

Школа ИШЭ  
 Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение школы (НОЦ) электроэнергетики и электротехники

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Электропривод питателя сушильного барабана

УДК 62-83:66.047.57

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6К	Чалдин Константин Андреевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев А.Ю.	К.Т.Н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора Игнат Валерьевич	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева Ирина Леонидовна			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника	Тютева П. В.	К.Т.Н.		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

### 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b>Универсальные компетенции</b>	
P1	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой <i>интеллектуальный</i> и <i>общекультурный уровень</i> , добиваться <i>нравственного и физического совершенствования</i> своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками</i> как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	<i>Использовать</i> на практике <i>навыки и умения</i> в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	<i>Использовать</i> представление о методологических основах <i>научного познания и творчества</i> , роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением <i>современных информационных технологий</i> , синтезировать и критически резюмировать информацию.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социальноэкономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Ставить и <i>решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.
P7	Выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Проводить инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу

	персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные</i> , наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	<i>Осваивать новое</i> электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Разрабатывать рабочую <i>проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять <i>оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.

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

Школа ИШЭ  
 Направление подготовки (специальность) 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение школы (НОЦ) электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Тютеева  
П.В.  
 (Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
5А6К	Чалдин Константин Андреевич

Тема работы:

Регулируемый электропривод центробежного насоса на основе системы «Симисторный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель»	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	59-78/с 28.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><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>Материалы производственной практики, техническая литература, техническая документация.</p>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- постановка задачи проектирования;</li> <li>- проектирование электропривода питателя сушильного барабана;</li> <li>- выбора типа преобразователя частоты и способа регулирования скорости;</li> <li>- расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристик электродвигателя;</li> <li>- разработка и исследование имитационной модели электропривода;</li> <li>- разработка раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»;</li> <li>- разработка раздела «Социальная ответственность»;</li> <li>- заключение.</li> </ul>
<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Графики переходных режимов асинхронного электродвигателя. Функциональная схема асинхронного электропривода, регулируемого изменением напряжения питания.</p>

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
<b>Социальная ответственность</b>	Мезенцева Ирина Леонидовна
<b>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b>	Кандидат экономических наук Подопригора Игнат Валерьевич

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

Все разделы выпускной квалификационной работы написаны на русском языке.

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

**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
5Г5А	Чалдин Константин Андреевич		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5А6К	Чалдин Константин Андреевич

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	13.03.02. 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	Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	30 % премии 20 % надбавки 16% накладные расходы 30% районный коэффициент
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	27,1 отчисления на социальные нужды

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

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Анализ конкурентных технических решений. Оценки перспективности проекта по технологии QuaD.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Формирование плана и графика разработки : -определение структуры работ; -определение трудоемкости работ; -разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: -материальные затраты; -заработная плата (основная и дополнительная); -отчисления на социальные цели; -амортизация; -накладные расходы.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Нахождение интегрального показателя эффективности через определение финансовой эффективности и ресурсоэффективности

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

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

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Подопригора И.В.	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
---------------	------------	----------------	-------------

5А6К	Чалдин Константин Андреевич		
------	-----------------------------	--	--

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5А6К	Чалдин Константин Андреевич

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.02. Электроэнергетика и электротехника

Тема ВКР:

<b>Электропривод питателя сушильного барабана</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p><i>Главным объектом рассмотрения исследования является – питатель для загрузки сушильных барабанов, предназначенный для равномерной подачи, разрыхления и загрузки в сушильные барабаны влажных продуктов обогащения углей. Рабочее место – щит управления оператора в помещении распределительного пункта. Область применения – цех сушки на угледобывающей промышленности.</i></p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p><i>ГОСТ 12.1.003 – 2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. ГОСТ 12.1.009-2017 ССБТ. Электробезопасность. Термины и определения ГОСТ 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты ГОСТ 12.4.002 – 97 ССБТ. Средства индивидуальной защиты рук от вибрации. Общие технические требования НБП 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки СанПиН 2.2.4/2.1.8.566 – 96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы Сан ПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений" (утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 1 октября 1996 г. N 21)</i></p>



	<p><i>Приказ Минприроды России (Министерства природных ресурсов и экологии РФ) об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе</i></p> <p><i>ТК РФ Статья 92. Сокращенная продолжительность рабочего времени</i></p> <p><i>ТК РФ Статья 93. Неполное рабочее время</i></p> <p><i>ТК РФ Статья 96. Работа в ночное время</i></p> <p><i>ТК РФ Статья 108. Перерывы для отдыха и питания</i></p> <p><i>ТК РФ Статья 113. Запрещение работы в выходные и нерабочие праздничные дни. Исключительные случаи привлечения работников к работе в выходные и нерабочие праздничные дни</i></p> <p><i>ТК РФ Статья 122. Порядок предоставления ежегодных оплачиваемых отпусков</i></p> <p><i>ТК РФ Статья 221. Обеспечение работников средствами индивидуальной защиты</i></p> <p><i>Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Глава 1.7 Заземление и защитные меры электробезопасности (Издание седьмое)</i></p>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p><i>Наиболее значимые вредные факторы:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li><i>1. Превышение уровня шума;</i></li> <li><i>2. Отклонение показателей микроклимата;</i></li> <li><i>3. Превышение уровня вибрации;</i></li> </ol> <p><i>Наиболее вероятно воздействие на персонал следующих опасных факторов:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li><i>1. Поражение электрическим током.</i></li> </ol>
<p><b>3. Экологическая безопасность:</b></p>	<p><i>- способы борьбы с газообразными отходами</i></p>
<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p>	<p><i>Одни из наиболее вероятных ЧС: пожар, затопление, землетрясение. Одно из наиболее вероятных ЧС – пожар.</i></p>

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6К	Чалдин Константин Андреевич		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит страниц 143, таблиц 29, рисунков 46, источников 30.

Ключевые слова: электропривод, питатель сушильного барабана, асинхронный электродвигатель, преобразователь частоты, статические характеристики, векторное управление, динамические характеристики, ресурсоэффективность, ресурсосбережение, социальная ответственность.

Выпускная квалификационная работа посвящена вопросам разработки электропривода питателя предназначенного для загрузки сушильного барабана. Рассмотрена методика определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя и выбора электродвигателя.

За базовый электропривод принят серийно выпускаемый комплектный преобразователь частоты типа 6SL3200-6AM23-8AN0 производства корпорации Siemens. Проведено обоснование выбора, а также анализ основных возможностей преобразователя частоты.

В выпускной квалификационной работе построена модель асинхронного двигателя, на базе которой реализованы законы скалярного и векторного бездатчикового управления. Построены соответствующие имитационные модели в программной среде MatLab Simulink. Произведён расчёт статических характеристик. Произведен расчет переходных процессов в электроприводе для построенных моделей.

Выпускная квалификационная работа выполнена с использованием пакета программ **Microsoft office Word 2007, Microsoft Visio 2007, Mathcad 14, Microsoft Visio, MatLab R2013b** на белой бумаге формата А4.

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	15
1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ЦЕХА СУШКИ.....	17
1.1. Описание технологического процесса.....	17
1.2 Сушильный барабан.....	20
2 ПИТАТЕЛЬ СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА .....	22
2.1 Состав, устройство и работа питателя .....	22
2.2 Кинематическая схема .....	27
2.3. Регулирование скорости питателя.....	28
2.4. Определение приведённого момента нагрузки и приведённого момента инерции электропривода питателя.....	30
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ ВАО-92-12/8/6/4.....	33
3.1. Расчёт параметров схемы замещения двигателя при его работе на первой скорости (6 пар полюсов).....	33
3.2. Построение механических и электромеханических характеристик двигателя вао-92-12/8/6/4.....	39
3.2.1. Механические характеристики асинхронного двигателя ВАО-92-12/8/6/4 .....	39
3.2.2. Электромеханические характеристики асинхронного двигателя ВАО-92-12/8/6/4 .....	43
3.3. Динамическая модель двигателя вао-92-12/8/6/4 .....	45
4. ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ.....	51
4.1. Обоснование выбора типа двигателя .....	51
4.2. Выбор двигателя.....	52
4.3. Проверка выбора двигателя.....	54
4.4. Расчёт основных параметров и характеристик двигателя .....	56
4.5. Динамическая модель двигателя АИМ 180 М6.....	64
5. ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ .....	69
5.1. Принципы построения статических преобразователей частоты для электроприводов переменного тока .....	69
5.2. Преобразователь частоты 6SL3200-6AM23-8AN0 .....	72

6. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПИТАТЕЛЯ .....	74
6.1. Регулирование скорости короткозамкнутого асинхронного двигателя изменением частоты.....	74
6.2. Регулирование скорости электропривода с помощью закона $U_{1\phi} / f_1 = const$ .....	78
6.3. Регулирование скорости электропривода с помощью закона $U_{1\phi} / f_1 = const$ с $I \cdot R$ - компенсацией.....	81
7. РАЗРАБОТКА ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ .....	86
7.1 Система векторного управления асинхронным электроприводом без датчика скорости.....	86
7.2. Оптимизация системы автоматического управления регулируемого электропривода .....	93
7.2.1. Расчет параметров силовой цепи.....	93
7.2.2. Оптимизация САР потокосцепления .....	96
7.2.3. Оптимизация САР скорости .....	101
8. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОЗОННОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ .....	105
9. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	111
9.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	112
Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование. ....	112
9.2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований.....	124
9.3. Планирование научно-исследовательских работ .....	125
9.4. Определение ресурсоэффективности проекта.....	139
Заключение по разделу финансовый менеджмент:.....	142
СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....	143

10.1. Введение .....	143
10.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	143
10.3. Производственная безопасность .....	145
10.4. Анализ опасных и вредных производственных факторов и Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на работающего .....	145
10.5. Экологическая безопасность .....	152
10.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	153
10.8. Выводы по разделу.....	156
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	157
Список использованных источников .....	159

## ВВЕДЕНИЕ

Большая энергоёмкость предприятий взрывоопасных производств, к которым относится и угледобывающая промышленность, имеет особые требования, относящиеся к выбору систем электропривода технологических механизмов. Совершенствование данных систем значительным образом определяет эффективность использования электроэнергии. Естественно, требование взрывобезопасности накладывает определённые ограничения на применение системы регулируемого электропривода, широко используемого в общепромышленных производствах (система тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока) из-за отсутствия серийного выпуска двигателей постоянного тока во взрывозащищённом исполнении. Поэтому для решения проблемы, связанной с ограничениями в данной сфере производства, и для совершенствования технологического процесса, требуется создать и внедрить регулируемые системы электропривода для взрывоопасных производств.

На предприятиях взрывоопасных производств применяются в основном взрывозащищённые электродвигатели асинхронного типа. Режимы работы технологических механизмов отличны друг от друга. Для различных механизмов требуется свой диапазон регулирования скорости, значительно влияющий на качество продукции, от 1:2 до 1:10. У питателей на обогатительных фабрика скорость регулируется от 1:3 до 1:15, согласно технологическому процессу. В настоящее время для данных механизмов либо вообще не применяется регулирование скорости, либо используются многоскоростные асинхронные двигатели, механические вариаторы или сменные шкивы с различными передаточными числами. Это в значительной степени сдерживает внедрение высокопроизводительных непрерывных технологических процессов и препятствует осуществлению их комплексной автоматизации. По мимо улучшения качества продукции и увеличения производительности труда, регулируемый электропривод способствует экономии электроэнергии.

Для большинства механизмов электропривод может быть выполнен на основе короткозамкнутого асинхронного двигателя, управление которого производится с помощью статического преобразователя частоты. Данное управление имеет широкий диапазон, в обе стороны от естественной характеристики, а регулирование осуществляется плавно. Характеристики обладают высокой жесткостью и двигатель способен сохранять большую перегрузочную способность. В связи с выше перечисленным, частотный способ регулирования находит все большее применение. К тому же, на взрывоопасных производствах, система преобразователь частоты – асинхронный двигатель – один из способов создания регулируемого электропривода. Его достоинства по отношению к приводу постоянного тока – простая настройка и эксплуатация, а недостаток – большая стоимость самого преобразователя частоты.

Целью выпускной квалификационной работы является рассмотрение законов регулирования скорости, системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель для построения имитационной модели во вращающейся системе координат с целью возможной реализации в системе регулируемого электропривода питателя сушильного барабана.

# 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ЦЕХА СУШКИ

## 1.1. Описание технологического процесса

Изначально, полезные ископаемые непригодны для непосредственного использования в промышленности и нуждаются в обработке. Для того, чтобы использовать их на производстве, необходимо подвергнуть их обработке, так называемому обогащению.[1]

Происхождение углей-целиком и полностью натуральный, природный процесс. Изначально, внутри породы происходит физико-химическое разложение, в результате чего образуется торф, а далее, под действием различных природных факторов, таких как температура солнечного света, атмосферное давление, образуется такая порода, как уголь. По степени углефикации различают угли бурые, каменные и антрацитовые. Вредными примесями в углях являются сера и фосфор. Качество углей повышается с уменьшением содержания влаги, золы и серы.

На обогатительных фабриках осуществляется обогащение полезных ископаемых. В результате данного процесса из ископаемого получают концентрат. В нем содержится основная масса полезных составляющих, и одновременно отходы, куда переходит большая часть пустой породы (хвосты).

У поступающего угля, после его дробления, следующий путь обработки: поступление в аккумулирующие бункера, затем в основной цех, где уже и происходит обогащение, реализуемое с помощью отсадочных машин. Получая концентрат, после его обезвоживания на центрифугах, его направляют в цех сушки, где он складывается в бункерах, из которых, с помощью питателей, он попадает в сушильные барабаны. И уже сухой концентрат из силосов грузят по вагонам, для доставки.

Сушка углей на углеобогатительных фабриках является завершающей операцией технологического процесса обогащения, определяющей показатели качества продуктов по влажности.



Сушильная установка представляет собой сложный технологический агрегат, требующий обеспечения непрерывной и ритмичной работы. Компоновка оборудования одной из секций цеха сушки концентрата представлена на рисунке 1.1. Концентрат накапливается в бункерах сырого угля, ёмкость которых соответствует часовой производительности сушильного барабана по исходному углю. Из бункеров концентрат подаётся в сушильный барабан питателем ПСП (питатель скребковый протирочный), который предназначен для равномерной подачи, разрыхления и загрузки в сушильные барабаны влажных продуктов обогащения углей. Режим работы питателя должен соответствовать режиму работы сушильного барабана и обеспечивать его производительность. Изменение скорости работы питателя производится оператором сушильного отделения.

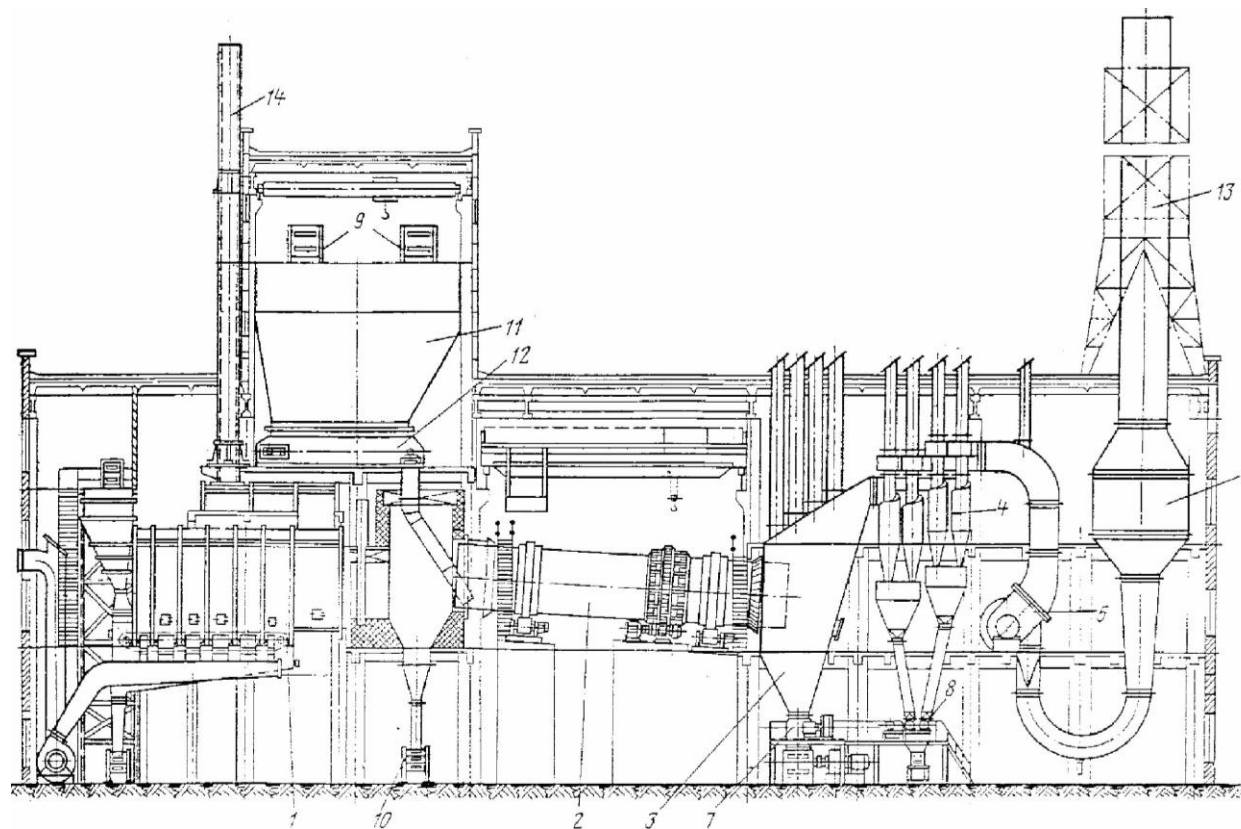


Рисунок 1.1 - Компоновка технологического оборудования: 1 – топка; 2 - сушильный барабан; 3 – разгрузочная камера; 4 – батарейный пылеуловитель; 5 - дымосос; 6 – мокрый аппарат; 7 – скребковый барабанный питатель; 8 – шлюзовой завор; 9 – конвейеры исходного угля; 10 – гидрозатвор; 11 - бункер сырого угля; 12 – питатель; 13 – дымовая труба; 14 – растопочная труба

## 1.2 Сушильный барабан

Сушильный барабан – это сварной полый цилиндр. У его стенок с внутренней стороны приварены специальные лопасти, для перемешивания. У горячего конца есть кожух. Так же со стороны горячего конца сушильный барабан оснащён приёмно-винтовыми лопастями, длиной 2 метра. Конструкция подъёмно-лопастной насадки, несовершенна. Отсутствие центрально-осевого пересыпного приспособления в значительной мере снижает теплообмен между сушимым материалом и газовым потоком. Торцы барабана и затворы питательных и разгрузочных желобов не имеют надёжных уплотнений, что приводит к подосу воздуха в количествах, увеличивающих объём газов за сушилкой примерно на 1/3 части общего расхода сушильного агента, получаемого при сжигании топлива и его разбавления.

Сушка концентрата в основном осуществляется прямым теплообменом, при непосредственном соприкосновении материала с горячими газами по прямоточной схеме движения газов и материала. Параметры сушильного барабана, используемого в проекте, представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Параметры сушильного барабана

Диаметр барабана, м.	3,5
Длина барабана, м.	27
Объём барабана, м <sup>3</sup> .	259
Материал подвергаемый сушке.	Концентрат
Температура входящих газов, °С.	850
Влажность материала питания, %.	16-20
Влажность высушенного материала, %.	6-8
Производительность по концентрату т/ч.	210
Производительность по испарённой влаге, т/ч.	27,5

Для уменьшения замазывания внутренних устройств барабанов влажным концентратом применяют различные способы. Одним из наиболее распространённых способов является навеска цепей по всей длине сушильного барабана вдоль периферических лопастей в виде гирлянд. Лучшим способом устранения замазывания барабанных сушилок является сушка смеси мелкого флотационного концентрата (шлама) и мелкого концентрата, так как при этом не только устраняются затруднения, возникающие в связи с замазыванием, но и значительно повышается производительность сушилок. Так же для уменьшения замазывания насадок сырым углём и для снижения тепловых потерь в окружающую среду необходима теплоизоляция наружной поверхности барабана.

На участке подъёмно-винтовых насадок материал делает один оборот за 2-5 секунд. Движение материала на этом участке характеризуется подъёмом на небольшую высоту и сползанием массы материала вниз по направляющим. Часть материала, слипшаяся в комки и находившаяся ближе к поверхности, многократно перекачивается в нижней части барабана. Скорость продольного перемещения материала на этом участке очень чувствительна к производительности, что необходимо учитывать во избежание скопления материала в начале барабана и пересыпания его через переднее торцевое кольцо. Характер влияния самоочистителей и цепей на движении материала вдоль сушильного барабана одинаковый при равной производительности.

Для уплотнения мест входа концов сушильного барабана в топку и разгрузочную камеру применяют уплотняющие устройства. При сушке взрывоопасных углей применяют уплотнительные устройства, которые выдерживают избыточное внутреннее давление в разгрузочной камере не менее  $4 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ .

Загрузочные желоба в сушильных барабанах изготавливаются из жаростойкой стали. Для защиты от воздействия газов высокой температуры желоба футеруются огнеупорной обмазкой со стороны входа газов в

сушильный барабан. Желоба выполняются овальной формой и устанавливаются вертикально с плавным перегибом в нижней части. Нижняя часть желоба должна входить в барабанную сушилку на глубину не менее 500 миллиметров от переднего торца барабана.

Сушильный барабан для сушки угля представлен на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 - Внешний вид сушильного барабана

## **2 ПИТАТЕЛЬ СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА**

Питатель (ПСП) - скребковый протирочный, для загрузки сушильных барабанов предназначен для равномерной подачи, разрыхления и загрузки в сушильные барабаны влажных продуктов обогащения углей (мелкого концентрата, флотоконцентрата, шлама, их смесей и промпродукта) крупностью до 13 мм и влажностью до 30% [2].

### **2.1 Состав, устройство и работа питателя**

Рабочим органом питателя является тяговая цепь со скребками. Она является собой две пластинчатые втулочные цепи, которые связаны скребками.

На приводной секции установлен приводной вал с двумя восьмизубыми звёздочками. Благодаря нему, цепь приводится в движение.

Сам питатель герметичен. Имеет фланцы, между которыми укладывается асбестовая прокладка, с их помощью соединяются секции.

Они представляют из себя закрытый сварной желоб. Устанавливаются нижние и верхние направляющие полосы внутри полости секции. По ним движется тяговая цепь со скребками. Над верхними направляющими устанавливаются ограничивающие угольники. Они нужны для того, чтобы предотвратить возможный изгиб в тяговой цепи, после того, как она сойдет с тяговой звездочки.

На приводной секции, которая является сварной конструкцией и состоит из корпуса с разгрузочными, а также смотровыми люками, монтируется приводной вал с подшипниками и тяговыми звёздочками.

Сварная металлоконструкция из герметичного корпуса, а также вал с устройством натяжения и верхней постели с неподвижной решеткой составляют натяжную секцию. Помимо этого, у нее имеется специальный люк для монтажа или других работ с верхней постелью, направляющими полосами или цепью.

Для того чтобы натянуть цепь используют натяжное устройство с натяжными винтами. Шаг натяжения 34 см. Для того, чтобы не нарушалась герметичность питателя, натяжной вал снабжен уплотнительными устройствами.

Длина питателя зависит от загрузочной точки сушильного барабана и расстояния между осями бункера, и может находиться в пределах 3 – 6 м.

Основные размеры и параметры питателя ПСП приведены в таблице 2.1.

Условия эксплуатации электрической части питателя соответствуют помещению класса В – Ia. Электрооборудование должно иметь высокий уровень взрывозащиты, в соответствии с пунктом VII – 3 – 66 ПУЭ.

Аппаратура по управлению питателя должна размещаться в помещении, в котором не существует опасности, связанной с газом и пылью.

Таблица 2.1 - характеристики питателя ПСП

Наименование	Норма
Масса питателя, кг.	7700
Ширина желоба, мм.	1000
Расстояние между осями приводного и натяжного валов, мм.	3500
Производительность, т/ч.	71 - 354
Шаг скребков, мм.	500
Высота скребка, мм.	90
Скорость движения тяговой цепи со скребками, м/с.	0,054 – 0,27

Питатель скребковый протирочный, использующийся в проекте представлен на рисунке 2.1.

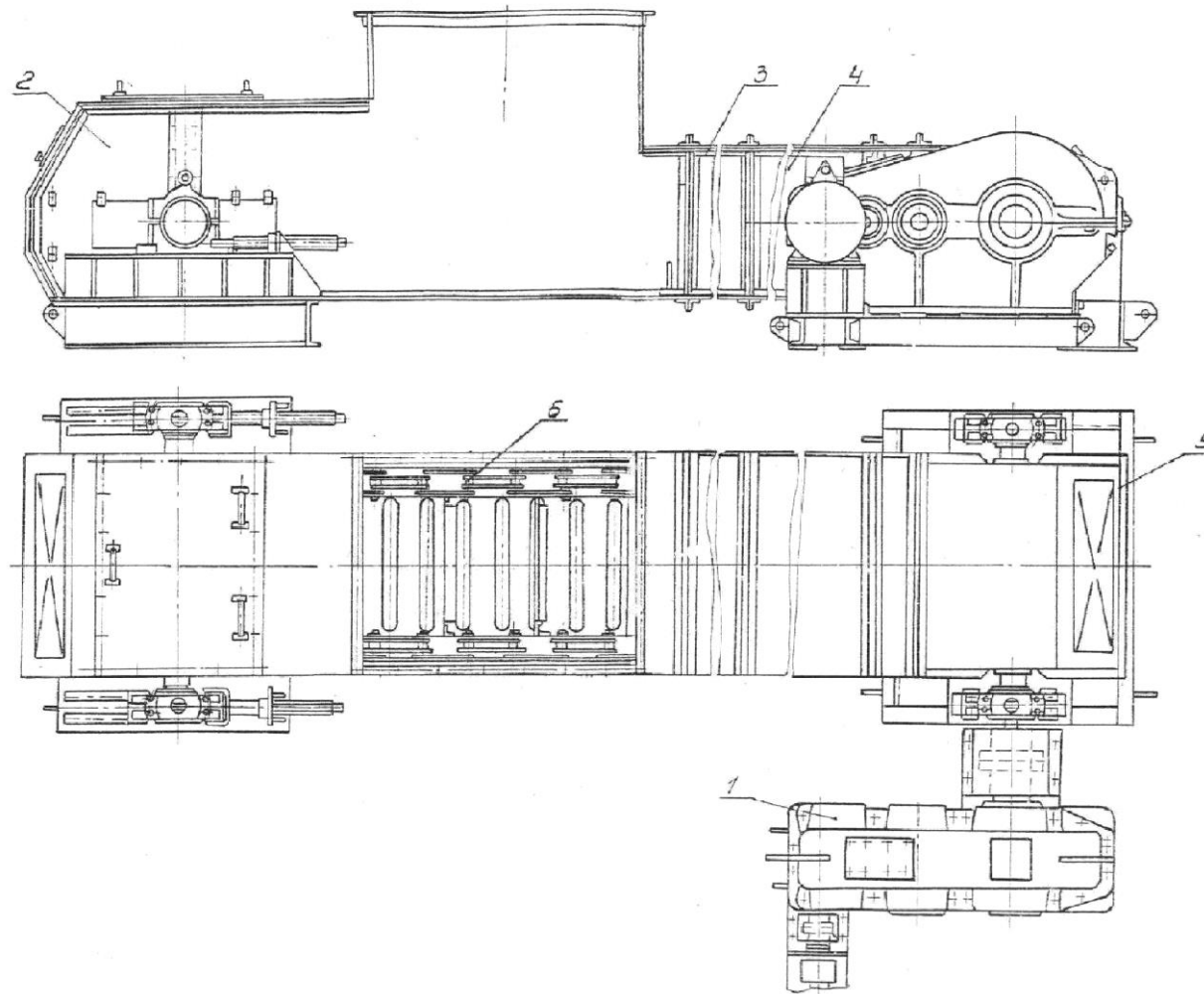


Рисунок 2.1 - Питатель скребковый протирочный: 1 – привод; 2 – секция натяжная; 3, 4 – секции; 5 – приводная секция; 6 – цепь тяговая со скребками



В связи с довольно тяжёлыми условиями работы питателя на фабриках по углеобогащению к нему предъявляются особые требования по его эксплуатации. Уход, своевременный профилактический уход и постоянный надзор обеспечивают непрерывную и надёжную работу питателя.

Привод питателя состоит из четырёхскоростного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором типа ВАО–92–12/8/6/4 и трёхступенчатого редуктора типа ЦТНД-500. Параметры двигателя представлены в таблице 2.2, данные редуктора приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.2 - Параметры двигателя ВАО-92-12/8/6/4

Число пар полюсов	6	4	3	2
Частота вращения, об/мин	490	735	980	1470
Мощность на валу, кВт	15	25	30	36
КПД, %	79	85	88	87
$\cos \varphi$	0,55	0,68	0,86	0,89
$M_{п} / M_{ном}$ , о.е.	1,1	1	0,8	0,8
$M_{max} / M_{ном}$ , о.е.	2	2	1,9	2
$I_{п} / I_{ном}$ , о.е.	5	6	6	7
Момент инерции ротора, кг·м <sup>2</sup>	0,69			

Таблица 2.3 - Параметры редуктора

Тип редуктора	ЦТНД-500-У3
Номинальный крутящий момент, Н·м	28500
Передаточное число	125
Масса, кг	1480

Обязательно соблюдаются следующие условия для правильной и надежной эксплуатации питателя:

- загрузка должна производиться равномерно и непрерывно в пределах производительности, которая предусматривается технической характеристикой питателя;
- своевременно производится техническое обслуживание, которое в значительной степени способствует увеличению срока службы, уменьшению объема работ, связанных с ремонтом, повышению производительности труда рабочих, в связи с сокращением и уменьшением простоев оборудования;
- в сушильном отделении, где эксплуатируется питатель, необходимо и обязательно соблюдать чистоту;
- помещение, где находится питатель, должно быть оборудовано промвентиляцией;
- нижний уровень влажного угля в бункере должен быть на уровне, не менее одной третьей высоты бункера;
- 
- силовое электрооборудование питателя должно питаться от сети переменного трёхфазного тока. Его напряжение должно быть 380 В, а частота 50 Гц.

