m = 8$.

5) Постоянная времени запаздывания в контуре потокосцепления

$$T_{\mu \Psi 0} = 8 \cdot T_{\mu m0} = 8 \cdot 0,00025 = 0,002 \text{ с} .$$

6) Постоянная времени запаздывания в контуре скорости

$$T_{\mu c0} = 4 \cdot T_{\mu m0} = 4 \cdot 0,00025 = 0,001 \text{ с} .$$

7) Постоянная времени инвертора

$$T_u = \frac{1}{f_u} = \frac{1}{10000} = 0,0001 \text{ с};$$

8) Полное индуктивное сопротивление обмотки статора

$$X_1 = X_m + X_{1\sigma} = 49,19 + 1,95 = 51,14 \text{ Ом};$$

9) Полное индуктивное сопротивление обмотки ротора

$$X_2 = X_m + X'_{2\sigma} = 49,19 + 2,61 = 51,8 \text{ Ом};$$

10) Коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - \frac{X_m^2}{X_1 \cdot X'_2} = 1 - \frac{49,19^2}{1,95 \cdot 2,61} = 0,0865 ;$$

Тогда

$$K_2 = \frac{X_m}{X_2} = \frac{49,19}{2,61} = 0,949.$$

11) Значение индуктивности цепи ротора

$$L_2 = \frac{X_2}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = \frac{2,61}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,165 \text{ Гн};$$

12) Постоянная времени роторной цепи

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2} = \frac{0,165}{0,847} = 0,1946 \text{ с};$$

13) Значение индуктивности статорной цепи

$$L_1 = \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = \frac{1,95}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,163 \text{ Гн};$$

14) Приведенное значение индуктивности статорной цепи

$$L'_1 = \sigma \cdot L_1 = 0,0865 \cdot 0,1628 = 0,0141 \text{ Гн};$$

15) Приведенное значение полного активного сопротивления

$$R' = R_1 + K_2^2 \cdot R_2 = 0,873 + 0,949^2 \cdot 0,847 = 1,64 \text{ Ом};$$

16) Постоянная времени статорной цепи

$$T_1 = \frac{L'_1}{R'} = \frac{0,0141}{1,64} = 0,0086 \text{ с};$$

17) Значение индуктивности контура намагничивания

$$L_m = \frac{X_m}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = \frac{49,19}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,157 \text{ Гн.}$$

4.3.2. Оптимизация контура тока.

Структурная схема контура приведена на рисунке 19.

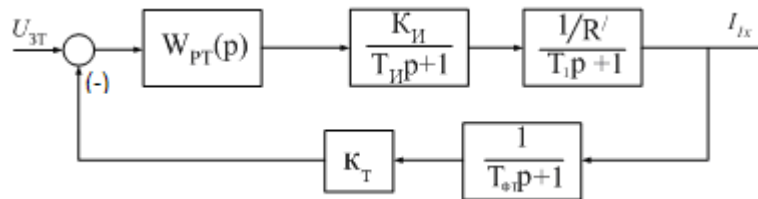


Рисунок 19 – Структурная схема контура тока

Контур содержит инерционные звенья первого порядка с постоянными времени: $T_1 = 0,0086 \text{ с}$, $T_{II} = 0,0001 \text{ с}$ и $T_{\text{фм}} = 0,001 \text{ с}$.

Принимаем малую некомпенсированную постоянную времени контура

$$T_{\text{ит}} = T_{\text{итк}} + T_{\text{иок}},$$

где $T_{\text{итк}}$ – постоянная времени прямого канала контура тока;

$T_{\text{иок}}$ – постоянная времени обратного канала контура тока.

$$T_{\text{итк}} = 0,5 \cdot T_{II} = 0,5 \cdot 0,0001 = 0,00005 \text{ с};$$

$$T_{\text{иок}} = 0,001 \text{ с};$$

$$T_{\text{ит}} = T_{\text{итк}} + T_{\text{иок}} = 0,00005 + 0,001 = 0,00105 \text{ с}.$$

Контур тока настраиваем на модульный оптимум (МО). С учетом параметров контура выбираем ПИ – регулятор с передаточной функцией

$$W_{pm}(p) = k_{pm} \cdot \frac{T_{pm} \cdot p + 1}{T_{pm} \cdot p},$$

где $T_{pm} = T_1 = 0,0086 \text{ с}$ – постоянная времени регулятора;

$$k_{pm} = \frac{T_1 \cdot R'}{k_{II} \cdot k_m \cdot a_m \cdot T_{\text{ит}}} = \frac{0,0086 \cdot 1,64}{31,1 \cdot 0,284 \cdot 2 \cdot 0,00105} = 0,759 \text{ – коэффициент усиления}$$

регулятора;

$$k_T = \frac{U_{\text{эт.макс}}}{I_{1\text{макс}}} = \frac{10}{35.2} = 0,284 \frac{\text{В}}{\text{А}} \quad \text{– коэффициент обратной связи по току};$$

$U_{\text{эт.макс}}$ – максимальное напряжение задания на ток, $U_{\text{эт.макс}} = 10 \text{ В}$;

$a_T = 2$ – коэффициент оптимизации контура тока по МО.

$I_{1\text{макс}} = 0,284 \text{ А}$ – максимальный кратковременный ток преобразователя

$$W_{\text{пт}}(p) = 0,759 \cdot \frac{0,0086 \cdot p + 1}{0,0086 \cdot p},$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура тока:

$\sigma = 6,7\%$ – перерегулирование;

$t_{\text{py1}}^{(5)} = 2,5 \cdot T_{\mu\text{м}} = 2,5 \cdot 0,00105 = 0,002625 \text{ с}$ – время первого согласования;

$t_{\text{py2}}^{(5)} = 6 \cdot T_{\mu\text{м}} = 6 \cdot 0,00105 = 0,0063 \text{ с}$ – время переходного процесса при обработке ступенчатого управляющего задания;

$\omega_n^{(M)} = \infty$ – полоса пропускания по модулю

$\omega_n^{(\phi)} = \frac{0,9}{T_{\mu\text{м}}} = \frac{0,9}{0,00105} = 857,1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ – полоса пропускания по фазе.

По структурной схеме контура тока (см. рисунок 19) набирается имитационная модель, представленная на рисунке 20.

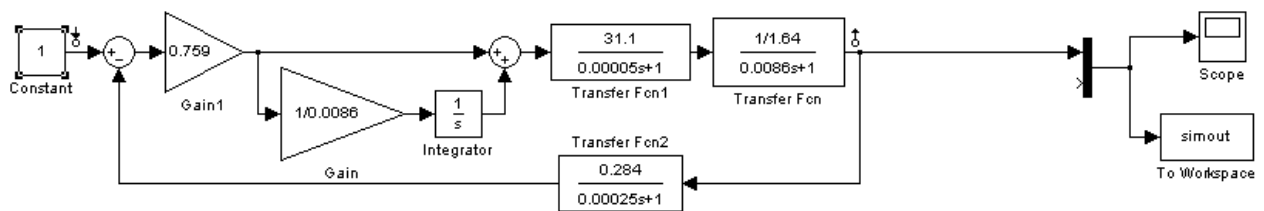


Рисунок 20 – Имитационная модель контура тока

Результаты моделирования переходных процессов в контуре тока, настроенного на модульный оптимум при обработке ступенчатого входного воздействия $U_{\text{эт}} = 1 \text{ В}$ приведены в виде переходной характеристики $i(t)$ на рисунке 21.

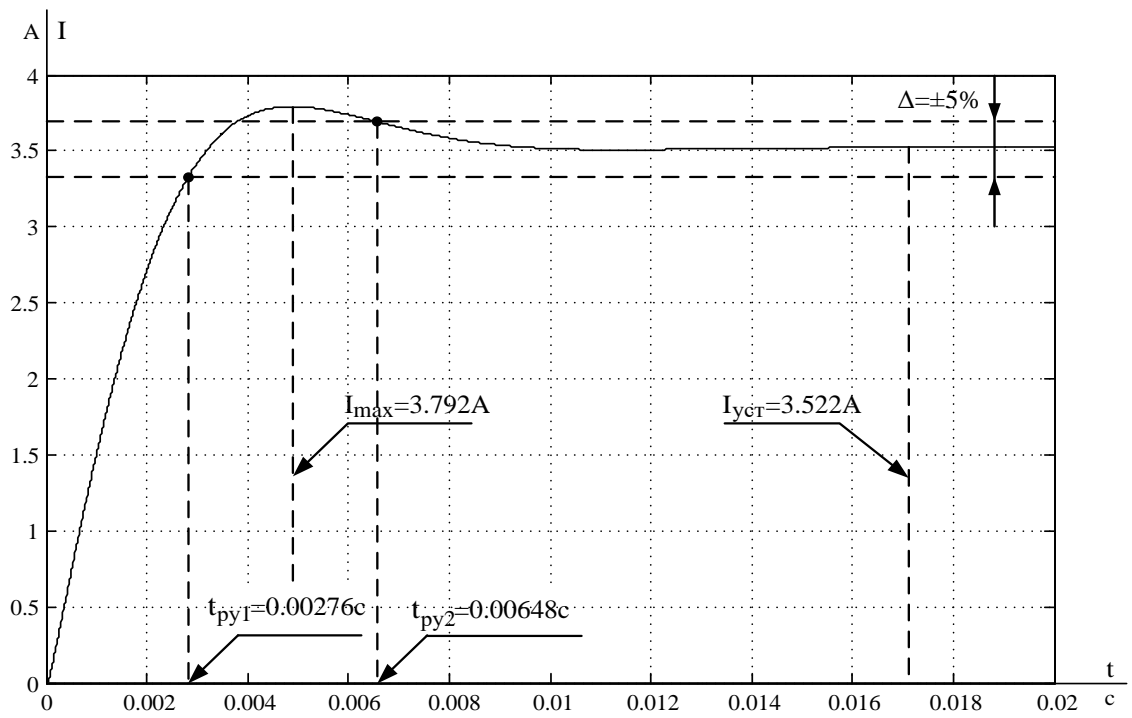


Рисунок 21 – Переходная характеристика $I(t)$ контура тока по структурной схеме рисунок 19

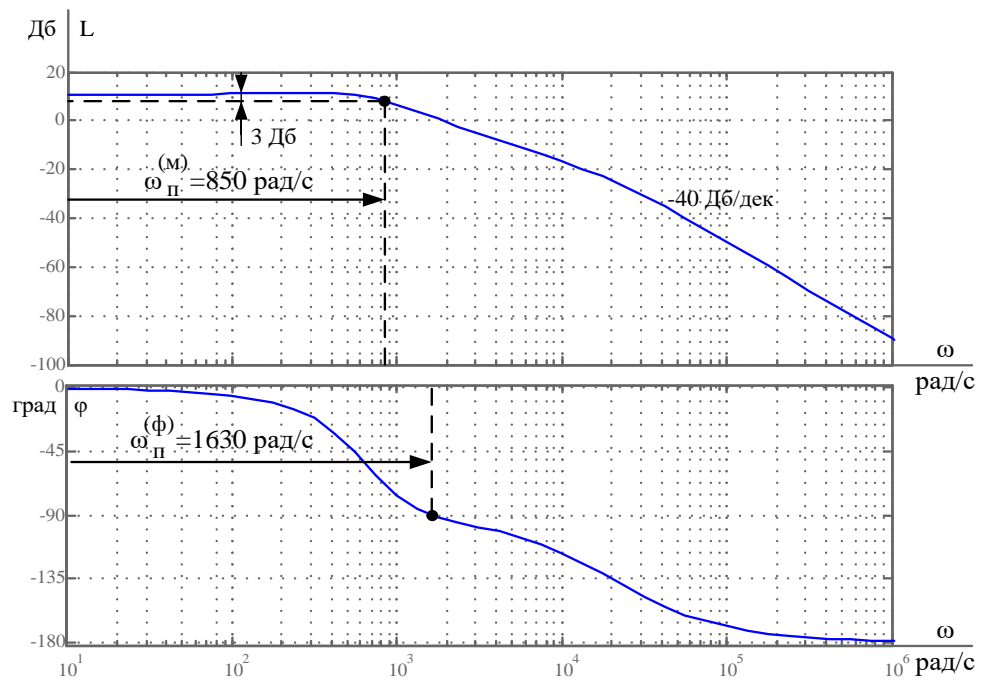


Рисунок 22 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого контура тока

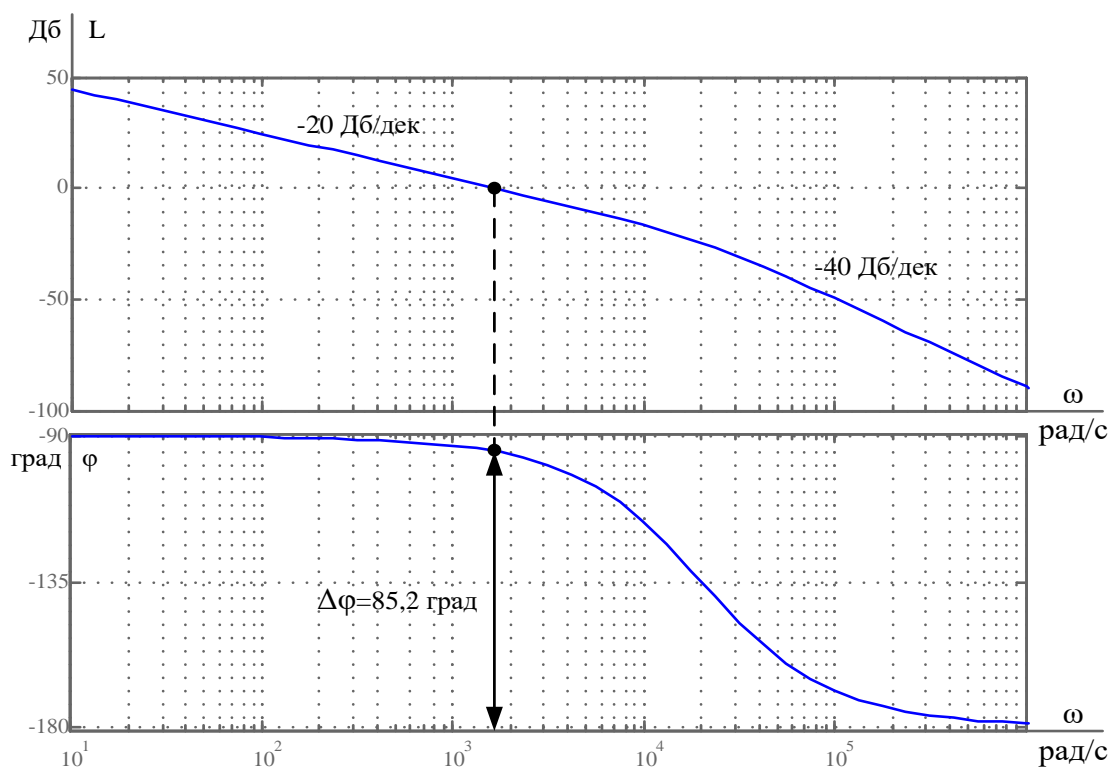


Рисунок 23 – Логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура тока

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что они наилучшим образом согласуются с ожидаемыми показателями работы контура.

Для наглядности сведем результаты моделирования в таблицу 4

Таблица 4 – Частотные показатели качества контура тока

Запас устойчивости		Полоса пропускания	
По модулю ΔL , дБ	По фазе $\Delta\varphi$, град	По модулю $\omega_n^{(M)}$, рад/с	По фазе $\omega_n^{(\phi)}$, рад/с
Ожидаемые показатели			
–	–	∞	857,1
Результаты моделирования			
–	85,2	850	1630

Таблица 5 – Показатели качества переходных процессов контура тока

$t_{py1}^{(5)}$, с	$t_{py2}^{(5)}$, с	σ , %	$\Delta I_{уст}$, А
Ожидаемые показатели			
0,002625	0,0063	6,7	0
Результаты моделирования			
0,00276	0,00648	7,1	0

Оптимизация контура потокосцепления

Структурная схема контура потокосцепления приведена на рисунке 24

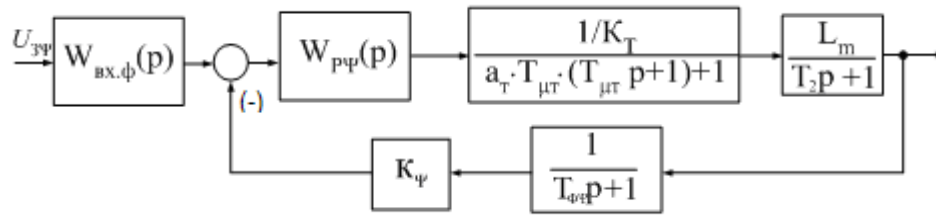


Рисунок 24 – Структурная схема контура потокосцепления

Контур потокосцепления настраиваем на МО. С учетом параметров контура выбираем ПИ – регулятор с передаточной функцией

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

где $k_{\delta\psi}$ – коэффициент усиления регулятора.

$$k_{p\psi} = \frac{k_T \cdot T_2}{K_\psi \cdot L_m \cdot 2 \cdot T_{\mu\psi\delta}} = \frac{0,284 \cdot 0,1946}{10,61 \cdot 0,157 \cdot 2 \cdot 0,0031} = 5,363 \text{ – коэффициент регулятора}$$

потокосцепления;

Малая постоянная времени контура потокосцепления

$$T_{\mu\psi\delta} = a_m \cdot T_{\mu m} + T_{\mu\psi} = 2 \cdot 0,00105 + 0,001 = 0,0031 \text{ с}.$$

$$k_\psi = \frac{U_{з\psi, \max}}{\Psi_n} = \frac{10}{0,9419} = 10,61 \text{ В/Вб} \text{ – коэффициент обратной связи по}$$

потокосцеплению.

$$W_{p\psi}(p) = k_{p\psi} \cdot \frac{T_{p\psi} \cdot p + 1}{T_{p\psi} \cdot p} = 5,363 \cdot \frac{0,1946 \cdot p + 1}{0,1946 \cdot p};$$

$$W_{BХ.ф}(p) = \frac{1}{T_{ф\psi} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,001 \cdot p + 1} \text{ – передаточная функция фильтра на}$$

входе контура потокосцепления.

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура

$$\sigma = (4,3 \div 6,7)\% \text{ – перерегулирование;}$$

$$t_{py1}^{(5)} = (4,1 \div 2,75) \cdot T_{\mu\psi\delta} = (2,75 \div 4,1) \cdot 0,0031 = (0,008525 \div 0,0127) \text{ c} - \text{ время}$$

первого согласования;

$$\omega_n^{(m)} = \frac{(0,71 \div 0,9)}{T_{\mu\psi\delta}} = \frac{(0,71 \div 0,9)}{0,0031} = (229,032 \div 290,32) \frac{\text{рад}}{\text{c}} - \text{ полоса}$$

пропускания по модулю.

По структурной схеме контура потокосцепления (см. рисунок 24) набирается имитационная модель, представленная на рисунке 25.