## **2.2 Кинематическая схема**

Кинематическая схема привода питателя представлена на рисунке 2.2.

Цифрами на рисунке обозначаются: 1 – двигатель; 2 – муфта МУВП1 – 48(упругая); 3 – редуктор ЦТНД – 500; 4 – жесткая муфта; 5 – приводной вал с ведущими звёздочками; 6 – тяговая цепь со скребками; 7 – вал ведомый.

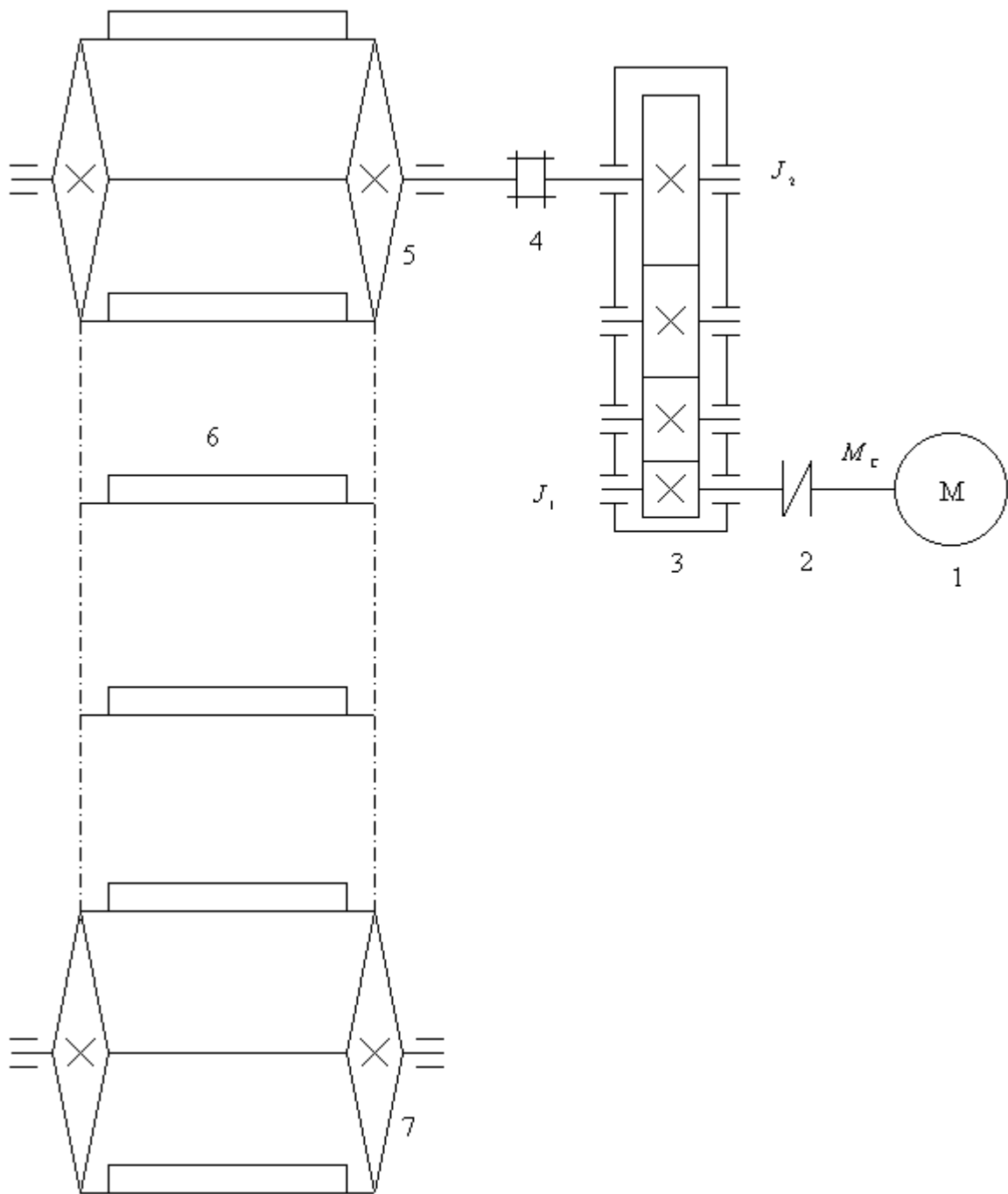


Рисунок 2.2 – Кинематическая схема привода питателя

### 2.3. Регулирование скорости питателя

Электропривод питателя должен обеспечивать регулирование скорости вращения электродвигателя в диапазоне

$$D = \frac{v_{\max}}{v_{\min}} = \frac{0,81}{0,054} = 15 \quad (2.1)$$

где:  $v_{\max} = 0,81 \text{ м/с}$  - наибольшая скорость тяговой цепи,

$v_{\min} = 0,054 \text{ м/с}$  - наименьшая скорость тяговой цепи.

В настоящее время в приводе питателя используется четырехскоростной асинхронный двигатель, с короткозамкнутым ротором, во взрывозащищенном исполнении, типа ВАО–92–12/8/6/4 (таблица 2.2). Обеспечиваемый им диапазон регулирования

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{1470}{490} = 3,$$

но с учётом того, что не используется четвёртая скорость двигателя потому, что тяговая цепь будет двигаться со скоростью выше предусмотренной технической характеристикой питателя, диапазон регулирования составит

$$D = \frac{980}{490} = 2.$$

Питатель устанавливается для загрузки одного сушильного барабана. Режим работы питателя должен соответствовать режиму работы сушильного барабана и обеспечивать его производительность. Изменение режимов работы питателя производится диспетчером сушильного отделения в зависимости от свойств материала поступающего в сушильный барабан.

Показателем качества работы сушильной установки является влажность стружки в разгрузочной камере, она должна составлять  $2 \pm 0,5\%$ . Косвенным показателем влажности является разрежение воздуха в разгрузочной камере. Разрежение в разгрузочной камере измеряется тягомером типа ТмМП-52, со шкалой от нуля до минус 200 мм водяного столба. В соответствии с режимной картой нормальным разрежением в разгрузочной камере считается минус 85мм, если разрежение меньше значит, влажность стружки ниже нормы и необходимо увеличить поступление стружки в сушильный барабан, то есть увеличить скорость питателя. Если разрежение выше нормы значит, стружка не досушена, и необходимо уменьшить поступление стружки в сушильный барабан, то есть

уменьшить скорость питателя. Также оператору необходимо следить за тем, чтобы не перегрузить сушильный барабан.

К достоинствам существующего привода можно отнести простую схему управления.

К недостаткам – невозможность плавного регулирования скорости и небольшой диапазон регулирования.

#### 2.4. Определение приведённого момента нагрузки и приведённого момента инерции электропривода питателя

Определим приведённый к валу двигателя момент нагрузки

$$M_c = \frac{F \cdot \rho}{\eta},$$

где:  $F$  – тяговое усилие;

$\rho$  – радиус приведения кинематической схемы между исполнительным органом и валом двигателя;

$\eta$  – общий КПД.

Так как питатель представляет собой скребковый конвейер [3], то тяговое усилие определим как

$$F = k(W_{zp} + W_{nop}),$$

где:  $k = 1,1$  – коэффициент, учитывающий сопротивления на концевых звёздочках;

$$W_{zp} = L \left[ q_m (w_m \cos \beta \pm \sin \beta) + Lq (w_{zp} \cos \beta \pm \sin \beta) \right] g - \text{сопротивление}$$

движению гружёной ветви, Н;

$$W_{nop} = Lq_m (w_m \cos \beta \pm \sin \beta) g - \text{сопротивление движению порожней ветви,}$$

Н;

$L = 3,5 \text{ м}$  – расстояние между осями приводного и натяжного валов;

$q_m = 52,4 \text{ кг/м}$  – масса 1 м тяговой цепи со скребками;

$w_m = 0,4$  – коэффициент сопротивления перемещению тяговой цепи со скребками;

$w_{zp} = 0,8$  – коэффициент сопротивления перемещению древесной массы по желобу;

$\beta = 0$  – угол наклона конвейера;

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

$q = \frac{Q_m}{3,6 \cdot v}$  – масса груза приходящаяся на 1 м желоба;

$Q_m = 71 \div 354 \text{ т/ч}$  – производительность питателя при минимальной и максимальной скорости тяговой цепи;

$v = 0,054 \div 0,27 \text{ м/с}$  – минимальная и максимальная скорость тяговой цепи.

С учётом выше изложенного имеем:

$$q = const = 364 \text{ кг / м};$$

$$W_{zp} = 3,5 [52,4 \cdot 0,4 + 3,5 \cdot 364 \cdot 0,8] \cdot 9,81 = 35714 \text{ Н};$$

$$W_{nop} = 3,5 \cdot 52,4 \cdot 0,4 \cdot 9,81 = 719 \text{ Н};$$

$$F = 1,1(35714 + 719) = 40076 \text{ Н}.$$

Определим общий КПД механизма питателя

$$\eta = \eta_{муф}^2 \cdot \eta_{ред} \cdot \eta_{зв} = 0,99^2 \cdot 0,92 \cdot 0,92 = 0,83,$$

где:  $\eta_{муф} = 0,99$  – КПД муфты;

$\eta_{ред} = 0,92$  – КПД трёхступенчатого редуктора;

$\eta_{зв} = 0,92$  – КПД приводной звёздочки с учётом жёсткости тягового органа.

Радиус приведения кинематической схемы:

$$\rho = \frac{v}{\omega_{дв}} = 0,0025.$$

Тогда момент нагрузки, который приводится к валу двигателя, будет равняться:

$$M_c = \frac{40076 \cdot 0,0025}{0,83} = 120 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Определим приведённый момент инерции

$$J_{\Sigma} = J_1 + \frac{J_2}{i^2} + m\rho^2.$$

В соответствии с кинематической схемой

$$J_1 = 1,15J_{\text{дв}} + J_{\text{муф}} = 1,15 \cdot 0,69 + 0,064 = 0,86 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где: 1,15 – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора;

$J_{\text{дв}} = 0,69 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  – момент инерции двигателя ВАО92-12/8/6/4;

$J_{\text{муф}} = 0,064 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  – момент инерции муфты МУВП 1- 48;

$$J_2 = J_{\text{муф}} + 4J_{\text{зв}} = 1,34 + 4 \cdot 7,12 = 29,82 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$$m = \frac{F}{g} = \frac{40076}{9,81} = 4085,2 \text{ кг} \quad - \quad \text{масса движущихся поступательно}$$

элементов питателя,

$$\rho = \frac{v}{\omega_{\text{ДВ}}} = 0,0025 \quad - \quad \text{радиус, между исполнительным органом и валом}$$

двигателя, приведения кинематической схемы.

В соответствии с вышеизложенным, приведённый момент инерции будет равен

$$J_{\Sigma} = 0,86 + \frac{29,82}{125^2} + 4085,2 \cdot 0,0025^2 = 0,89 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ ВАО-92-12/8/6/4

#### 3.1. Расчёт параметров схемы замещения двигателя при его работе на первой скорости (6 пар полюсов)

Используя математическую модель асинхронного двигателя, которая представляет собой различные схемы замещения, можно рассчитать механические и электромеханические характеристики. Т-образная схема замещения является одним из наиболее предпочтительных вариантов [4], рисунок 3.1.

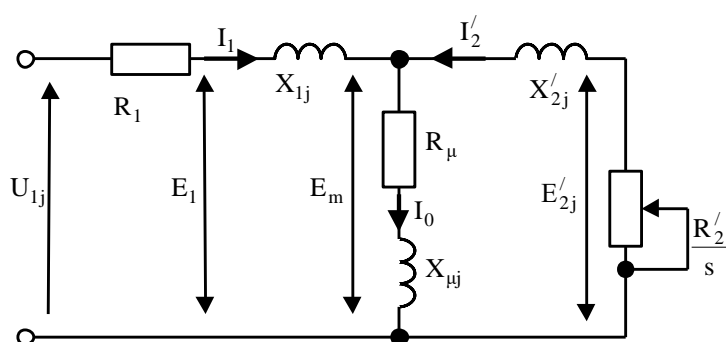


Рисунок 3.1 – Схема замещения асинхронного двигателя

Согласно принятой схеме, основные уравнения асинхронного двигателя:

$$\begin{aligned}
 U_{1\phi} - \bar{E}_m - j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 &= 0; \\
 \bar{E}_m + j \cdot X'_2 \cdot \bar{I}'_2 + R'_2 \cdot \bar{I}'_2 / s &= 0; \\
 \bar{I}_1 + \bar{I}'_2 + \bar{I}_0 &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

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

Для определения параметров выбранной Т-образной схемы, необходимы следующие тех. данные (которые, как правило, можно обнаружить в различных справочниках для асинхронных двигателей):

$P_n = 15 \text{ кВт}$  – номинальная мощность двигателя;

$U_{1n} = 380 \text{ В}$  – номинальное линейное напряжение;

$U_{1\phi} = 220 \text{ В}$  – фазное напряжение;



$n_0 = 500 \text{ об / мин}$  – синхронная частота вращения;

$n_n = 490 \text{ об / мин}$  – номинальная частота вращения;

$\eta_n = 0,79$  – КПД в режиме номинальной мощности (100 %-я нагрузка);

$\cos \varphi_n = 0,55$  – коэффициент мощности в номинальном режиме;

$k_i = \frac{I_n}{I_n} = 5 \text{ о.е.}$  – кратность пускового тока;

$k_n = \frac{M_n}{M_n} = 1,1 \text{ о.е.}$  – кратность пускового момента;

$k_{\max} = \frac{M_{\kappa}}{M_n} = 2 \text{ о.е.}$  – кратность максимального момента;

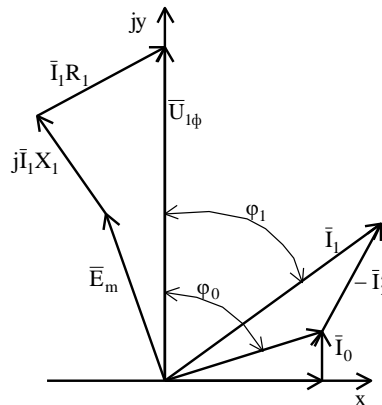


Рисунок 3.2 - Векторная диаграмма асинхронной машины

При данных допущениях: не рассматриваются эффекты вытеснения. Это означает, что режим работы двигателя никак не влияет на активные сопротивления обмоток у статора и у ротора. Потери, связанные с механикой и магнитные потери равняются . Это позволит найти параметры для схемы замещения.

Ток холостого хода АД:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - (p_{жс} \cdot I_{1н} \cdot (1 - s_n) / (1 - p_{жс} \cdot s_n))^2}{1 - (p_{жс} \cdot (1 - s_n) / (1 - p_{жс} \cdot s_n))^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{40,031^2 - (0,75 \cdot 52,307 \cdot (1 - 0,02) / (1 - 0,75 \cdot 0,02))^2}{1 - (0,75 \cdot (1 - 0,02) / (1 - 0,75 \cdot 0,02))^2}} = 13,355 \text{ A,}$$

где:  $I_{1н} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{1ф} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{15000}{3 \cdot 220 \cdot 0,55 \cdot 0,79} = 52,307 \text{ A}$  – номинальный ток статора двигателя;

$I_{11} = \frac{p_{жс} \cdot P_n}{3 \cdot U_{1ф} \cdot \cos \varphi_{ржс} \cdot \eta_{ржс}} = \frac{0,75 \cdot 15000}{3 \cdot 220 \cdot 0,539 \cdot 0,79} = 40,031 \text{ A}$  – ток статора двигателя при частичной нагрузке;

$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{500 - 490}{500} = 0,02 \text{ o.e.}$  – номинальное скольжение;

$p_{жс} = P/P_n = 0,75$  – коэффициент загрузки двигателя;

$\eta_{ржс} = \eta_n = 0,79$  – КПД при частичной нагрузке;

$\cos \varphi_{ржс} = \cos \varphi_n \cdot 0,98 = 0,539$  – коэффициент мощности при частичной нагрузке.

Для того, что бы определить КПД и коэффициент мощности, воспользуемся следующими соображениями:

– если учесть шкалу дискретных мощностей, то основная часть АД работают с небольшой недогрузкой. Поэтому самый большой КПД достигается при нагрузке на 10 – 15 % ниже номинальной. Поэтому КПД с нагрузкой равной  $p_{жс} = 0,75$  и КПД при номинальной нагрузке фактически равны, то есть

$$\eta_{ржс} \approx \eta_n \quad (3.2)$$

– коэффициент мощности при номинальной нагрузке и при нагрузке  $p_{жс} = 0,75$  значительно отличаются между собой. Их отличие зависит от мощности двигателя и подчиняется зависимости, представленной на рисунке 3.8.

Воспользовавшись формулой Клосса, рассчитаем соотношение для критического скольжения:

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

$$= 0,02 \cdot \frac{2 + \sqrt{2^2 - (1 - 2 \cdot 0,02 \cdot 3,155 \cdot (2 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,02 \cdot 3,155 \cdot (2 - 1)} = 0,086 \text{ o.e.}$$

где:  $\beta = R_1 / (C_1 \cdot R_2')$ . (3.3)

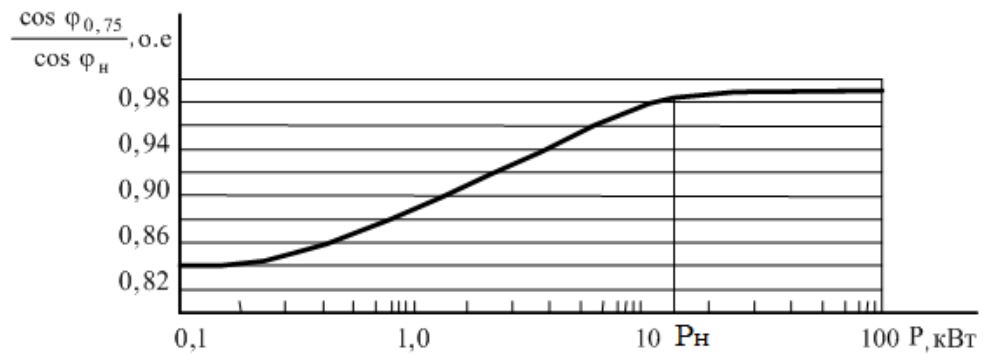


Рисунок 3.3 – Зависимость мощности асинхронного двигателя от  $\frac{\cos \varphi_{0,75}}{\cos \varphi_H}$

Значение коэффициента  $\beta$  располагается в диапазоне между 0,6 – 4, поэтому в первом приближении принимается  $\beta = 1$ .

Далее находим промежуточные коэффициенты:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{13,355}{2 \cdot 5 \cdot 52,307} = 1,026;$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,02)}{2 \cdot 1,026 \cdot 2 \cdot 15000} = 2,313;$$

$$A_0 = \frac{I_{1H} \cdot \cos \varphi_H - I_0 \cos \varphi_0}{U_{1\phi}} = \frac{52,307 \cdot 0,55 - 13,355 \cdot 0,139}{220} = 0,122;$$

где:  $\cos \varphi_0 = \cos 82^\circ = 0,139$  – коэффициент мощности асинхронного двигателя в режиме холостого хода;

$$B = \frac{1}{s_H} + \frac{1}{s_{\kappa}} - A_0 \cdot 2 \cdot \frac{A_1}{s_H} = \frac{1}{0,02} + \frac{1}{0,086} - 0,122 \cdot 2 \cdot \frac{2,313}{0,02} = 33,305;$$

$$C = \frac{1}{s_n \cdot s_k} - \left( \frac{1}{s_k^2} + \frac{1}{s_n^2} \right) \cdot A_0 \cdot A_1 = \frac{1}{0,02 \cdot 0,086} - \left( \frac{1}{0,086^2} + \frac{1}{0,02^2} \right) \cdot 0,122 \cdot 2,301 = -165,53$$

Теперь по найденным значениям проверим величину коэффициента  $\beta$ :

$$\beta_p = \left| \frac{-B}{2} + \sqrt{\frac{B}{2} - C} \right| = \left| \frac{-33,305}{2} + \sqrt{\frac{33,305}{2} - (-165,53)} \right| = 3,155.$$

Активное сопротивление ротора, приведённое к обмоткам статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = \frac{A_1}{\left( \beta + \frac{1}{s_k} \right) \cdot C_1} = \frac{2,301}{\left( 3,155 + \frac{1}{0,086} \right) \cdot 1,026} = 0,153 \text{ Ом.}$$

По формуле найдем активное сопротивление статорной обмотки:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,026 \cdot 0,153 \cdot 3,155 = 0,495 \text{ Ом.}$$

Посчитаем  $\gamma$ , который поможет найти индуктивное сопротивление кз  $X_{кн}$ :

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,086^2} - 3,155^2} = 11,157.$$

Тогда:

$$X_{кн} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 11,157 \cdot 1,026 \cdot 0,153 = 1,749 \text{ Ом}$$

Для того чтобы определить из индуктивного сопротивления  $X_{кн}$ , сопротивления рассеяния фаз статора и ротора, используем соотношения,

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

$$X_{2н}' = \frac{0,58 \cdot X_{кн}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 1,749}{1,026} = 0,989 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки определим по следующему выражению:

$$X_{1н} = 0,42 \cdot X_{кн} = 0,42 \cdot 1,749 = 0,735 \text{ Ом.}$$

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

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\phi} \cdot \cos \phi_n - R_1 \cdot I_{1n})^2 + (U_{1n} \cdot \sin \phi_n - X_{1n} \cdot I_{1n})^2} = \\ = \sqrt{(220 \cdot 0,55 - 0,495 \cdot 52,307)^2 + (220 \cdot 0,83 - 0,735 \cdot 52,307)^2} = 173,637 \text{ В.}$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания определим как:

$$X_{\mu n} = \frac{E_m}{I_0} = \frac{173,637}{13,355} = 18,019 \text{ Ом.}$$

$$\text{Индуктивность фазы обмотки статора: } L_{1\sigma} = \frac{X_{1n}}{2 \cdot \pi \cdot f_n} = \frac{0,735}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,002341 \text{ Гн.}$$

$$\text{Индуктивность фазы обмотки ротора: } L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2n}}{2 \cdot \pi \cdot f_n} = \frac{0,735}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,003154 \text{ Гн.}$$

$$\text{Индуктивность цепи намагничивания: } L_{\mu} = \frac{X_{\mu n}}{2 \cdot \pi \cdot f_n} = \frac{18,019}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,043 \text{ Гн.}$$

Расчет параметров на остальных скоростях с изменением числа пар полюсов производим аналогично. Полученные данные сведем в таблицу 3.1.

Таблица 3.1. – Параметры схемы замещения при изменении числа пар

ПОЛЮСОВ

Число пар полюсов	$R_1$ , Ом	$R'_2$ , Ом	$X_{1n}$ , Ом	$X'_{2n}$ , Ом	$X_{\mu n}$ , Ом	$L_{1\sigma}$ , Гн·10 <sup>-3</sup>	$L'_{2\sigma}$ , Гн·10 <sup>-3</sup>	$L_{\mu}$ , Гн
p=6	0,495	0,153	0,735	0,989	18,019	2,341	3,154	0,043
p=4	0,298	0,093	0,443	0,599	11,456	1,41	1,908	0,036
p=3	0,247	0,077	0,397	0,537	14,962	1,263	1,709	0,048

Можно произвести расчёт электромеханических и механических характеристик используя параметры схемы замещения.

## 3.2. Построение механических и электромеханических характеристик двигателя вао-92-12/8/6/4

Так как при переключении скоростей параметры асинхронного электродвигателя будут изменяться, то определим их для каждой скорости. Определение параметров асинхронного двигателя будем вести по методологии, которая описана в разделе 3.3, данные для расчёта возьмём из таблицы 3.1.

Расчёт параметров произведём с применением программной среды Mathcad, так как в ней довольно быстро возможно найти коэффициент  $\beta$ .

### 3.2.1. Механические характеристики асинхронного двигателя ВАО-92-12/8/6/4

Произведем расчеты критического момента, когда машина работает на первой скорости и в двигательном режиме, для того чтобы построить механическую характеристику:

$$M_k = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2} \right]} =$$
$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 52,359 \cdot 1,026 \cdot \left[ 0,495 + \sqrt{0,495^2 + 1,749^2} \right]} = 584,357 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.4)$$

Задаваясь диапазоном изменения скольжения от 1 до 0, с шагом 0,001, строим механическую характеристику асинхронного электродвигателя по формуле Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + a \cdot s_k)}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k} + 2 \cdot a \cdot s_k}, \quad (3.5)$$

где: коэффициент  $a$  равен  $a = \frac{R_1}{R_2'} = \frac{0,495}{0,153} = 3,235$ .

Тогда расчётное выражение для механической характеристики примет следующий вид:

$$M(s) = \frac{1493,862}{\frac{0,086}{s} + \frac{s}{0,086} + 0,556} .$$

При работе двигателя на первой скорости, механическая характеристика, изображена на рисунке 3.2, характеристика 1.

Проведём анализ основных данных, по построенной механической характеристике, а также сравним их с паспортными.

Момент номинальный:

$$M_{n(\text{паспорт})} = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{15000}{51,312} = 292,325 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.5)$$

То же значение, но по формуле Клосса:

$$M_n = \frac{1493,862}{\frac{0,086}{s_n} + \frac{s_n}{0,086} + 0,556} = 293,572 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент критический:

$$M_k = k_{\max} \cdot M_{n(\text{паспорт})} = 2 \cdot 292,325 = 584,65 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.6)$$

Пусковой момент:

$$M_n = k_n \cdot M_{n(\text{паспорт})} = 1,1 \cdot 292,325 = 321,557 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.7)$$

То же значение, но по формуле Клосса:

$$M_n = \frac{1493,862}{\frac{0,086}{1} + \frac{1}{0,086} + 0,556} = 121,75 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Механические характеристики двигателя при его работе на второй и третьей скоростях рассчитываются аналогично, расчеты сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2. – Основные точки механической характеристики АД

Число пар полюсов	$M_{n.расч},$ $H \cdot м$	$M_{n.пасп},$ $H \cdot м$	$M_{н.расч},$ $H \cdot м$	$M_{н.пасп},$ $H \cdot м$	$M_{к.расч},$ $H \cdot м$	$M_{к.пасп},$ $H \cdot м$	$\omega_0,$ $рад / с$	$\omega_n,$ $рад / с$	$\omega_k,$ $рад / с$
p=6	121,2 45	321,5 57	293,5 72	292,3 25	584,3 51	584,6 5	52,36	51,31 3	47,84 4
p=4	135,3 21	324,8 06	334,4 91	324,8 06	649,6 12	649,6 12	78,54	76,96 9	71,76 6
p=3	106,5 67	233,8 6	301,1 58	292,3 25	555,4 18	555,4 18	104,7 2	102,6 25	96,33 1

Механические характеристики асинхронного двигателя ВАО-92-12/8/6/4, при включении его на первую(1), вторую(2) и третью(3) скорости изображены на рисунке 4.1. Характеристики соответствующая паспортным данным изображена пунктирной линией.



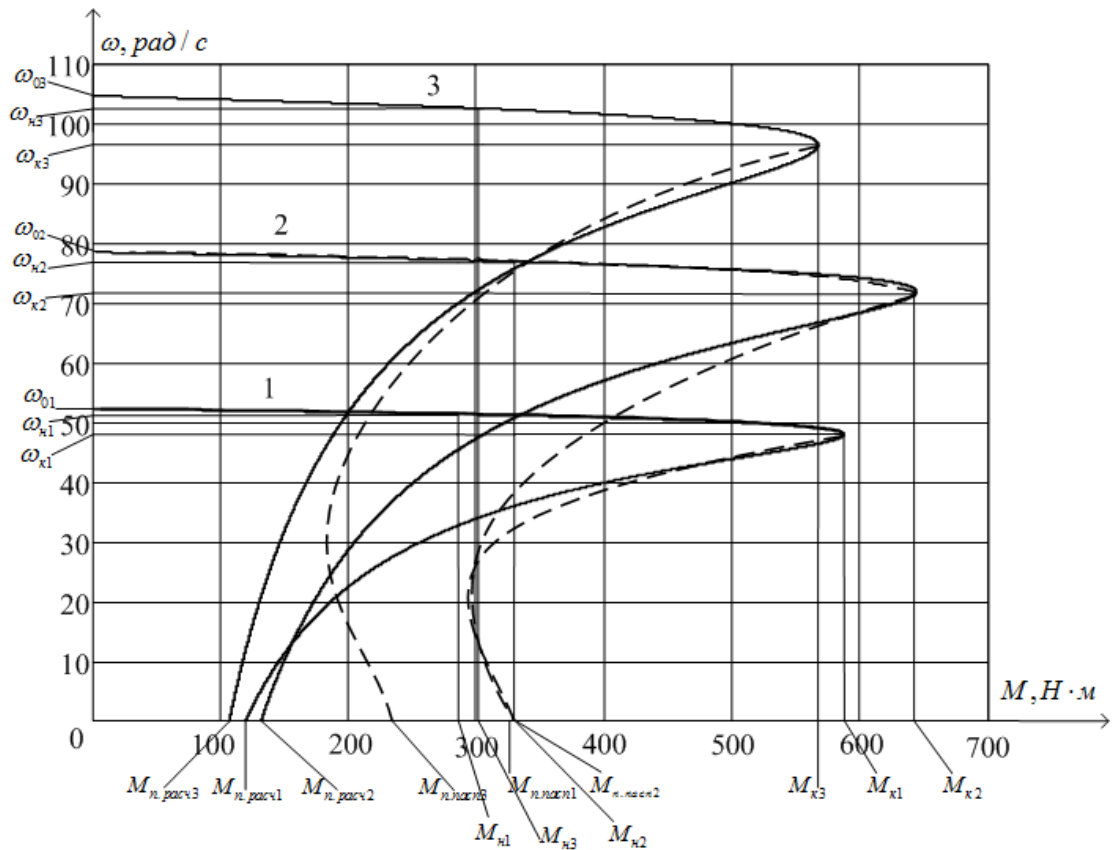


Рисунок 3.2 – Механические характеристики асинхронного двигателя ВАО-92-12/8/6/4, при включении его на первую(1), вторую(2) и третью(3) скорости

Полученная механическая характеристика аналогична характеристике асинхронного двигателя с ненасыщенной магнитной системой, а её вид задается зависимостью индуктивного сопротивления ротора от скольжения.

Анализируя полученные графические и аналитические результаты можно сказать о том, что в области близкой к номинальным параметрам двигателя, значения номинального и критического моментов равны, но моменты в диапазоне скоростей от  $\omega_k$  до  $\omega_n$  отличаются. Данный факт можно объяснить тем, что ток вытесняется на поверхность проводника, который наиболее сильно проявляется в момент разгона двигателя, где частота вращения ротора  $f_2$  увеличивается с увеличением скольжения  $s$ .

### 3.2.2. Электромеханические характеристики асинхронного двигателя ВАО-92-12/8/6/4

Суммируя токи  $\bar{I}_0$  (намагничивания) и  $\bar{I}'_2$  (ротора), получается ток  $I_1$  (статора). Для реализации этой суммы обычно пользуются круговой диаграммой.

Полагая ток  $I_0$  (намагничивания) реактивным ( $I_{0A} = 0$ ), ток статора  $I_1$  через приведённый ток ротора  $I'_2$  можно найти по формуле:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + (I'_2)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2 \cdot \sin \varphi_2}, \quad (3.8)$$

$$\text{где: } I'_2 = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2}}, \quad (3.9)$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_{кн}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2}}. \quad (3.10)$$

В формулы 4.6 – 4.8 требуется подставить численные значения, что бы получить график с электромеханическими характеристиками.

Расчет производим для работы двигателя на первой скорости.

$$I_1(s) = \sqrt{13,355^2 + (I'_2(s))^2 + 2 \cdot 13,355 \cdot I'_2(s) \cdot \sin \varphi_2(s)},$$

$$I'_2(s) = \frac{220}{\sqrt{\left(0,495 + \frac{0,153}{s}\right)^2 + 1,749^2}},$$

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{1,749}{\sqrt{\left(0,495 + \frac{0,153}{s}\right)^2 + 1,749^2}}.$$

На второй и третьей скоростях расчеты производим аналогично.

Строим электромеханические характеристики асинхронного электродвигателя, задаваясь диапазоном изменения скольжения от 0 до 1, с шагом 0,001, по формулам для токов обмоток статора и ротора. Электромеханические характеристики демонстрируются на рисунке 4.2.

Сравним паспортные данные с электромеханическими характеристиками.

$$I_n = k_i \cdot I_{1n} = 5 \cdot 52,307 = 261,5 \text{ A},$$

$$I_{1(s=1)} = 130 \text{ A}.$$

Полученные основные точки электромеханической характеристики сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3. – Основные точки электромеханической характеристики АД

Число пар полюсов	$I_0,$ A	$I_n,$ A	$I_{\text{пуск.пасп}},$ A	$I_{\text{пуск.расч}},$ A
p=6	13,355	52,307	261,5	130
p=4	16,19	65,534	393,2	210,891
p=3	12,1	60,062	360,369	234,87

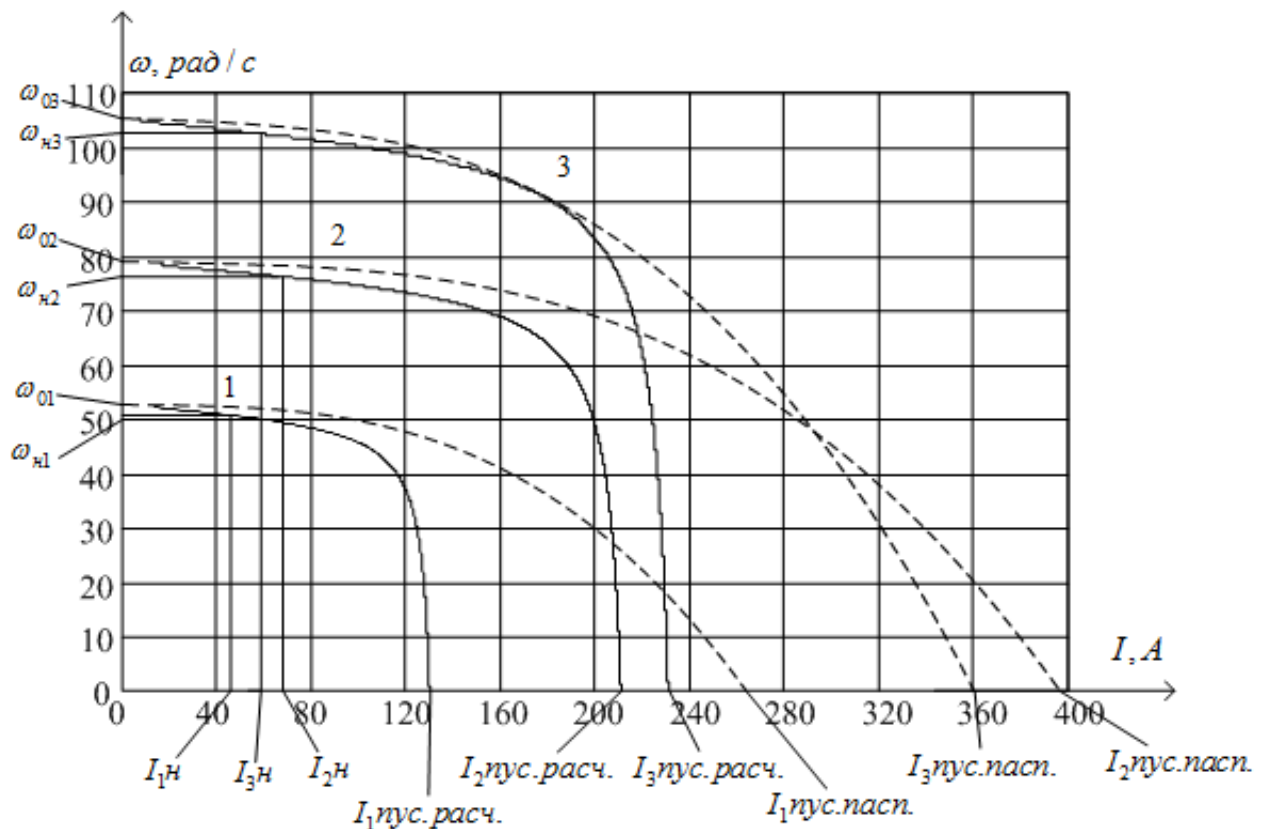


Рисунок 3.3 – Электромеханические характеристики двигателя ВАО-92-12/8/6/4 при включении его на первую (характеристика 1), вторую (характеристика 2) и третью (характеристика 3) скорости

Можно сделать вывод, что построенные электромеханические характеристики, также как и механические справедливы только в области близкой к номинальным скоростям. Это можно объяснить тем, что в момент проектирования сечение провода обмоток берут с запасом, за счет чего ток короткого замыкания принимается большим. Также на данный факт имеет воздействие то, что при построении электромеханических характеристик учитывалась частичная нагрузка двигателя.

### 3.3. Динамическая модель двигателя вao-92-12/8/6/4

С помощью программы MATLAB Simulink осуществим моделирование асинхронного двигателя. Для создания имитационной модели использованы параметры схемы замещения двигателя.

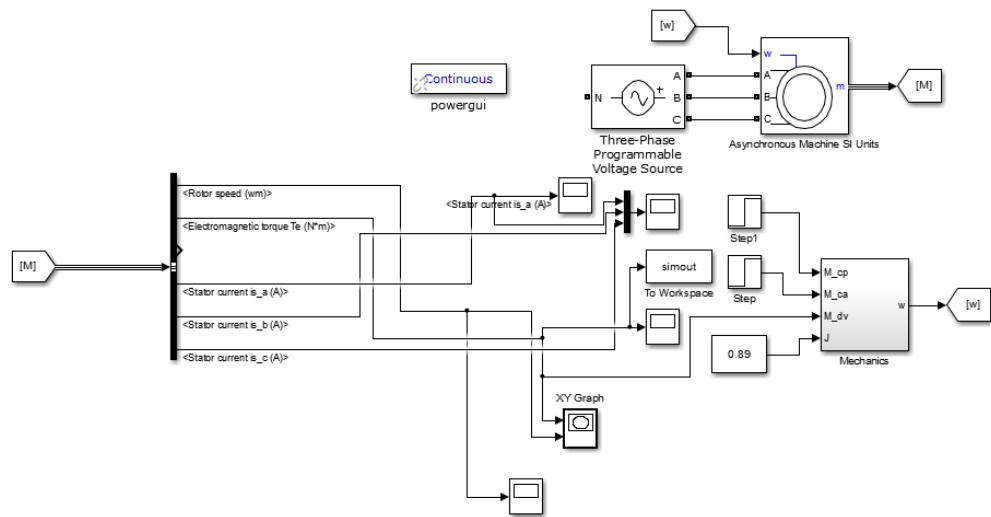


Рисунок 3.4 – Имитационная модель прямого пуска асинхронного двигателя

Однако, только исходя из результатов расчета переходных процессов возможно построить механическую и динамическую характеристику асинхронного двигателя, именно с этой целью сначала следует построить графики переходных процессов скорости и момента при пуске двигателя при прямом пуске, представленных на рисунках 3.5 и 3.6 соответственно.

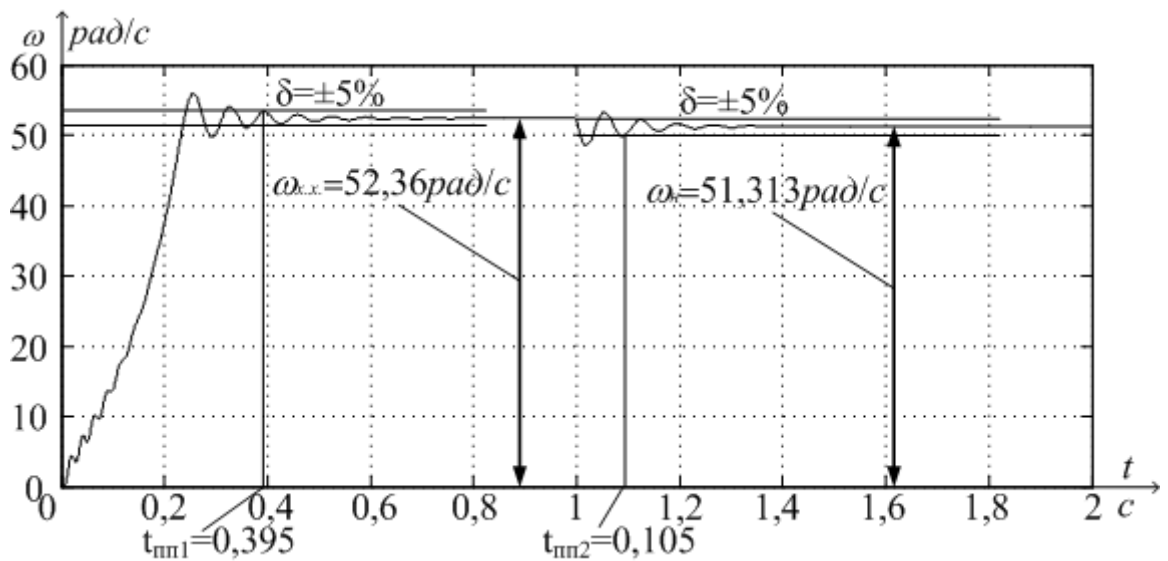


Рисунок 3.5 – Переходный процесс скорости при пуске короткозамкнутого асинхронного двигателя ВАО 92-12/8/6/4 прямым включением в сеть

Основные показатели качества для характеристики скорости:  $t_p$

перерегулирование –  $\sigma = 2,5\%$ ,

время переходного процесса до скорости холостого хода –  $t_{m1} = 0,395$  с,

время переходного процесса со скорости холостого хода на номинальную скорость при набросе нагрузки на 1 секунде –  $t_{m2} = 1,105$  с,

установившееся значение скорости холостого хода –  $\omega_{x.x.} = 52,36$  рад/с,

установившееся значение номинальной скорости –  $\omega_n = 51,313$  рад/с.

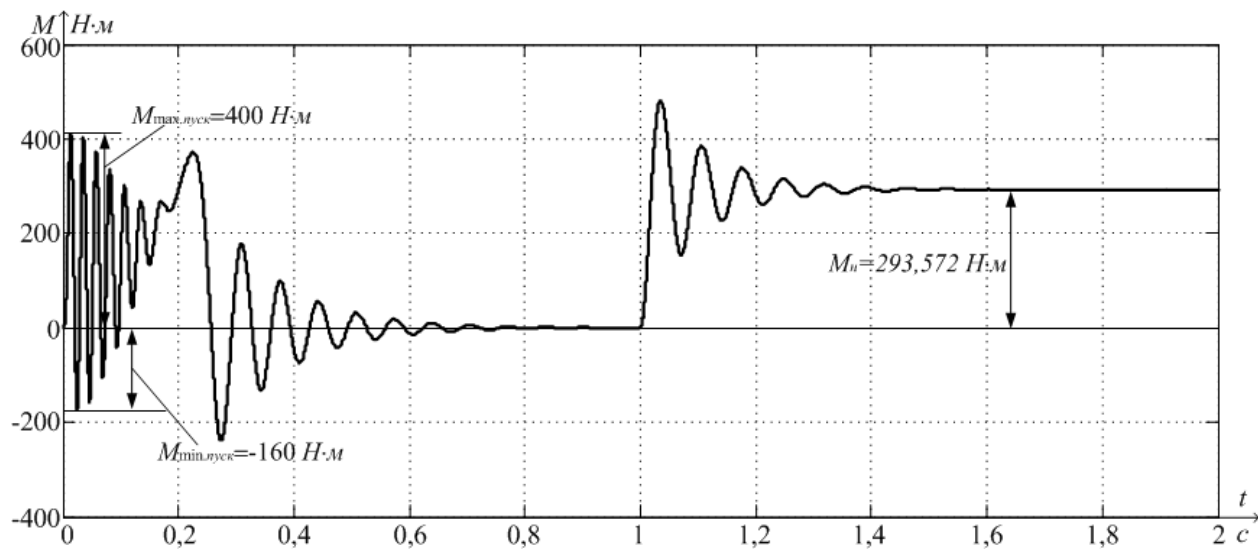


Рисунок 3.6 – Переходный процесс электромагнитного момента при пуске короткозамкнутого асинхронного двигателя ВАО 92 – 12/8/6/4 прямым включением в сеть

Графики  $\omega = f(t)$  и  $M = f(t)$  переходных процессов позволяют построить динамическую механическую характеристику (рисунок 3.7) асинхронного двигателя ВАО-92-12/8/6/4 при пуске прямым включением в сеть.

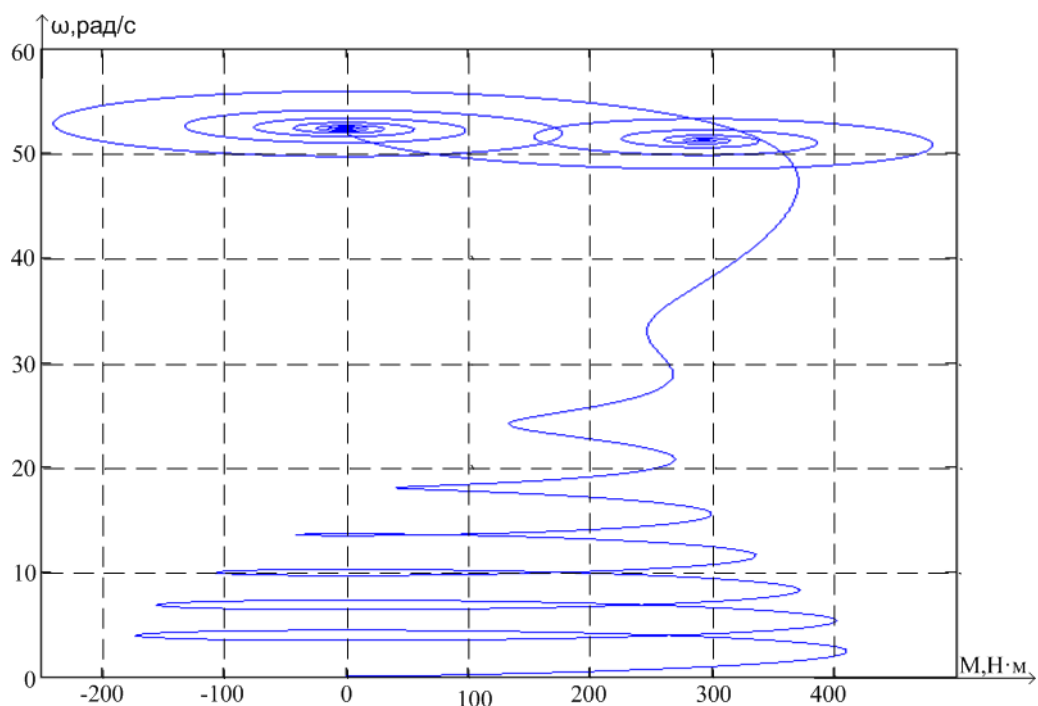


Рисунок 3.7 – Динамическая механическая характеристика асинхронного двигателя ВАО-92-12/8/6/4

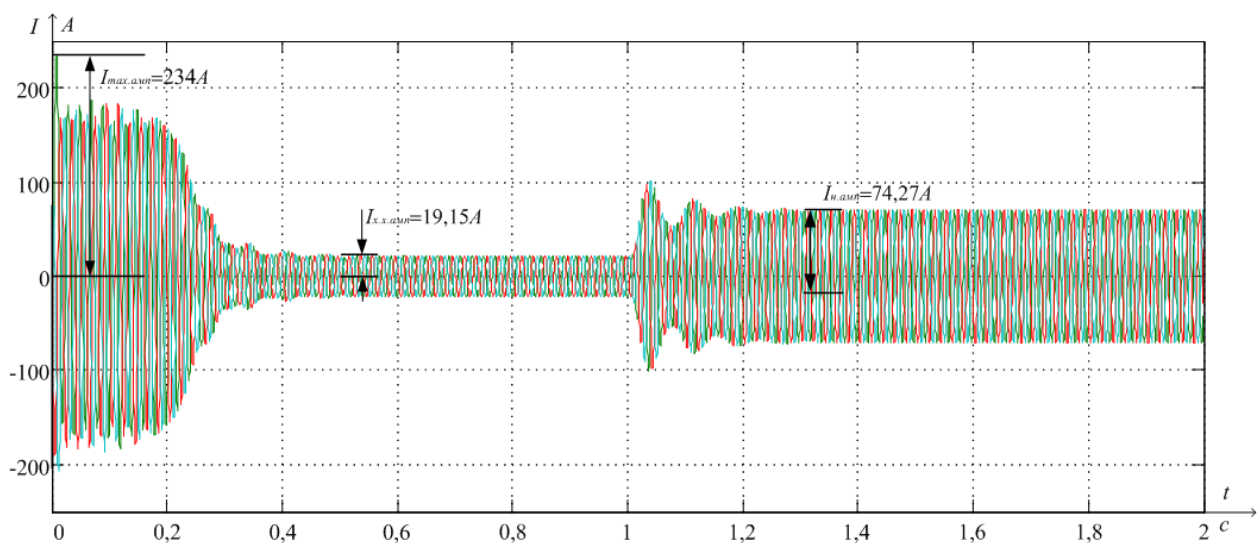


Рисунок 3.8 – Переходный процесс тока статора при прямом пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором ВАО 92 – 12/8/6/4

Установившееся амплитудное значение тока статора на холостом ходу  $I_{x.x.amn.} = 19,15 A$ .

Определим действующее значение тока статора без нагрузки:

$$I_{x.x.дейст.} = \frac{I_{x.x.амп.}}{\sqrt{2}} = \frac{19,15}{\sqrt{2}} = 13,541A$$

Установившееся амплитудное значение тока статора при номинальной нагрузке  $M_H = 293,572H \cdot м$  равно  $I_{H.амп.} = 74,27A$ .

Определим действующее значение тока статора при номинальной нагрузке:

$$I_{H.дейст.} = \frac{I_{H.амп.}}{\sqrt{2}} = \frac{74,27}{\sqrt{2}} = 52,517A$$

Полученные значения тока при моделировании  $I_{x.x.дейст.} = 13,541A$ ,  $I_{H.дейст.} = 52,517A$  совпадают с расчетными значениями тока  $I_0 = 13,355A$ ,  $I_{1н.} = 52,307A$ , из это можно сделать вывод, что переходные процессы при моделировании получились верные.

Для обнаружения колебательной составляющей в кривой электромагнитного момента, которая изменяется в пределах от  $-160$  до  $+400$  и затухает с разгоном двигателя пользуются тем, как выглядит переходный процесс при прямом пуске. Когда динамическая характеристика достигает критического значения, у двигателя максимально возможное ускорение, а момент равен  $400 H \cdot м$ . К поломке питателя (выход из строя редуктора, обрыв тяговой цепи) приводит большие значения ударного момента, которые происходят при пуске. Значения токов обмоток статора во время разгона двигателя достигают значения в  $165 A$ , последствием чего является поломка обмотки статора, когда двигатель разогнался ток уменьшается до номинального. Следовательно, при прямом пуске асинхронного двигателя переходные характеристики являются неудовлетворительными Также существующий привод не обеспечивает необходимый для технологического процесса диапазон регулирования. Так как существующий привод не



удовлетворяет необходимым требованиям, необходимо спроектировать новый привод.

## 4. ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ

### 4.1. Обоснование выбора типа двигателя

Главное требование, которое предъявляется электроприводу питателя, это повышенная надежность против возможного взрыва.

Взрывобезопасность двигателей, как и других электрических аппаратов эксплуатируемых на предприятиях опасных по газу или пыли, достигается тем, что взрыв, который может возникнуть внутри их оболочки под действием электрической дуги или высокой температуры, не может передаться во внешнюю среду. Это достигается тем, что зазоры, соединяющие внутреннюю полость двигателя с окружающей атмосферой, имеют нормированные величины, при которых пламя, возникающее в оболочке, не может пройти через зазоры, а газы до выхода наружу успевают охладиться до температуры, не способной воспламенить древесную пыль. Кроме того, оболочки взрывобезопасных двигателей, как и другого взрывобезопасного электрооборудования, рассчитываются таким образом, чтобы они не могли быть разрушены избыточным внутренним давлением, возникающим при взрыве древесной пыли внутри оболочки.

В силу того, что двигатели постоянного тока взрывозащищённого исполнения серийно не выпускаются, остановим свой выбор на наиболее простом, надёжном и дешёвом асинхронном электродвигателе с короткозамкнутым ротором во взрывозащищённом исполнении. На предприятиях взрывоопасных производств в настоящее время применяются, выпускавшиеся ранее, взрывозащищённые электродвигатели типов КО, КОМ, МА, АСВ, ВАО и выпускаемые в настоящее время взрывозащищённые электродвигатели типов В, ВР, ВРП, АИМ, АИММ, АИМС, АИМР, АИУ и АИУР.

Асинхронные двигатели имеют широкий оборот в производстве и эксплуатации благодаря таким преимуществам, как: простое исполнение в конструкции, довольно высокая надежность и дешевая стоимость. У асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором отсутствуют такие компоненты, как щетки и коллектор, в отличие от машин постоянного тока. Это обеспечивает им высокую скорость вращения, высокую перегрузочную способность и допустимую скорость изменения момента, а также лучшие весогабаритные показатели и большой предел единичной мощности. А благодаря частотному управлению все вышеперечисленные преимущества реализуются в полной мере. Поэтому, частотно-регулируемый асинхронный привод вытеснит с рынка регулируемый электропривод на постоянном токе.

Но стоит отметить и недостатки асинхронного двигателя: если происходит падение напряжения в сети, то вместе с этим сильно проседает также критический и пусковой моменты – так называемая, квадратичная зависимость момента от напряжения. Существует и опасность перегрева ротора со статором, особенно в моменты повышения напряжения сети.

#### 4.2. Выбор двигателя

Привод питателя состоит из электродвигателя и трёхступенчатого редуктора типа ЦТНД – 500, с передаточным числом  $i = 125$  и номинальным крутящим моментом  $M_{кр} = 24000 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Тяговая цепь пластинчатая с шагом  $\rho = 250 \text{ мм}$ . Ведущая и ведомая звёздочки с числом зубьев  $z = 8$ .

Максимальная скорость тяговой цепи:  $v = 0,81 \text{ м/с}$ .

Минимальная скорость тяговой цепи:  $v = 0,054 \text{ м/с}$ .

Определим необходимую синхронную скорость электродвигателя.

Для этого найдём максимальную и минимальную скорость вращения ведущей звёздочки:

$$n_{зв.макс} = \frac{v \cdot 60000}{z \cdot \rho} = \frac{0,81 \cdot 60000}{8 \cdot 250} = 8,1 \text{ об/мин}, \quad (4.1)$$

$$n_{зв.мин} = \frac{0,054 \cdot 60000}{8 \cdot 250} = 1,62 \text{ об/мин}.$$

Тогда необходимая максимальная и минимальная скорость электродвигателя:

$$n_{дв.макс} = n_{зв.макс} \cdot i = 8,1 \cdot 125 = 1012,5 \text{ об/мин},$$

$$n_{дв.мин} = n_{зв.мин} \cdot i = 1,62 \cdot 125 = 202,5 \text{ об/мин}.$$

Таким образом, следует производить выбор двигателя учитывая факт, что синхронная скорость должна составлять 1000 об/мин.

Питатель является одной из разновидностью скребкового конвейера [3], поэтому для нахождения мощности двигателя, воспользуемся следующей формулой:

Ввиду того, что питатель представляет собой разновидность скребкового конвейера [3], необходимая мощность двигателя (кВт) определяется по формуле:

$$P = \frac{k_3 \cdot F \cdot v}{1000 \cdot \eta}, \quad (4.2)$$

где:  $F = 40076$  – суммарное тяговое усилие, Н, (раздел 2.4);

$k_3 = 1,3$  – коэффициент запаса;

$v = 0,81 \text{ м/с}$  – максимальная скорость тяговой цепи;

$\eta = 0,83$  – общий КПД привода (раздел 2.4).

$$P = \frac{1,3 \cdot 40076 \cdot 0,81}{1000 \cdot 0,83} = 16,9 \text{ кВт}.$$

По справочнику [5] выбираем двигатель, взрывозащищенного исполнения, ближайшей большей мощности, данные которого представлены в таблице 6.1.

Таблица 4.1– Параметры двигателя АИМ 180 М6

Тип двигателя	АИМ 180 М6
$P_{ном}$ , кВт	18,5
Синхронная скорость	1000
КПД, %	89,5
$\cos \varphi$	0,83
$S_n$ , %	2,5
$I_n/I_H$	5,7
$M_n/M_H$	2
$M_{мин}/M_H$	1,2
$M_{макс}/M_H$	2,3
Момент инерции ротора, кг · м <sup>2</sup>	0,32

### 4.3. Проверка выбора двигателя

Для того, чтобы правильно осуществить выбор двигателя в рассматриваемом асинхронном приводе переменного тока, обязательно нужно учесть следующий фактор:

$$M_{дв} \geq M_{мех},$$

где:  $M_{дв}$  – момент развиваемый двигателем;

$M_{мех}$  – момент сопротивления механизма.

Исходя из того факта, что в конструкции двигателя присутствует такой немаловажный аспект, как самовентиляция, следует учитывать, что в момент уменьшения скорости происходит ухудшение условий охлаждения, что на прямую влияет на допустимы по нагреву момент, который незамедлительно

уменьшается. При отклонении скорости от номинальной в сторону увеличения происходит регулирование путем ослабления поля, что соответствует режиму работы с постоянной мощностью и уменьшением момента.

На протяжении всего диапазона регулирования, обязательным условием является удержание момента двигателя на величину большей, чем момент нагрузки двигателя.

Для того, чтобы выбранный в разделе 4.2. двигатель осуществлял работу на максимально возможной по каталожным данным скорости, необходимо увеличение частоты напряжения статора до следующего уровня:

$$f_{\max} = \frac{n_{\max} \cdot f_{\text{ном}}}{n_{\text{дв.0}}} = \frac{1012,5 \cdot 50}{1000} = 50,625 \text{ Гц.} \quad (4.3)$$

Для работы двигателя на минимальной скорости потребуется снижение частоты напряжения питания статора до уровня:

$$f_{\min} = \frac{n_{\min} \cdot f_{\text{ном}}}{n_{\text{дв.0}}} = \frac{202,5 \cdot 50}{1000} = 10,125 \text{ Гц.}$$

Момент нагрузки, который создается с помощью питателя, не меняется по величине, независимо от диапазона регулирования, то есть на всей его протяженности. Таким образом необходимо, что бы:

$$M_{\text{дв.мин}} \geq M_{\text{мех}}, \quad M_{\text{дв.макс}} \geq M_{\text{мех}}.$$

В соответствии с рисунком 6.1, для двигателя с самовентиляцией с частотой равной  $50,625 \text{ Гц}$  необходимо ограничение момента на уровне  $0,91M_{\text{дв.ном}}$ . Следовательно, для максимальной скорости необходимо, что бы:

$$0,91M_{\text{дв.треб}} \geq M_{\text{мех}}, \quad \text{т.е.} \quad M_{\text{дв.треб}} \geq \frac{M_{\text{мех}}}{0,91},$$

где:  $M_{\text{дв.треб}}$  - требуемый момент двигателя.