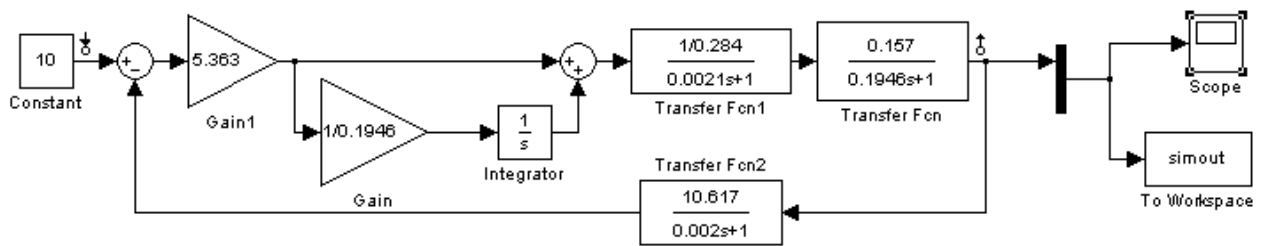


Рисунок 25 – Имитационная модель контура потокосцепления

Результаты моделирования переходных процессов в контуре потокосцепления, настроенного на модульный оптимум, при отработке ступенчатого входного воздействия $U_{3\psi} = 10 \text{ В}$ приведены в виде переходных характеристик $\Psi(t)$ на рисунке 26.

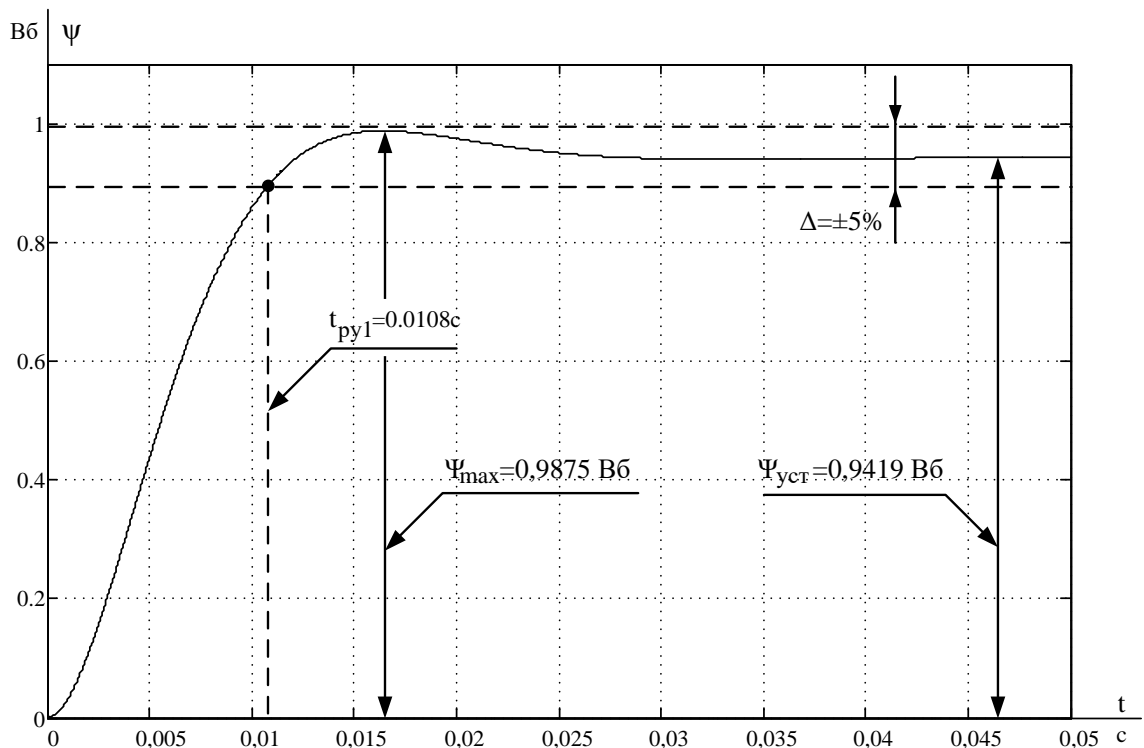


Рисунок 26 – Переходные характеристики $\Psi(t)$ контура потокосцепления

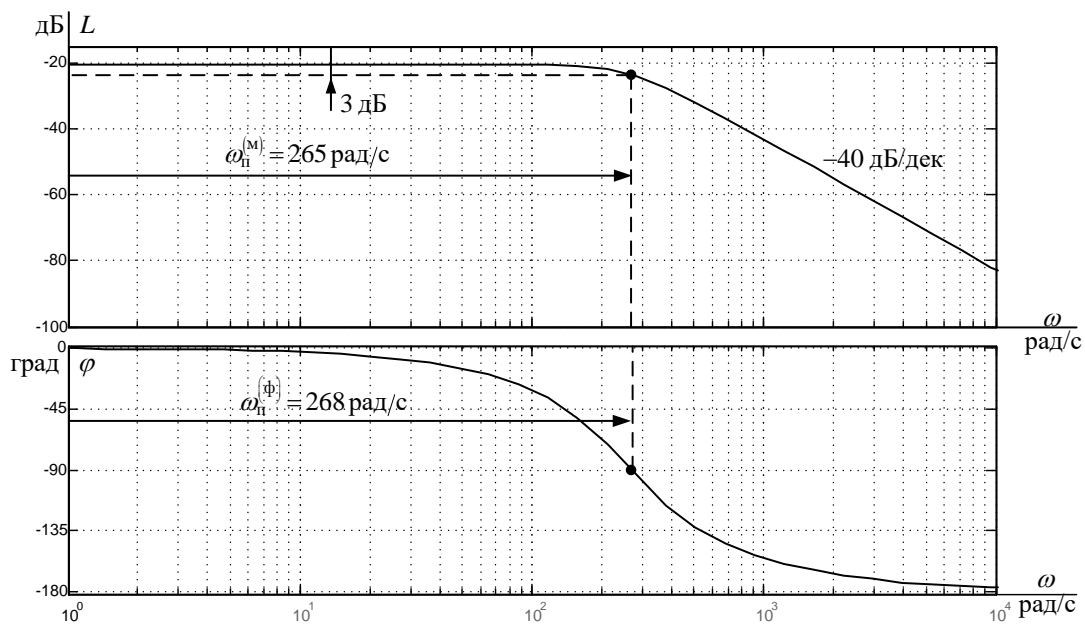


Рисунок 27 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого контура потокосцепления

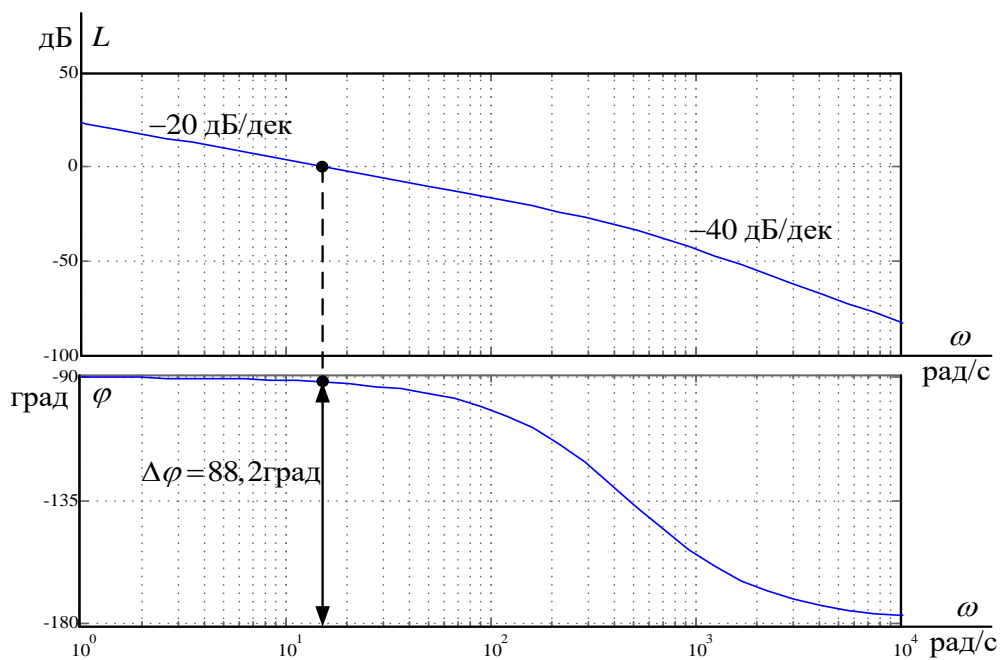


Рисунок 28 – Логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура потокосцепления

Таблица 6 – Показатели качества переходных процессов контура потокосцепления

$t_{py1}^{(5)}$, с	$t_{py2}^{(5)}$, с	σ , %	$\Delta\Psi_{уст}$, Вб
Ожидаемые показатели			
0,008525 ÷ 0,0127	–	(4,3 ÷ 6,7)	0
Результаты моделирования			
0,0108	–	4,6	0

Таблица 7 – Частотные показатели качества контура потокосцепления

Запас устойчивости		Полоса пропускания	
По модулю ΔL , дБ	По фазе $\Delta\varphi$, град	По модулю $\omega_{п}^{(M)}$, рад/с	По фазе $\omega_{п}^{(\Phi)}$, рад/с
Ожидаемые показатели			
–	–	229,032 ÷ 290,32	–
Результаты моделирования			
–	88,2	265	268

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что они полностью совпадают с ожидаемыми показателями работы контура.

4.3.3. Оптимизация САР скорости

Структурная схема линейризованной САР скорости приведена на рисунке 29.

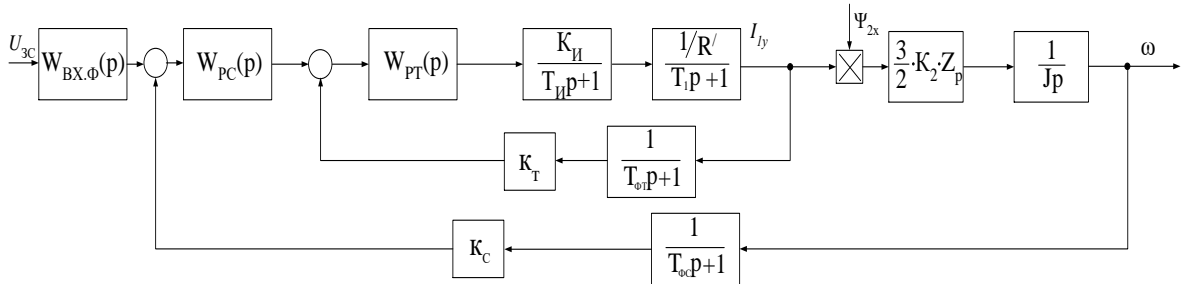


Рисунок 29 – Структурная схема контура скорости

Оптимизация контура скорости

Контур скорости настраиваем на СО. С учетом параметров контура выбираем ПИ – регулятор с передаточной функцией

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

где k_{pc} – коэффициент усиления регулятора.

$a_c = 2$ – коэффициент оптимизации контура скорости по МО;

$T_{\mu c \Sigma} = a_m \cdot T_{\mu m} + T_{\mu c} = 2 \cdot 0,00105 + 0,001 = 0,0031$ с – малая постоянная времени контура скорости.

$$k_c = \frac{U_{зс макс}}{\omega_{макс}} = \frac{10}{314,159} = 0,032 \frac{В \cdot с}{рад} \quad \text{– коэффициент обратной связи по}$$

скорости; $U_{зс макс} = 10$ В.

$T_{pc} = b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu c} = 2 \cdot 2 \cdot 0,0031 = 0,0124$ с – постоянная времени регулятора скорости;

$$k_{pc} = \frac{\kappa_T \cdot J_{\Sigma}}{\frac{3}{2} \cdot K_2 \cdot Z_P \cdot \kappa_C \cdot \Psi_{2н} \cdot 2 \cdot T_{\mu c}} = \frac{0,284 \cdot 0,01}{\frac{3}{2} \cdot 949 \cdot 1 \cdot 0,032 \cdot 0,9419 \cdot 2 \cdot 0,0031} = 10,729 \quad \text{–}$$

коэффициент усиления регулятора скорости;

$$W_{pc}(p) = k_{pc} \frac{T_{pc} \cdot p + 1}{T_{pc} \cdot p} = 10,729 \cdot \frac{0,0124 \cdot p + 1}{0,0124 \cdot p};$$

$$W_{BX.\phi}(p) = \frac{1}{(4 \cdot T_{\mu c} + T_{\phi C}) \cdot p + 1} = \frac{1}{0,0134 \cdot p + 1} \text{ – передаточная функция фильтра}$$

на входе контура;

$T_{\phi C} = 0,001$ с – постоянная времени фильтра в обратной связи контура.

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура скорости, настроенного на СО

$\sigma = (8,1 \div 10) \%$ – перерегулирование;

$t_{py1}^{(5)} = (5,8 \div 7) \cdot T_{\mu c} = (5,8 \div 7) \cdot 0,0031 = (0,018 \div 0,0217)$ с – время первого согласования;

$t_{py2}^{(5)} = (9,5 \div 12) \cdot T_{\mu c} = (9,5 \div 12) \cdot 0,0031 = (0,0295 \div 0,0372)$ с – время второго согласования;

$\omega_n^{(M)} = \frac{(0,5 \div 0,54)}{T_{\mu c}} = \frac{(0,5 \div 0,54)}{0,00105} = (161,29 \div 174,19) \frac{рад}{с}$ – полоса

пропускания по модулю;

$\omega_n^{(\phi)} = \frac{(0,36 \div 0,42)}{T_{\mu c}} = \frac{(0,36 \div 0,42)}{0,0031} = (116,3 \div 135,48) \frac{рад}{с}$ – полоса

пропускания по фазе.

По структурной схеме контура скорости набирается имитационная модель, представленная на рисунке 30.

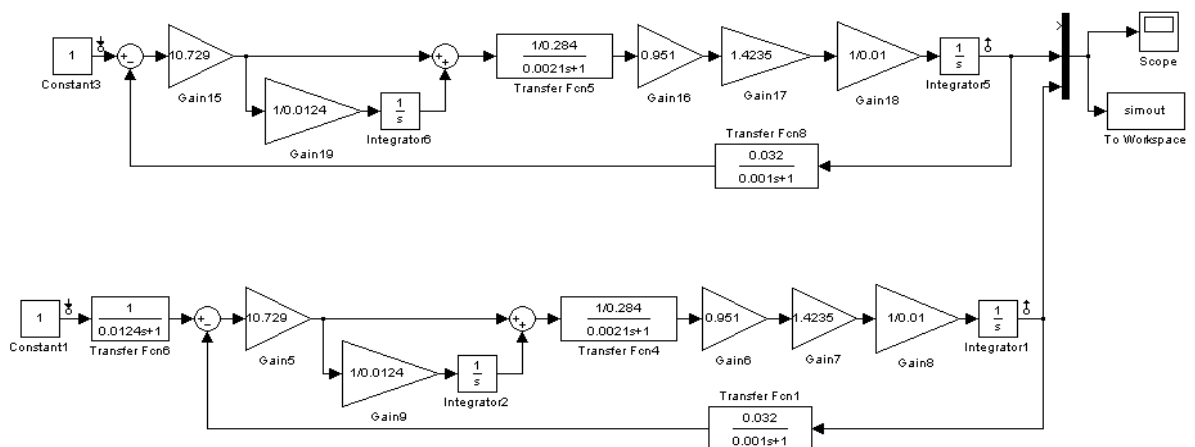


Рисунок 30 – Имитационная модель контура скорости

Результаты моделирования переходных процессов в контуре скорости, настроенного на симметричный оптимум, при отработке ступенчатого входного

воздействия $U_{zc} = 1\text{В}$ приведены в виде переходной характеристики $\omega(t)$ на рисунке 31.

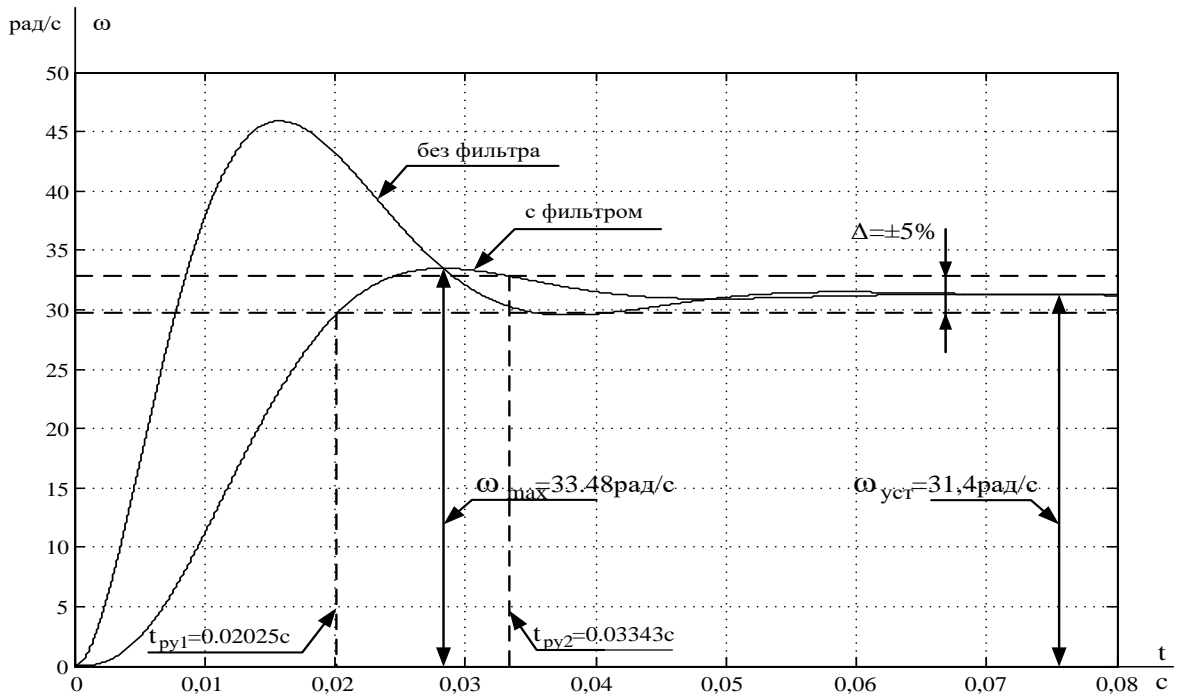


Рисунок 31 – Переходные характеристики $\omega(t)$ контура скорости, настроенного на СО с фильтром на входе и без него

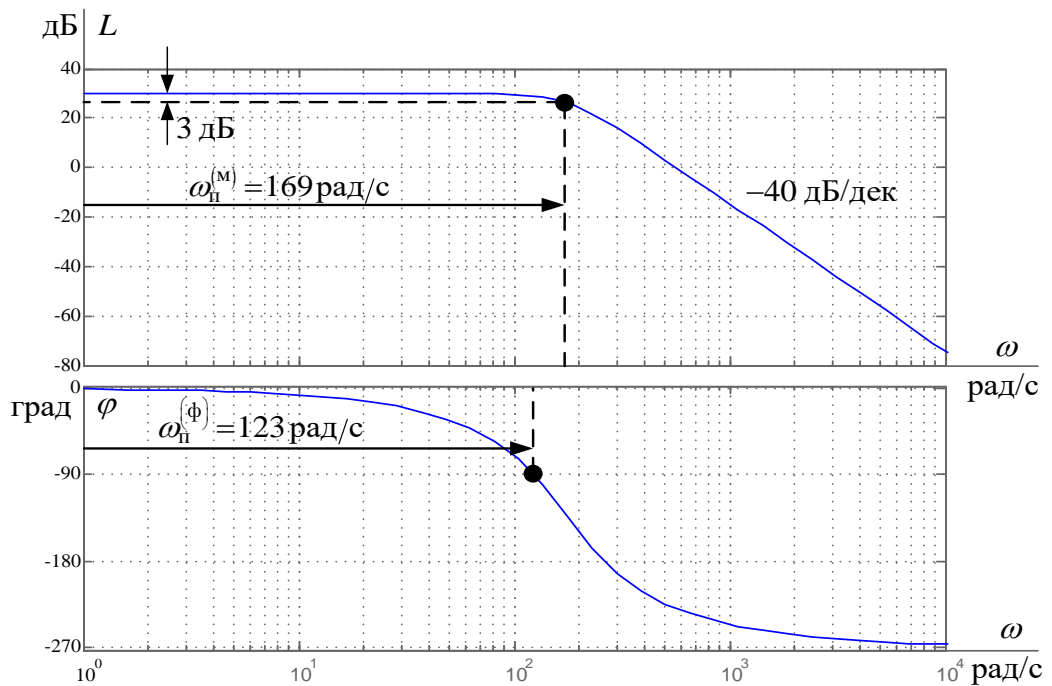


Рисунок 32 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого контура скорости с фильтром на входе

Таблица 8 – Показатели качества переходных процессов контура скорости с фильтром на входе

$t_{py1}^{(5)}$, с	$t_{py2}^{(5)}$, с	σ , %	$\Delta\omega_{уст}$, рад/с
Ожидаемые показатели			
(0,018 ÷ 0,0217)	(0,0295 ÷ 0,0372)	(8,1 ÷ 10)	0
Результаты моделирования			
0,02025	0,003343	6,7	0

Таблица 9 – Частотные показатели качества контура скорости с фильтром на входе

Запас устойчивости		Полоса пропускания	
По модулю ΔL , дБ	По фазе $\Delta\varphi$, град	По модулю $\omega_n^{(M)}$, рад/с	По фазе $\omega_n^{(\Phi)}$, рад/с
Ожидаемые показатели			
–	–	161,29 ÷ 174,19	116,3 ÷ 135,48
Результаты моделирования			
–	–	169	123

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что они в целом согласуются с ожидаемыми показателями работы контура.