Для частоты  $10,125 \text{ Гц}$  и ограничением момента  $0,77M_{\text{дв.ном}}$ :

$$0,77M_{дв.треб} \geq M_{мех}, \text{ т.е. } M_{дв.треб} \geq \frac{M_{мех}}{0,77}.$$

Из двух условий выбираем минимальное ограничение, т.е.:

$$M_{дв.треб} \geq \frac{120}{0,77} \geq 155,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Известно, что между номинальным моментом и мощностью имеется следующая взаимосвязь

$$M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n}, \quad (4.4)$$

тогда требуемая мощность асинхронного двигателя:

$$P_{треб} \geq \frac{M_{дв.треб} \cdot n_{дв.0}}{9,55} \geq \frac{155,8 \cdot 1000}{9,55} = 16314 \text{ Вт}.$$

Подставив в 6.4 численные значения, определим номинальный момент выбранного двигателя (раздел 6.2).

$$M_n = 9,55 \frac{18500}{975} = 181,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Условия  $P_n \geq P_{треб}$ ,  $M_n \geq M_{дв.треб}$  выполняются, следовательно, выбор двигателя сделан правильно.

#### 4.4. Расчёт основных параметров и характеристик двигателя

Произведём расчёт основных параметров асинхронной машины для построения механической и электромеханической характеристик асинхронного электродвигателя, расчёт будем вести по методике изложенной в разделе 3.3.[6]

$$U_{1\phi} = 220 \text{ В} \text{ – фазное напряжение;}$$

$$P_n = 18,5 \text{ кВт} \text{ – номинальная мощность двигателя;}$$

$$U_{1н} = 380 \text{ В} \text{ – номинальное линейное напряжение;}$$

$$\cos \varphi_n = 0,83 \text{ – коэффициент мощности}$$

$\eta_n = 0,895$  – КПД в режиме номинальной мощности (100 %-я нагрузка);

$n_n = 975 \text{ об / мин}$  – номинальная частота вращения;

$n_0 = 1000 \text{ об / мин}$  – синхронная частота вращения;

$k_n = \frac{M_n}{M_n} = 2 \text{ о.е.}$  – кратность пускового момента;

$k_{\max} = \frac{M_{\kappa}}{M_n} = 2,3 \text{ о.е.}$  – кратность максимального момента;

$k_i = \frac{I_n}{I_n} = 5,7 \text{ о.е.}$  – кратность пускового тока;

Ток холостого хода асинхронного двигателя найдём из выражения:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - (p_{\text{жс}} \cdot I_{1n} \cdot (1 - s_n) / (1 - p_{\text{жс}} \cdot s_n))^2}{1 - (p_{\text{жс}} \cdot (1 - s_n) / (1 - p_{\text{жс}} \cdot s_n))^2}} = \\ = \sqrt{\frac{28,705^2 - (0,75 \cdot 37,733 \cdot (1 - 0,025) / (1 - 0,75 \cdot 0,025))^2}{1 - (0,75 \cdot (1 - 0,025) / (1 - 0,75 \cdot 0,025))^2}} = 8,647 \text{ A,}$$

где:  $I_{1n} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{18500}{3 \cdot 220 \cdot 0,83 \cdot 0,895} = 37,733 \text{ A}$  – номинальный ток

статора двигателя;

$$I_{11} = \frac{p_{\text{жс}} \cdot P_n}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \phi_{\text{ржс}} \cdot \eta_{\text{ржс}}} = \frac{0,75 \cdot 18500}{3 \cdot 220 \cdot 0,83 \cdot 0,895} = 28,705 \text{ A}$$
 – ток статора

двигателя при частичной загрузке;

$\eta_{\text{ржс}} = \eta_n = 0,79$  – КПД при частичной загрузке;

$p_{\text{жс}} = P / P_n = 0,75$  – коэффициент загрузки двигателя.

$\cos \phi_{\text{ржс}} = \cos \varphi_n \cdot 0,98 = 0,813$  – коэффициент мощности при частичной загрузке;

Из формулы Клосса определим соотношение для расчёта критического скольжения:



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

$$= 0,025 \cdot \frac{2,3 + \sqrt{2,3^2 - (1 - 2 \cdot 0,025 \cdot 1 \cdot (2,3 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,025 \cdot 1 \cdot (2,3 - 1)} = 0,117 \text{ o.e.}$$

В первом приближении принимаем  $\beta = 1$ .

Далее определяем ряд промежуточных коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{9,856}{2 \cdot 5,7 \cdot 37,733} = 1,023;$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,025)}{2 \cdot 1,023 \cdot 2,3 \cdot 18500} = 1,631,$$

где:  $\cos \varphi_0 = \cos 82^\circ = 0,139$  - коэффициент мощности асинхронного двигателя в режиме холостого хода.

Активное сопротивление ротора, приведённое к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_{\kappa}}\right) \cdot C_1} = \frac{1,631}{\left(1 + \frac{1}{0,117}\right) \cdot 1,023} = 0,168 \text{ Ом}$$

Активное сопротивление статорной обмотки определим по следующему выражению:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,023 \cdot 0,168 \cdot 1 = 0,171 \text{ Ом}$$

Определим параметр  $\gamma$ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_{\kappa H}$ ,

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_{\kappa}^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,117^2} - 1^2} = 8,467.$$

Тогда

$$X_{\kappa H} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 8,467 \cdot 1,023 \cdot 0,168 = 1,45 \text{ Ом}.$$

Сопротивления рассеяния фаз для статора и ротора, которое выводится из  $X_{кн}$ , используем следующими соотношениями:

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

$$X'_{2н} = \frac{0,58 \cdot X_{кн}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 1,45}{1,023} = 0,824 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки определим по следующему выражению

$$X_{1н} = 0,42 \cdot X_{кн} = 0,42 \cdot 1,45 = 0,609 \text{ Ом.}$$

Согласно векторной диаграмме (рисунок 8) ЭДС ветви намагничивания, наведённая потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\phi} \cdot \cos \phi_n - R_1 \cdot I_{1н})^2 + (U_{1н} \cdot \sin \phi_n - X_{1н} \cdot I_{1н})^2} = \\ = \sqrt{(220 \cdot 0,83 - 0,171 \cdot 37,733)^2 + (220 \cdot 0,56 - 0,558 \cdot 37,733)^2} = 202,417 \text{ В.}$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания определится как:

$$X_{\muн} = \frac{E_m}{I_0} = \frac{202,417}{8,647} = 23,409 \text{ Ом.}$$

Индуктивность фазы обмотки статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1н}}{2 \cdot \pi \cdot f_H} = \frac{0,609}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,001938 \text{ Гн.}$$

Индуктивность фазы обмотки ротора:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2н}}{2 \cdot \pi \cdot f_H} = \frac{0,824}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,00263 \text{ Гн.}$$

Индуктивность цепи намагничивания:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\muн}}{2 \cdot \pi \cdot f_H} = \frac{23,409}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,075 \text{ Гн.}$$

По найденным значениям  $C_1$ ,  $R_2'$  и  $X_{кн}$  определим критическое скольжение

$$s_{k1} = \frac{C_1 \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2}} = \frac{1,02 \cdot 0,168}{\sqrt{0,171^2 + 1,45^2}} = 0,117.$$

Для построения естественной механической характеристики двигателя определим критический момент машины в двигательном режиме

$$M_k = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2} \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,719 \cdot 1,023 \cdot \left[ 0,171 + \sqrt{0,171^2 + 1,45^2} \right]} = 443,66 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Задаваясь диапазоном изменения скольжения от 1 до 0, с шагом 0,001, строим механическую характеристику асинхронного электродвигателя по формуле Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + a \cdot s_k)}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k} + 2 \cdot a \cdot s_k},$$

где: коэффициент  $a$  равен  $a = \frac{R_1}{R_2'} = \frac{0,171}{0,168} = 1,018$ .

Тогда расчётное выражение для механической характеристики примет следующий вид:

$$M(s) = \frac{903,477}{\frac{0,117}{s} + \frac{s}{0,117} + 0,238}.$$

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя АИМ 180 Мб изображена на рисунке 4.2.

Анализ данных и их сравнение с паспортными, на основе смоделированной механической характеристики.

Нахождение номинального момента реализуется по следующей формуле:

$$M_{n(\text{паспорт})} = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{18500}{102,1} = 181,195 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

то же значение, но по формуле Клосса:

$$M_n = \frac{903,477}{\frac{0,117}{s_n} + \frac{s_n}{0,117} + 0,238} = 188,045 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент критический:

$$M_k = k_{\max} \cdot M_{n(\text{паспорт})} = 2,3 \cdot 181,195 = 416,748 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковой момент

$$M_n = k_n \cdot M_{n(\text{паспорт})} = 2 \cdot 181,195 = 362,39 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

то же самое, но с использованием формулы Клосса

$$M_n = \frac{903,477}{\frac{0,117}{1} + \frac{1}{0,117} + 0,238} = 101,491 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Из полученных данных строим механическую характеристику, характеристика приведена на рисунке 6.2. Характеристика соответствующая паспортным данным изображена пунктирной линией.

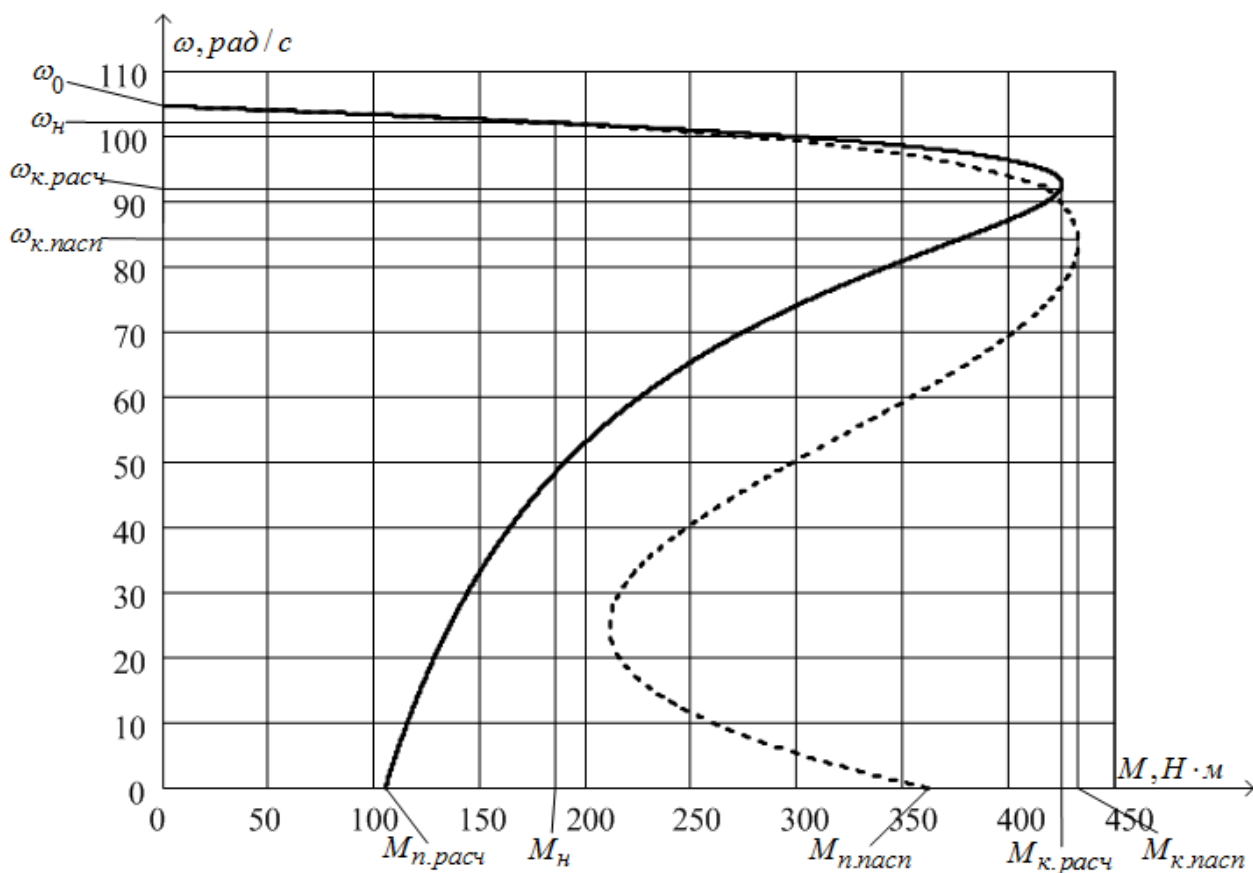


Рисунок 4.2 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя АИМ 180 М6

Полученная механическая характеристика аналогична характеристике асинхронного двигателя с ненасыщенной магнитной системой, а её вид задается зависимостью индуктивного сопротивления ротора от скольжения.

Анализируя полученные графические и аналитические результаты можно сказать о том, что в области близкой к номинальным параметрам двигателя, значения номинального и критического моментов равны, но моменты в диапазоне скоростей от  $\omega_k$  до  $\omega_n$  отличаются. Данный факт можно объяснить тем, что ток вытесняется на поверхность проводника, который наиболее сильно проявляется в момент разгона двигателя, где частота вращения ротора  $f_2$  увеличивается с увеличением скольжения  $s$ .

Электромеханическая характеристика  $I_1 = f(\omega)$ , отражающая зависимость тока статора от скорости, представляет особый интерес для

короткозамкнутого асинхронного двигателя. Путём сложения вектора тока намагничивания  $\bar{I}_0$  и вектора тока ротора  $\bar{I}'_2$ , которое обычно производится при помощи круговой диаграммы, определяется  $I_1$  - ток статора.

Полагая  $I_0$  - ток намагничивания асинхронного двигателя реактивным ( $I_{0A} = 0$ ), ток статора  $I_1$  через приведённый ток ротора  $I'_2$  можно найти по формуле:

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + (I'_2(\omega))^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2(\omega) \cdot \sin \phi_2(\omega)} = \\ = \sqrt{8.647^2 + (I'_2(\omega))^2 + 2 \cdot 8.647 \cdot I'_2(\omega) \cdot \sin \phi_2(\omega)},$$

$$\text{где: } I'_2(\omega) = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R'_2}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}} \right)^2 + X_{кн}^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left( 0,171 + \frac{0,168}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}} \right)^2 + 1,433^2}},$$

$$\sin \phi_2(\omega) = \frac{X_{кн}}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R'_2}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}} \right)^2 + X_{кн}^2}} = \frac{1,433}{\sqrt{\left( 0,171 + \frac{0,168}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}} \right)^2 + 1,433^2}}.$$

Строим электромеханическую характеристику асинхронного электродвигателя, задаваясь диапазоном изменения скорости, по формулам для токов обмоток статора и ротора. Электромеханическая характеристика двигателя представлена на рисунке 4.3.

Сравним электромеханическую характеристику с паспортными данными:

$$I_n = k_i \cdot I_{1н} = 5,7 \cdot 37,733 = 215,078 \text{ A},$$

$$I_{1(s=1)} = 157,82 \text{ A}.$$

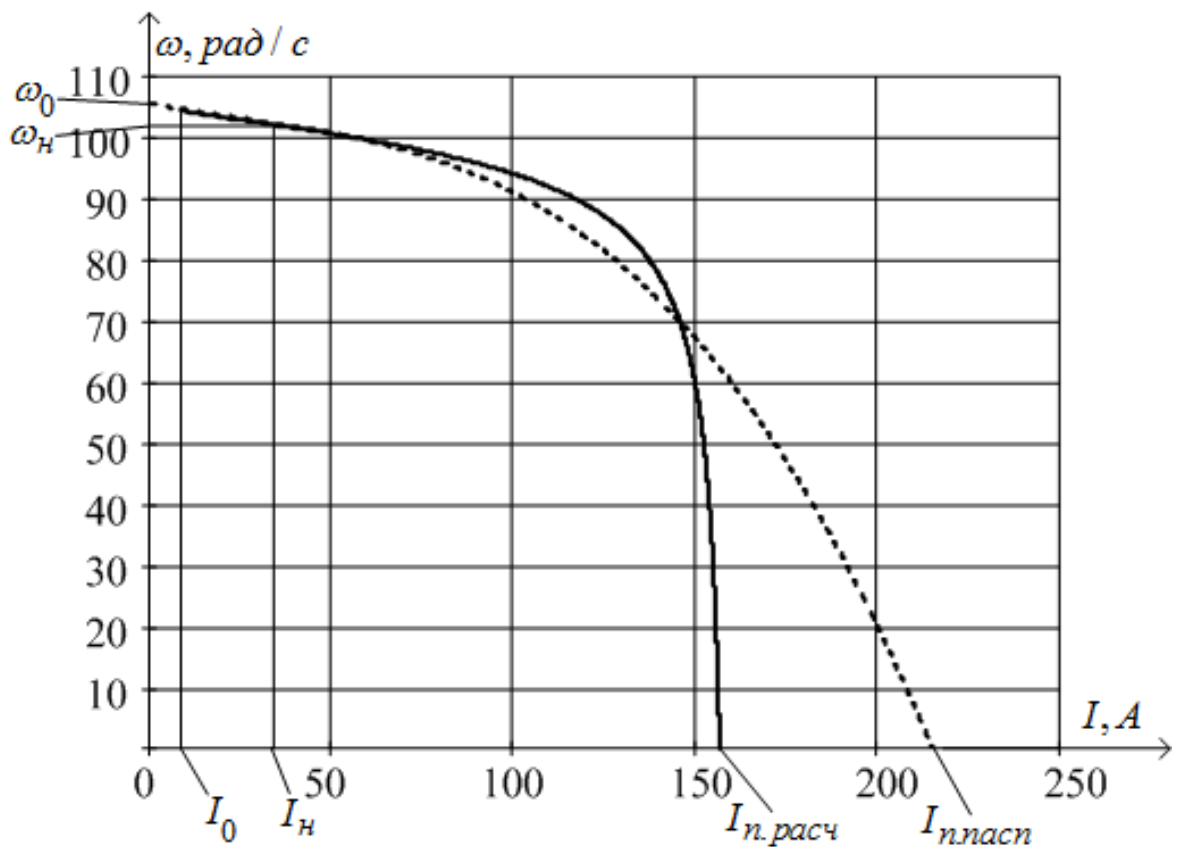


Рисунок 4.3 – Естественная электромеханическая характеристика асинхронного электродвигателя АИМ 180 М6

Можно сделать вывод, что построенные электромеханические характеристики, также как и механические справедливы только в области близкой к номинальным скоростям. Это можно объяснить тем, что в момент проектирования сечение провода обмоток берут с запасом, за счет чего ток короткого замыкания принимается большим. Также на данный факт имеет воздействие то, что при построении электромеханических характеристик учитывалась частичная нагрузка двигателя.

#### 4.5. Динамическая модель двигателя АИМ 180 М6

Моделирование асинхронного двигателя осуществим с помощью программы MATLAB Simulink. Для создания имитационной модели использованы параметры схемы замещения двигателя.

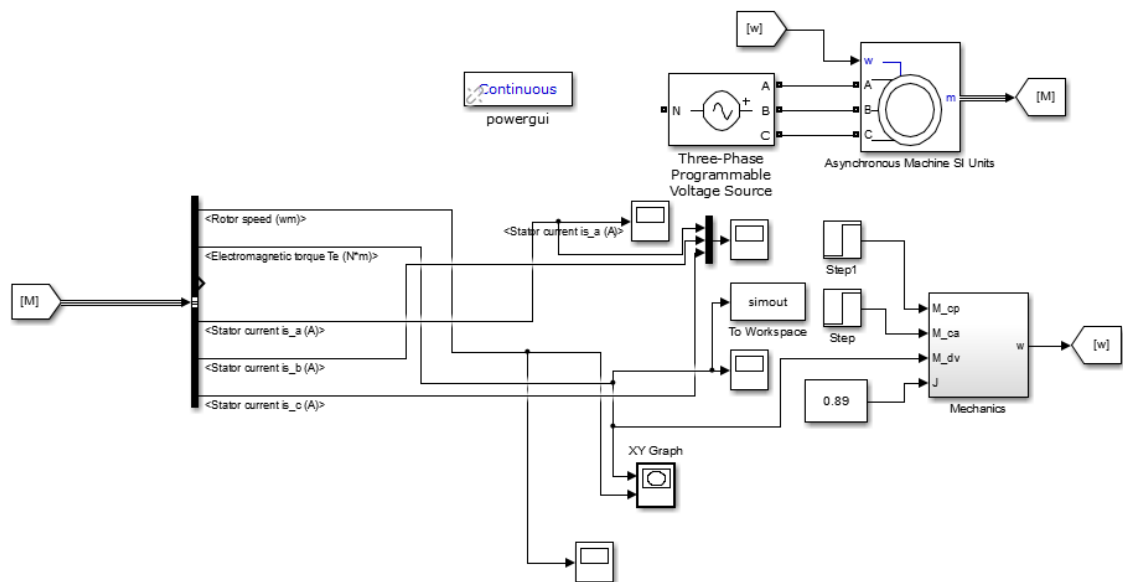


Рисунок 4.4 - Имитационная модель прямого пуска асинхронного двигателя

Приведем графики переходных процессов скорости рисунок 6.5 и момента рисунок 6.6 при пуске двигателя прямым включением в сеть для того, что бы получить динамическую механическую характеристику асинхронного двигателя, так как она получается только по результатам расчетов переходных процессов.

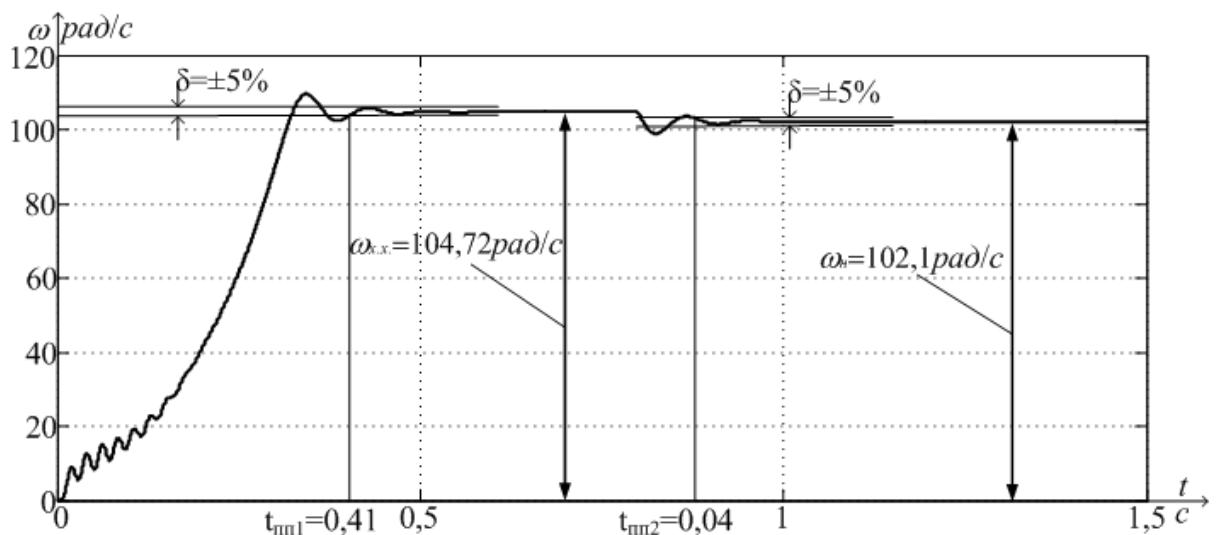


Рисунок 4.5 - Переходный процесс скорости при пуске короткозамкнутого асинхронного двигателя АИМ 180 Мб прямым включением в сеть

Основные показатели качества для характеристики скорости:



перерегулирование –  $\sigma = 2\%$  ,

время переходного процесса до скорости холостого хода –  $t_{m1} = 0,41c$  ,

время переходного процесса со скорости холостого хода на номинальную скорость при набросе нагрузки на 0,8 секунды –  $t_{m2} = 0,04c$  ,

установившееся значение скорости холостого хода –  $\omega_{x.x.} = 104,72 \text{ рад} / c$  ,

установившееся значение номинальной скорости –  $\omega_n = 102,1 \text{ рад} / c$  .

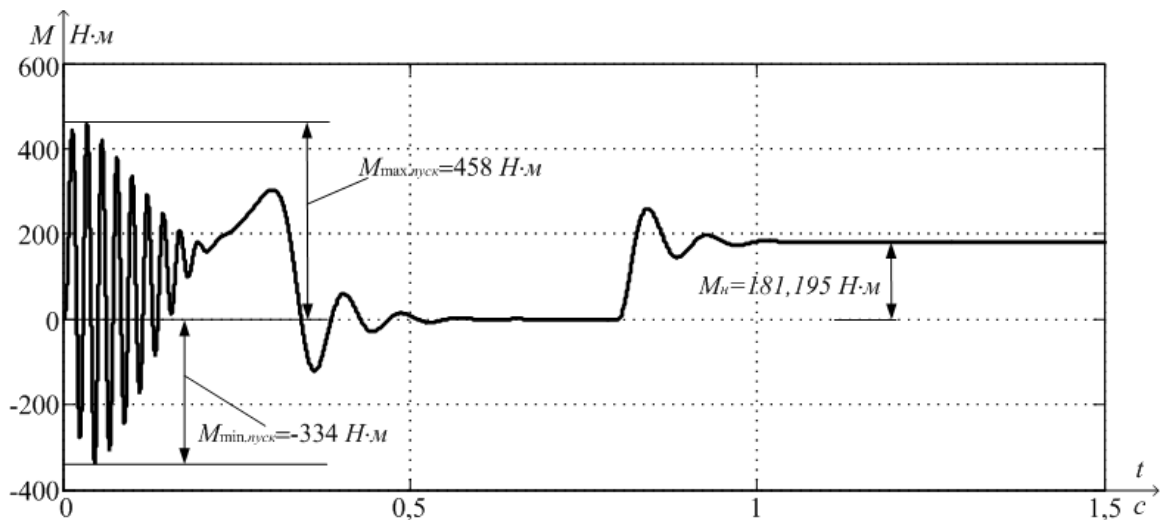


Рисунок 4.6 - Переходный процесс электромагнитного момента при пуске асинхронного двигателя АИМ 180 Мб прямым включением в сеть

Графики  $\omega = f(t)$  и  $M = f(t)$  переходных процессов позволяют построить динамическую механическую характеристику (рисунок 4.7) асинхронного двигателя АИМ 180 Мб при пуске прямым включением в сеть.

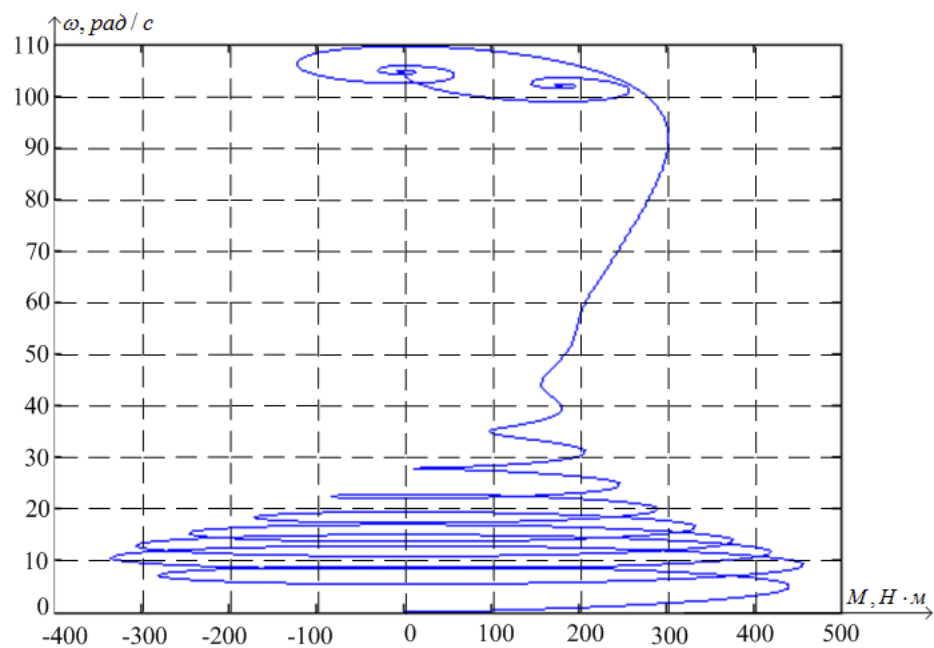


Рисунок 4.7 – Динамическая механическая характеристика асинхронного двигателя АИМ 180 М6 при прямом пуске

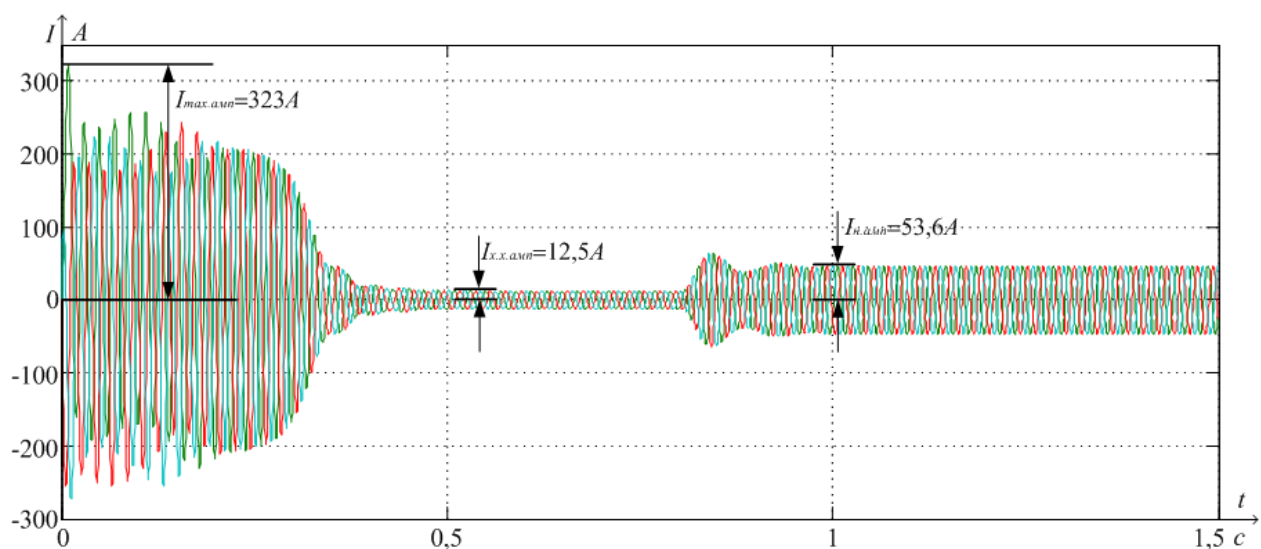


Рисунок 4.8 – Переходный процесс тока статора при прямом пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором АИМ 180 М6

Установившееся амплитудное значение тока статора на холостом ходу  $I_{x.x.амп.} = 12,5 A$ .