4.4 Исследование нелинейной САУ РЭП

Анализ влияния основных нелинейностей САУ РЭП на качество регулирования

Учтем следующие основные нелинейности характеристик элементов САУ РЭП:

- насыщение регулятора скорости $U_{рсмакс} \leq (10 \div 12) \text{ В}$. Принимаем $U_{рсмакс} = 10 \text{ В}$;
- насыщение регулятора тока $U_{ртмакс} \leq (10 \div 12) \text{ В}$. Принимаем $U_{ртмакс} = 10 \text{ В}$;
- насыщение регулятора потокосцепления $U_{рψмакс} \leq (10 \div 12) \text{ В}$. Принимаем $U_{рψмакс} = 10 \text{ В}$;

Имитационная модель нелинейной системы автоматического управления регулируемого электропривода представлена на рисунке 33

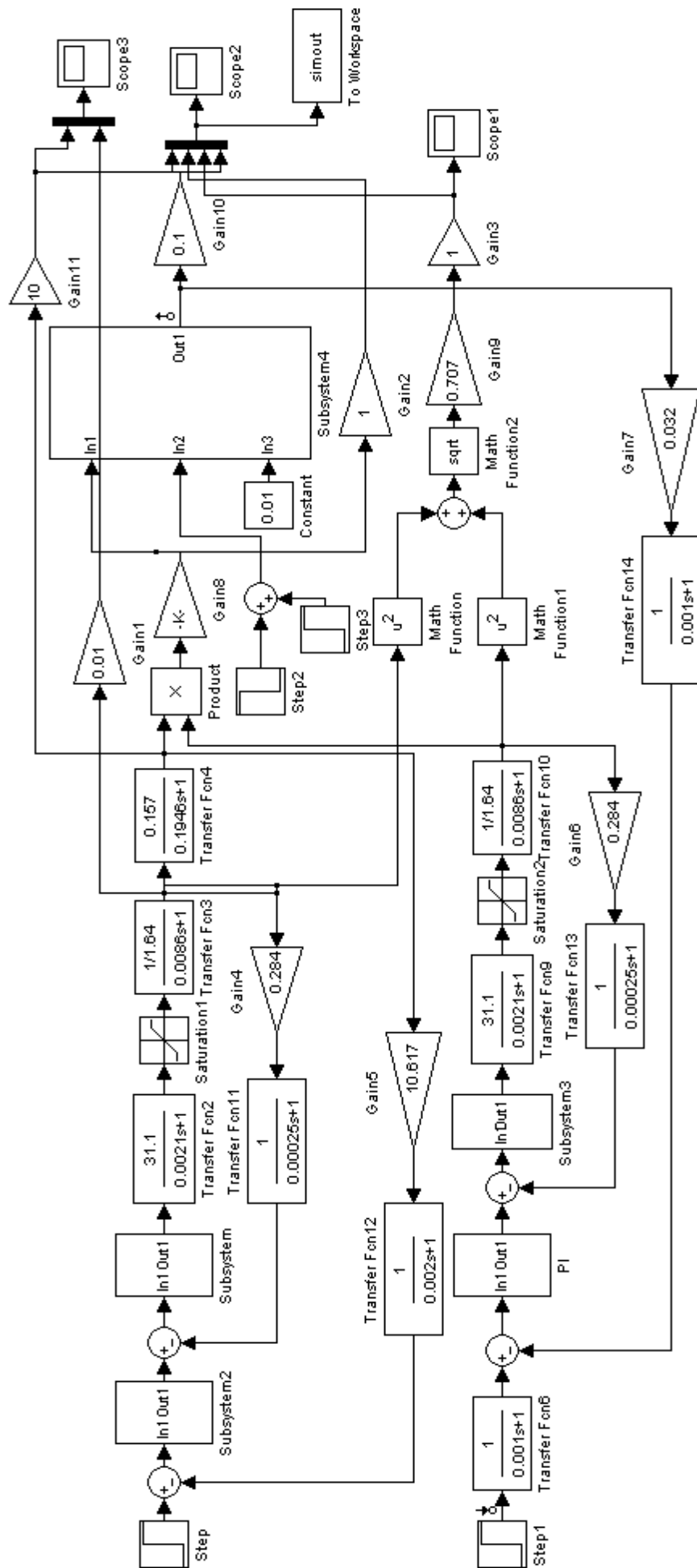


Рисунок 33 - Имитационная модель нелинейной САУ РЭП

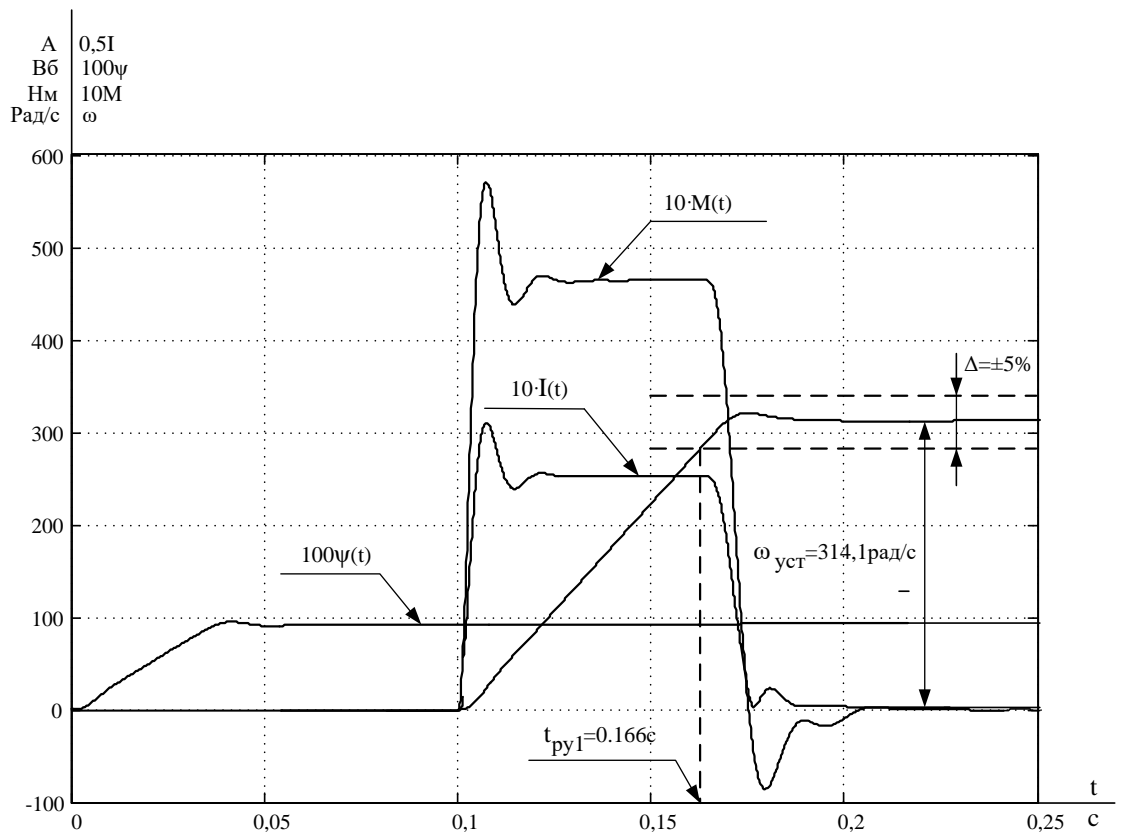


Рисунок 34 – Переходные процессы $\omega(t)$, $\Psi(t)$, $i(t)$ и $M(t)$ при учёте насыщений регуляторов

$U_{з.макс}=10$ В и $M_c=0$ Нм

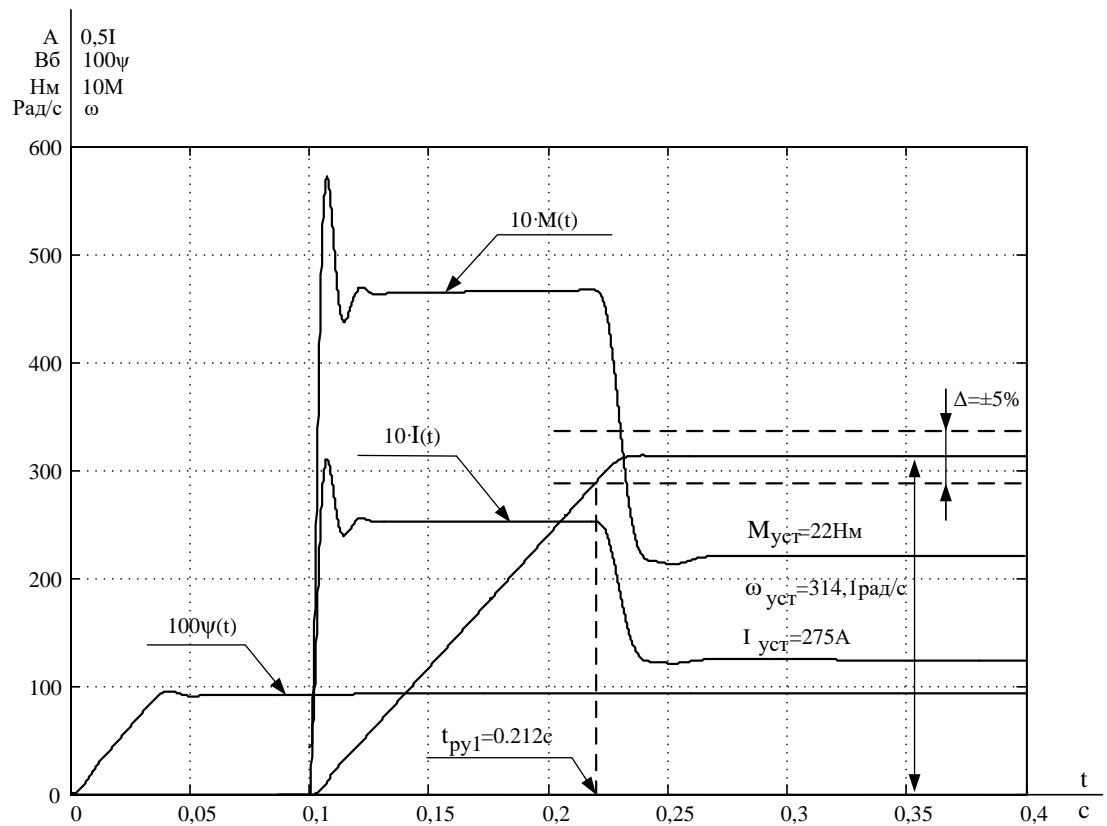


Рисунок 35 – Переходные процессы $\omega(t)$, $\Psi(t)$, $i(t)$ и $M(t)$ при учёте насыщений регуляторов

$U_{з.макс}=10$ В и $M_c=22$ Нм

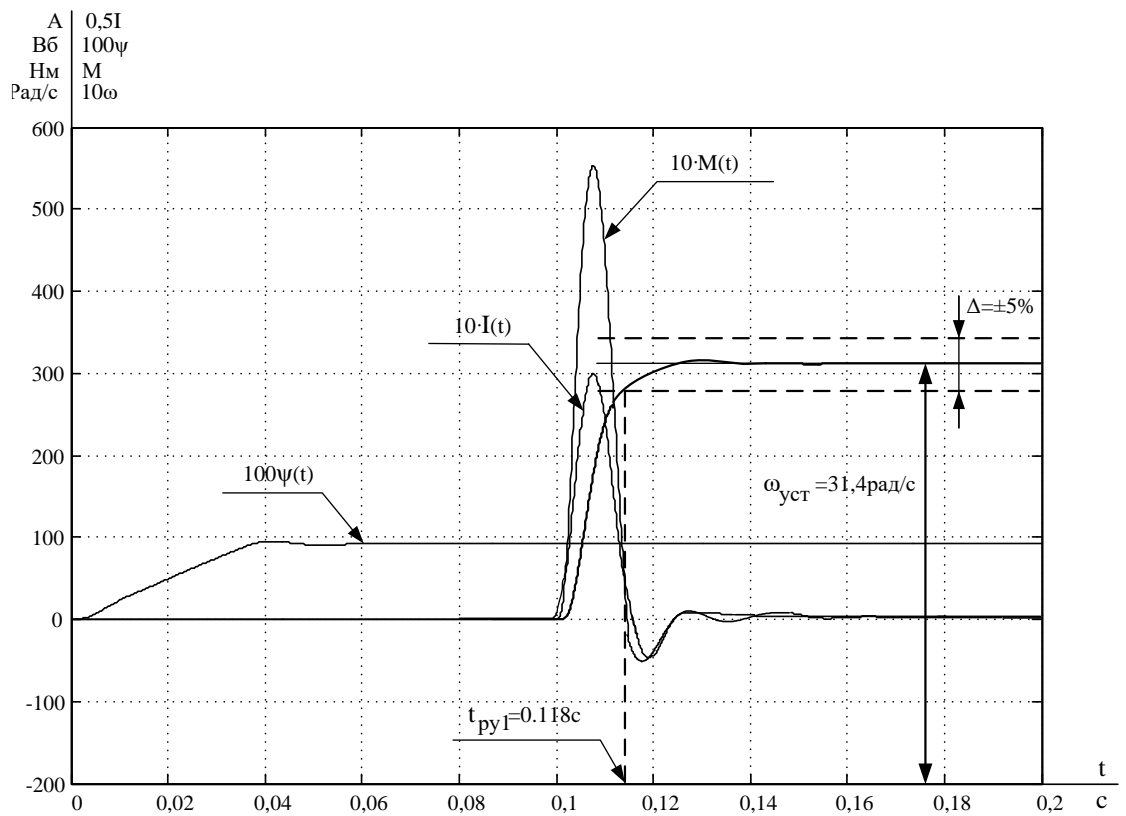


Рисунок 36– Переходные процессы $\omega(t)$, $\Psi(t)$, $i(t)$ и $M(t)$ при учёте насыщений регуляторов
 $U_{з.макс} = 1 \text{ В}$ и $M_c = 0 \text{ Нм}$

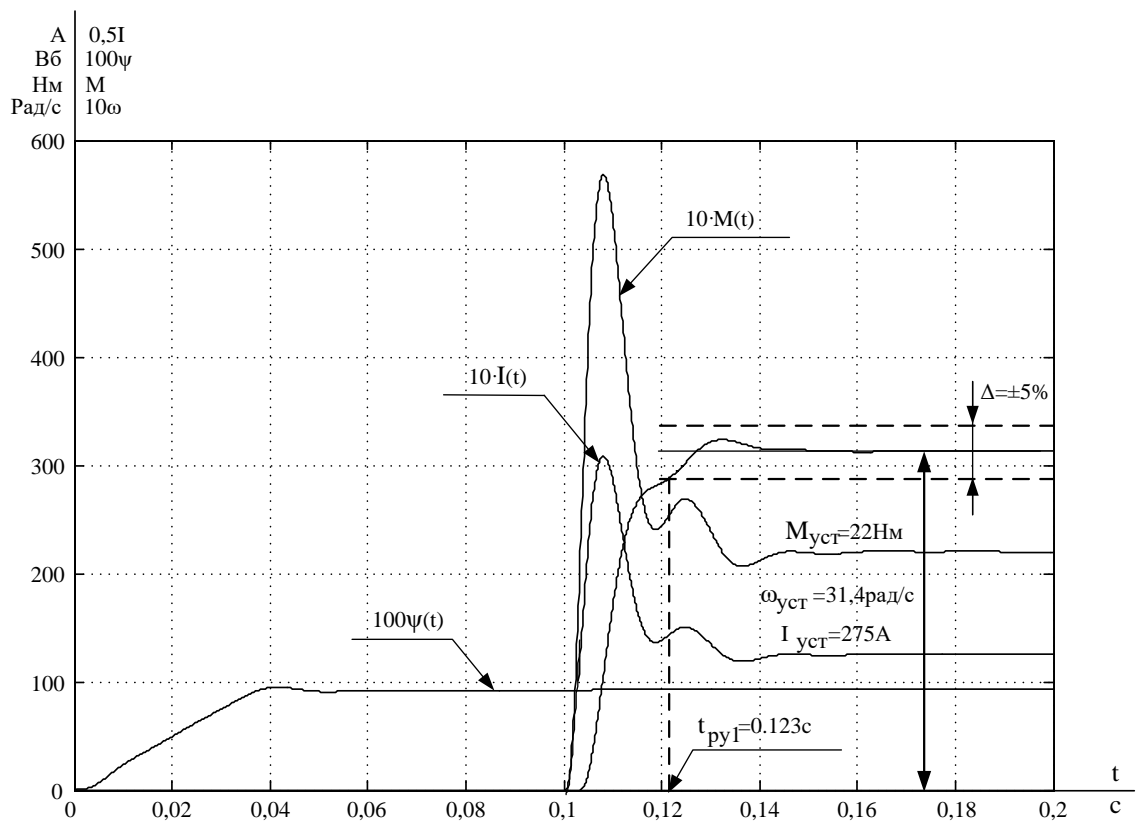


Рисунок 37 – Переходные процессы $\omega(t)$, $\Psi(t)$, $i(t)$ и $M(t)$ при учёте насыщений регуляторов
 $U_{з.макс} = 1 \text{ В}$ и $M_c = 22 \text{ Нм}$

Из полученных графиков следует, что качество переходных процессов удовлетворяет требованиям технического задания, максимальное перерегулирование не превышает 5%, время переходного процесса не превышает 0,212 с. Графики п/п. с различным заданием теоретически подтвердили, что ЭП обеспечивает D регулирования 1:100.