Определим действующее значение тока статора без нагрузки:

$$I_{x.x.дейст.} = \frac{I_{x.x.амп.}}{\sqrt{2}} = \frac{12,5}{\sqrt{2}} = 8,839 A$$

Установившееся амплитудное значение тока статора при номинальной нагрузке  $M_H = 181,195 \text{ Н} \cdot \text{м}$  равно  $I_{н.амп.} = 53,6 \text{ А}$ .

Определим действующее значение тока статора при номинальной нагрузке:

$$I_{н.дейст.} = \frac{I_{н.амп.}}{\sqrt{2}} = \frac{53,6}{\sqrt{2}} = 37,901 \text{ А}$$

Полученные значения тока при моделировании  $I_{x.x.дейст.} = 8,839 \text{ А}$ ,  $I_{н.дейст.} = 37,901 \text{ А}$  совпадают с расчетными значениями тока  $I_0 = 8,647 \text{ А}$ ,  $I_{1н.} = 37,733 \text{ А}$ , из это можно сделать вывод, что переходные процессы при моделировании получились верные.

Вид переходных процессов при прямом пуске асинхронного электродвигателя показывает наличие колебательной составляющей в кривой электромагнитного момента изменяющейся в пределах от  $-334$  до  $+458 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и затухающей по мере разгона двигателя. Значения токов обмоток статора во время разгона двигателя достигают значения в  $228,4 \text{ А}$ , по окончании времени разгона ток уменьшается до номинального.

В результате выбора нового двигателя удалось снизилось количество колебаний электромагнитного момента по сравнению с существующим приводом, также уменьшилось перерегулирование и уменьшилось время разгона привода.

Статические характеристики в пределах скольжения от  $0$  до  $s_{кр}$  совпадают с контрольными паспортными точкам, а переходные процессы при прямом пуске двигателя показали, что он является устойчивым звеном.

## 5. ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

### 5.1. Принципы построения статических преобразователей частоты для электроприводов переменного тока

Преобразователи частоты или ПЧ используются на практике для того, чтобы из переменного напряжения питающей сети, обладающей определенной частотой получить трехфазное переменное напряжение с другой частотой, которая будет регулироваться человеком, согласно технологическому заданию. В современном мире более чаще всего ПЧ исполняется в виде управляемых силовых полупроводниковых ключей, а именно: силовых транзисторов, запираемых тиристоров, которые можно как открыть, так и закрыть сигналами, подаваемыми на их управляющие входы [9].

Классифицировать ПЧ можно по типу связи с питающей сетью, а именно:

1) ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока (АИТ и АИН). Оба этих ПЧ содержат инверторы, один – тока, другой – напряжения. Также у них имеется силовой фильтр и выпрямитель, который может быть как управляемым, так и нет.

2) Преобразователи частоты с непосредственной связью (ПЧНС).

Современное состояние рынка преобразователей частоты свидетельствует, что с появлением новейших конструкций и материалов полупроводниковых силовых элементов практически все производители приводной техники освоили серийный выпуск универсальных комплектных ПЧ на базе АИН. В связи с инвариантностью предложений производителей и активное позиционирование данного товара рассмотрим более подробно данную структуру ПЧ.

В звеньях постоянно тока АИН имеет либо фильтр индуктивно-емкостный, либо просто емкостный. В конструкции четко прослеживается связь между напряжением в звене постоянно тока и напряжения находящегося в нагрузке, в связи этим он и есть источник напряжения. Когда происходит работа инвертора

в качестве источника напряжения на активно-индуктивную нагрузку, емкость обеспечивает взаимообмен реактивной энергии между асинхронным двигателем и звеном постоянного тока. Помимо конденсатора, для реализации обмена нужны диоды D1–D6, которые должны быть включены параллельно основным ключам T1–T6. Через них течет ток, когда происходит возврат реактивной энергии в емкость от двигателя. Между инвертором и емкостью ток в цепи имеет возможность изменить свое направление, при условии, что коэффициент мощности нагрузки имеет низкие значения. От последовательности переключения ключей T1-T6 зависит на выходе у инвертора форма напряжения, а регулируется оно следующими способами:

- 1) Широтно-импульсный способ (используемый в работе). Регулировка напряжения происходит в инверторе при помощи модуляции  $U$  несущей частоты сигналом основной частоты. Название данных ПЧ -АИН с ШИМ. Выпрямитель в них неуправляемый, это сделано для увеличения КПД системы(нет рекуперация энергии в питающую сеть).
- 2) При использовании управляемого выпрямителя для изменения напряжения  $U_d$  в звене постоянного тока, а инвертор, создавая нужную частоту, будет выполнять функции коммутатора фаз. АИН с АИМ.

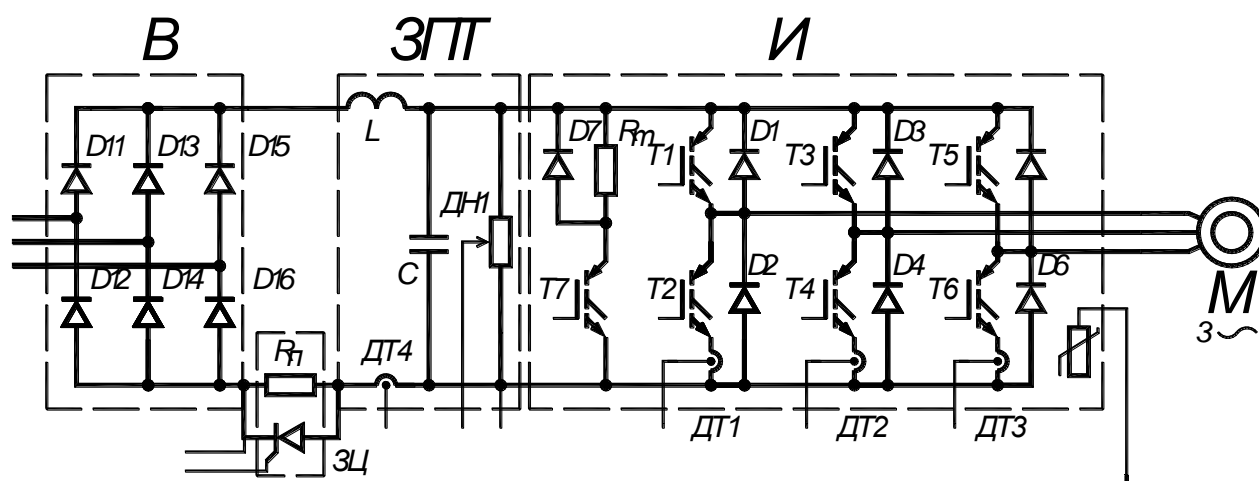


Рисунок 5.1 - Схема силовой части АИН

Одним из главных положительных качеств АИН - его работа в качестве источника напряжения, который может питать целую группу двигателей или же одиночный движок. Или его работа в режиме источника тока. Когда происходит построение замкнуты структур регулирования скорости АД, при разных принципах управления. В связи с этим, АИН массово применяется в частотно-регулируемых электроприводах.

Главными недостатками АИН являются: далеко немаленькие габариты конденсаторной батареи, необходимость больших значений на емкости фильтра, сложность реализации рекуперации энергии в тормозном режиме в сеть. Что бы это осуществить нужно применить управляемый модуль выпрямителя.

## 5.2. Преобразователь частоты 6SL3200-6AM23-8AN0

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод, что в данной силовой схеме имеется возможность реализации основных законов управления асинхронным двигателем. Есть возможность программно перестроить комплектный преобразователь частоты для осуществления разных законов управления. На базе цифрового процессора осуществляется система управления. Она обеспечивает необходимые характеристики. В данной работе выбор остановился на преобразователе 6SL3200-6AM23-8AN0 – общего применения. Выбор основывался на мощности самого двигателя, характера нагрузки и соответствии с питающей сетью. Преобразователь производства корпорации Siemens. Он обладает всеми необходимыми функциями. На рисунке 5.2 приведен внешний вид преобразователя частоты.



Рисунок 5.2 – Внешний вид преобразователя частоты 6SL3200-6AM23-8AN0 фирмы Siemens

Основные функции управления:

- 4 встроенных ПИД – регулятора,
- Увеличение пускового момента до  $1,5M_n$ ,
- Обход заданной частоты,
- Задание частоты управляющего транзисторами напряжения,

- Самозапуск,
- Электронная тепловая защита,
- Ограничение по максимальной и минимальной скорости вращения,
- Запись параметров последних сбоев.

Применяемые защиты привода:

- От недопустимых отклонений технологического параметра (в режиме автоматического регулирования).
- От недопустимых отклонений и исчезновения напряжения,
- От замыкания на землю,
- От токов перегрузки и короткого замыкания,
- От перенапряжения на силовых элементах схемы,

Основные характеристики:

- Напряжение питания: 3x380 - 500 В +10%-15%,
- Номинальный выходной ток: 38 А,
- Входная частота: 47 / 63 Гц,
- Выходная частота: 0-550 Гц,
- КПД при номинальной мощности: 98 %,
- Степень защиты IP55,
- Масса: 10,21 кг;
- Габаритные размеры (мм): 230×620×249.

Более подробная информация приведена в руководстве по эксплуатации

[7].



## 6. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПИТАТЕЛЯ

### 6.1. Регулирование скорости короткозамкнутого асинхронного двигателя изменением частоты

Меняя частоту питающего напряжения у двигателя, меняется и его реактивное сопротивление и синхронная скорость  $\omega_0$ . Они меняются пропорционально частоте.

$$X_{1j} = X_{1н} \cdot f_{1j} / f_{1н}; X'_{2j} = X'_{2н} \cdot f_{1j} / f_{1н}; X_m = X_{mн} \cdot f_{1j} / f_{1н}, \quad (6.1)$$

где:  $f_{1н}$  - номинальное значение частоты напряжения статора асинхронного двигателя;

$X_{1σн}, X'_{2σн}$  - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора при номинальной частоте питающей сети  $f_{1н}$ .

Если менять переменное напряжение  $U_{1j}$  обмоток статора вместе с частотой  $f_{1j}$ , то тогда возможно осуществить в системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» разные законы для регулирования скорости. Что бы сравнить эти законы используем, без учета потерь на статоре, уравнения для баланса мощностей.[8]

$$P_D = M \cdot \omega_0 = P_m + \Delta P_n = P_\partial \cdot s + P_\partial(1 - s), \quad (6.2)$$

где:  $P_D$  – мощность, подведенная из сети;

$P_m$  – мощность, преобразованная в механическую;

$\Delta P_n$  – мощность потерь.

Из (6.2) следует, что каким бы не был способ регулирования скорости, необходимо согласовать нагрузку и регулировочные механические характеристики.

По характеру зависимости момента механизма от его скорости -  $M_c = f(\omega)$  можно выделить следующие механические характеристики производственных механизмов:

- не зависящая от угловой скорости механическая характеристика

$$M_c = const; P_c = k \cdot \omega; \quad (6.3)$$

- нелинейно-спадающая механическая характеристика или работа с постоянной мощностью

$$M_c = k \cdot \omega^{-1}; P_c = const \quad (6.4)$$

- нелинейно-возрастающая механическая характеристика или вентиляторная нагрузка

$$M_c = k \cdot \omega^2; P_c = k \cdot \omega^3 \quad (6.5)$$

При постоянном моменте нагрузки ( $M_c = const$ ) управление напряжением и частотой тока статора асинхронного двигателя должно быть реализовано по закону

$$U_{1j} / f_{1j} = const. \quad (6.6)$$

При нелинейно-спадающей нагрузке  $M_c = k \cdot \omega^{-1}$  - закон управления напряжением и частотой принимает вид

$$U_{1j}^2 / f_{1j} = const \quad (6.7)$$

Наконец, при «вентиляторной» нагрузке  $M_c = k \cdot \omega^2$  напряжение и частота должны изменяться в соответствии с зависимостью

$$U_{1j} / f_{1j}^2 = const \quad (6.8)$$

Законы управления (8.6) - (8.8), связывающие напряжение, частоту и характер нагрузки, описываются формулой М.П. Костенко

$$U_{1j} = U_{1н} \frac{f_{1j}}{f_{1н}} \sqrt{\frac{M_c}{M_n}}, \quad (6.9)$$

где:  $U_{1н}$  – номинальное напряжение питающей сети, В;

$U_{1j}$  – напряжение на выходе преобразователя частоты;

$M_c$  – статический момент на валу асинхронного двигателя при данной частоте  $f_{1j}$ .

Исходя из (8.7), можно сделать вывод о том, что для электропривода, который работает на постоянной мощности, с увеличением его скорости в четыре раза, статический момент  $M_c$  падает во столько же раз. Тогда из (6.9) делаем вывод о том, что с увеличением частоты со скоростью в четыре раза, нужно снизить напряжение в два раза. Перегрузочная способность в таком случае остается примерно такой же, а вот потери на намагничивание и потери в стали становятся меньше.

$$\frac{M_c}{M_k} = const, \quad (6.10)$$

где:  $M_k$  – критический момент двигателя, Н · м.

Управление двигателем, в соответствии с соотношением (6.9), позволяет также сохранить практически неизменным коэффициент мощности и абсолютное скольжение электропривода, при этом его КПД не зависит от скорости. В этом и заключается основное достоинство частотного управления.

Закон управления (6.9) справедлив только в первом аналитическом приближении, когда активным сопротивлением статора  $R_1$  можно пренебречь.

В действительности при малых значениях частоты ( $f_1 \leq 0,5 \cdot f_{1н}$ ) падение

напряжения на сопротивлении  $R_1$  существенно снижает величину напряжения, прикладываемого к контуру намагничивания и критический момент асинхронного двигателя уменьшается. При более точном анализе, учитывающем падение напряжения на сопротивлении  $R_1$ , механические характеристики принимают вид, показанный на рисунке 6.1. Так, например, при

законе управления  $U_{1j}/f_{1j} = const$ , предполагающем постоянство критического момента, наблюдается его снижение при уменьшении частоты  $f_{1j}$ .

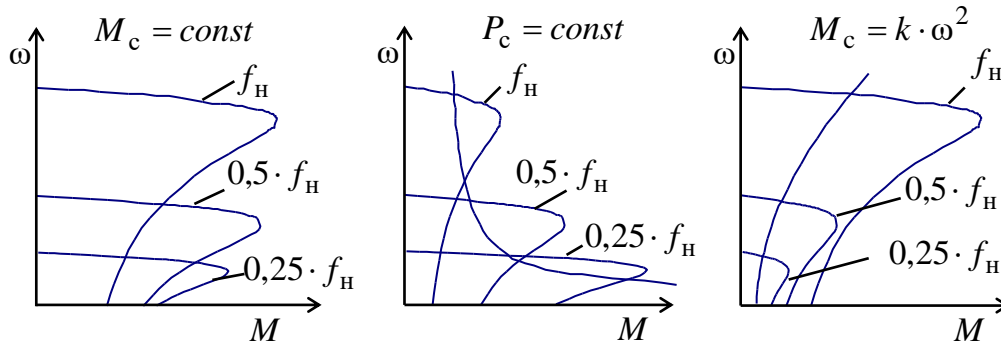


Рисунок 6.1 – Механические характеристики производственных механизмов и электроприводов «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»

Функциональная схема электропривода выполненного по системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель», реализующая различные законы управления класса  $U_{1j}/f_{1j}$  приведена на рисунке 6.2.

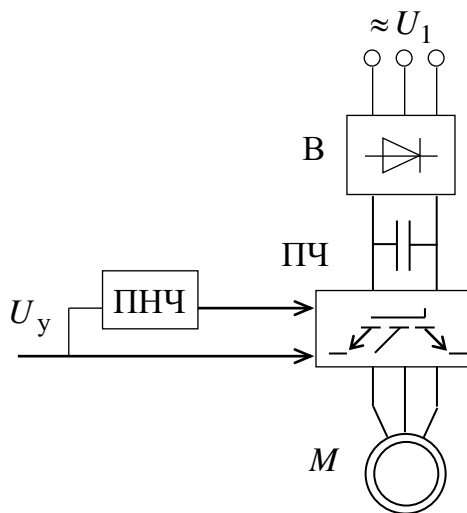


Рисунок 8.2 – Функциональная схема скалярного частотного управления скоростью асинхронного двигателя

В этой схеме сигнал управления  $U_y$  определяет модуль напряжения статора. Преобразователь напряжение-частота (ПНЧ) обеспечивает изменение относительной частоты  $\alpha = f_{1*} = f_{1j} / f_{1H}$  в функции от напряжения управления  $U_y$  по одному из установленных законов регулирования (6.6) – (6.8) класса  $U_{1j} / f_{1j}$ .

Так как момент нагрузки механизма питателя постоянный ( $M_c = const$ ), то для регулирования скорости электропривода будем использовать закон  $U_{1j} / f_{1j} = const$ .

## 6.2. Регулирование скорости электропривода с помощью закона $U_{1\phi} / f_1 = const$

Выбор соотношения между частотой и напряжением зависит от характера момента нагрузки.

Для двигателя типа - АИМ 180 Мб управляемого от преобразователя частоты 6SL3200-6AM23-8AN0, согласно паспортным данным и параметрам схемы замещения посчитаем и построим электромеханические и механические характеристики при питании его от статического преобразователя частоты по закону управления:

$$U_{1\phi} / f_1 = const, \text{ для частот питания } f_1 = 50; 40; 30; 20; 10 \text{ Гц.}$$

Определим значения относительных частот, напряжений и синхронных скоростей [10]:

$$f_{1*} = \frac{f_{1j}}{f_{1H}} = \frac{\{50; 40; 30; 20; 10\}}{50} = \{1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2\} \text{ о.е.;} \quad (6.11)$$

$$U_{1j} = U_{1\phi} \cdot f_{1*} = 220 \cdot \{1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2\} = \{220; 176; 132; 88; 44\} \text{ В;} \quad (6.12)$$

$$\begin{aligned} \omega_{0j} &= \omega_{0H} \cdot f_{1*} = 104,719 \cdot \{1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2\} = \\ &= \{104,719; 83,775; 62,831; 41,887; 20,943\} \text{ рад / с;} \end{aligned} \quad (6.13)$$

Расчёт электромеханических характеристик будем производить, подставляя в следующие выражения соответствующие для каждой характеристики значения  $f_{1*}, U_{1j}, \omega_{0j}$ . Далее, задаваясь диапазоном значений от нуля до соответствующего для каждой характеристики значения  $\omega_{0j} \cdot 1,25$  с шагом  $0,001 \cdot \omega_{0j}$ , подставляем в выражение для относительного скольжения. На следующем этапе получившиеся значения относительного скольжения последовательно подставляем в выражение для тока обмотки ротора и статора.

$$\begin{aligned} \Gamma_{2j}(S) &= \frac{U_{1j}}{\sqrt{X_{kH}^2 \cdot f_{1H}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2}{S}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{S \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}}\right)^2}} = \\ &= \frac{U_{1j}}{\sqrt{1,45^2 f_{1*}^2 + \left(0,171 + \frac{0,168}{S}\right)^2 + \left(\frac{0,171 \cdot 0,168}{S \cdot 23,409 \cdot f_{1*}}\right)^2}}; \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} I_{1j}(S) &= \sqrt{I_0^2 + \Gamma_{2j}^2(S) + 2 \cdot I_0 \cdot \Gamma_{2j}(S)} \frac{X_{kH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{S}\right)^2 + X_{kH}^2}} = \\ &= \sqrt{8,647^2 + \Gamma_{2j}^2(S) + 2 \cdot 8,647 \cdot \Gamma_{2j}(S)} \frac{1,45}{\sqrt{\left(0,171 + \frac{0,168}{S}\right)^2 + 1,45^2}} \end{aligned} \quad (6.15)$$

Построенные характеристики для данного закона управления двигателем изображены на рисунке 6.3.

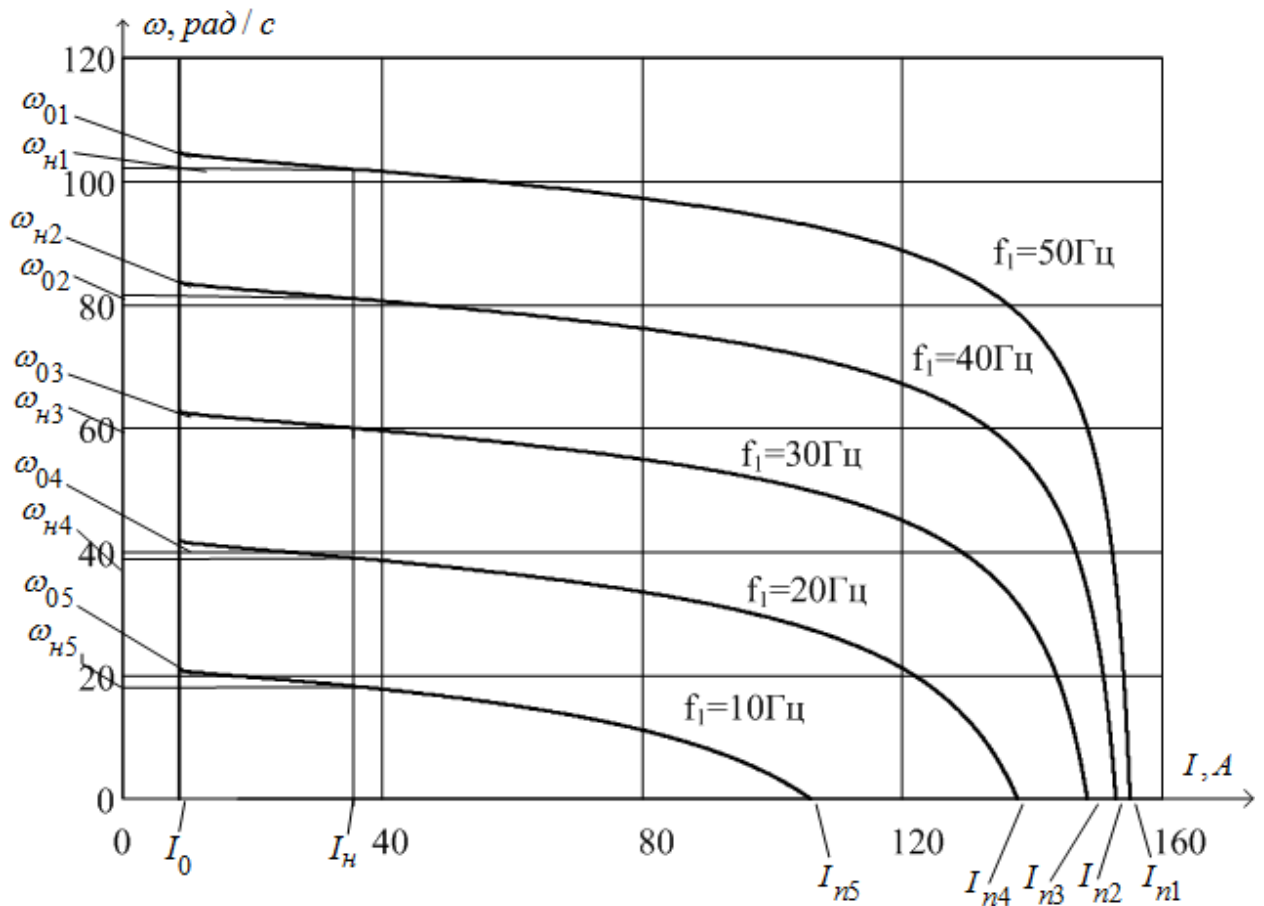


Рисунок 8.3 – Электромеханические характеристики двигателя АИМ 180 М6 при законе регулирования скорости  $U_{1\phi} / f_1 = const$

Для построения механических характеристик асинхронной машины для закона управления  $U_{1\phi} / f_1 = const$ , воспользуемся следующим выражением

$$\begin{aligned}
 M(S) &= \frac{3 \cdot U_{1j} \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot S_j \left[ X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{S_j} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{S_j \cdot X_{\text{мн}} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]} \\
 &= \frac{3 \cdot U_{1j} \cdot 0,149}{\omega_{0j} \cdot S_j \left[ 1,45^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( 0,171 + \frac{0,168}{S_j} \right)^2 + \left( \frac{0,171 \cdot 0,168}{S_j \cdot 23,409 \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]} \quad ; \quad (6.16)
 \end{aligned}$$

Механические характеристики двигателя для закона управления  $U_{1\phi} / f_1 = const$ , представлены на рисунке 6.4.

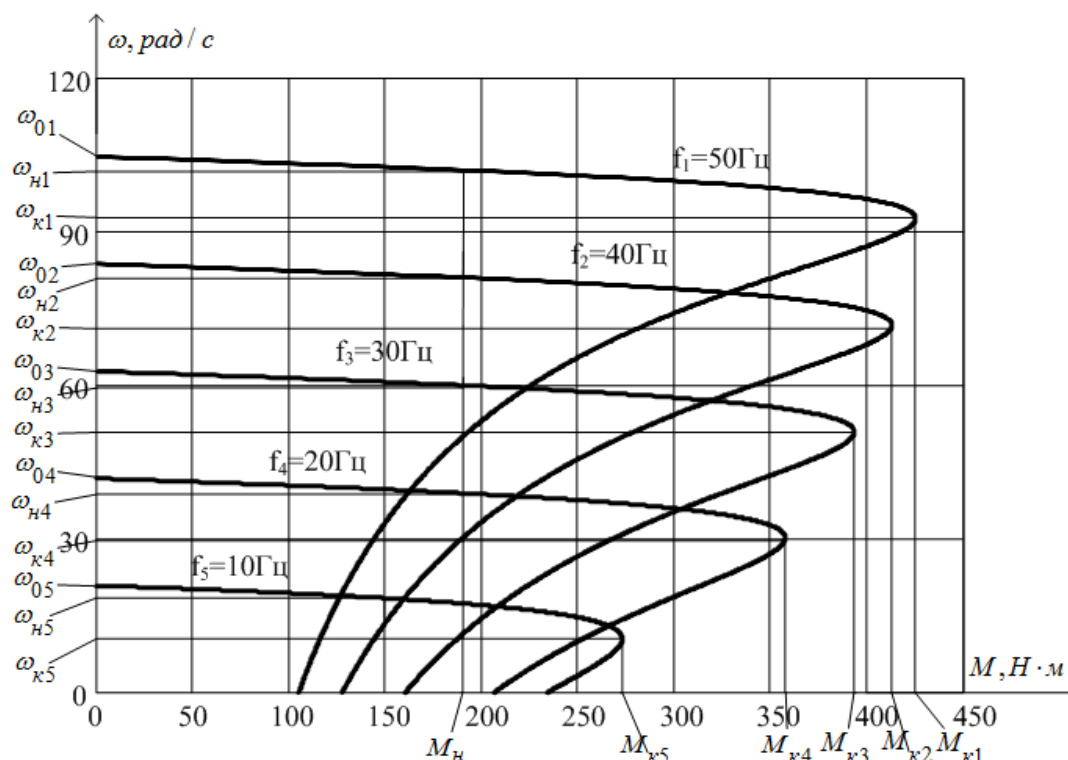


Рисунок 6.4 – Механические характеристики двигателя при законе регулирования скорости  $U_{1\phi} / f_1 = const$

Электромеханические и механические характеристики двигателя АИМ 180 М6, для закона регулирования  $U_{1\phi} / f_1 = const$ , построены в математической системе MathCad.

Из построенных характеристик следует, что для данного двигателя при законе управления  $U_{1\phi} / f_1 = const$  с уменьшением частоты питающей сети заметно влияние активного сопротивления обмотки статора. В результате критический момент на малых частотах падает, что для электропривода питателя недопустимо, так как при запуске питателя статический момент может возрасть в 1,5 раза.