5 ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ DANFOSS VLT 5016

Функции управления ПЧ выполняет микроконтроллерная система на базе цифрового сигнального процессора (ЦСП), совместимого по своим параметрам и архитектуре с серией микропроцессоров C2000 Motor Control от компании Texas Instruments. Функциональная схема микропроцессорной системы управления приведена на рисунке 16. Система управления ПЧ обеспечивает выполнение следующих функций:

- управление силовыми ключами инвертора в режиме широтно-импульсной модуляции с несущей частотой от 2 до 16 кГц;
- сопряжение с внутренними и внешними датчиками аналоговых сигналов в различных стандартах (0...10 В, ±10 В, 4...20 мА);
- сопряжение с цепями управляющей коммутационной аппаратуры и телесигнализации через порты ввода/вывода дискретных сигналов
- +24 В с гальванической развязкой от силовых цепей питания ПЧ;
- оперативное наблюдение за параметрами и переменными ЭП с помощью встроенного пульта управления с отображением текстовой информации на графическом дисплее;
- возможность управления работой ПЧ со встроенного пульта, от кнопочной станции или от внешнего контроллера по последовательному интерфейсу RS-485;
- доступ к просмотру и изменению текущих параметров ПЧ с пульта управления, с внешнего контроллера по интерфейсу RS-485 или с портативного компьютера по USB интерфейсу в реальном масштабе времени;
- сохранение текущей конфигурации параметров ПЧ в энергонезависимой памяти, возможность быстрого восстановления заводских уставок;

- мониторинг питающей сети со стороны ПЧ, возможность принудительного запуска ЭП после восстановления питающего напряжения;
- мониторинг аварийных ситуаций, возникающих в ЭП с записью в энергонезависимую память кода и времени возникновения аварии, последующий просмотр журнала аварий с пульта управления, по RS-485 или USB интерфейсу.

Через микросхемы драйверов выводы микропроцессорной системы поступают к управляющим выводам силовых ключей. Драйверы выполняют функции согласования между силовыми и выходными цепями микропроцессорной системы управления. Кроме того, данные компоненты реализуют защитные функции, прекращая поступление управляющих импульсов к силовым ключам инвертора при возникновении токовых перегрузок.

Силовой канал ПЧ создан по схеме с промежуточным звеном постоянного тока и трёхфазным инвертором напряжения, на рисунке 8.1 представлена соответствующая функциональная схема. Переменное напряжение трёхфазной сети 380 В поступает на мостовой неуправляемый выпрямитель на базе диодов VD1 – VD6. Выпрямленное напряжение сглаживается дросселями L1, L2 и электролитическим конденсатором C1 большой ёмкости и поступает к инвертору на силовых ключах VT1 – VT6. Напряжение на выходе инвертора формируется по закону широтно-импульсной модуляции и поступает к статорным обмоткам АД, фазы U, V и W.

В качестве силовых ключей используются IGBT-транзисторы с высокой нагрузочной способностью. Для исключения обратных напряжений, возникающих из-за токов ЭДС самоиндукции в моменты коммутации ключей инвертора, параллельно IGBT-транзисторам включаются быстродействующие диоды VD8 – VD13.

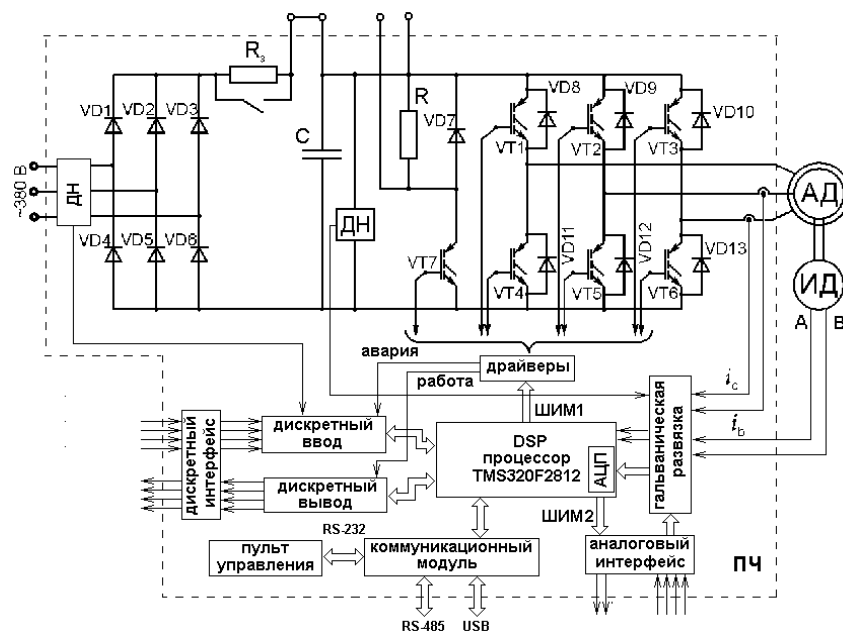


Рисунок 38 – Функциональная схема ЭП на базе АД и ПЧ Danfoss VLT 5016

Тормозные режимы на больших скоростях вращения ЭП реализуются переводом АД в генераторный режим посредством снижения частоты подводимого напряжения. В тормозных режимах рекуперация энергии в сеть невозможна, поэтому через ключ VT7 в цепь постоянного тока включается дополнительное сопротивление R_T для сброса энергии. При работе на низких скоростях для более эффективного торможения используется режим динамического торможения постоянным током.

На верхней крышке расположен съёмный пульт управления с кнопками и графическим индикатором. Непосредственно под крышкой находится плата управления с компонентами микропроцессорной системы, разъёмы для связи с устройствами в USB формате и клеммами для подключения цепей управления и сигнализации.

Кроме силового модуля с IGBT–транзисторами, на охлаждающем радиаторе расположены мостовой выпрямитель, силовой ключ для организации торможения и температурный датчик для контроля теплового режима преобразователя частоты. Для принудительного охлаждения элементов преобразователя частоты в корпусе установлен малогабаритный вентилятор с регулируемой частотой вращения.

6 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-технического исследования, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

- организовать работы по научному исследованию;
- осуществить планирование этапов выполнения исследования;
- оценить коммерческий потенциал и перспективность проведения научного исследования;
- рассчитать бюджет проводимого научно-технического исследования;
- произвести оценку социальной и экономической эффективности исследования.

5.1 Предпроектный анализ

5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование. Электропривод ленточного весодозатора непрерывного действия, разработанный для весового


дозирования кокса или железосодержащей руды, работающий на номинальную частоту 50 Гц и номинальное напряжение 380 В удовлетворит потребности предприятий металлургической, горнорудной, химической промышленностей.

Рассмотрим сегментирование по отрасли применения и типам используемых двигателей (таблица 10).

Таблица 10 – Карта сегментирования по отрасли применения и типам используемых двигателей

		Отрасли применения		
		Металлургическая	Горнорудная	Химическая
Типы двигателей	Асинхронные дв.			
	Синхронные дв.			

 – более широкое использование,

 – менее широкое использование.

Согласно представленной карте сегментирования видно, что использование асинхронных двигателей в системе электропривода насосов актуальна, но требует улучшения.

5.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 11, подобраны, исходя из

выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Таблица 11– Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1.Повышение производительности пользователей	0,14	5	3	4	0,7	0,42	0,56
2. Удобство использования	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
3. Энергоэффективность	0,2	4	5	5	0,8	1	1
4. Надежность	0,12	5	3	4	0,6	0,36	0,48
5. Уровень шума	0,06	4	4	4	0,24	0,24	0,24
6. Безопасность	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,09	4	3	2	0,36	0,27	0,18
2. Цена	0,12	4	5	4	0,48	0,6	0,48
3.Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
Итого	1	40	34	35	4,43	3,87	4,02

Итоговый вес показателей должны составлять 1. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i$$

где: K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i– вес показателя (в долях единицы);

B_i– балл i-го показателя.

Основываясь на проведенном анализе конкурентов, можно сказать что проект превосходит конкурентные исследования, что связано с точностью

привода и предполагаемым сроком эксплуатации. Однако конкурентоспособность у выбранных объектов достаточно высока.

5.1.3 FAST-анализ

Стадия 1.

В рамках магистерской диссертации в качестве объекта FAST-анализа выступает проектируемый асинхронный двигатель электропривода для нефтяного насоса.

Стадия 2.

Электропривод с асинхронным двигателем является самым массовым видом привода в промышленности, коммунальном и сельском хозяйстве. Такое положение определяется простотой изготовления и эксплуатации АД, их меньшими по сравнению с двигателями постоянного тока массой, габаритами и стоимостью, надежностью в работе.

В асинхронных двигателях вращающееся магнитное поле создаётся трёхфазной системой при включении её в сеть переменного тока. Вращающееся магнитное поле статора пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них электродвижущую силу (ЭДС). Если обмотка ротора замкнута на какое-либо сопротивление или накоротко, то в ней под действием индуцируемой э.д.с. проходит ток. В результате взаимодействия тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем обмотки статора создаётся вращающий момент, под действием которого ротор начинает вращаться по направлению вращения магнитного поля. Для изменения направления вращения ротора необходимо поменять местами по отношению к зажимам сети любые два из трёх проводов, соединяющих обмотку статора с сетью (таблица 12).

Таблица 12 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Статор	1	Корпус двигателя, она неподвижна, внутри неё имеются специальные пазы (магнитопровод), куда пофазно уложены витки (секции) обмоток (статорная обмотка)	×		
Ротор	1	Вращается и несет на себе обмотку	×		
Обмотки статора	1	Образуют магнитную цепь асинхронного двигателя	×		
Магнитопровод ротора	1	Образуют магнитную цепь асинхронного двигателя	×		
Вал	1	Служит для передачи крутящего момента от двигателя на механическую нагрузку		×	
Коробка выводов	1	К ней подводятся выводы обмоток, также для подключения электропитания двигателя			×
Вентилятор	1	Для создания охлаждения двигателя, так как при своей работе асинхронный двигатель выделяет тепло			×

Стадия 3

Для оценки значимости функции используем метод расстановки приоритетов, для этого построим матрицу смежности функций (таблица 13), где «<» – менее значимая; «=» – одинаковые функции по значимости; «>» – более значимая, и матрицу количественных соотношений функций (таблица 14), для которой 0,5 при «<»; 1,5 при «>»; 1 при «=».

Таблица 13 – Матрица смежности

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6	Функция 7
Функция 1	=	=	>	>	>	>	>
Функция 2	=	=	>	>	>	>	>
Функция 3	<	<	=	=	>	>	>
Функция 4	<	<	=	=	>	>	>
Функция 5	<	<	<	<	=	>	>
Функция 6	<	<	<	<	<	=	<
Функция 7	<	<	<	<	<	>	=

Таблица 14 – Матрица смежности

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Функция 6	Функция 7	Итого
Функция 1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	9,5
Функция 2	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	9,5
Функция 3	0,5	0,5	1	1	1,5	1,5	1,5	7,5
Функция 4	0,5	0,5	1	1	1,5	1,5	1,5	7,5
Функция 5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1,5	1,5	6
Функция 6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	4
Функция 7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1	5
								\sum 49

Стадия 4

С помощью нормативного метода проведена оценка уровня затрат на выполнение каждой функции.

Таблица 15 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наимен. детали	Кол-во дет. на узел	Выполняемая функция	Норма расхода, кг	Трудовое мк. дет., нормо-ч	Стоим. мат-ла, руб	ЗП, руб.	Себест оим., руб.
Статор	1	Корпус двигателя, она неподвижна, внутри неё имеются специальные пазы (магнитопровод), куда пофазно уложены витки (секции) обмоток (статорная обмотка)	54	1,8	23	1219	1242
Ротор	1	Вращается и несет на себе обмотку	36	1,8	7	245	252
Обмотки статора	1	Образуют магнитную цепь асинхронного двигателя	16	1,8	341,5	5122	5464
Магнито-провод ротора	1	Образуют магнитную цепь асинхронного двигателя	175	1,6	65	11310	11375
Вал	1	Служит для передачи крутящего момента от двигателя на механическую нагрузку	54	3,2	23	1219	1242
Коробка выводов	1	К ней подводятся выводы обмоток, также для подключения электропитания двигателя	0,5	2,8	180	180	360
Вентилятор	1	Для создания охлаждения двигателя, т. к. при работе АД выделяет тепло	0,5	1,2	200	180	380

Стадия 5

Суммирование затрат по каждой из функций определяет общую стоимость каждой из них и используется для построения функционально-стоимостной диаграммы (ФСД), представленной на рисунке 1. Построенная ФСД позволяет выявить диспропорции между важностью функций и затратами на них.

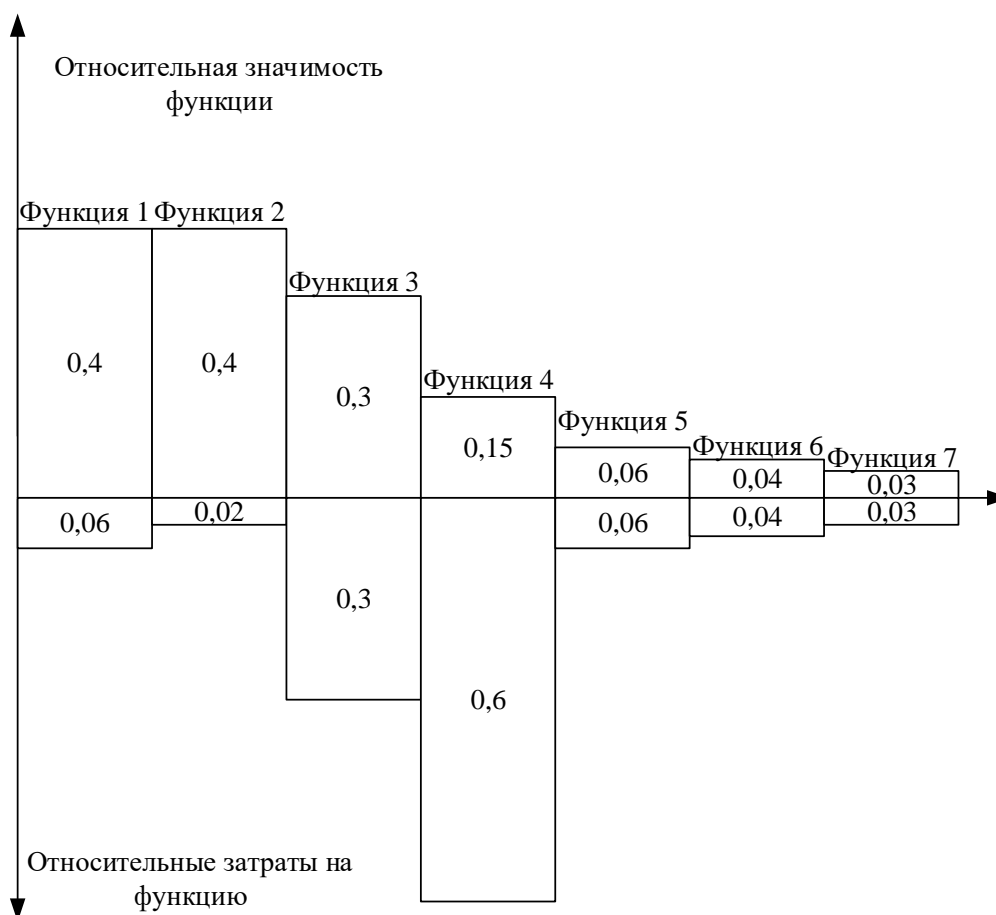


Рисунок 39 – Функционально-стоимостная диаграмма

5.1.4 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. Анализ проводится в 3 этапа.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде (таблица 16).

Таблица 16 – Матрица SWOT

<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>С1. Высокое качество питающего напряжения</p> <p>С2. Надежность технологии и аварийной сигнализации</p> <p>С3. Квалифицированный персонал</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.</p> <p>Сл2. Аварийность</p> <p>Сл3. Высокая стоимость оборудования</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Экономия электроэнергии за счет использования ПЧ</p> <p>В2. Повышение износостойкости электропривода</p> <p>В3. Повышение стоимости конкурентных систем</p>	<p>Угрозы:</p> <p>У1. Развитая конкуренция</p> <p>У2. Риск несвоевременной поставки оборудования</p> <p>У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции</p> <p>У4. Отсутствие финансового обеспечения со стороны государства</p>

Второй этап – выявление соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды, что поможет выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Интерактивная матрица проекта представлена в таблице 17. 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 «-».

Таблица 17 – Интерактивная матрица проекта

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

В рамках третьего этапа составляется итоговая матрица SWOT-анализа, которая приведена в таблице 18.

Таблица 18 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта: С1. Высокое качество питающего напряжения С2. Надежность технологии и аварийной сигнализации С3. Квалифицированный персонал</p>	<p>Слабые стороны: Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой. Сл2. Аварийность Сл3. Высокая стоимость оборудования</p>
<p>Возможности: В1. Экономия электроэнергии за счет использования ПЧ В2. Повышение износостойкости электропривода В3. Повышение стоимости конкурентных систем</p>	<p>Быстрое продвижение проекта возможно за счет улучшенной износостойкости электропривода</p>	<p>Отсутствие квалификационных кадров и потенциальных потребителей может усложнить процесс эксплуатации.</p>
<p>Угрозы: У1. Развитая конкуренция У2. Риск несвоевременной поставки оборудования У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции У4. Отсутствие финансового обеспечения со стороны государства</p>	<p>Создание конкурентоспособного проекта.</p>	<p>Экономическая ситуация оказывает сильный эффект на процесс внедрения проекта.</p>

5.1.5 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого заполнена специальную форму, содержащая показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта (таблица 19).

При проведении анализа по таблице, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Таблица 19 – Оценка степени готовности проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	3
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	2	3
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	5	5
67	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	5	5
8	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	3
9	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
10	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
11	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	5	5
12	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	2	2

13	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	4	4
14	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	3
15	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	5	5
16	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	57	56

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i$$

где: $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Значение $B_{\text{сум}}$ позволяет оценить готовность научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. В итоге получилось, что разработка является перспективной, а уровень имеющихся знаний у разработчика выше среднего.

Выявлены слабые стороны исследования, дальнейшего улучшения необходимо провести маркетинговые исследования рынков сбыта, разработать бизнес-план коммерциализации научной разработки и проработать вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок.

5.1.6 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Для коммерциализации результатов, проведенного исследования будут использоваться следующие методы: инжиниринг и передача интеллектуальной собственности.

Инжиниринг будет предполагать предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне,

именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг, связанных с проектированием, строительством и вводом объекта в эксплуатацию, с разработкой новых технологических процессов на предприятии заказчика.

Передача интеллектуальной собственности будет производиться в уставной капитал предприятия или государства.

Данные методы коммерциализации будут наиболее продуктивными в отношении данного проекта.

5.2 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта (таблица 20).

Таблица 20 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
НИ ТПУ	Выпуск высококвалифицированных специалистов
«Сибтензоприбор»	Имитационная модель электропривода весодозатора

В таблице 21 представлена иерархия целей проекта и критерии достижения целей.

Таблица 21 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Разработка электропривода ленточного весодозатора непрерывного действия, предназначенного для весового дозирования кокса/железной руды
Ожидаемые результаты проекта:	Разработана система электропривода, выбраны подходящие элементы системы и полученные статические и динамические характеристики соответствуют необходимым
Критерии приемки результата проекта:	<p>Электропривод, соответствующий требованиям ТЗ:</p> <ul style="list-style-type: none"> • нормальная работа от промышленной сети частотой 50 Гц и переменным напряжением 380 В. Максимальное отклонение напряжения питающей сети +10% -15%; • работа электродвигателя в первом квадранте, • диапазон регулирования скорости не менее 1:60; • время разгона до рабочей скорости не менее 3с; • погрешность скорости при изменении нагрузки не более 2%;
Требования к результату проекта:	Определены основные электромагнитные соотношения для двигателя электропривода
	Полученные механические и электромеханические характеристики разомкнутой системы соответствуют ТЗ
	Проведено имитационное моделирование привода в среде MatlabSimulink
	Подобраны элементы системы и сняты статических и динамических характеристик полученной системы

В таблице 22 представлена организационная структура проекта (роль каждого участника, их функции, трудозатраты).

Таблица 22 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо-затраты, час.
1.	Чернышев А. Ю. НИ ТПУ, доцент ИШЭ	Руководитель проекта	Консультирование, координация деятельности, определение задач, контроль выполнения.	212
2.	Рындин П. С., магистрант ИШЭ	Исполнитель по проекту	Анализ литературных источников, проведение расчета, моделирования, анализ лабораторных данных, написание работы	212
ИТОГО:				424

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта (таблица 23).

Таблица 23 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
Бюджет проекта	1471650
Источник финансирования	НИ ТПУ
Сроки проекта:	01.09.2021-31.05.2022
Дата утверждения плана управления проектом	15.09.2021
Дата завершения проекта	12.06.2022

5.3 Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

План управления научным проектом должен включать в себя следующие элементы:

- иерархическая структура работ проекта;
- контрольные события проекта;
- план проекта;
- бюджет научного исследования.

Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта (рисунок 2).



Рисунок 40 – Иерархическая структура работ

5.3.2 План проект

В рамках планирования научного проекта построены календарный график проекта (таблицы 24 и 25).

Таблица 24– Календарный план проекта

Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
Утверждение темы магистерской диссертации	7	01.09.21	07.09.21	Руководитель и исполнитель
Согласование плана работ	7	08.09.21	15.09.21	Руководитель и исполнитель.
Литературный обзор	21	16.09.21	07.10.21	Исполнитель.
Расчет параметров электродвигателя	14	08.10.21	22.10.21	Исполнитель.
Выбор элементов электропривода	27	23.10.21	19.11.21	Руководитель и исполнитель.
Проведение имитационного моделирование электропривода в среде MatlabSimulink	139	20.11.21	08.04.2022	Руководитель и исполнитель.
Обобщение и оценка результатов	35	09.04.22	14.05.2022	Руководитель и исполнитель
Составление пояснительной записки	28	15.05.22	12.06.22	Исполнитель
Итого:	270			

Таблица 25 – Календарный план график проведения НИОКР по теме

Наименование этапа	Т, дней	2021				2022					
		Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Утверждение темы магистерской диссертации	7	■									
Согласование плана работ	7	■ ■									
Литературный обзор	21		■								
Расчет параметров электродвигателя	14			■ ■							
Выбор элементов электропривода	27			■ ■							
Проведение имитационного моделирование электропривода в среде MatlabSimulink	139				■	■	■	■	■	■	
Обобщение и оценка результатов	35									■ ■	
Составление пояснительной записки	28										■

■ Руководитель ■ Исполнитель

5.4 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. Смета затрат включает в себя следующие статьи:

- Специальное оборудование
- Зарботную плату исполнителей технического проекта
- Отчисления во внебюджетные фонды
- Накладные расходы

В настоящую смету включается основная и дополнительная заработные платы научных и инженерно-технических работников, отчисления во внебюджетные фонды, материальные и накладные расходы,

Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ. В данную статью включены все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по теме НИР (таблица 26).

Таблица 26 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Компьютер (НР)	1	43 000,0	43 000,0
2	Программное обеспечение MicrosoftOffice	1	5 990,0	5990,0
3	MathCad	1	7818	7818
4	Matlab Simulink (student version)	1	0	0
Итого, руб.:				56808

5.4.1 Основная заработная плата

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 сводится в таблице 27.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату: $Z_{zn} = Z_{осн} + Z_{доп}$,

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

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-15 % от $Z_{осн}$).

Величина расходов по основной заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок: $Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p$

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m + Z_d + Z_{рк}}{F_d},$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

Z_d – доплата за руководство расчетного проектирования;

$Z_{рк}$ – доплата с учетом районного коэффициента $K_{рк}$;

$K_{рк}$ равный 1,3 (для Томска).

F_d – фонд рабочего времени персонала, раб.дн.

Таблица 27 – Расчёт основной и дополнительной заработной платы

Исполнители	Z_m , руб	$Z_{доп}$, руб	$Z_{рк}$, руб	Z_m , руб	$Z_{дн}$, руб	T_p , дн	$Z_{осн}$, руб	$Z_{доп}$, руб	
Руководитель	35540	710,8	10875,24	47126,04	2489,5	212	527771,8	79165,8	
Исполнитель	14560		4368	18928	999,9	212	211977,6	31796,6	
ИТОГО								739749,4	110962

5.4.2 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 следующей формулы: $Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп})$,

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды – 30,2%.

$$Z_{внеб} = 0,302 \cdot 606937,6 = 183295,2 \text{ руб.}$$

5.4.3 Накладные расходы

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

$$C_{накл} = k_{накл} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,1 \cdot (739749,4 + 110962) = 85071,18$$

где $k_{накл}$ – коэффициент накладных расходов принят 0,1.

5.4.4. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 28.

Таблица 28 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Структура затрат, %
Специальное оборудование	56808	4,83
Основная заработная плата	739749,4	62,91
Дополнительная заработная плата	110962,41	9,44
Отчисления во внебюджетные фонды	183295,15	15,59
Накладные расходы	85071,18	7,23
Бюджет затрат НТИ	1175886,17	100

Исходя из представленной выше таблицы, можно сделать вывод, что общие затраты на реализацию технического проекта составят 1175886,17 рублей, из которых большую часть (62,91%) составят затраты по заработной плате исполнителей проекта и накладные расходы (15,59%).

5.5 Организационная структура проекта

Данный проект представлен в виде проектной организационной структуры. Проектная организационная структура проекта представлена на рисунке 3.



Рисунок 41 – Проектная организационная структура проекта

5.5.1 План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта (таблица 29).

Таблица 29 – План управления коммуникациями

Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передается информацию
Статус проекта	Исполнитель	Руководителю	Еженедельно (понедельник)
Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Исполнитель	Руководителю	Ежемесячно (конец месяца)
Документы и информация по проекту	Исполнитель	Руководителю	Не позже сроков графиков и к. точек
О выполнении контрольной точки	Исполнитель	Руководителю	Не позже дня контрольного события по плану управления

5.5.2 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты.

Информация по возможным рискам сведена в таблицу 30.

Таблица 30 – Реестр рисков

№	Риск	Вероятность наступления	Влияние риска	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Неточность метода анализа	2	5	Низкий	Внешний и внутренние анализы	Низкая точность метода анализа
2	Погрешность расчетов	3	5	Средний	Пересчет, проверка	Невнимательность
3	Отсутствие интереса к результатам исследования	2	5	Низкий	Привлечение предприятий, публикация результатов	Отсутствие результатов исследования

5.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности

5.6.1 Оценка абсолютной эффективности исследования

В основе проектного подхода к инвестиционной деятельности предприятия лежит принцип денежных потоков. Особенностью является его прогнозный и долгосрочный характер, поэтому в применяемом подходе к анализу учитываются фактор времени и фактор риска. Для оценки общей экономической эффективности используются следующие основные показатели:

- чистая текущая стоимость (NPV);
- индекс доходности (PI);
- внутренняя ставка доходности (IRR);
- срок окупаемости (DPP).

Чистая текущая стоимость (NPV) – это показатель экономической эффективности инвестиционного проекта, который рассчитывается путём дисконтирования (приведения к текущей стоимости, т.е. на момент инвестирования) ожидаемых денежных потоков (как доходов, так и расходов).

Расчёт NPV осуществляется по следующей формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{ont}}{(1+i)^t} - I_0$$

где: $ЧДП_{ont}$ – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

I_0 – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

t – номер шага расчета ($t= 0, 1, 2 \dots n$)

n – горизонт расчета;

i – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Расчёт NPV позволяет судить о целесообразности инвестирования денежных средств. Если $NPV > 0$, то проект оказывается эффективным.

Расчет чистой текущей стоимости представлен в таблице 31. При расчете рентабельность проекта составляла 20-25 %, норма амортизации- 10 %.

Таблица 31 – Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Выручка от реализации, руб.	0	1446340,0	1446340,0	1446340,0	1446340,0
2	Итого приток, руб.	0	1446340,0	1446340,0	1446340,0	1446340,0
3	Инвестиционные издержки, руб.	1175886	0	0	0	0
4	Операционные затраты, руб. (35% от бюджета)	0	352765,8	352765,8	352765,8	352765,8
5	Налогооблагаемая прибыль(1-4)	0	1093574,1	1093574,1	1093574,1	1093574,1
6	Налоги 20 %, руб.(5*20%)	0	218714,8	218714,8	218714,8	218714,8
8	Чистая прибыль, руб.(5-6)	0	874859,3	874859,3	874859,3	874859,3
9	Чистый денежный поток (ЧДП), руб.(чистая прибыль + амортизация)	-1175886	992447,9	992447,9	992447,9	992447,9
10	Коэффициент дисконтирования при $i=23%$ (КД)	1	0,813	0,661	0,537	0,437
11	Чистый дисконтированный	-1175886	806868,2	655990,4	533325,6	433598,0

	денежный поток (ЧДД), руб.(9*10)					
12	\sum ЧДД	2429782,2 руб.				
12	Итого NPV, руб.	1253896,1 руб.				

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет 1253896,1 рублей, что позволяет судить об его эффективности.

Индекс доходности (PI) – показатель эффективности инвестиции, представляющий собой отношение дисконтированных доходов к размеру инвестиционного капитала. Данный показатель позволяет определить инвестиционную эффективность вложений в данный проект. Индекс доходности рассчитывается по формуле:

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_t}{(1+i)^t} / I_0 = 2 > 1$$

где: ЧДД - чистый денежный поток, руб.;

I_0 – начальный инвестиционный капитал, руб.

Таким образом, проект является эффективным.

Внутренняя ставка доходности (IRR). Значение ставки, при которой обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или IRR. Формальное определение «внутренней ставки доходности» заключается в том, что это та ставка дисконтирования, при которой суммы дисконтированных притоков денежных средств равны сумме дисконтированных оттоков или =0. По разности между IRR и ставкой дисконтирования i можно судить о запасе экономической прочности инвестиционного проекта. Чем ближе IRR к ставке дисконтирования i , тем больше риск от инвестирования в данный проект.

Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования (i) существует обратная зависимость. Эта зависимость представлена в таблице 32 и на рисунке 4.

Таблица 32 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

№	Наименование показателя	0	1	2	3	4	NPV, руб.
1	Чистые денежные потоки, руб.	-1175886	992447,9	992447,92	992447,9	992447,9	

		Коэффициент дисконтирования					
2	0,1	1	0,909	0,826	0,751	0,683	
	0,2	1	0,833	0,694	0,578	0,482	
	0,3	1	0,769	0,592	0,455	0,350	
	0,4	1	0,714	0,510	0,364	0,260	
	0,5	1	0,667	0,444	0,295	0,198	
	0,6	1	0,625	0,390	0,244	0,153	
	0,7	1	0,588	0,335	0,203	0,112	
	0,8	1	0,556	0,309	0,171	0,095	
	0,9	1	0,526	0,277	0,146	0,077	
	1	1	0,500	0,250	0,125	0,062	
3	Дисконтированный денежный поток, руб.						
	0,1	-1175886	902135,2	819762,0	745328,4	677841,9	1969181,3
	0,2	-1175886	826709,1	688758,9	573634,9	478359,9	1391576,6
	0,3	-1175886	763192,5	587529,2	451563,8	347356,8	973756,0
	0,4	-1175886	708607,8	506148,4	361251,0	258036,5	658157,6
	0,5	-1175886	661962,8	440646,9	292772,1	196504,7	416000,3
	0,6	-1175886	620280,0	387054,7	242157,3	151844,5	225450,3
	0,7	-1175886	583559,4	332470,1	201466,9	111154,2	52764,4
	0,8	-1175886	551801,0	306666,4	169708,6	94282,6	-53427,6
	0,9	-1175886	522027,6	274908,1	144897,4	76418,5	-157634,6
	1,0	-1175886	496224,0	248112,0	124056,0	61531,8	-245962,5

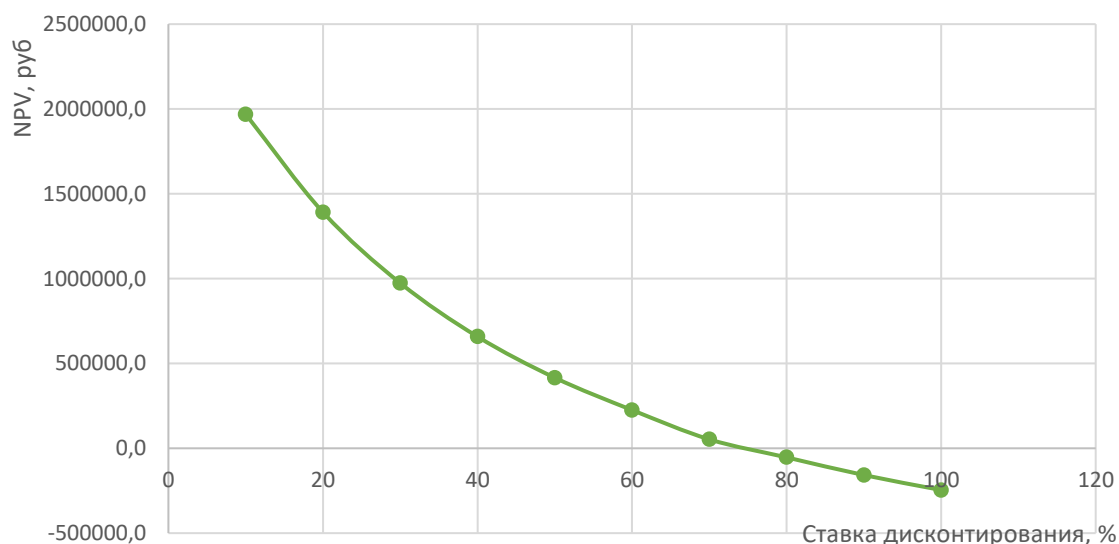


Рисунок 42 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит

название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,74.

$IRR > i$, проект эффективен.

Запас экономической прочности проекта: $74\% - 23\% = 51\%$

Дисконтированный срок окупаемости. Как отмечалось ранее, одним из недостатков показателя простого срока окупаемости является игнорирование в процессе его расчета разной ценности денег во времени. Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости. То есть это время, за которое денежные средства должны совершить оборот.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (таблица 33).

Таблица 33 – Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Дисконтированный чистый денежный поток ($i = 0,23$), руб.	- 1175886	806868,2	655990,4	533325,6	433598,0
2	То же нарастающим итогом, руб.	- 1175886	- 369017,9	286972,5	820298,1	1253896,1
3	Дисконтированный срок окупаемости	$DPP_{диск} = 1 + (369017,9 / 655990,4) = 1,56$ года				

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в целом или отдельных категорий населения или групп лиц, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты (таблица 34).

Таблица 34 – Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Отсутствие имитационной модели электропривода	Создана имитационная модель, позволяющая получить необходимые переходные процессы и оценить их параметры: время переходного процесса, перерегулирование.
Управление существующей схемой организовано на скалярном законе управления с	Управление данного электропривода осуществляется по закону векторного управления, что позволяет увеличить производительность и

использованием дополнительных обратных связей.	осуществить контроль и регулирование токов статора напрямую без использования дополнительных системы обратной связи.
--	--

5.6.2 Оценка сравнительной 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 получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по следующей формуле:

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

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

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

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по следующей формуле:

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

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.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы (таблице 35).

Таблица 35 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Выход продукта	0,1	5	3	4
2. Удобство в эксплуатации	0,15	5	4	4
3. Надежность	0,15	5	3	4
4. Безопасность	0,2	4	4	4
5. Повышение производительности	0,25	5	3	4
6. Энергоэффективность	0,15	4	5	5
Итого	1	28	22	25

$$I_m^p = 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 = 4,65$$

$$I_1^A = 3 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 = 3,65$$

$$I_2^A = 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 = 4,15$$

Интегральный показатель эффективности разработки $I_{финр}^p$ и аналога $I_{финр}^a$ определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p}; I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a}$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a}$$

где: $\mathcal{E}_{ср}$ – сравнительная эффективность проекта;

$I_{финр}^p$ – интегральный показатель разработки;

$I_{финр}^a$ – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Сравнительная эффективность разработки по сравнению с аналогами представлена в таблице 36.

Таблица 36 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,16	0,2	0,14
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,65	4,35	3,80
3	Интегральный показатель эффективности	29,06	21,75	27,14
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,00	0,80	1,14

Выводы: Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять, что разработанный вариант проведения проекта является наиболее эффективным при решении поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

В ходе выполнения раздела финансового менеджмента определена чистая текущая стоимость, (NPV), равная 1253896 руб; индекс доходности $PI=2$, внутренняя ставка доходности $IRR=74\%$, срок окупаемости $PP_{дск} = 1,56$ года.

Таким образом, в работе представлен ресурсоэффективный проект с высоким запасом финансовой прочности и достаточно коротким сроком окупаемости.

6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

Данный раздел ВКР посвящён характеристике проектных решений, производственных процессов и оборудования, анализу опасных и вредных факторов при данном виде производственной деятельности и решению вопросов безопасности на основе требований действующих нормативно-технических документов.

Объектом исследования является ленточный весодозатор непрерывного действия. Предметом исследования является проектирование электропривода ленточного дозатора. Целью работы является разработка электропривода, предназначенного для весового дозирования кокса или железосодержащей руды согласно требованию технического задания, математическое моделирование и исследование при помощи различных программных средств.

Эксплуатация привод весодозатора производится в производственном помещении 3х2,5 м, поэтому целесообразно рассмотреть безопасность труда при работе стоя. Освещение помещения осуществляется с помощью искусственных и естественных источников, вентиляция осуществляется с помощью приточно-вытяжной системы.

Все вышеуказанные факторы могут повлиять на здоровье, эмоциональное состояние и работоспособность сотрудников лаборатории.