### 6.3. Регулирование скорости электропривода с помощью закона $U_{1\phi} / f_1 = const$ с $I \cdot R$ -компенсацией

Для регулирования скорости двигателя с постоянным критическим моментом необходимо изменять напряжение по следующему закону



$U_{1j} = U_{1\phi} \cdot f_{1*} + I_{li} \cdot R_1$  (пропорциональное регулирование с  $I \cdot R$ -компенсацией) [12]. Чтобы реализовать данную зависимость необходимо организовать положительную обратную связь по току с коэффициентом передачи  $R_1 \cdot K_{км}$ , где величина  $K_{км}$  характеризует степень компенсации падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора. При выборе  $K_{км} = 1$  имеем полную компенсацию  $R_1$ . При полной  $I \cdot R$ -компенсации происходит регулирование с законами класса  $E_{1j}/f_{1j} = const$ .

В общем виде расчёт электромеханических и механических характеристик не отличается от предыдущего. Однако при этом необходимо учесть положительную связь по току и постоянно корректировать величину  $U_{1j}$ . Характеристики с  $I \cdot R$  – компенсацией были построены в программной среде Mathcad.

Механическая характеристика асинхронного двигателя для режима неполной  $I \cdot R$ -компенсации, при переменных значениях величины и частоты напряжения питания определяется выражением

$$M(S) = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot S_j \cdot \left[ X_{кн}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( R_{1экв} + \frac{R_2'}{S_j} \right)^2 + \left( \frac{R_{1экв} \cdot R_2'}{S_j \cdot X_{\mu н} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]}, \quad (6.17)$$

где:  $R_{1экв} = (R_1 - K_{км}) \cdot R_1$  - эквивалентное активное сопротивление цепи обмотки статора.

При частичной  $I \cdot R$ -компенсации, примем  $K_{км} = 0,4$ , тогда  $R_{1экв} = 0,103$ ,

Момент критический асинхронного двигателя будет равен:

$$M_{\kappa} = \frac{3 \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_{0j} \cdot X_{кн} \cdot f_{1*}}. \quad (6.18)$$

Критическое скольжение определим по формуле:

$$S_{kj} = \pm \frac{R'_2}{X_{кн} \cdot f_{1*}}. \quad (6.19)$$

Электромеханическая характеристика, определяющая зависимость приведённого тока ротора от скольжения для режима неполной  $I \cdot R$ -компенсации.

$$I'_2(S) = \frac{U_{1j}}{\sqrt{\left(R_{1экв} + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(\frac{R_{1экв} \cdot R'_2}{S \cdot X_{мн} \cdot f_{1*}}\right)^2}}. \quad (6.20)$$

Ток статора, через приведённый ток ротора, можно найти по формуле:

$$I_1(S) = \sqrt{I_0^2 + (I'_2(S))^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2(S) \cdot \frac{X_{кн} \cdot f_{1*}}{\sqrt{\left(R_{1экв} + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1*}^2}}}. \quad (6.21)$$

Механические и электромеханические характеристики, построим для режима частичной  $I \cdot R$ -компенсации, подставив численные значения в уравнения 8.17; 8.20; 8.21.

$$M(S) = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot 0,168}{\omega_{0j} \cdot S_j \cdot \left[ 1,45^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(0,103 + \frac{0,168}{S_j}\right)^2 + \left(\frac{0,103 \cdot 0,168}{S_j \cdot 23,409 \cdot f_{1*}}\right)^2 \right]},$$

$$I'_2(S) = \frac{U_{1j}}{\sqrt{\left(0,103 + \frac{0,168}{S_j}\right)^2 + 1,45^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(\frac{0,103 \cdot 0,168}{S_j \cdot 23,409 \cdot f_{1*}}\right)^2}},$$

$$I_1(S) = \sqrt{8,647^2 + (I'_2(S))^2 + 2 \cdot 8,647 \cdot I'_2(S) \cdot \frac{1,45 \cdot f_{1*}}{\sqrt{\left(0,103 + \frac{0,168}{S_j}\right)^2 + 1,45^2 \cdot f_{1*}^2}}}.$$

Расчёт электромеханических характеристик будем производить, подставляя в эти выражения соответствующие для каждой характеристики значения  $f_{1*}, U_{1j}, \omega_{0j}$ . Задаваясь диапазоном изменения скольжения от единицы до нуля, с шагом равным 0,001, построим характеристики.

По формулам 6.18 и 6.19 рассчитаем значения критических моментов и скольжений, результаты расчёта занесены в таблицу 6.1.

Таблица 6.1– Значения критических моментов и скольжений

$\omega_{0j}, \text{рад/с}$	104,72	83,776	62,832	41,888	20,944
$M_k, \text{Н} \cdot \text{м}$	445,55	437,77	425,09	400,94	337,45
$S_k, \text{о.е.}$	0,117	0,263	0,311	0,408	0,697

Механические характеристики АД для закона регулирования скорости  $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$  с  $I \cdot R$  - компенсацией приведены на рисунке 6.4, электромеханические – на рисунке 8.5.

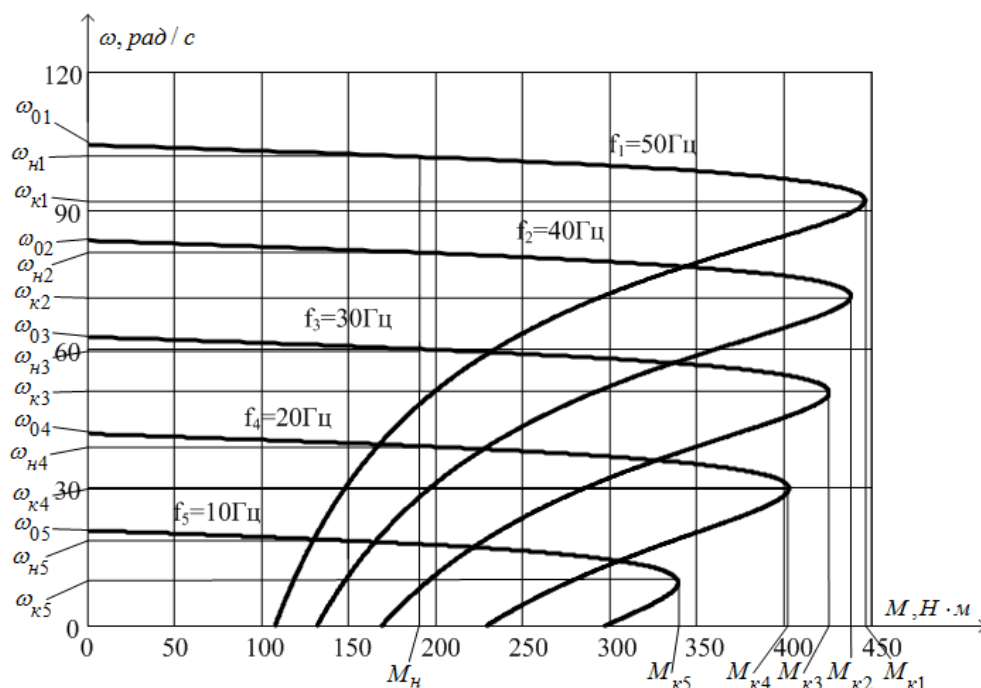


Рисунок 6.4 – Механические характеристики двигателя АИМ 180 М6 для закона регулирования скорости  $U_{1\phi} / f_1 = const$  с  $I \cdot R$  – компенсацией

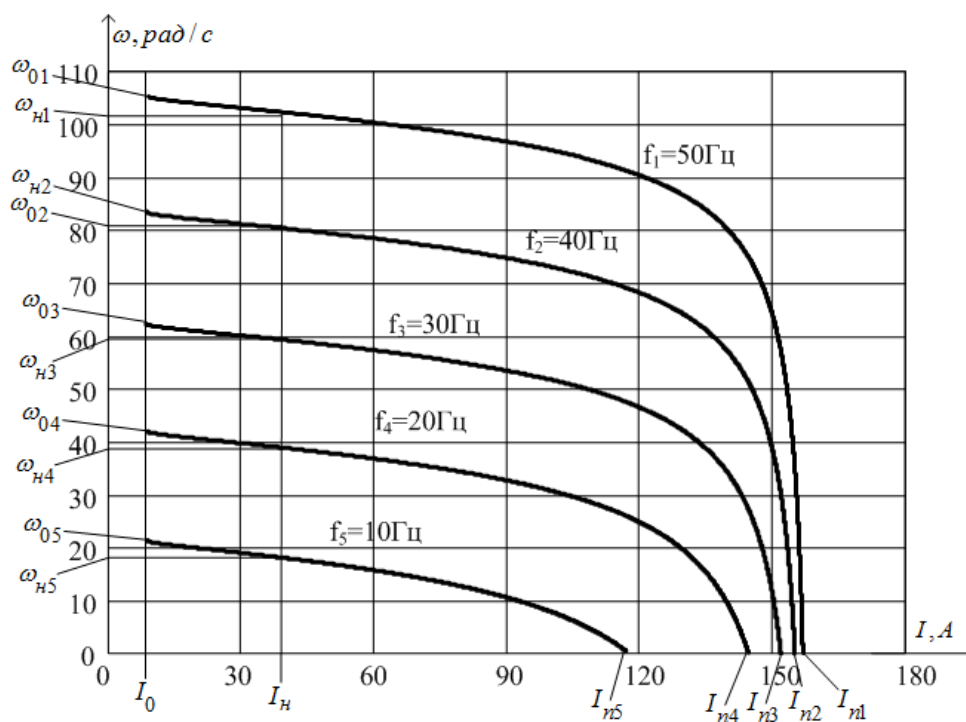


Рисунок 6.5 – Электромеханические характеристики двигателя АИМ 180 М6 для закона регулирования  $U_{1\phi} / f_1 = const$  с  $I \cdot R$  – компенсацией

По построенным механическим и электромеханическим характеристикам можно сделать вывод о том, что положительная обратная связь по току влияет на максимальный момент механических характеристик, делая его больше. Но помимо этого, растут и напряжения в обмотке статора. А влияние дополнительного подмагничивания системы при низких скоростях опасно для теплового режима работы, и при данном диапазоне по регулированию скорости данное замечание является существенным. Двигатель на малых скоростях разгоняется дольше, что приводит к его перегреву и увеличению скольжения. Также это приводит к большим броскам момента в динамике, что способствует большим нагрузкам на кинематику. Таким образом, при заданном диапазоне (1:15) и при скалярном управлении электропривод работает на пределе.

Поэтому для электропривода питателя сушильного барабана более целесообразно применить систему электропривода с векторным управлением.

## **7. РАЗРАБОТКА ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

### **7.1 Система векторного управления асинхронным электроприводом без датчика скорости**

Вектор  $\overline{\psi}_2^*$ , который является комплексно сопряженным с вектором потокосцепления, перемноженный на вектор  $\overline{I}_1$  - тока статора, дает в произведении электромагнитный момент асинхронного двигателя [7].

Если  $\psi_{2y}$ , которая является мнимой составляющей вектора потокосцепления ротора, равна нулю, то момент АД станет пропорциональным произведению мнимой составляющей тока статора  $I_{1y}$  и действительной составляющей потокосцепления ротора  $\psi_{2x}$ . Это возможно только тогда, когда система координат будет ориентироваться по действительной составляющей потокосцепления ротора  $\psi_{2x}$ .

$$M = \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2 \cdot X_2'} (\psi_{2x} \cdot I_{1y}) \quad (7.1)$$

На основе выражения (6.83) выстраиваются системы векторного управления асинхронным электроприводом с ориентацией по вектору потокосцепления ротора.

На рисунке 9.1. изображается функциональная схема асинхронного электропривода, ориентирующемся по вектору потокосцепления ротора и обладающим бездатчиковым векторным управлением.

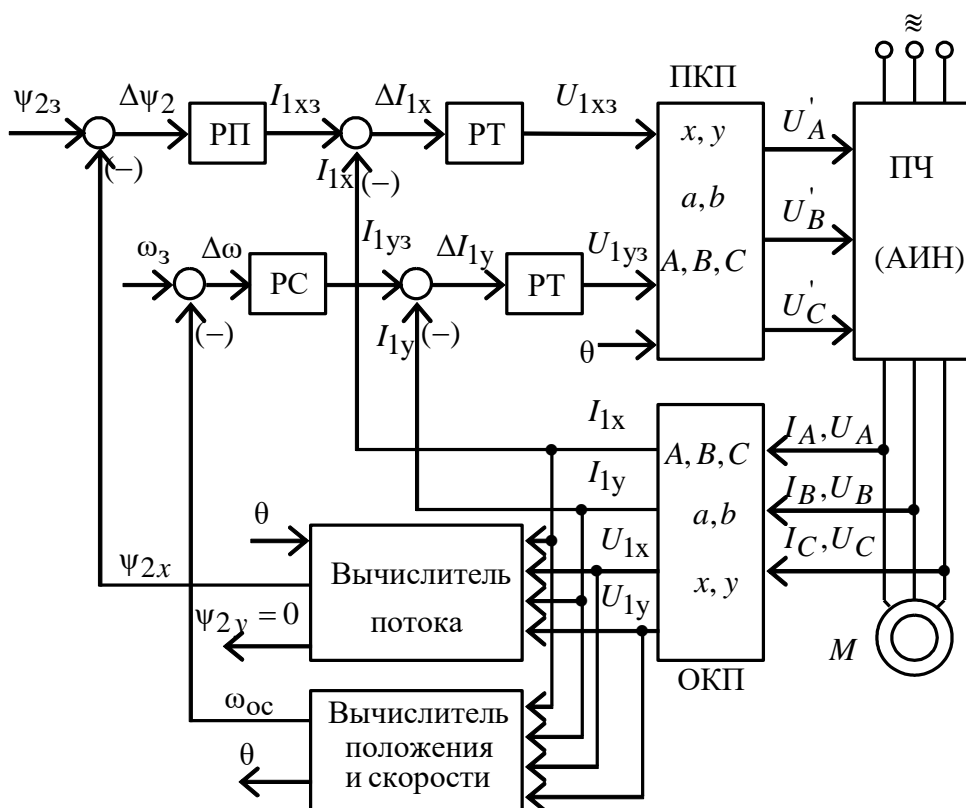


Рисунок 7.1 - Функциональная схема асинхронного электропривода с бездатчиковым векторным управлением с ориентацией по вектору потокосцепления ротора

На рисунке 9.1 приняты следующие обозначения физических величин:

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

$\omega_3$  – сигнал задания скорости вращения электропривода;

$\psi_{2x}$  – сигнал, пропорциональный действительной составляющей потокосцепления ротора;

$\psi_{2y}$  – сигнал, пропорциональный мнимой составляющей потокосцепления ротора;

$I_{1xz}$  – сигнал задания действительной составляющей тока обмотки статора;

$I_{1yz}$  – 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;

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

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

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

$U_{1y}$  – составляющая вектора напряжения обмотки статора, ориентированная вдоль оси 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 имеет прямой и обратный координатные преобразователи, которые называются соответственно – ПКП и ОКП. Так как токи напряжения обмоток АД являются собой гармонические сигналы, то есть сигналы неподвижной трехфазной системы. Поэтому координатные преобразователи и используются с той целью, что бы построить систему управления во вращающейся системе координат, так как позволяют перевести из одной системы координат в другую.

Учитывая задающие сигналы скорости  $\omega_3$  и потокосцепления  $\psi_{23}$ , а также и сигналы обратной связи, регуляторы системы управления создают сигналы во вращающейся системе координат. В ПКП управляющие сигналы в неподвижную систему координат переводятся, как сигналы  $U'_A, U'_B, U'_C$ . Они управляют инвертором.. ОКП сначала пересчитывает мгновенные значения напряжений трехфазной системы координат  $A, B, C$  в неподвижную систему координат  $a, jb$ :

$$U_{1a} = \frac{2}{3} \left[ U_{1A} - \frac{1}{2} (U_{1B} + U_{1C}) \right], \quad (7.2)$$

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

Затем напряжения переводятся во вращающуюся систему координатх -  $jy$

$$U_{1x} = -U_{1a} \cos \theta + U_{1b} \sin \theta, \quad (7.3)$$

$$U_{1y} = -U_{1a} \sin \theta + U_{1b} \cos \theta \quad (7.3a)$$

По этим же формулам возможно выполнить и обратное преобразование для того что бы рассчитать токи  $I_{1x}, I_{1y}$ .

Мгновенное значение пространственных углов поворота векторов потокосцепления, тока и напряжения вычисляются на основании скорости вращения поля статора:  
Затем напряжения переводятся во вращающуюся систему координатх-

$$\theta = \int_0^t \omega dt. \quad (7.4)$$

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



$$\left. \begin{aligned}
U_{1x} &= R' \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot I_{1x} - \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2x} - L'_1 \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1y} - \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2y} \\
U_{1y} &= R' \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot I_{1y} - \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2y} + L'_1 \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1x} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} \\
0 &= (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2x} - L_m \cdot I_{1x} - T_2 \cdot (\omega_\kappa - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2y} \\
0 &= (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2y} - L_m \cdot I_{1y} + T_2 \cdot (\omega_\kappa - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2x} \\
M &= \frac{3}{2} \cdot K_2 \cdot z_p \cdot (\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}) \\
p \cdot \omega &= \frac{1}{J} \cdot (M - M_c)
\end{aligned} \right\}, \quad (7.5)$$

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

$$L' = \sigma \cdot L_1.$$

Совмещая ось  $x$  во вращающейся системе координат с вектором потокосцепления ротора получаем, что  $|\bar{\Psi}_2| = \Psi_{2x}, \Psi_{2y} = 0$  и система (7.17) приобретает вид:

$$\left. \begin{aligned}
I_{1x} &= \frac{1/R'}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \left[ U_{1x} + \frac{K_2}{T_2} \cdot \Psi_{2x} + L'_1 \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1y} \right] \\
I_{1y} &= \frac{1/R'}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \left[ U_{1y} - K_2 \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2x} - L'_1 \cdot \omega_\kappa \cdot I_{1x} \right] \\
\Psi_{2x} &= \frac{L_m}{T_2 \cdot p + 1} \cdot I_{1x} \\
\omega_\kappa &= z_p \cdot \omega + \frac{L_m}{T_2} \cdot \frac{I_{1y}}{\Psi_{2x}} \\
M &= \frac{3}{2} \cdot K_2 \cdot z_p \cdot \Psi_{2x} \cdot I_{1y} \\
\omega &= \frac{1}{J \cdot p} \cdot (M - M_c)
\end{aligned} \right\} \quad (7.6)$$

Наилучшим вариантом осуществить систему регулирования скорости в такой системе координат, где присутствует связь с обобщенным вектором  $\Psi_2$ .

Также, следует учесть, что систему регулирования скорости следует проектировать в двух осях, то есть она должна являться двухкоординатной.

Рассматриваемые каналы регулирования содержат следующие апериодические звенья:

- канал потокосцепления  $\psi_{2x}$ :  $W(p) = \frac{1/R'}{T_1' \cdot p + 1}$  и  $W(p) = \frac{L_m}{T_2 \cdot p + 1}$ ;
- канал регулирования тока  $i_{1y}$  и момента:  $W(p) = \frac{1/R'}{T_1' \cdot p + 1}$ .

Исходя из этого, важно отметить, что систему регулирования канала потокосцепления  $\psi_{2x}$  необходимо создавать как двухконтурную систему подчиненного регулирования, контуры которой будут настраиваться при помощи ПИ–регуляторов на модульный оптимум.

Для того, чтобы спроектировать и построить систему регулирования скорости хорошего качества, необходимо каким то образом скомпенсировать действие перекрестных связей, в данном случае будем осуществлять компенсацию путем введения соответствующих компенсирующих сигналов, в результате чего, возникают независимые каналы регулирования, в данном случае два, расчет параметров регуляторов которых производится рассмотренными ранее способами. Получившаяся структурная схема системы представлена на рисунке 7.2.

В данной системе, следует принять в качестве преобразователя частоты транзисторный инвертор напряжения, работающего по алгоритму синусоидальной широтно-импульсной модуляции на высокой несущей частоте.[11]

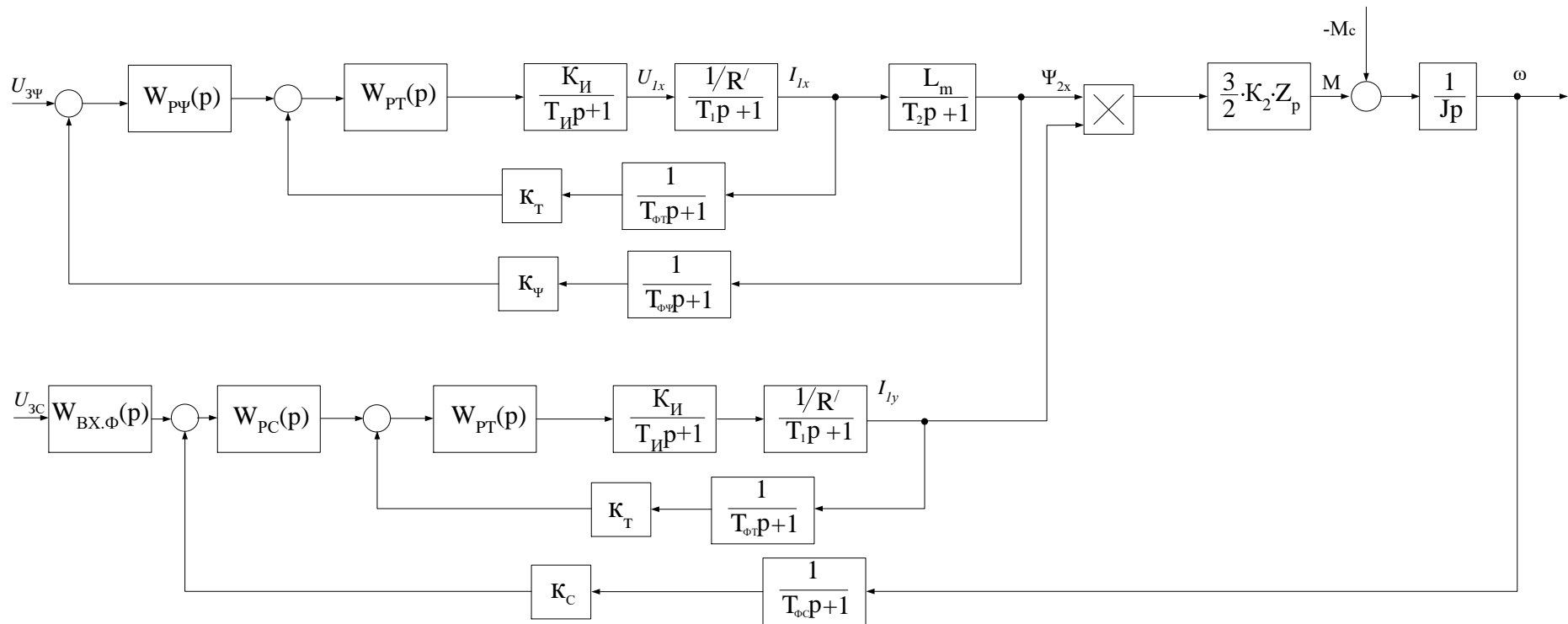


Рисунок 7.2 – Структурная схема асинхронного электропривода с векторным управлением

## 7.2. Оптимизация системы автоматического управления регулируемого электропривода

### 7.2.1. Расчет параметров силовой цепи

Коэффициент обратной связи по току [13]:

$$k_{mx} = k_{my} = \frac{U_{zt.макс}}{I_{эп.макс}} = \frac{10}{38} = 0,263 \text{ В / А},$$

принять  $U_{zt.макс} = 10 \text{ В}$ ;

Коэффициент обратной связи по потокосцеплению:

$$k_{\Psi} = \frac{U_{з\Psi.макс}}{\Psi_n} = \frac{10}{1} = 10 \text{ В/Вб},$$

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

$$\Psi_n = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1фн}}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 1.$$

Коэффициент обратной связи по скорости:

$$k_c = \frac{U_{зс.макс}}{\omega_{эп.макс}} = \frac{10}{102,09} = 0,098 \text{ В} \cdot \text{с/рад},$$

принять  $U_{зс.макс} = 10 \text{ В}$ ;

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:

$$k_k \cdot f_n \leq f_{mo},$$

где:  $f_n$  – несущая частота инвертора напряжения;

$f_{mo}$  – частота вычислений мгновенного значения тока статора;

$k_k \geq 2$  – коэффициент.

Тогда минимальное время запаздывания в вычислении мгновенного значения тока статора:

$$T_{mo} \geq \frac{1}{f_{mo}} = \frac{1}{k_k \cdot f_n}.$$

Высокая несущая частота  $f_n$  инвертора приближает ток статора двигателя к синусоидальному (см. рисунок 9.3). 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  $f_n = 10000$  и  $k_k = 2$ .

Тогда период вычислений тока статора

$$T_{mo} \geq \frac{1}{f_{mo}} = \frac{1}{k_k \cdot f_n} = \frac{1}{2 \cdot 10000} \geq 0,00005.$$

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

$$T_{\mu to} = 5 \cdot T_{mo} = 5 \cdot 0,00005 = 0,00025 \text{ с}.$$

Постоянная времени запаздывания в контуре потокосцепления

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

Постоянная времени запаздывания в контуре скорости

$$T_{\mu \omega o} = 4 \cdot T_{\mu to} = 4 \cdot 0,00025 = 0,001 \text{ с}.$$

Постоянная времени инвертора

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

Полное индуктивное сопротивление обмотки статора

$$X_1 = X_{\mu n} + X_{1\sigma} = 23,409 + 0,609 = 24,018 \text{ Ом.}$$

Полное индуктивное сопротивление обмотки ротора

$$X_2 = X_{\mu n} + X'_{2\sigma} = 23,409 + 0,824 = 24,233 \text{ Ом.}$$

Коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - \frac{X_{\mu n}^2}{X_1 \cdot X_2} = 1 - \frac{23,409^2}{24,018 \cdot 24,233} = 0,058.$$

Тогда

$$K_2 = \frac{X_m}{X_2} = \frac{23,409}{24,233} = 0,966.$$

Значение индуктивности цепи ротора

$$L_2 = \frac{X_2}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = \frac{24,233}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0772 \text{ Гн.}$$

Постоянная времени роторной цепи

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2} = \frac{0,0772}{0,168} = 0,459 \text{ с.}$$

Значение индуктивности статорной цепи

$$L_1 = \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = \frac{24,018}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0765 \text{ Гн.}$$

Приведенное значение индуктивности роторной цепи

$$L'_2 = \sigma \cdot L_2 = 0,058 \cdot 0,0772 = 0,00448 \text{ Гн.}$$

Приведенное значение полного активного сопротивления

$$R' = R_1 + K_2^2 \cdot R_2 = 0,171 + 0,966^2 \cdot 0,168 = 0,328 \text{ Ом.}$$

Постоянная времени статорной цепи

$$T_1 = \frac{L'_1}{R'} = \frac{0,00448}{0,328} = 0,014 \text{ с.}$$

Значение индуктивности контура намагничивания

$$L_m = \frac{X_m}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = \frac{23,409}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,07455 \text{ Гн.}$$

### 7.2.2. Оптимизация САР поттокосцепления

Структурная схема линейризованной двухконтурной САР поттокосцепления приведена на рисунке 7.3.

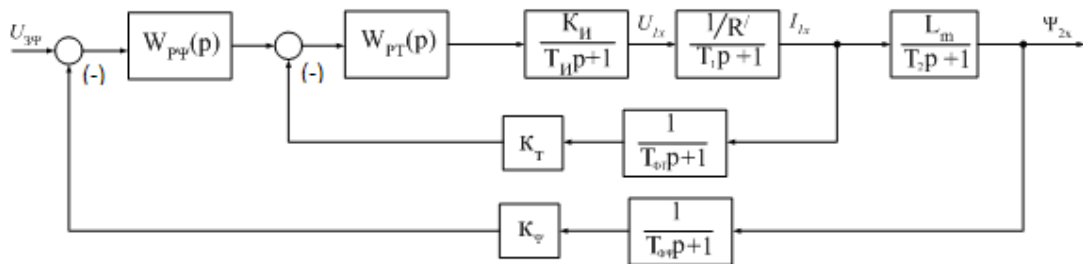


Рисунок 7.3 – Структурная схема линейризованной двухконтурной  
Оптимизация контура тока

Структурная схема контура приведена на рисунке 7.4.

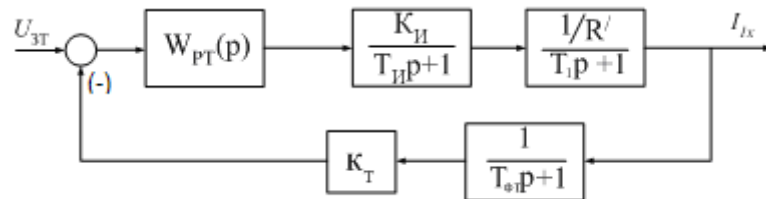


Рисунок 7.4 – Структурная схема контура тока

Контур содержит инерционные звенья первого порядка с постоянными времени:  $T_1 = 0,014c$ ,  $T_И = 0,0001c$  и  $T_{ФТ} = 0,001c$ .