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Согласно ТК РФ, Статья 219 [29] право работника на труд в условиях, отвечающих требованиям охраны труда – каждый работник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;

- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
- гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

Трудовые и экономические отношения между работником (слесарь-механик, обслуживающий работу привода) и организацией регулируются в Трудовом кодексе Российской Федерации. [29] Режим рабочего времени регулируется согласно ст. 91 ТК РФ и не должен превышать 40 ч в рабочую неделю. Согласно ст. 115 ТК РФ каждый работник имеет право на ежегодный оплачиваемый отпуск продолжительностью 28 календарных дней. Порядок начисления и определения заработной платы регламентируется ст. 130 ТК РФ. Размер заработной платы не должен быть ниже минимального размера оплаты труда для Томской области. Обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом. Обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя.

Работа с электроприводом предполагает стоя, что подразумевает возможное наличие угроз жизни и здоровья, следует обеспечить комфортную и безопасную среду для работника согласно ГОСТ 12.2.033-78 «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ стоя»

[15], а также организовать режим труда и отдыха согласно методическим рекомендациям [18] и [19]; правильная установка освещения, которое не должно светить в глаза и оставлять блики на рабочем мониторе; для облегчения длительной работы эксперты рекомендуют использовать вспомогательное оборудование, например, особые очки, антибликовые мониторы, коврики для мыши и проч. Помещения должны иметь естественное и искусственное освещение. Поверхность пола в рабочем помещении должна быть ровной, без выбоин, нескользкой, удобной для очистки и влажной уборки, обладать антистатическими свойствами. В помещении должны находиться аптечка первой медицинской помощи.

6.2 Производственная безопасность

6.2.1 Анализ опасных и вредных факторов на рабочем месте

Обеспечение безопасности труда обязательно на любом предприятии, важно создать такие условия труда для работников, при которых риски вреда здоровью и будут сведены к минимуму. Проведем анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при работе в цеху (таблица 37). Воспользуемся ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [13] для идентификации потенциальных факторов.

Таблица 37 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015 [2])	Нормативные документы
1. Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [25]
2. Превышение уровня шума	
3. Превышение уровня вибрации	
4. Недостаточная освещенность рабочей зоны	ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений [16]

5. Повышение уровня производственной пыли	Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 [20]
6. Воздействие электрического тока	Правила устройства электроустановки (ПУЭ) [23]

6.2.2 Микроклимат

Под микроклиматом производственных помещений понимается состояние внутренней среды помещения, которая оказывает воздействие на человека. Микроклимат определяется воздействием на человека температуры воздуха и окружающих поверхностей, насыщенность воздуха механическими частицами (пылью), освещенностью, уровнем шума, биологическими и химическими загрязнениями воздуха.

Работа при пониженных температурах провоцирует сердечно-сосудистые, простудные заболевания, оказывает пагубное влияние на позвоночник и суставы. Повышенные температуры ухудшают работоспособность, может вызывать головные боли, слабость, интенсивное потоотделение, повышение артериального давления, тепловые удары. Влажность воздуха оказывает влияние на терморегуляцию организма.

Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений представлены в таблице 38 [25]. Работа в производственном цеху относится к средней тяжести – Па.

Таблица 38 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Па	17-23	16-24	15-75	0,1
Теплый	Па	18-27	17-28	15-75	0,1

производственных помещений

Для достижения оптимальных параметров микроклимата в производственных помещениях используются системы кондиционирования воздуха, для допустимых параметров – обычные системы вентиляции и отопления.

Так же в общественных помещениях постоянным вредным выделением является выдыхаемый людьми углекислый газ (CO_2). Определение потребного воздухообмена производится по количеству углекислого газа, выделяемого человеком и по допустимой концентрации его. Количество углекислого газа в зависимости от возраста человека и выполняемой работы приведены в табл. 2 [17], так взрослый человек при физической работе производит 45 л/ч (68 г/ч) углекислого газа. Содержание углекислоты в атмосфере населенных пунктов следует принимать 1000 мг/м³ для больших городов (свыше 300 тыс. жителей). ПДК CO_2 в воздухе рабочей зоны – 9000 мг/м³.

Одновременно в помещении может работать до 2 человек, тогда количество CO_2 , выделяемого всеми работниками:

$$G = N_{\text{людей}} \cdot g_{\text{CO}_2} = 2 \cdot 68 = 136 \text{ г/ч}$$

Потребный воздухообмен:

$$L = 1000 \cdot \frac{G}{x_g - x_n} = 1000 \cdot \frac{280}{9000 - 1000} = 17 \text{ м}^3/\text{ч}$$

где x_g – 9000 мг/м³ – предельно допустимая концентрация CO_2 в воздухе рабочей зоны помещения, согласно [14];

x_n – 1000 мг/м³ – максимально возможная концентрация той же вредности в воздухе населенных мест по [24].

Кратность воздухообмена n , которая показывает, сколько раз в течение одного часа воздух полностью сменяется в помещении. Кратность воздухообмена определяется по формуле:

$$n = \frac{L}{V} = \frac{17}{3 \cdot 2,5 \cdot 3,5} = 0,756 \text{ ч}^{-1}$$

где V – внутренний объем помещения, м³.

6.2.3 Шум и вибрация

Превышение уровня шума так же относится к вредным факторам производства. Шумом могут являться различные виды звуков вызывающие неприятные ощущения и отвлекающие от нормальной деятельности человека. Источниками шума при установке электропривода ленточного весодозатора могут являться: работающие механизмы и аппараты, трансформатор, система вентилирования и кондиционирования воздуха, соударение металлических деталей при установке, шум вращающихся элементов. Предельно допустимые эквивалентные уровни звука представлены в таблице 39 [25].

Таблица 39 – Предельно допустимые эквивалентные уровни звука, дБА

Рабочее место	Уровни звукового давления, дБ									По шкале
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Мех. цех	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

Повышенный уровень вибрации оказывает разрушающее воздействие не только на состояние машин и механизмов, но и организм человека: ухудшение состояния нервной и костно-суставной системы, повышение артериального давления, повышение энергетических затрат организма.

Источниками вибрации при установке электропривода ленточного весодозатора могут являться: работающие механизмы и аппараты.

Для уменьшения влияния шумов и вибраций на состояние работников необходимо:

- качественное изготовление и крепление деталей;
- использование неметаллических деталей вместо металлических;
- применение звукоизолирующих и звукопоглощающих преград;
- применение амортизации, виброгасителей;
- правильная организация труда и отдыха;
- оснащение работников средствами индивидуальной защиты (наушники, беруши, противозумные каски, одежда).

6.2.4 Освещение

Человек с помощью зрения получает около 90% всей информации, качество поступления которой зависит от освещения. В условиях неудовлетворительного освещения человеку приходится напрягать зрительный аппарат, что приводит к утомлению зрения и организма в целом, а также со временем вызывает потерю ориентации среди оборудования, что может привести к получению травмы.

В зависимости от источника света освещение может быть:

- естественным (создается солнечным диском диффузионным светом небосвода);
- искусственным (создается электролампами);
- совмещенным (естественное + искусственное).

1. Выбор системы освещения. Для производственных помещений всех назначений применяются системы общего (равномерного или локализованного) и комбинированного (общего и местного) освещения. Система комбинированного освещения применяется для производственных помещений, в которых выполняются точные зрительные работы. Для данной рабочей зоны рассчитывается общее равномерное освещение.

2. Выбор источников света. Источники света, применяемые для искусственного освещения, делят на две группы – газоразрядные лампы и лампы накаливания. Для общего освещения, как правило, применяются газоразрядные лампы как энергетически более экономичные и обладающие большим сроком службы. Наиболее распространёнными являются люминесцентные лампы. Не смотря на большую стоимость, необходимость в обслуживании и пусковой аппаратуре, они обладают хорошей светоотдачей, имеют длительный срок службы, хорошую цветопередачу и низкую температуру.

3. Выбор светильников и их размещение. Светильник – прибор, перераспределяющий свет ламп внутри больших телесных углов и

обеспечивающий угловую концентрацию светового потока. При выборе типа светильников следует учитывать светотехнические требования, экономические показатели, условия среды.

При выборе необходимого количества ламп необходимо руководствоваться целью создания требуемой освещенности. Выбор необходимой освещенности осуществляется по наименьшей освещенности рабочей поверхности E_{min} . Если учитывать, что совершаются работы средней точности, то можно принять значение E_{min} 150-200 лк удовлетворяющее указанному в [25]. Для помещений, где проводятся общие работы с маинами выбираем $E_{min} = 300$ лк.

Производственное помещение имеет следующие габаритные размеры: длина $A = 3$ м, ширина $B = 2,5$ м.

Согласно исследованиям, в зависимости от типа светильников существует наиболее выгодное расстояние между светильниками: $L/h = \lambda$,

где L - расстояние между рядами светильников;

h_p - высота подвеса светильника над рабочей поверхностью.

Принимаем, что светильники укреплены непосредственно на потолок.

Высота помещения: $H = 3$ м. Высота рабочей поверхности: $h_p = 0,5$ м.

тогда $h = H - h_p = 3 - 0,5 = 2,5$ м.

Расстояние от стен помещения до крайних светильников $L/3$.

Для нормальных помещений с хорошим отражением потолка и стен, при умеренной влажности и запылённости допускается применение открытых двухламповых светильников типа ПВЛ. Интегральный критерий оптимальности расположения светильников является величина $\lambda = 1,5$.

Ширина между рядами светильников:

$$L = \lambda \cdot h = 1,5 \cdot 2,5 = 3,75 \text{ м}, \quad L/3 = 3,75/3 = 1,25 \text{ м.}$$

Количество рядов светильников:

$$N = \frac{B}{L} = \frac{2,5}{3,75} = 0,667 \text{ шт.}$$

где N – количество рядов светильников, шт;

B – ширина помещения, м;

L – расстояние между светильниками, м.

Количество светильников в ряду:

$$M = \frac{A}{L} = \frac{3}{3,55} = 0,909 \text{ шт.}$$

где M – количество светильников в ряду, шт;

A – длина помещения, м;

L – расстояние между светильниками, м.

Округлим полученные значения и примем к установке 1 светильник.

Определим световой поток F_n :

$$F_n = \frac{E_{min} \cdot S \cdot K \cdot z}{N \cdot n \cdot \eta},$$

где $E_{min} = 300$ лк; – нормированная минимальная освещенность, лк.

S – площадь, освещаемого помещения, м²;

$K = 1,7$ – коэффициент запаса, (для помещений со средним выделением пыли);

z – коэффициент минимальной освещенности. $z = 1,1$ (для люминесцентных ламп);

n – число светильников, шт;

N – число ламп в светильнике, шт;

η – коэффициент использования светового потока ламп, который зависит от типа светильника, коэффициентов отражения потолка ρ_n и стен ρ_c , светопоказателя помещения i ; $\rho_n = 50\%$; $\rho_c = 30\%$.

Определим светопоказатель помещения:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{3 \cdot 2,5}{2,2 \cdot (3 + 2,5)} = 0,62,$$

где i – светопоказатель помещения; A – длина помещения; B – ширина помещения; H_p – высота подвеса.

Примем $\eta = 33\%$, согласно таблице 5 [17].

Рассчитаем световой поток:

$$F_{л} = \frac{300 \cdot 7,5 \cdot 1,7 \cdot 1,1}{1 \cdot 2 \cdot 0,33} = 6375 \text{ лм.}$$

По рассчитанному значению светового потока $F_{л}$ примем к установке люминесцентные лампы ЛХБ мощностью 125 Вт и значением светового потока равным 8000 лм.

1. Таким образом, с помощью приведённых выше расчетов был рассмотрен вариант организации системы освещения в рабочем помещении, согласно которым требуется 1 светильник (рисунок 1). При этом не нарушая установленные в [16] требования.

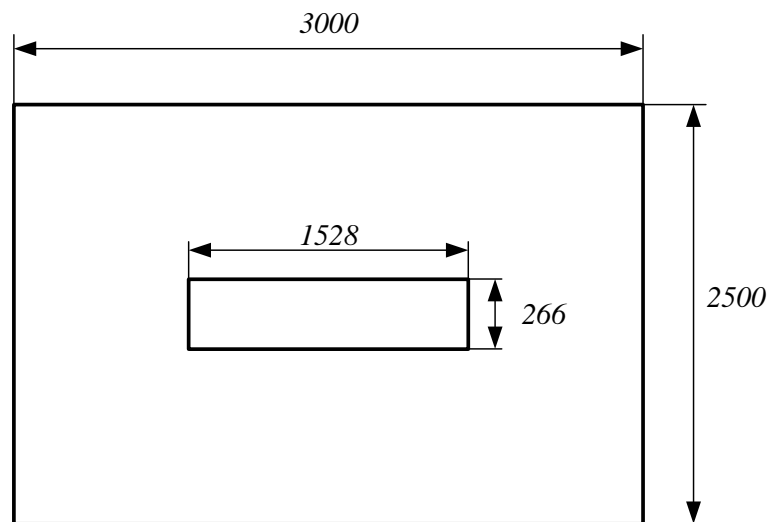


Рисунок 43 – План освещения рабочего помещения

6.2.5 Повышенный уровень производственной пыли

Причиной повышенной запыленности и загазованности воздуха рабочей зоны на этапе производства возникает на участках производства агломерата (окускованного рудного концентрата).

Взвешенные в воздухе частицы, попадая в организм, приводят к острым и хроническим отравлениям. На рассматриваемом участке при механической обработке происходит образование пыли и других вредных факторов, предельно, допустимые значения которых представлены в таблице 40 [20].

Таблица 40 - Предельно допустимые значения вредных веществ

Вещества	ПДК, %	Класс опасности	Агрегатное состояние
СО	20	4	газ
Пыль	6	4	аэрозоль
Вредные вещества	6	4	аэрозоль

Уменьшить содержание вредных веществ в воздушной среде и сохранить необходимую концентрацию газов помогут профилактические мероприятия использование фильтров, качественная герметизация оборудования, использование увлажнителей при работе с сыпучими веществами, - общей и местной вытяжной вентиляции помещений и рабочих мест, а также применение индивидуальных средств защиты рабочими.

6.2.6 Электробезопасность

Поражение электрическим током возникает при непосредственном соприкосновении человека с электрической цепью, в которой присутствует источник напряжения или тока, способный вызвать протекание тока по попавшей под напряжение части тела.

Сила поражения электрическим током различна и поэтому последствия поражения электрическим током, тоже различны. Сила поражения электрическим током зависит от нескольких факторов: класса напряжения, времени воздействия, от характера тока, индивидуальных особенностей организма, от пути прохождения тока по организму и от места соприкосновения человека с оборудованием. Проходя через организм, электрический ток производит термическое, электролитическое, механическое и биологическое

воздействия. Говоря о последствиях нужно отметить, что из-за нагрева человеческих тканей, поражение электрическим током вызывает ожоги, иногда эти ожоги не совместимы с жизнью. Так же во время удара происходит разложение органических жидкостей, таких как кровь, внутри организма. Удары током могут вызвать сбои в работе сердечной мышцы и нервной системы. При поражении головы электрическим током возможна потеря сознания. Удары электрическим током приводят к нарушениям биологических процессов.

Для снижения вероятности поражения электрическим током необходимо проводить инструктаж персонала, экзамены на предмет проверки знания правил техники безопасности, правил технической эксплуатации, межотраслевых правил при работе с электроустановками, а также правил оказания первой помощи пострадавшему. Проверка знаний по данным вопросам проводится специальной комиссией, которая утверждена соответствующими контролирующими органами.

В данном помещении присутствуют только электроустановки напряжением до 1кВ. По электробезопасности помещение относится ко второму классу – помещения с повышенной опасностью (сырые помещения. влажность более 75%, в воздухе возможно наличие токопроводящей пыли, цеха с высоким содержанием в воздухе химических соединений, полы выполнены из материалов способных, проводить электричество, наличие возможности возникновения одновременного прикосновения к станку или другому оборудованию с одной стороны и металлическим частям (корпусам) электрооборудования или открытым проводящим частям с другой.).

В соответствии с «Правилами устройства электроустановок» [23] в лаборатории предусмотрены следующие технические способы защиты от воздействия электрического тока:

- защитное заземление;
- зануление;

- устройства защиты оборудования (УЗО), отключающие электропитание от устройств, у которых нетоковедущие части оказались под напряжением;
- знаки безопасности в виде предупредительных плакатов «Высокое напряжение!».

Персонал постоянно проходит инструктаж по технике безопасности (1 раз в 3 месяца), ведется журнал. Большинство сотрудников имеют группу допуска 3 и выше.

6.3 Экологическая безопасность работы

Работа исследуемого объекта сопровождается негативным воздействием на окружающую среду в виде: -выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ и иных веществ; -загрязнение недр, почв; -сбросы загрязняющих веществ, в поверхностные водные объекты и на водосборные площади. воздействий на атмосферный воздух и их источников.

Воздействие на атмосферу. При эксплуатации происходит выделение вредных веществ в воздух, влияющих на дыхательные пути живых организмов. Во время разработки выхлопные газы техники, вредные газы во время агломерации приводят к истощению запаса кислорода; разрушению озонового слоя. Для снижения уровня загрязнения необходимо: — разработка и внедрение очистных фильтров на предприятиях; — использование экологически безопасных источников энергии.

Воздействие на гидросферу. В процессе разработки, появляется большое количество отходов производства. Утилизации таких отходов должна быть осуществлена только в специально предназначенные для этого места, не допускается сброс отходов в водные источники, во избежание загрязнений водного ресурса. Для того, чтобы воздействие при работе устройства было минимальным необходимо проводить следующие мероприятия: промышленные и бытовые отходы должны быть утилизированы в отведенные для этого места.

Воздействие на литосферу Воздействие на литосферу характеризуется загрязнением вредными химическими веществами, применяемыми при тех или иных технологических процессах. Основными методами сохранения земельных ресурсов являются: —исправление ландшафта, изменённого во время работ; —создание мелиоративных и гидротехнических сооружений; обработка почвы, путем внесения удобрений.

6.4 Защита в чрезвычайных ситуациях

При эксплуатации устройства возможны различные чрезвычайные ситуации техногенного характера, в данном случае возможные чрезвычайные ситуации: пожар (возгорание); взрыв; разрушение конструкции цеха, склада; землетрясение, а типичная – возгорание.

Пожаром называется неконтролируемое горение, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью людей, интересам общества, государства. В области пожарной безопасности основополагающими документами являются законодательные акты, такие как – федеральный закон [30] Здания участков, цехов, заводов промышленных предприятий; производственные помещения по техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности, согласно федеральному закону [31] по степени огнестойкости, конструктивной и функциональной пожарной опасности относятся к классу Ф5.1. Так как в помещении находятся и используются негорючие вещества и материалы в холодном состоянии, то по пожарной опасности данное помещение можно отнести к классу Г. Пожар может возникнуть по нескольким причинам: при нарушении исправности электропроводки, при эксплуатации неисправного оборудования, при несоблюдении техники пожарной безопасности. Поэтому необходимо принимать меры, которые будут направлены на повышение пожаробезопасности.

Для предотвращения пожаров необходимо применять следующие меры:

- соблюдать все стандарты по проектированию и строительству зданий и сооружений;

- своевременно проводить проверку и ремонт электрооборудования;
- соблюдать правила пожарной безопасности.

Согласно постановлению правительства [21], помещение должно быть оборудовано первичными средствами пожаротушения. Для персонала должны проводиться инструктажи по правилам действия при пожаре. Персонал должен проходить ежегодную переподготовку по правилам пожарной безопасности.