Принимаем малую некомпенсированную постоянную времени контура

$$T_{\mu m} = T_{\mu ПК} + T_{\mu ОК},$$

где:  $T_{\mu ПК}$  – постоянная времени прямого канала контура тока,

$T_{\mu ОК}$  – постоянная времени обратного канала контура тока.

$$T_{\mu ПК} = 0,5 \cdot T_И = 0,5 \cdot 0,0001 = 0,00005 \text{ с;}$$

$$T_{\mu ОК} = T_{ФТ} + T_{АЦП} = 0,001 \text{ с;}$$

$$T_{\mu m} = T_{\mu ПК} + T_{\mu ОК} = 0,00005 + 0,001 = 0,00105 \text{ с.}$$

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:  $T_{pm} = T_1 = 0,014 \text{ с}$  – постоянная времени регулятора;

$$k_{pm} = \frac{T_1 \cdot R'}{k_{II} \cdot k_m \cdot a_m \cdot T_{\mu m}} = \frac{0,016 \cdot 0,328}{31,1 \cdot 0,263 \cdot 2 \cdot 0,00105} = 0,306 \text{ – коэффициент усиления}$$

регулятора;

$$k_m = \frac{U_{zt.макс}}{I_{1.макс}} = \frac{10}{38} = 0,263 \frac{В}{А} \text{ – коэффициент обратной связи по току;}$$

$U_{zt.макс}$  – максимальное напряжение задания на ток  $U_{zt.макс} = 10В$ ;

$a_m = 2$  – коэффициент оптимизации контура тока по МО;

$I_{1.макс} = 38 \text{ А}$  – максимальный кратковременный ток преобразователя

$$W_{pm}(p) = 0,306 \cdot \frac{0,014 \cdot p + 1}{0,014 \cdot p},$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура тока:

$\sigma = 4,3\%$  – перерегулирование;

$t_{py1}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu m} = 4,1 \cdot 0,00105 = 0,004305 \text{ с}$  – время первого согласования;

$t_{py2}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu m} = 4,1 \cdot 0,00105 = 0,004305 \text{ с}$  – время переходного процесса при обработке ступенчатого управляющего задания;

$\omega_n^{(м)} = \omega_n^{(ф)} = \frac{0,71}{T_{\mu m}} = \frac{0,71}{0,00105} = 676,2 \frac{рад}{с}$  – полоса пропускания по модулю и

фазе.

По структурной схеме контура тока (см. рисунок 7.4) набирается имитационная модель, представленная на рисунке 7.5.



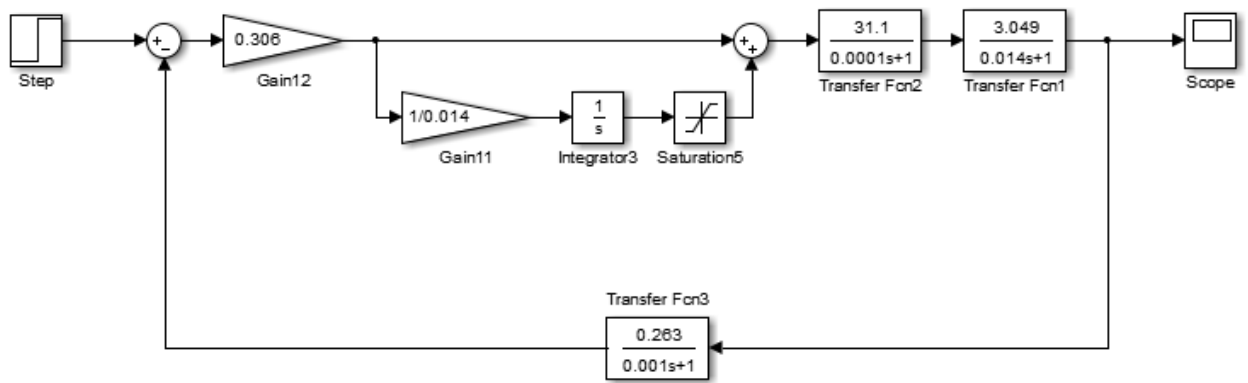


Рисунок 7.5 – Имитационная модель контура тока

Результаты моделирования переходных процессов в контуре тока, настроенного на модульный оптимум при обработке ступенчатого входного воздействия  $U_{зм} = 0,1В$  приведены в виде переходной характеристики  $I(t)$  на рисунке 7.6.

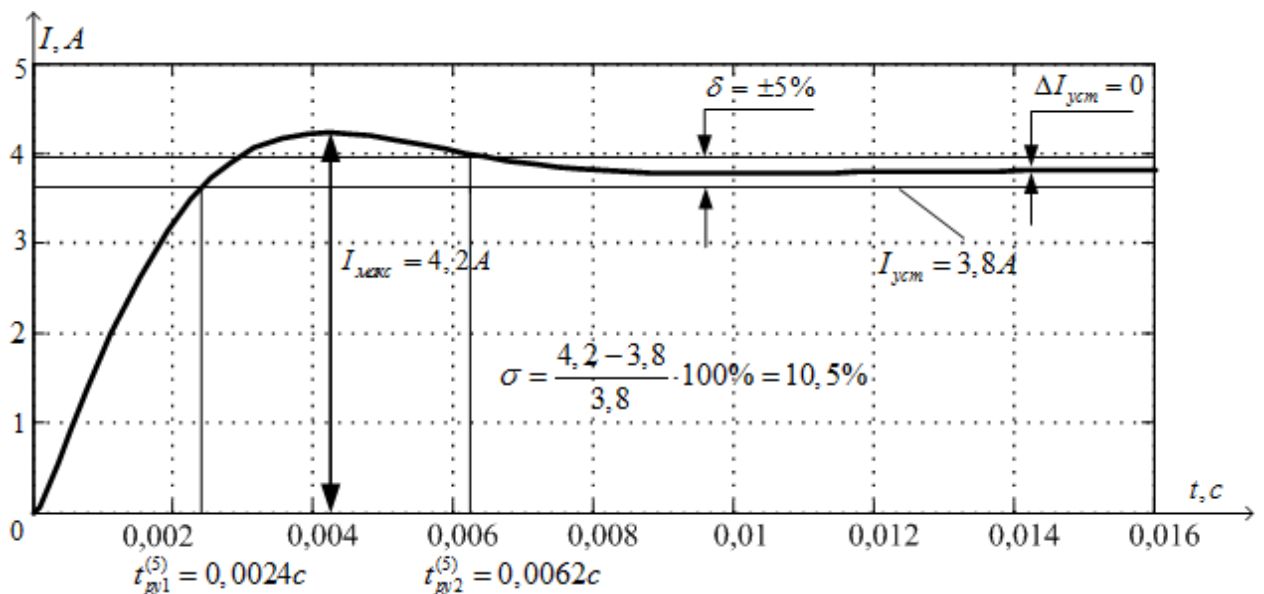


Рисунок 7.6 – Переходная характеристика  $I(t)$  контура тока по структурной схеме рисунок 7.5

Проводя анализ результатов моделирования можно сделать вывод о том, что они отлично согласуются с теми показателями работы контура, которые ожидалось.

Результаты показателей работы контура тока демонстрируются в таблице 7.1

Таблица 7.1 – результаты моделирования показателей работы контура тока

Показатели	Ожидаемые	Полученные
$\sigma, \%$	4,3	10,5
$t_{py1}^{(5)}, c$	0,00435625	0,0024
$t_{py2}^{(5)}, c$	0,00435625	0,0062

### Оптимизация контура потокосцепления

Структурная схема контура потокосцепления приведена на рисунке 7.7.

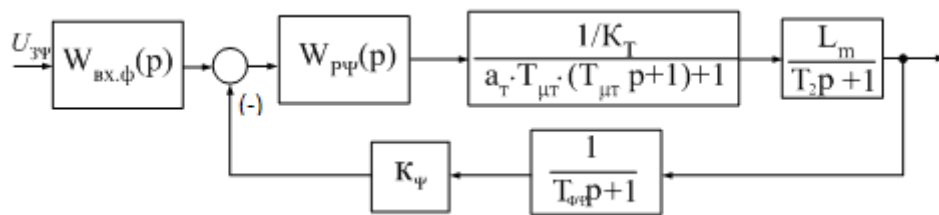


Рисунок 7.7 – Структурная схема контура потокосцепления

### Параметры элементов контура

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:  $k_{p\psi} = \frac{k_T \cdot T_2}{k_\psi \cdot L_m \cdot 2 \cdot T_{\mu\psi}} = \frac{0,263 \cdot 0,459}{10 \cdot 0,07455 \cdot 2 \cdot 0,0031} = 26,12$  – коэффициент усиления

регулятора потокосцепления,

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

$L_m = L_m = 0,07455$  – индуктивность контура намагничивания.

$$W_{p\Psi}(p) = k_{p\Psi} \cdot \frac{T_{p\Psi} \cdot p + 1}{T_{p\Psi} \cdot p} = 26,12 \cdot \frac{0,459 \cdot p + 1}{0,459 \cdot p};$$

На вход контура потокосцепления устанавливаем фильтр, передаточная функция которого определяется выражением

$$W_{BX.\Phi}(p) = \frac{1}{T_{\Phi\Psi} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,001 \cdot p + 1}.$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура потокосцепления, настроенного на МО:

$\sigma = 8,1\%$  – перерегулирование;

$t_{py1}^{(5)} = 7 \cdot T_{\mu m} = 7 \cdot 0,00105 = 0,00735$  с – время первого согласования;

$t_{py2}^{(5)} = 12 \cdot T_{\mu m} = 12 \cdot 0,00105 = 0,0126$  с – время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего задания;

$\omega_n^{(m)} = \frac{0,5}{T_{\mu m}} = \frac{0,5}{0,00105} = 476,2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  – полоса пропускания по модулю;

$\omega_n^{(\phi)} = \frac{0,35}{T_{\mu m}} = \frac{0,35}{0,00105} = 333,3 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  – полоса пропускания по фазе.

По структурной схеме контура потокосцепления (см. рисунок 7.7) набирается имитационная модель, представленная на рисунке 7.8.

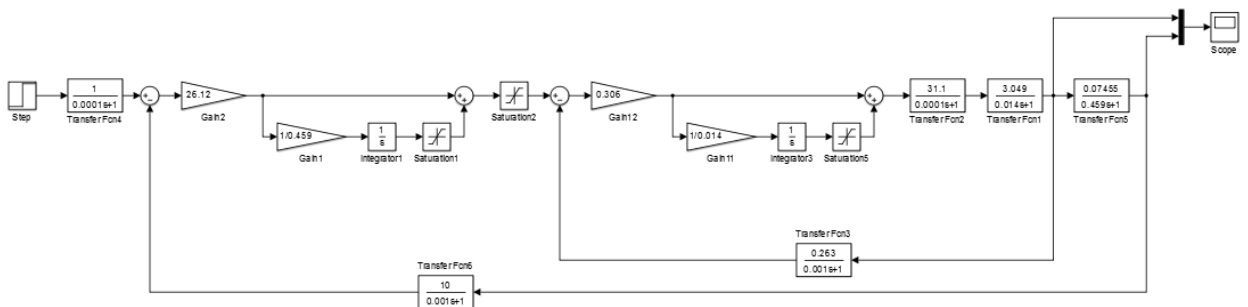


Рисунок 7.8 – Имитационная модель контура потокосцепления

Результаты моделирования переходных процессов в контуре потокосцепления, настроенного на модульный оптимум, при отработке ступенчатого входного воздействия  $U_{3\Psi} = 0,1\text{В}$  приведены в виде переходных характеристик  $\Psi(t)$  и  $I(t)$  на рисунке 7.9.

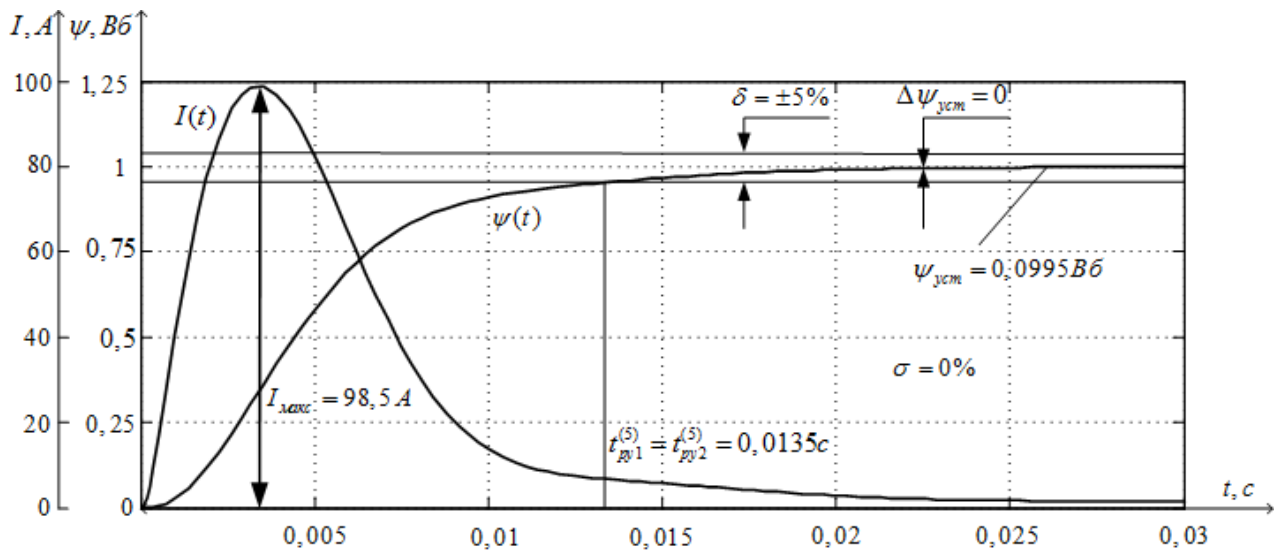


Рисунок 7.9 – Переходные характеристики  $\Psi(t)$  и  $I(t)$  контура  
потокосцепления

Таблица 7.2 – Показатели работы замкнутого контура потокосцепления

Показатели	Ожидаемые	Полученные
$\sigma, \%$	8,1	0
$t_{py1}^{(5)}, с$	0,00735	0,0135
$t_{py2}^{(5)}, с$	0,01275	0,0135

Разница экспериментальных и ожидаемых параметров связана с наличием апериодического звена первого порядка в цепи обратной связи контура и на его входе.

Анализ переходных процессов пуска двигателя показывает, что они полностью удовлетворяют требованиям технического задания.

### 7.2.3. Оптимизация САР скорости

Структурная схема линеаризованной САР скорости приведена на рисунке 9.10.

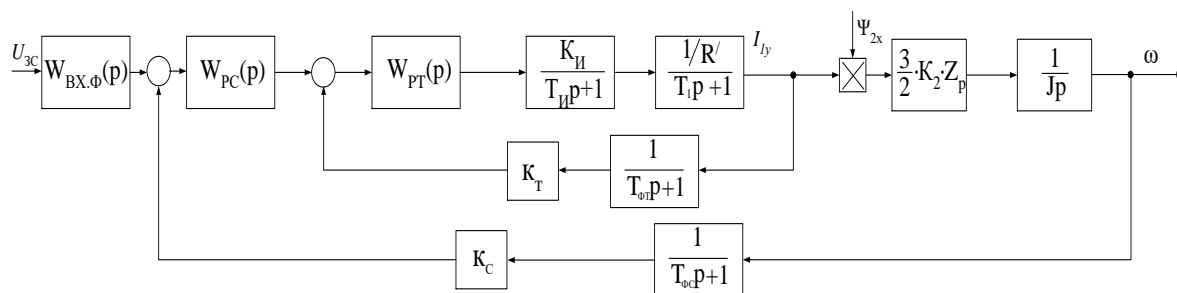


Рисунок 7.10 – Структурная схема контура скорости

### Оптимизация контура скорости

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

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

$$\text{где: } k_{pc} = \frac{k_T \cdot J_{\Omega}}{\frac{3}{2} \cdot K_2 \cdot Z_P \cdot k_c \cdot \Psi_{2x} \cdot 2 \cdot T_{\mu c}} = \frac{0,263 \cdot 0,459}{\frac{3}{2} \cdot 0,966 \cdot 3 \cdot 0,098 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0,0031} = 45,7 -$$

коэффициент усиления регулятора скорости;

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

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

$$k_c = \frac{U_{зс макс}}{\omega_{макс}} = \frac{10}{102,09} = 0,098 \frac{В \cdot с}{рад} - \text{коэффициент обратной связи по скорости;}$$

$$U_{зс макс} = 10 \text{ В;}$$

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

$$W_{pc}(p) = k_{pc} \frac{T_{pc} \cdot p + 1}{T_{pc} \cdot p} = 45,7 \cdot \frac{0,0124 \cdot p + 1}{0,0124 \cdot p};$$

На вход контура скорости устанавливаем фильтр, передаточная функция которого определяется выражением

$$W_{BX.\Phi}(p) = \frac{1}{(4 \cdot T_{\mu c} + T_{\Phi C}) \cdot p + 1} = \frac{1}{0,0135 \cdot p + 1},$$

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

Показатели, которые ожидаются при работе замкнутого контура скорости, который настроен на СО:

$\sigma = 6,2\%$  – перерегулирование;

$t_{py1}^{(5)} = 13,6 \cdot T_{\mu m} = 13,6 \cdot 0,00105 = 0,01428$  с – время первого согласования;

$t_{py2}^{(5)} = 13,6 \cdot T_{\mu m} = 13,6 \cdot 0,00105 = 0,01428$  с – время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего задания;

$\omega_n^{(m)} = \frac{0,284}{T_{\mu m}} = \frac{0,284}{0,00105} = 270,5 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  – полоса пропускания по модулю;

$\omega_n^{(\phi)} = \frac{0,18}{T_{\mu m}} = \frac{0,18}{0,00105} = 171,4 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  – полоса пропускания по фазе.

Имитационная модель, которая основывается на структурной схеме для контура скорости, показана на рисунке 7.11.

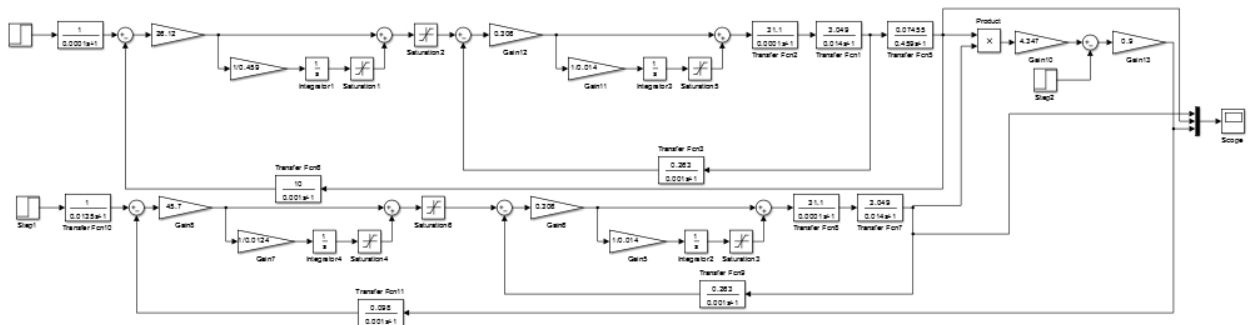


Рисунок 7.11 – Имитационная модель контура скорости

Результаты моделирования переходных процессов в контуре скорости, настроенного на симметричный оптимум, при отработке ступенчатого входного воздействия  $U_{zc} = 0,1$ В приведены в виде переходной характеристики  $\omega(t)$  на рисунке 7.12.

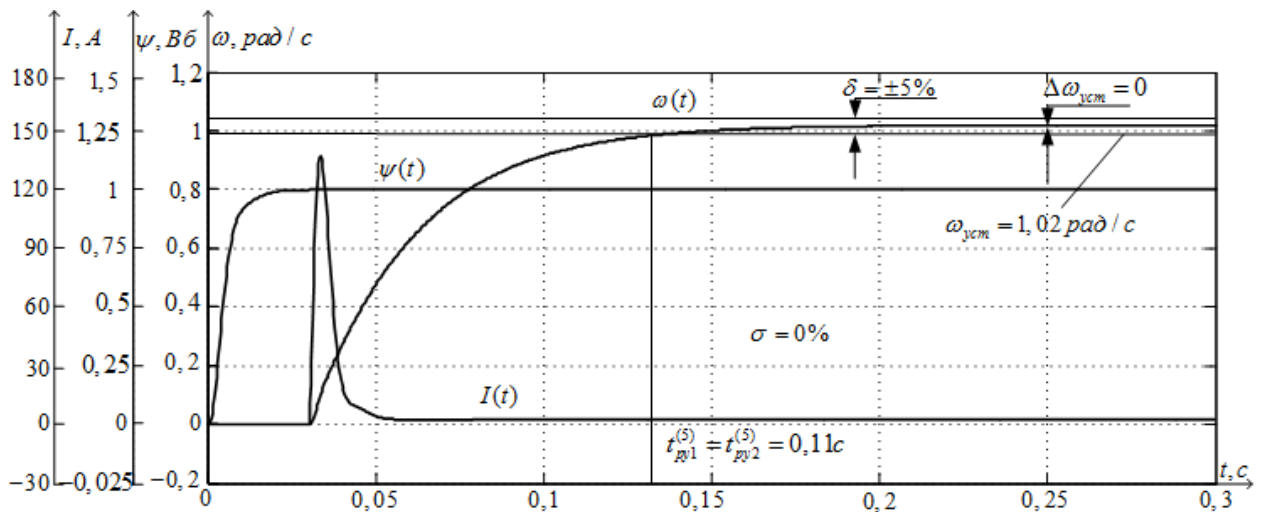


Рисунок 7.12 – Переходные характеристики  $\omega(t)$ ,  $\psi(t)$  и  $I(t)$  контура скорости

Таблица 7.3 – Показатели работы замкнутого контура скорости

Показатели	Ожидаемые	Полученные
$\sigma, \%$	6,2	0
$t_{py1}^{(5)}, c$	0,01428	0,11
$t_{py2}^{(5)}, c$	0,01428	0,11

Так как постоянная времени в прямом канале контура и в обратном мала, показатели качества для переходных процессов в эксперименте и те, которые были ожидаемы, отличаются друг от друга.

## 8. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОЗОННОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

На рисунке 8.1. изображена схема САР для установившегося режима стабилизации скорости

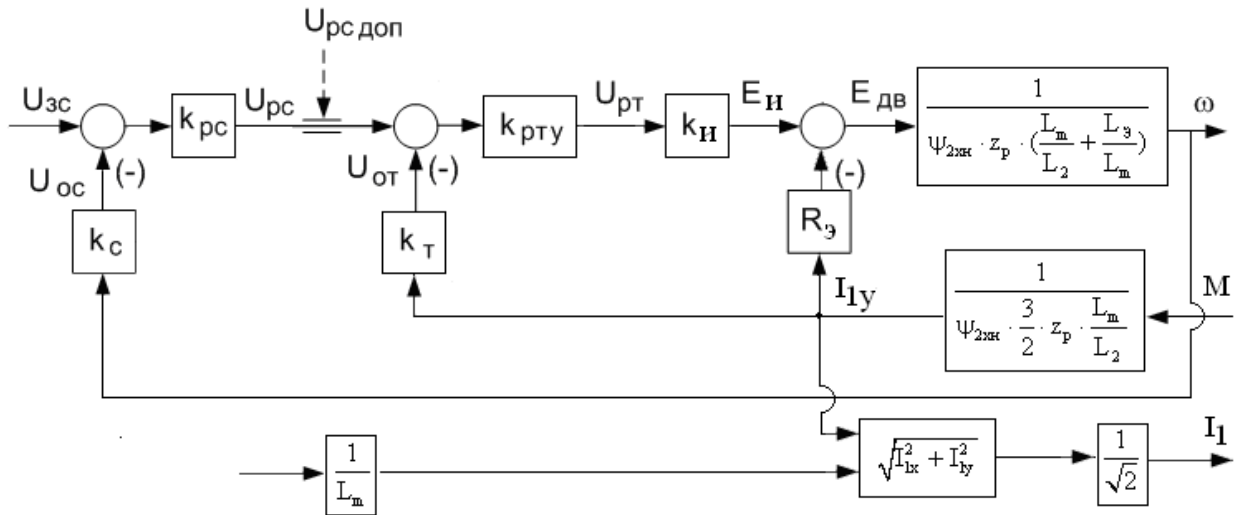


Рисунок 8.1 – схема (структурная) САР скорости однозонного электропривода для статического режима стабилизации скорости

$\omega(I_{1y})$  САР (электромеханическая характеристика) в данном режим выглядит следующим образом:

$$\omega(I_{1y}) = \omega_0(U_{zc}) - \Delta\omega_B(I_{1y}) = \frac{k_{pc} \cdot k_{пту} \cdot k_u \cdot k_c}{\Psi_{2хн} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{пту} \cdot k_u \cdot k_c} \cdot \frac{U_{zc}}{k_c} - \frac{R_3 + k_{пту} \cdot k_u \cdot k_c}{\Psi_{2хн} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{пту} \cdot k_u \cdot k_c} \cdot I_{1y},$$

где:  $\omega_0(U_{zc}) = \frac{k_{pc} \cdot k_{пту} \cdot k_u \cdot k_c}{\Psi_{2хн} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{пту} \cdot k_u \cdot k_c} \cdot \frac{U_{zc}}{k_c}$  – скорость

идеального холостого хода в замкнутой системе при управляющем напряжении  $U_{zc}$ , рад/с;



$k_{pc} = 500000$ ,  $k_{pmy} = 50000$  – коэффициенты усиления операционных усилителей, на которых реализованы регуляторы скорости и тока.

$$\Delta\omega_B(I_{1y}) = \frac{R_3 + k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_c}{\psi_{2xh} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_c} \cdot I_{1y}, \text{ рад/с} - \text{ абсолютная}$$

погрешность скорости электропривода в замкнутой системе по возмущению при изменении тока нагрузки электропривода  $I_{1y}$ ;

$$\omega_{зад}(U_{3c}) = \frac{U_{3c}}{k_c} - \text{ заданное значение скорости, рад/с.}$$

Абсолютная погрешность скорости по управлению замкнутой системы электропривода, рад/с

$$\Delta\omega_y(U_{3c}) = \omega_{зад}(U_{3c}) - \omega_0(U_{3c}) = \frac{\psi_{2xh} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right)}{\psi_{2xh} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_c} \cdot \frac{U_{3c}}{k_c}.$$

Выражение для механической характеристики  $\omega(M)$  электропривода имеет вид

$$\omega(M) = \frac{k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_c}{\psi_{2xh} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_c} \cdot \frac{U_{3c}}{k_c} - \frac{\frac{R_3 + k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_c}{\psi_{2xh} \cdot z_p \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2}}}{\psi_{2xh} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_c} \cdot M,$$

где:  $M$  – момент нагрузки с учетом момента трения на валу двигателя, Н·м.

$$\Delta\omega(M) = \frac{\frac{R_3 + k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_c}{\psi_{2xh} \cdot z_p \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2}}}{\psi_{2xh} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_c} \cdot M, \text{ рад/с}$$

– абсолютная погрешность скорости электропривода в замкнутой системе по возмущению при изменении момента нагрузки.

Относительная погрешность скорости по возмущению (при изменении момента нагрузки) находится по выражению

$$\Delta_n = \frac{\omega(U_{zc}; M_{мин}) - \omega(U_{zc}; M_{макс})}{\omega(U_{zc}; M_{мин}) + \omega(U_{zc}; M_{макс})} \cdot 100,$$

где:  $M_{макс} = M_{дв.н} + M_{с.дв}$  – максимальное значение нагрузки.

$M_{мин} = 0,15 \cdot M_{дв.н} + M_{с.дв}$  – минимальное значение нагрузки;

Структурная схема для установившегося режима стабилизации тока приведена на рисунке 10.2.

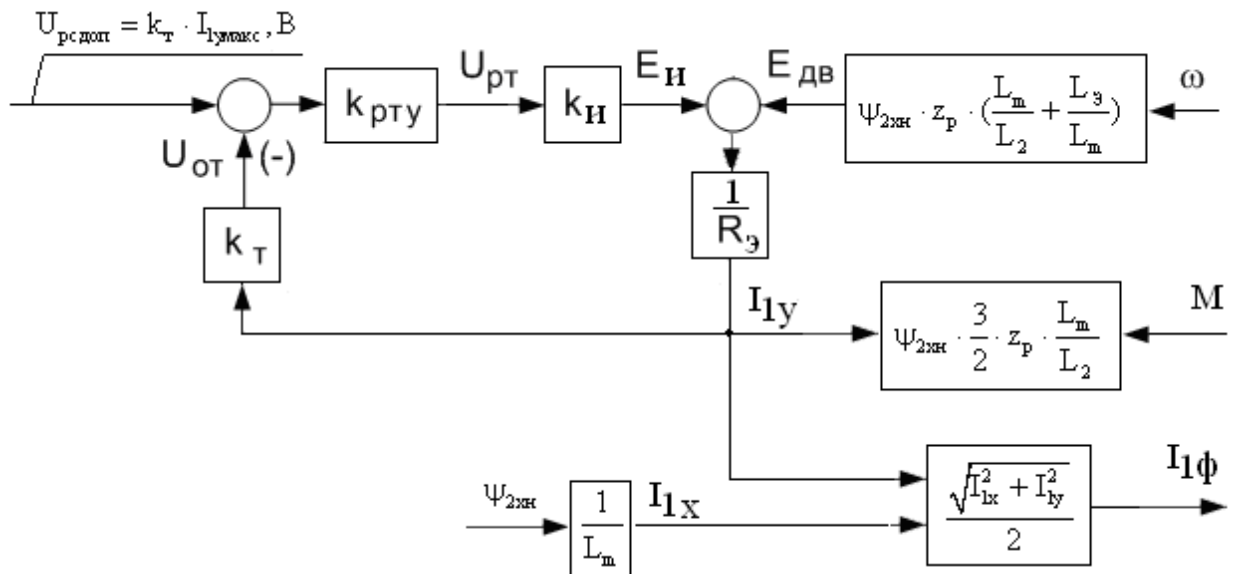


Рисунок 8.2 – Структурная схема САР скорости однозонного с постоянным токоограничением для статического режима стабилизации тока

Выражение для электромеханической характеристики  $I_{1y}(\omega)$  САР электропривода в режиме стабилизации скорости имеет вид

$$I_{1y}(\omega) = I_{1устон}(U_{рс доп}) - \Delta I_{1y}(\omega) = \frac{k_{пты} \cdot k_u \cdot k_m}{R_3 + k_{пты} \cdot k_u \cdot k_m} \cdot \frac{U_{рс доп}}{k_m} - \frac{\psi_{2хн} \cdot z_p \cdot \left( \frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right)}{R_3 + k_{пты} \cdot k_u \cdot k_m} \cdot \omega,$$

где:  $I_{1устон}(U_{pc\ \partial on}) = \frac{k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_m}{R_3 + k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_m} \cdot \frac{U_{pc\ \partial on}}{k_m}$  – фактическое значение

максимального тока  $I_{1y}$  при  $\omega = 0$  (в режиме стопорения), А;

$I_{1yмакс} = \frac{U_{pc\ \partial on}}{k_m}$  – заданное значение максимального тока, А;

$\Delta I_{1y}(\omega) = \frac{\psi_{2xn} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right)}{R_3 + k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_m} \cdot \omega$ , рад/с – абсолютная погрешность тока

электропривода при изменении скорости  $\omega$ , рад/с;

$k_{pmy} = 50000$  – коэффициент усиления операционного усилителей, на котором реализован регулятор тока.