Техническими средствами для предотвращения возникновения чрезвычайной ситуации в помещении лаборатории служат:

- пожарная сигнализация со звуковым оповещением;
- первичное средство пожаротушения в виде порошкового огнетушителя типа 4(А) - АВСЕ, находящегося в свободном доступе.

К дополнению к этому для тушения пожаров в должны быть предусмотрены пожарные краны.

При возникновении пожара в соответствии с постановлением правительства [21] персонал, который не участвует в подавлении очага возгорания должен в спешном порядке покинуть помещение. О возникновении чрезвычайной ситуации необходимо сообщить в пожарную часть по телефону 01 (112). Также необходимо поставить в известность заведующего кафедрой, в подчинении которого находится данная лаборатория. По возможности необходимо оказать помощь при эвакуации людей.

В соответствии с постановлением правительства [21], на случай чрезвычайной ситуации разрабатывается план эвакуации, который несет следующие функции:

- обозначает пути эвакуации, эвакуационные выходы, обеспечивая тем самым безопасность процесса организованного самостоятельного движения людей из помещений;
- в нем указывается расположение пожарного оборудования и средств оповещения;
- несет упоминания о первоочередных действиях при пожаре.

Вывод по разделу

В разделе социальной ответственности был проведён анализ основных правовых и организационных вопросов обеспечения безопасности на предприятии, опасных и вредных факторов, экологической безопасности данного производства и меры предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Анализ вредных и опасных факторов и мер по уменьшению их влияния на работников, позволит создать более и безопасную обстановку. Так было определено, что одновременная работа двух человек в данном производственном помещении не требует установки дополнительных систем вентиляции, кратность воздухообмена $n = 0,756 \text{ ч}^{-1}$ ниже критического значения $n < 10$ [25]. Согласно расчету системы искусственного освещения, были выбраны люминесцентные лампы ЛХБ мощностью 125 Вт и значением светового потока равным 8000 лм

Согласно выявленным факторам выбранное помещение относится к категории «опасных» помещений [23] Персоналу, работающему в данном помещении, достаточно обладать III группой по электробезопасности [Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок]. Тяжесть труда, выполняемого при разработке электропривода ленточного весодозатора, соответствует II категории [25].

Выявление и применение мер по предупреждению чрезвычайных ситуаций, а также планирования мер по их ликвидации с минимальными последствиями позволяет свести к минимуму риски возникновения чрезвычайных ситуаций, количество жертв и ущерб, нанесённый предприятию. Учебные заведения по техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности [30] по степени огнестойкости относятся к классу Ф51. Так как в помещении находятся и используются негорючие вещества и материалы в холодном состоянии, то по пожарной опасности данное помещение можно отнести к классу Г [26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной выпускной квалификационной работы являлся вопрос разработки и исследования электропривода ленточного весодозатора непрерывного действия, предназначенного для весового дозирования кокса или железосодержащей руды. Рассмотрены основы технологии производства агломерата и подготовки агломерационной шихты.

Был выбран двигатель переменного тока, для которого рассчитаны параметры схемы замещения.

В настоящее время наиболее эффективным способом регулирования скорости является регулирование частоты подводимого напряжения, в работе подробно произведен обзор ПЧ.

Была выбрана структура векторного управления. В работе произведен синтез параметров регуляторов тока, потокосцепления и скорости. Составлены схемы имитационных моделей.

В ходе имитационного моделирования динамических режимов работы установлено, что разработанная система обеспечивает требуемые показатели качества.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Производство офлюсованного агломерата. Технологическая инструкция ТИ 107-ОА.А-01-98. Новокузнецк: ОАО Западно-сибирский металлургический комбинат, 1998.
2. Автоматизация процессов дозирования в металлургии. Бабенко В. Т., Шидлович Л. Х., Левинсон Б. А. и др. М.: Металлургия, 1977
3. Александров М. П. Подъемно-транспортные машины: Учеб. Для машиностроит. спец. вузов – 6-е изд., перераб., М.: Высш. шк., 1985.
4. Бабич В. К., Лукашин Н. Д. Основы металлургического производства. Черная металлургия. Учеб. для СПТУ. М.: Высш. шк., 1988.
5. Расчет и проектирование ленточных конвейеров. Учебное пособие. Шейнблин В. А. Краунив Г. А. М.: Металлургия, 1987.
6. Справочник по электрическим машинам. Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
7. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование автоматизированных тиристорных электроприводов постоянного тока: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПИ им. С.М. Кирова, 1991.
8. Элементы автоматизированного электропривода. Методические указания к выполнению курсовой работы для студентов специальности 0628, – Томск, изд. ТПИ им. С. М. Кирова, 1989.
9. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
10. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно – регулируемых асинхронных электроприводах. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. 172 с.
11. Преобразователь частоты общепромышленного применения EI-7011. Руководство по эксплуатации ВАЮУ.435Х21.001ИЭ.
12. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

13. ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».
14. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
15. ГОСТ 12.2.033-78 «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ стоя».
16. ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений.
17. *Е.Н. Пашков, А.И. Сечин, И.Л. Мезенцева, О.А. Антонец, И.И. Авдеева.* Социальная ответственность: учебно-методическое пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2022. – 27 с.
18. МР 2.2.7.2129-06 «Режимы труда и отдыха работающих в холодное время года на открытой территории или в неотапливаемых помещениях»;
19. МР 2.2.8.0017-10 «Гигиена труда. Средства коллективной и индивидуальной защиты. Режимы труда и отдыха работающих в нагревающем микроклимате в производственном помещении и на открытой местности в теплый период года»
20. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 [--]
21. Постановление Правительства РФ от 28.12.2020 N 2314 "Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде".
22. Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок
23. Правила устройств электроустановок. 6-е и 7-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 640 с.
24. Решение Комиссии Таможенного союза от 28.05.2010 N 299 (ред. от 29.11.2021) "О применении санитарных мер в Евразийском экономическом союзе".

25. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
26. СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»
27. СП 2.2.3670-20 "Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда"
28. СП 31-110-2003 Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий.
29. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.22.11.2021).
30. Федеральный закон от 21.12.1994 N 69-ФЗ (ред. от 12.03.2014) «О пожарной безопасности».
31. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Continuous belt weigher electric drive

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM07	Рындин Павел Станиславович		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Александр Юрьевич	к.т.н., доцент		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Воробьева Виктория Владимировна	к.ф.н., доцент		

Introduction

The purpose of this work is to develop an electric drive designed for weight dosing of coke or iron ore in accordance with the requirements of the technical assignment. The fundamentals of agglomerate production technology and the preparation of agglomerate charge were described.

An electric drive is a controlled electromechanical system. Its purpose is to convert electrical energy into mechanical and back to control this process. The electric drive always has two channels - power and information. The first one transports converted energy, the second one controls the flow of energy, as well as the collection and processing of information about the state and functioning of the system, and doing a fault diagnosis. Accordingly, the energy basis of production is currently an electric drive.

At present, the role of an automated electric drive is significantly increasing. The perfection of the electric drive is very important. In addition, in modern conditions, the problems of efficiency and reliability of the electric drive are very relevant. All this is achieved by improving electric motors, converters, analog and digital control circuits, switching equipment and protection elements. Year by year, new, more productive equipment with an automated electric drive is being created. Work is underway to create new systems with microprocessor automatic control. The expansion and complication of the functions performed by the electric drive, the use of new tools require a high level of specialist training. Despite the significant progress made in the theory and practice of an adjustable AC electric drive, the DC electric drive continues to be a mass industrial adjustable electric drive. Firstly, it is high reliability, economy, wide range of regulation, smoothness of regulation and high speed. Secondly, there are a large number of DC drives supplied as a set, which ensures high installation readiness and reliability, as well as their invariance to changes in the element base or the technological process. Thirdly, they are easy to maintain and set up. Regulated electric drive includes an electric motor, a power semiconductor converter, a power transformer and a circuit breaker or fuses. The controlled electric drive is the basis for the development of the servo drive.

The purpose of the continuous belt weigher electric drive is to provide the required feed rate of bulk materials (weight per time) for better preparation of the mixture.

Preparation of agglomerate for domain production

Agglomeration is a thermal process of a crushed materials, which are the iron-containing part of the ore. The agglomeration process is based on the combustion of fuel in a layer of sintering material. As a result of combustion, a high temperature develops, about 1500 C°. Ore grains are dehydrated, forming liquid and semi-liquid phases, with which chemical transformations of their constituent compounds take place. The material is sintered and, with further air supply, cools down and quickly crystallizes, forming a porous cake - an agglomerate.

Importance of the dosing process as an element of technological process

An analysis of the work of metallurgical enterprises shows that one of the factors that have an influence on the technical and economic indicators of the main metallurgical stages are the quality of charge preparation. To prepare the charge well means to ensure its optimal particle size distribution and optimum moisture content and to determine and accurately maintain the optimal chemical composition of the charge. If these requirements are met, then, of course, provided that the appropriate technological regimes of the units processing the charge are maintained, the loss of metals are minimal, the costs of expensive additives, fuel and electricity are minimal, the productivity of the units is maximum with a high quality of the output products. If the charge does not have the listed properties, then, no matter how well the technological processes for its processing are carried out, it is not possible to achieve high technical and economic indicators [2].

Thus, to ensure high technical and economic indicators of blast-furnace smelting, it is necessary that fluctuations in the iron content in the sinter do not exceed 0.5%. Such high requirements can be met only with high-quality control of the charge preparation processes, which provides compensation for both disturbances in the quantitative ratios between the charge components and disturbances in the

composition of the starting materials. Therefore, the projects of charge preparation shops and departments provide automatic dosing systems as an integral part. Increasing requirements for the intensity of metallurgical processes, the quality of the products obtained, and the ever-greater consideration of the economic aspects of metallurgical production urgently requires further improvement of automatic dosing systems [1].

The main directions for improving automatic dosing systems are as follows:

1. transition from stabilization of the mass flow rates of dosed materials or the ratios between them to automatic stabilization of the chemical composition of the charge.
2. transition from stabilization and regulation of the instantaneous values of the costs of the charge components to the control of their averaged values.
3. use of a systematic approach to the automation of dosing processes.

Characteristics of weighers

In order to carry out the process of dosing different materials by weight, different types of dosing devices are used. All, regardless of their classification into different groups according to the process, consist of the following main components (Figure 44): a storage hopper and a device; weighing devices; discharger. It should be borne in mind that in addition to accuracy when dosing, it is necessary to ensure the declared productivity, joint operation of several units, etc. Therefore, when dosing, a special device - a feeder - is installed between the weighing device and the hopper. Feeders consist of three main units: working body, drive and supporting structure.

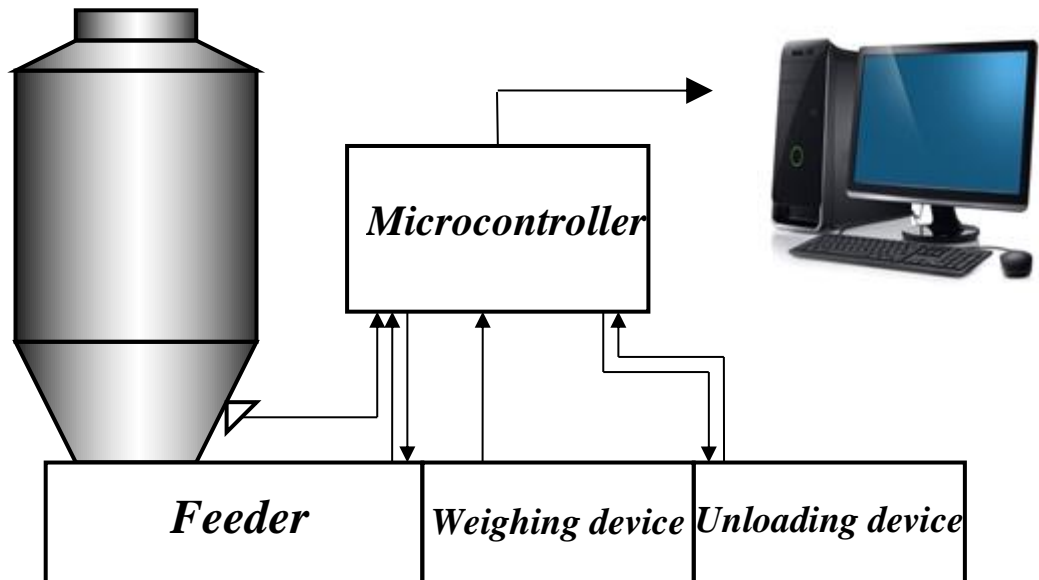


Figure 44 – Functional diagram of weigher device

Conveyors, reels, plates, trays, etc. are used as working bodies in the existing designs of feeders. By the nature of the movement of the working body, feeders are divided into conveyors (belt, plate, chain) - the material is pulled out of the hopper by a conveyor belt, the speed of material feed is changed by changing the speed of the conveyor belt.); Feeders with rotary movement of the working body (feeder augers work by the following algorithm: the material is taken out of the hopper through the auger, the material feeding rate is changed by changing the rotational speed of the auger; disc feeders work by the following algorithm: the material from the hopper is fed to the disc and is discharged from the disc by centrifugal force, the rate of material feed is changed by changing the speed of rotation of the disc; reel feeders work by the following algorithm: material from the hopper is selected by the reel, the rate of material feed is changed by changing the speed of rotation of the reel) and feeders with oscillating movement of the working body (carriage, piston and pendulum). According to the method of installation, feeders are divided into stationary and mobile. The most commonly used stationary feeders. Mobile feeders are used, for example, when the material is stored in a series of hoppers located in a straight line above the conveyor, when one hopper is emptied the feeder moves and is installed at the exit of another hopper.

Feeders are usually driven by electric motors. The drive shaft of the feeder is rotated via a gearbox. If the regulation of productivity is carried out without changing

the speed of movement of the working body, then a three-phase asynchronous motor with a squirrel-cage rotor is used. In a system that automatically doses itself with an accuracy of a few percent, the dosing drive must be based on a DC motor. In this case, the motor shaft speed should be controlled by changing the armature current. Controlled thyristor power converters are used for this. This greatly simplifies the drive of feeders and helps expand the range of applications of dispensers.

With a dosing accuracy of tenths of a percent, the dosing drive must be built as a high-quality follow-up system. The control law in such a system must be such that the material feed rate is consistent with the process of its weighing. Ultimately, it is the material portions that are fed into the weighing device as the target weight is approached that determine the success of the entire dosing process. So we are talking about the movement of negligible amounts of material. At the same time, the feeders are equipped with sufficiently powerful motors to ensure the required performance. A high-quality tracking system is required to ensure that a high-performance feeder feeds small portions of material at the end of the weighing process.

According to the principle of operation of the weighing device, the dispensers are divided into the following two types:

1. Continuous scales – provide for the weighing of a continuously moving flow of material;
2. Scales with a discrete action work this way: dosing is done in portions of a certain mass. The material is filled into the weighing container and when the specified weight is reached, the container is emptied.

Principle of work continuous belt weigher electric drive

Continuous belt weigher "SIGMA - DNA2" is needed for continuous weight dosing of bulk materials in local systems and in automated process control systems in enterprises of metallurgical, mining, chemical, building materials and other industries.

This weigher is based on a conveyor-type belt conveyor, this scale (Figure 45) is a conventional conveyor with a hopper and a built-in weighing platform. The working body is a rubberized conveyor belt encasing two drive and tension reels.

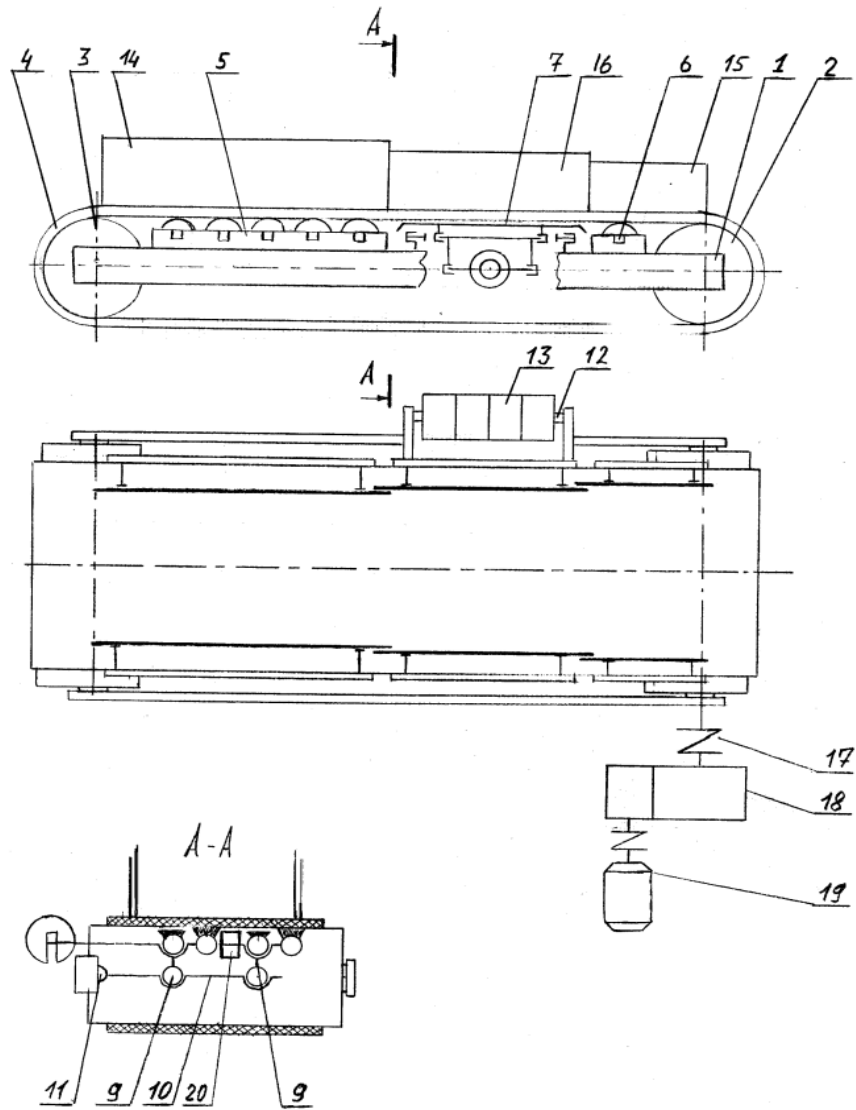


Figure 45 – Belt weigher electric drive

The weight dispenser (Figure 45) consists of a carrier frame 1, a drive reel 2, a tension reel 3. The conveyor belt 4 moves along the load receiving 5, dropping 6 and weighing 7 platforms.

The weighing platform 7 is located between the loading platform 5 and the dropping platform 6 with a fixed gap and rests on the levers 9.

The rod 10 connecting the arms of the levers rests against the sensor 11. The levers are located in a plane perpendicular to the direction of movement of the tape 4. Permanent counterweights 20 are installed at the free ends of one pair of levers 9. The free ends of the second pair of levers are connected by a bar 12, on which a volumetric counterweight 13 is installed, made in the form of a set of weights. The counterweight 13 is used to calibrate the weighing mechanism of the dispenser.

The drive reel is connected by means of a clutch 17 to a gearbox 18 which is driven by an electric motor 19.

The weighing conveyor is equipped with sides 14, 15, 16 located on the load receiving 5, dropping 6 and weighing 7 platforms, respectively. The sides are equipped with rubber seals to prevent material spillage. The conveyor is equipped with scrapers for cleaning the outer and inner surfaces of the belt.

The principle of operation of the weigher is based on the stabilization of a given capacity according to the principle:

$$Q = G \cdot V = \text{const},$$

Q – productivity, kg/s;

G – the mass of material per 1 m of a tape, kg;

V – the instantaneous speed of belt, m/s.

With the electric motor running, the material is taken from the hopper via a conveyor belt and fed through the weighing platform. An electrical signal proportional to the mass of material on the platform enters the dispensing system. At the same time, the system receives an electrical signal from the tach generator or pulse sensor of the electric motor, which is proportional to its rotation frequency, i.e., proportional to the speed of the belt. The product of two values (G and V) is compared to the set power and if there is a difference, the system generates a control action to

change the speed of the electric motor. Thus, there is a smooth automatic change in productivity by adjusting the speed in the range from 0.1 to 6 m/min [3].

The load cell signal is processed by a special microprocessor that calculates the flow rate and the mass passed. The information is sent to the central computer. The microprocessor can work in scale and batcher mode. When dosing, it is fed a certain productivity that it can withstand by acting on the speed of the feeding motor via a DC electric drive. The microprocessor can work with any asynchronously controlled drive that has an analogue input.

The scale can be used wherever it is necessary to measure the mass of bulk material that has passed in the flow: loading vehicles, balancing the mass of grain that has passed through in alcohol production, in mills, breweries, in fodder production, etc. [4].

Requirements for the weighers

All elements that make up the electric drive, namely: the electric motor, the mechanism for transmitting motion from the electric motor to the reels, the equipment and the control circuit of the electric motor must meet the following requirements resulting from the technological process and operating conditions result:

1. The electric drive must ensure normal operation when supplied from an industrial three-phase network;
2. The electric drive must ensure the operation of an electric motor in the first quadrant;
3. Load change speed error must be not more than 2%;
4. Maximum control voltage must be less than 10V;
5. Operating mode of the electric drive must be long (S1);
6. The electricity meter must be designed for harsh environments
7. Electric drive overload capacity mustn't be less than 2;
8. The acceleration of the engine from standstill to the operating and set speed must be smooth;
9. The system for setting and adjusting the working speed must allow regulation in the range from 0.1 to 6 m/min. Therefore, the speed control range is at least 1:60;

10. The electric drive must be safe and easy to use, have a protection system and an alarm system;

11. It is necessary to provide interlocks in electrical equipment;

12. It is necessary to provide automatic shut-off devices that ensure a quick stop of the metering conveyor;

13. The emergency stop of the conveyor can be performed using the emergency stop button installed on the dispenser or control panel;

14. The control circuit of the electric drive must contain devices and devices that allow constant control of the number of revolutions, the power absorbed by the electric motor and the supply voltage. All controls must function comfortably, reliably and safely;

15. The electric drive must be economical, have low costs and high efficiency in operation;

16. The main operating mode is the automated mode;

17. The time to reach operating speed from standstill is no more than 5 seconds;

In addition to the above requirements [5], the following must be taken into account: in the batch processing departments, a lot of dust containing particles of lime, metal and coke is released. The ingress of this dust into electric motors and controllers leads to premature failure. For this reason, it is necessary to install flushed electric motors in protective design.

Conclusion

This master's degree project presents the continuous belt weigher electric drive and its control system. The parameters of an AC motor were calculated and graphs of transient response were built.

In my opinion, a vector control structure was the best solution for a continuous belt weigher electric drive. I developed a schemes of simulation models. The synthesis of the parameters of the current controller, the flux linkage and the speed were also included in my work.

In the course of my master's degree project I found that the system delivers the required quality indicators.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

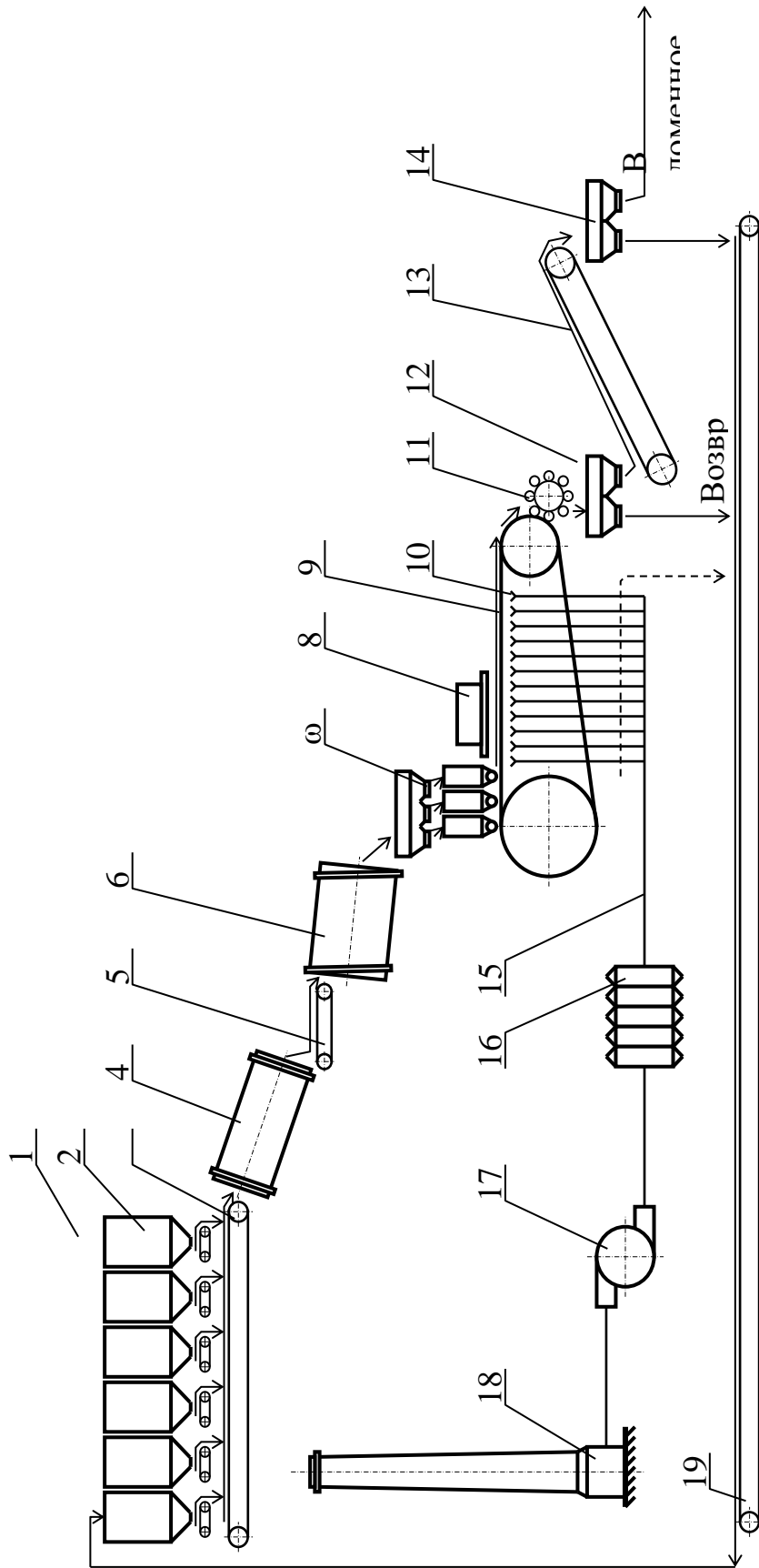


Рисунок 46 - Схема, поясняющая технологический процесс производства агломерата металлургического производства

ПРИЛОЖЕНИЕ В

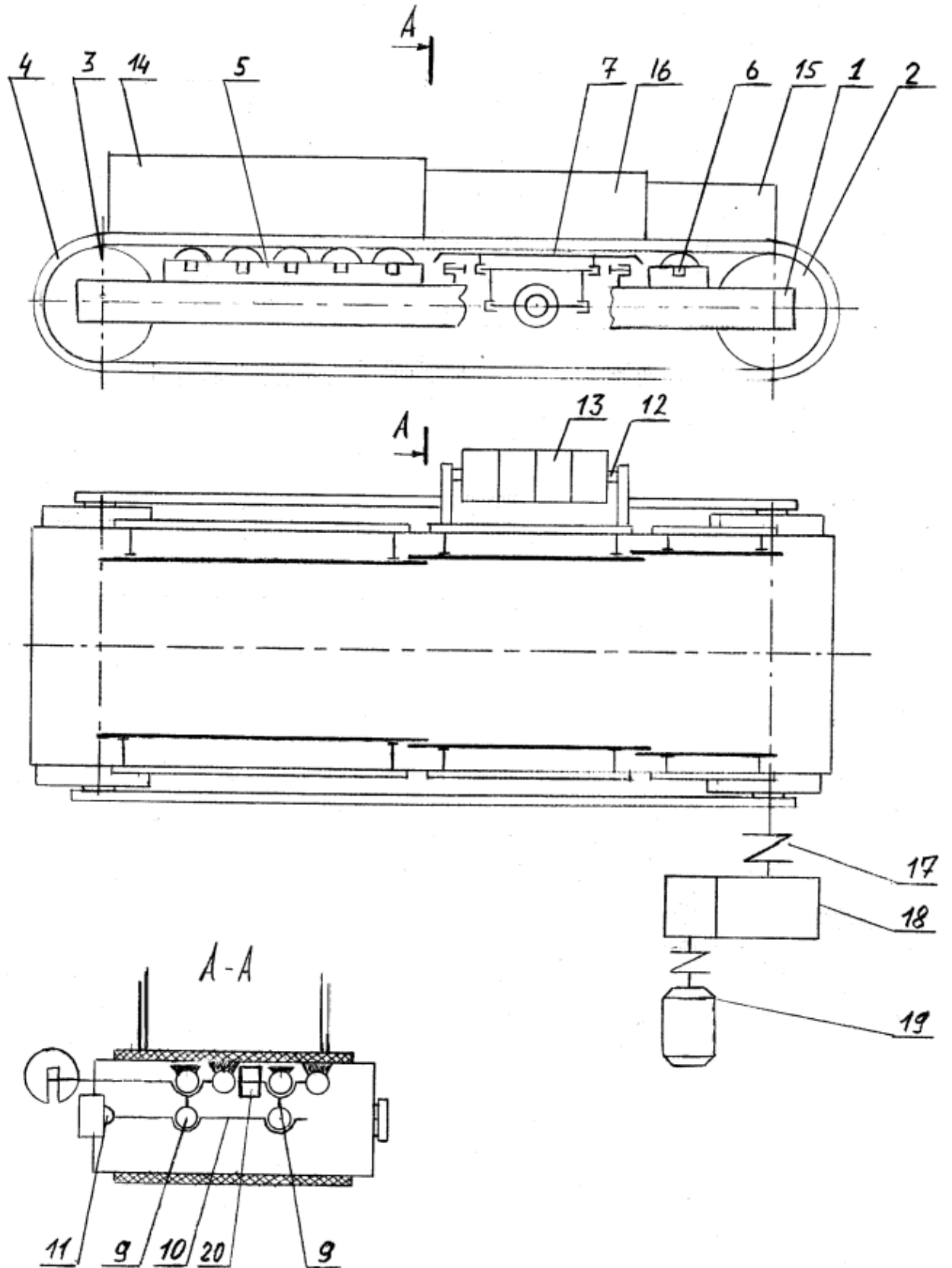


Рисунок 47 - Устройство и внешний вид ленточного весодозатора

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

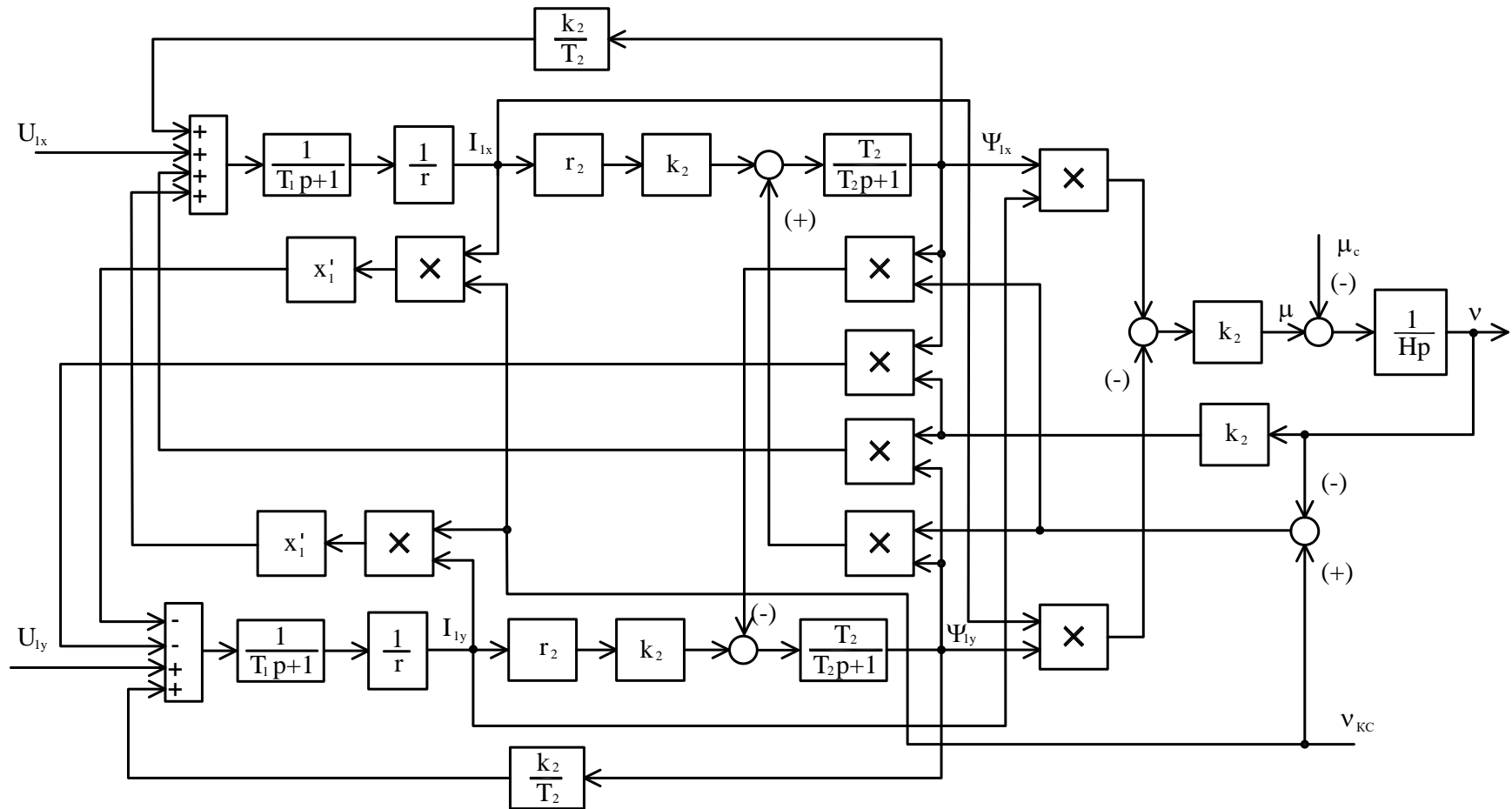


Рисунок 48 - Структурная схема модели асинхронного электродвигателя во вращающейся системе координат

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

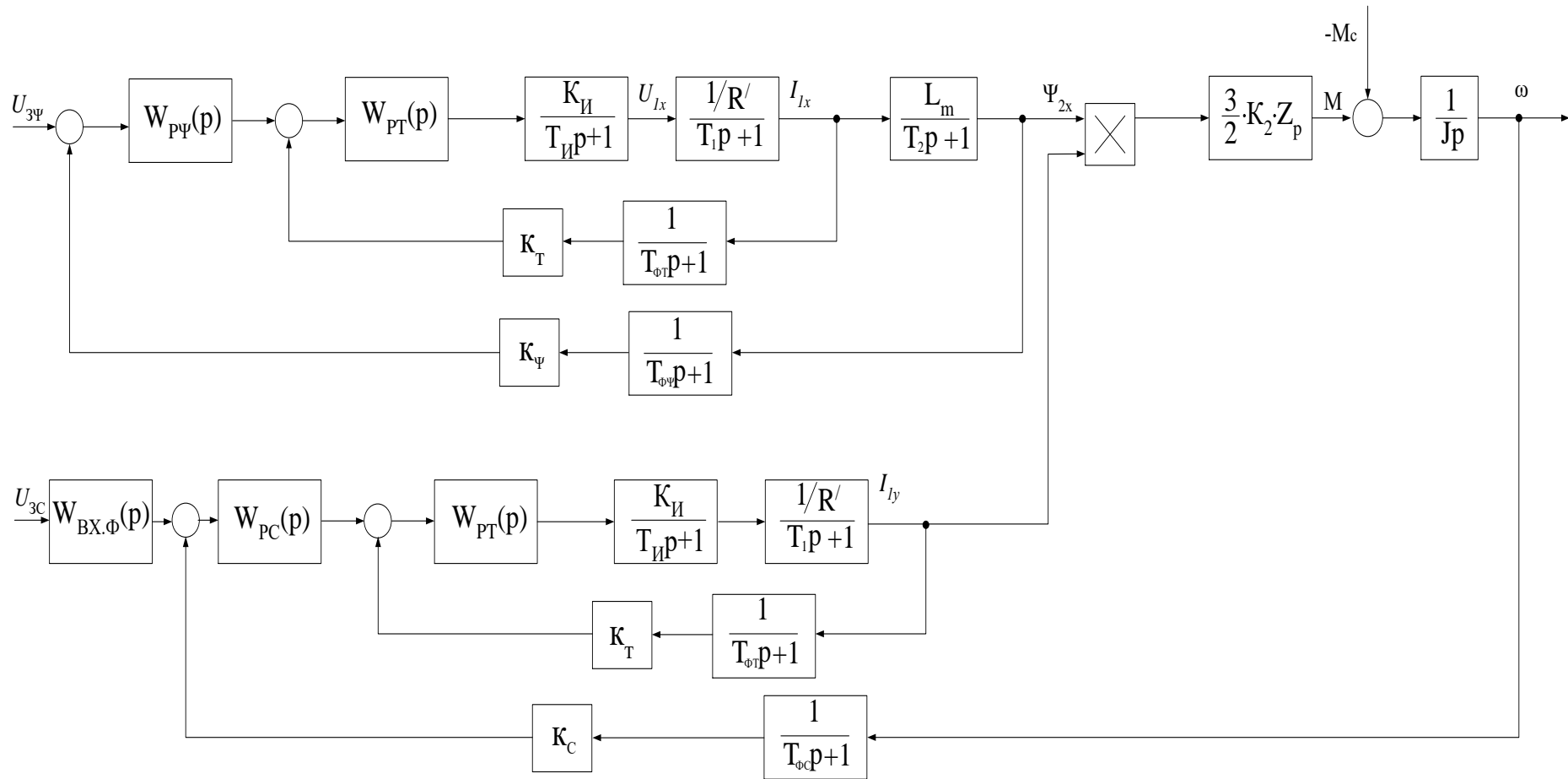


Рисунок 49 - Структурная схема асинхронного электропривода с векторным управлением