Выражение для механической характеристики  $M(\omega)$  электропривода имеет вид

$$M(\omega) = M_{cмон}(U_{pc\ \partial on}) - \Delta M(\omega) = \frac{k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_m}{R_3 + k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_m} \cdot \psi_{2xn} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \frac{U_{pc\ \partial on}}{k_m} - \frac{\psi_{2xn}^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p^2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right)}{R_3 + k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_m} \cdot \omega$$

где:  $M_{cмон}(U_{pc\ \partial on}) = \frac{k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_m}{R_3 + k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_m} \cdot \psi_{2xn} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \frac{U_{pc\ \partial on}}{k_m}$  – фактическое

значение максимального электромагнитного момента двигателя при  $\omega = 0$ ;

$M_{макс}(U_{pc\ \partial on}) = \psi_{2xn} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \frac{U_{pc\ \partial on}}{k_m}$  – заданное значение максимального

момента двигателя, Н·м;

$\Delta M(\omega) = \frac{\psi_{2xn}^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p^2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right)}{R_3 + k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_m} \cdot \omega$  – абсолютная погрешность

максимального электромагнитного момента двигателя при скорости  $\omega$ , Н·м.

Результаты расчётов электромеханических характеристик и погрешности сводим в таблицу 10.1.

Таблица 8.1 – Статические характеристики однозонного электропривода

$U_{зс}, В$	$I_{1y}, А$	0				$I_{1у\max} = 38$	$\Delta, \%$
	$M, Н \cdot м$	0	$M_{\min} = 45,185$	$M_{\max} = 199,02$	$M_n = 181,2$		
10	$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	102,04	102,041	102,041	102,041	102,04	$2,02 \cdot 10^{-6}$
1		10,204	10,204	10,204	10,204	10,204	$2,02 \cdot 10^{-5}$
0,1		1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	$2,02 \cdot 10^{-4}$
$U_{р\text{сдop}} = 9,994 В$	$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	0		51,045		102,09	
	$I_{1y}, А$	37,966		37,966		37,996	
	$M, Н \cdot м$	199,02		199,02		199,02	

Результаты расчётов статических электромеханических и механических характеристик однозонного электропривода в режимах стабилизации скорости и тока приведены на рисунках 8.3 и 8.4 соответственно.

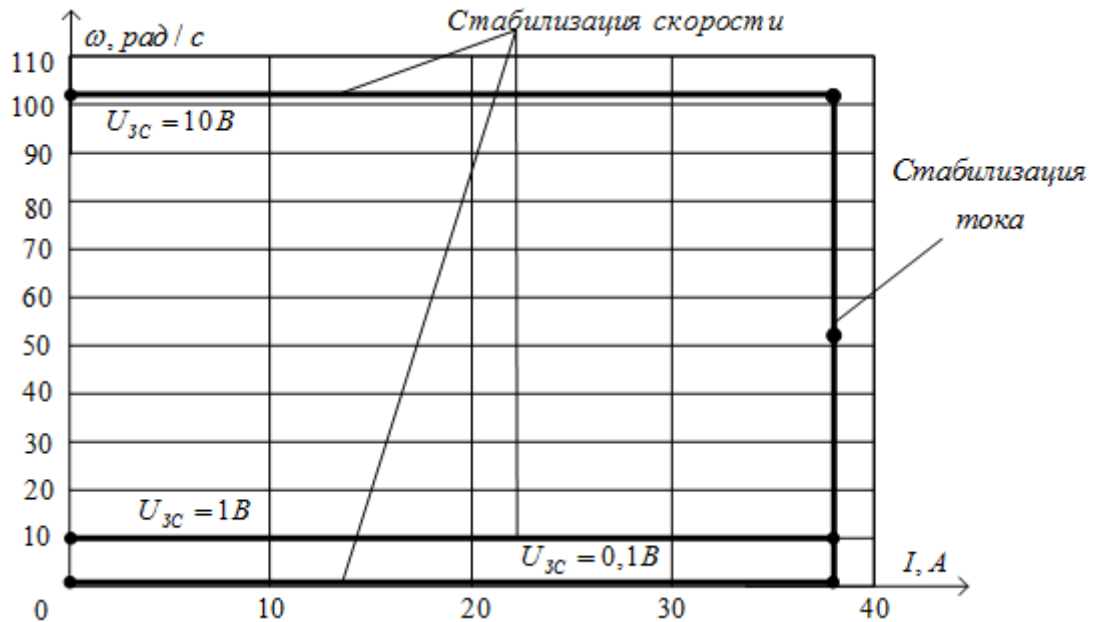


Рисунок 10.3 – Электромеханические характеристики в режимах стабилизации скорости и тока

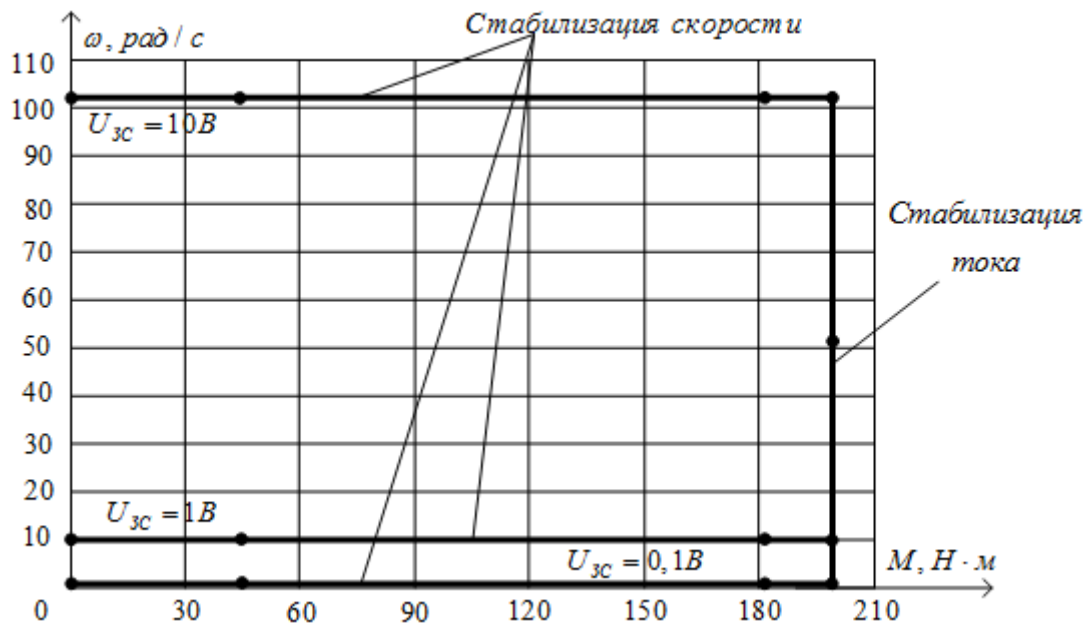


Рисунок 8.4 –Механические характеристики в режимах стабилизации скорости и тока

Анализ полученных статических характеристик показывает, что в диапазоне рабочих скоростей электропривод обеспечивает поддержание скорости с погрешностью, не превышающей  $2,02 \cdot 10^{-4} \%$ , что полностью удовлетворяет требованиям технического задания.

## **9. 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. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет научного проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;

- планирование научно-исследовательских работ;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

С учетом решения данных задач была сформирована структура и содержание раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».

## **9.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

### **9.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования**

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).




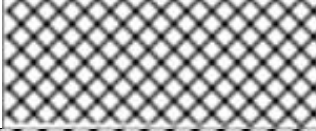

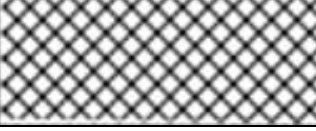
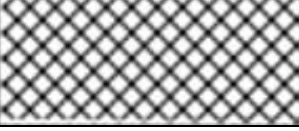


В данном случае сегментирование целесообразно провести по критерию точности, т.к. для разных типов режимов работы, требуется разная величина подачи стружки в установки соответствующей мощности.

А также следует выделить сегменты рынка:

- по разработке, проектированию и производству;
- по установке и пуско-наладке;
- по дальнейшему обслуживанию и ремонту.

Исходя из сегмента рынка, будет произведено сегментирование коммерческих организаций по отраслям. Сегментирование приведено в табл.9.1.

Таблица 9.1– Карта сегментирования рынка разработок для ЭП

	Не регулируемые асинхронные электропривода	Электроприводы с реостатным регулированием	Электроприводы системы ПЧ – АД
Проектирование и производство			
Установка и пуско-наладка			
Обслуживание и ремонт			
Фирма А		Фирма Б	

Результаты сегментирования:

- Основными сегментами рынка являются все виды деятельности для электроприводов постоянного тока;
- Наиболее сильно предприятие должно быть ориентировано на сегменты рынка связанные с проектированием и производством, установкой и пуско-наладкой двухзонных электроприводов постоянного тока;
- Наиболее привлекательными сегментами рынка являются отрасли, связанные с проектированием и производством, установкой и пуско-наладкой двухзонных электроприводов постоянного тока.

### 9.1.2. Технология QuaD

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение



целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект.

В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины следующих групп показателей:

1) *Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:*

- влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
- перспективность рынка;
- пригодность для продажи;
- перспективы конструирования и производства;
- финансовая эффективность.
- правовая защищенность и др.

2) *Показатели оценки качества разработки:*

- динамический диапазон;
- вес;
- ремонтпригодность;
- энергоэффективность;
- долговечность;
- эргономичность;
- унифицированность;
- уровень материалоемкости разработки и др.

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

Для упрощения процедуры проведения QuaD оценка проводится в табличной форме (таблица 9.2).

В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по стобалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а

100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Таблица 9.2– Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)x100
1	2	3	4	5	6
<b>Показатели оценки качества разработки</b>					
1. Повышение производительности труда пользователя	0,07	65	100	0,65	4,55
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям)	0,13	75	100	0,75	9,75
3. Помехоустойчивость	0,03	50	100	0,5	1,5
4. Энергоэкономичность	0,1	70	100	0,7	7
5. Надежность	0,09	100	100	1	9
6. Уровень шума	0,04	40	100	0,4	1,6
7. Безопасность	0,01	80	100	0,8	2,4
8. Потребность в ресурсах памяти	0,02	75	100	0,75	1,5
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,04	85	100	0,85	3,4
10. Простота эксплуатации	0,04	98	100	0,98	3,92
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,05	96	100	0,96	4,8
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,06	100	100	1	6
<b>Показатели оценки коммерческого потенциала разработки</b>					
1. Конкурентоспособность продукта	0,03	70	100	0,7	2,1
2. Уровень проникновения на рынок	0,04	80	100	0,8	3,2
3. Цена	0,06	45	100	0,45	2,7
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	100	100	1	8
5. Послепродажное обслуживание	0,03	90	100	0,9	2,7

6. Финансирование научной разработки	0,05	78	100	0,78	3,9
7. Срок выхода на рынок	0,03	71	100	0,71	2,13
8. Наличие сертификации разработки	0,02	78	100	0,78	3,2
<b>Итого</b>	<b>1</b>				<b>83,35</b>

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum B_i \cdot B_i = 0,07 \cdot 65 + 0,13 \cdot 75 + \dots + 0,02 \cdot 78 = 83,35,$$

где  $P_{cp}$  – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – средневзвешенное значение  $i$ -го показателя.

Значение  $P_{cp}$  позволяет говорить о перспективах разработки и качестве проведенного исследования. Если значение показателя  $P_{cp}$  получилось от 100 до 80, то такая разработка считается перспективной. Если от 79 до 60 – то перспективность выше среднего. Если от 69 до 40 – то перспективность средняя. Если от 39 до 20 – то перспективность ниже среднего. Если 19 и ниже – то перспективность крайне низкая.

Значение  $P_{cp}$  получилось равным 83,35, что говорит о том, что данная разработка является перспективной.

### 9.1.3. 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.

Он проводится в несколько этапов.

**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. Дадим трактовку каждому из этих понятий.

1. **Сильные стороны.** Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей. При этом важно рассматривать сильные стороны и с точки зрения руководства проекта, и с точки зрения тех, кто в нем еще задействован. При этом рекомендуется задавать следующие вопросы:

- Какие технические преимущества вы имеете по сравнению с конкурентами?

- Что участники вашего проекта умеют делать лучше всех?

- Насколько ваш проект близок к завершению по сравнению с конкурентами?

2. **Слабые стороны.** Слабость – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами. Чтобы прояснить в каких аспектах вас, возможно, превосходят конкуренты, следует спросить:

- Что можно улучшить?

- Что делается плохо?

- Чего следует избегать?

3. **Возможности.** Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или

предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию. Формулирование возможностей проекта можно упростить, ответив на следующие вопросы:

- Какие возможности вы видите на рынке? Проводите поиск свободных ниш, но помните, что свободными они остаются недолго. Благоприятная возможность, увиденная сегодня, может перестать существовать уже через три месяца. Благоприятные возможности могут возникать в силу действия следующих факторов:

- изменения в технологической сфере и на рынке – как мирового, так и регионального масштаба;

- изменения правительственной политики в отношении отрасли, где проводится научное исследование;

- изменения социальных стандартов, профиля населения, стиля жизни и т.д.

- В чем состоят благоприятные рыночные возможности?

- Какие интересные тенденции отмечены?

- Какие потребности, пожелания имеются у покупателя, но не удовлетворяются конкурентами?

4. *Угроза* представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту. Для выявления угроз проекта рекомендуется ответить на следующие вопросы:

- Какие вы видите тенденции, которые могут уничтожить ваш научно-исследовательский проект или сделать его результаты устаревшими?

- Что делают конкуренты?

- Какие препятствия стоят перед вашим проектом (например, изменения в законодательстве, снижение бюджетного финансирования проекта, задержка финансирования проекта и т.п.)?

- Изменяются ли требуемые спецификации или стандарты на результаты научного исследования?

- Угрожает ли изменение технологии положению вашего проекта?

- Имеются ли у руководства проекта проблемы с материально-техническим обеспечением?

Результаты первого этапа SWOT-анализа представляем в табличной форме (табл. 9.3).

Таблица 9.3– Матрица SWOT

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.</p> <p>С2. Экологичность технологии.</p> <p>С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4. Повышение производительности труда.</p> <p>С5. Высокий срок эксплуатации.</p> <p>С6. Надежность данной системы по сравнению с другими.</p> <p>С7. Возможность автоматизированного управления.</p> <p>С8. Высокое качество продукции.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>Сл1. Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца</p> <p>Сл2. Большой срок поставок материалов и комплектующий, используемые при проведении научного исследования</p> <p>Сл3. Отсутствие возможности проверки теоретических данных.</p>
--	---	--

<p><b>Возможности:</b>  В1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ  В2.Появление дополнительного спроса на новый продукт  В3. Снижение стоимости на электроэнергию и материалы, используемые при научных исследований  В4. Повышение стоимости конкурентных разработок  В5. Развитие технологий в данной отрасли инновационной инфраструктуры ТПУ</p>		
--	--	--

Продолжение таблицы 9.3.

<p><b>Угрозы:</b>  У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.  У2. Развитая конкуренция технологий производства  У3. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции  У4. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.  У5.Экономическая ситуация в стране, влияющая на спрос.</p>		
---	--	--

Описание сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта, его возможностей и угроз должно происходить на основе результатов анализа, проведенного в предыдущих разделах бакалаврской работы.

После того как сформулированы четыре области SWOT переходим к реализации второго этапа.

**Второй этап** состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Возможно использование этой матрицы в качестве одной из основ для оценки вариантов стратегического выбора. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Полученная интерактивная матрица проекта представлена в табл. 9.4.

Таблица 9.4– Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта									
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	B1	0	+	-	0	+	0	+	+
	B2	+	+	+	+	-	+	+	+
	B3	+	-	+	+	-	+	+	0
	B4	+	-	+	0	+	+	+	+
B5	+	0	+	+	+	+	+	+	

Результаты анализа таблицы:

B2B3B4C1C3C6C7

B1C2C5C7C8

B4C1C3C4C5C6C7C8

B5C1C3C4C5C6C7C8

Продолжение таблицы 9. 4.

Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	B1	-	-	-
	B2	-	-	-
	B3	-	-	-
	B4	-	+	0
	B5	+	-	+

Результаты анализа таблицы:



В4Сл2  
В5Сл1Сл3

Продолжение таблицы 9.4.

Сильные стороны проекта									
		С1	С2	С3	С4	С5	С6	С7	С8
Угрозы	У1	-	-	-	-	+	-	-	-
	У2	0	0	-	+	-	-	-	-
	У3	+	0	+	+	-	+	0	0
	У4	-	-	-	0	-	-	-	-
	У5	0	-	-	-	+	-	-	-

Результаты анализа таблицы:

У1С5  
У2С8  
У3С1С3С4С6  
У5С5

Окончание таблицы 9. 4.

Слабые стороны проекта				
		Сл1	Сл2	Сл3
Угрозы	У1	+	+	0
	У2	-	0	+
	У3	0	+	+
	У4	+	-	+
	У5	+	0	+

Результаты анализа таблицы:

У1Сл1 Сл2  
У2Сл3  
У3Сл2Сл3  
У4У5Сл1Сл3

В рамках третьего этапа составляем итоговую матрицу SWOT-анализа (табл. 9.5).

Таблица 9.5– Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b> С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b> Сл1. Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца</p>
--	---	---

	<p>С2.Экологичность технологии.</p> <p>С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4.Повышение производительности труда.</p> <p>С5.Высокий срок эксплуатации.</p> <p>С6.Надежность данной системы по сравнению с другими.</p> <p>С7.Возможность автоматизированного управления.</p> <p>С8.Высокое качество продукции.</p>	<p>Сл2. Большой срок поставок материалов и комплектующий, используемые при проведении научного исследования</p> <p>Сл3.Отсутствие возможности проверки теоретических данных.</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p>В1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2.Появление дополнительного спроса на новый продукт</p>	<p>В2В3В4С1С3С6С7</p> <p>В1С2С5С7С8</p> <p>В4С1С3С4С5С6С7С8</p> <p>В5С1С3С4С5С6С7С8</p>	<p>В4Сл2</p> <p>В5Сл1Сл3</p>

Продолжение таблицы 9.5.

<p>В3. Снижение стоимости на электроэнергию и материалы, используемые при научных исследований</p> <p>В4. Повышение стоимости конкурентных разработок</p> <p>В5. Развитие технологий в данной отрасли</p>		
<p><b>Угрозы:</b></p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p> <p>У2. Развитая конкуренция технологий производства</p> <p>У3. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции</p>	<p>У1С5</p> <p>У2С8</p> <p>У3С1С3С4С6</p> <p>У5С5</p>	<p>У1Сл1 Сл2</p> <p>У2Сл3</p> <p>У3Сл2Сл3</p> <p>У4У5Сл1Сл3</p>
<p>У4. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</p>		

У5.Экономическая ситуация в стране, влияющая на спрос.		
--	--	--

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта. Сильными сторонами проекта при использовании асинхронного двигателя является : экономичность, энергоэффективность, экологичность технологии, более низкая стоимость по сравнению с другими технологиями, надежность , высокий срок эксплуатации, но а так же есть и недостатки такие как : Большой срок выхода на рынок, и малый процент специалистов по обслуживанию данной разработки.

## **9.2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований**

В предыдущем разделе были описаны методы, которые позволяют выявить и предложить возможные альтернативы проведения исследования и доработки результатов. К их числу относятся технология QuaD, оценка конкурентных инженерных решений, SWOT-анализ. К ним можно добавить ФСА-анализ, метод Кано. Однако, в большей степени все приведенные методы ориентированы на совершенствование результатов научного исследования, находящегося на стадии создания макета, модели системы, прототипа, конечного продукта. Если разработка находится на перечисленных стадиях жизненного цикла нового продукта, можно предложить не менее трех основных вариантов совершенствования разработки или основных направлений научного исследования.

Разработка относится к вышеописанным стадиям, поэтому нет необходимости использовать морфологический подход.

### 9.3. Планирование научно-исследовательских работ

#### 9.3.1. Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном разделе составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и произведено распределение исполнителей по видам работ. Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 9.6.

Таблица 9.6– Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Научный руководитель
	3	Выбор направления исследований	Научный руководитель
	4	Календарное планирование работ по теме	Научный руководитель
	5	Проведение теоретических	Инженер

Теоретические и экспериментальные исследования		расчетов и обоснований	
	6	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Инженер совместно с лаборантом
	7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими данными	Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер
Оформление отчета по НИР	9	Составление пояснительной записки	Инженер
	10	Публикация полученных результатов	Инженер

### 9.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

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

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

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

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

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

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i},$$

где:  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожi}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

В таблице 11.7. приведены ожидаемая трудоемкость и время выполнения работы.

### 9.3.3 Разработка графика проведения научного исследования

При выполнении дипломных работ студенты в основном становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. Поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

*Диаграмма Ганта* – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где:  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22,$$

где:  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_{ki}$  необходимо округлить до целого числа.

Все рассчитанные значения сведены в таблицу 9.7.

Таблица 9.7– Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ									Исполнители	Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$			Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$				
	$t_{min}$ , чел-дни			$t_{max}$ , чел-дни			$t_{ожид}$ , чел-дни				Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3									
Составление и утверждение технического задания	1	5	2	2	8	4	1,4	6,2	2,8	1	2	1	1,4	3,1	2,8	1,7	3,8	3,4
Подбор и изучение материалов по теме	1	5	3	2	8	4	1,4	6,2	3,4	1	2	1	1,4	3,1	3,4	1,7	3,8	4,1
Выбор направления исследований	1	4	1	3	8	3	1,8	5,6	1,8	1	2	1	1,8	2,8	1,8	2,2	3,4	2,2
Календарное планирование работ по теме	1	1	2	2	2	5	1,4	1,4	3,2	1	1	1	1,4	1,4	3,2	1,7	1,7	3,9
Проведение теоретических расчетов и обоснований	4	10	4	8	14	8	5,6	11,6	5,6	1	2	1	5,6	5,8	5,6	6,8	7,1	6,8
Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	28	28	7	40	40	8	32,8	32,8	7,4	2	2	2	16,4	16,4	3,7	20	20	4,5
Сопоставление результатов экспериментов с теоретическим и данными	5	10	5	7	20	7	5,8	14	5,8	1	2	1	5,8	7	5,8	7,1	8,5	7,1
Оценка эффективности полученных результатов	2	8	2	3	11	3	2,4	9,2	2,4	1	2	1	2,4	4,6	2,4	2,9	5,6	2,9
Составление пояснительной записки	4	7	4	7	14	7	5,2	9,8	5,2	1	1	1	5,2	9,8	5,2	6,3	11,9	6,3
Публикация полученных результатов	1	1	1	7	7	7	3,4	3,4	3,4	1	1	1	3,4	3,4	3,4	4,1	4,1	4,1



*Примечание:* Варианты исполнения выбраны из раздела 11.2.

Итого длительность работ в календарных днях при использовании

- Первого варианта- 54,5 календарных дней.
- Второго варианта- 69,9 календарных дней.
- Третьего варианта- 45,3 календарных дней.

На основе таблицы 9.7 строим календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта, с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени написания ВКР. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Календарный план-график построенный для максимального по длительности второго варианта исполнения работ рамках научно-исследовательского проекта приведен в таблице 9.8.

Таблица 9.8– Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	T, Кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				февр.		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель и инженер	3,8	■													
2	Подбор и изучение материалов по теме	Научный руководитель и лаборант	3,8	■	⊠												
3	Выбор направления исследований	Научный руководитель и инженер	3,4	■	■												
4	Календарное планирование работ по теме	Лаборант	1,7		⊠												
5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер и лаборант	7,1		■	⊠											
6	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Инженер и лаборант	20			■	⊠										
7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими данными	Инженер и научный руководитель	8,5					■	■								
8	Оценка эффективности и полученных результатов	Инженер и научный руководитель	5,6					■	■								
9	Составление пояснительной записки	Инженер	11,9						■	■							
10	Публикация полученных результатов	Инженер	4,1							■	■						

■ Научный руководитель

■ Инженер

⊠ Лаборант

### 9.3.4. Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

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

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;

- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

Все необходимое оборудование и материалы имеются в лаборатории, поэтому расчет материальных затрат проводить не будем.

#### **9.3.4.1. Основная заработная плата исполнителей темы**

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы приведен в таблице 9.9.

Таблица 9.9.– Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов			Исполнители по категориям			Трудо-емкость, чел.-дн.			Зароботная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.			Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель	Научный руководитель	1,4	6,2	2,8	2308,91	2308,91	2308,91	3232,47	14315,24	646,494			
			Инженер					1848,18			11458,71				
2	Подбор и изучение материалов по теме	Научный руководитель	Научный руководитель	1,4	6,2	3,4	2308,91	2308,91	2308,91	3232,47	14315,24	785,029			
			Лаборант					1206,56			7480,67				
3	Выбор направления исследований	Научный руководитель	Научный руководитель	1,8	5,6	1,8	2308,91	2308,91	2308,91	4156,03	12929,89	415,603			
			Инженер					1848,18			10349,80				
4	Календарное планирование работ по теме	Лаборант	Лаборант	Лаборант	1,4	1,4	3,2	1206,56	1206,56	1206,56	1689,18	1689,18	386,099		
5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер	Инженер	5,6	11,6	5,6	1848,18	1848,18	1848,18	10349,80	21438,88	103,49,80			
			Лаборант					1206,56			13996,09				
6	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Инженер	Инженер	Инженер	32,8	32,8	7,4	1848,18	1848,18	1848,18	60620,30	136,76,53			
		Лаборант	Лаборант	Лаборант				1206,56			1206,56		1206,56	39575,16	39575,16
7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими данными	Инженер	Научный руководитель	5,8	14	5,8	1848,18	2308,91	1848,18	10719,44	32324,74	107,19,44			
			Инженер					1848,18			25874,52				
8	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер	Научный руководитель	2,4	9,2	2,4	1848,18	2308,91	1848,18	4435,63	21241,972	443,5,63			
			Инженер					1848,18			17003,256				
9	Составление пояснительной записки	Инженер	Инженер	Инженер	5,2	9,8	5,2	1848,18	1848,18	1848,18	9610,53	18112,16	961,0,53		
10	Публикация полученных результатов	Инженер	Инженер	Инженер	3,4	3,4	3,4	1848,18	1848,18	1848,18	6283,81	6283,81	628,3,81		
Итого:											153904,9	322725,86	863,36,5		

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}},$$

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

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

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

Расчет баланса рабочего времени приведен в таблице 910.

Таблица 9.10 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Инженер	Лаборант
Календарное число дней	365	365	365
Количество нерабочих дней			
- выходные дни	52	52	52
- праздничные дни	14	14	14
Потери рабочего времени			
- отпуск	56	56	28
- невыходы по болезни	14	17	20
Действительный годовой фонд рабочего времени	229	226	251

Месячный должностной оклад работника:

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

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

$k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{\text{ТС}}$ );

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от  $Z_{тс}$ );

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

Тарифная заработная плата  $Z_{тс}$  находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда  $T_{ci} = 600$  руб. на тарифный коэффициент  $k_t$  и учитывается по единой для бюджетных организации тарифной сетке. Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии. Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 9.11.

Таблица 9.11– Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$ , руб.	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , руб	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Научный руководитель	27500	0,3	0,15	1,3	51838	2308	16	20928
Инженер	17500	0,3	0,5	1,3	40950	1848	45	83160
Лаборант	13000	0,3	0,3	1,3	27040	1206	34	41004
Итого								145092

#### 9.3.4.2 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

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

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,12 \cdot 145092 = 17411,04 \text{ руб.},$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15). Расчет дополнительной заработной платы приведен в таблице 11.12.

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

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 (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2015 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%.

На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2015 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 9.12.

Таблица 9– Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.			Дополнительная заработная плата, руб.		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Научный руководитель	10620,97	95127,08	20927	1274,51	11415,25	2511,24
Инженер	102019,5	171141,4	83160	12242,34	20536,97	9979,2
Лаборант	41264,34	62741,1	41004	4951,72	7528,93	4920,48
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды			0,271			
Итого						
Исполнение 1			46713,18			
Исполнение 2			99860,98			
Исполнение 3			44038,1			

#### 9.3.4.4. Амортизация

Расчет амортизационных отчислений для полного восстановления основных фондов производится по нормам амортизации, утвержденным в порядке, установленном действующим законодательством, и определяется в зависимости от стоимости оборудования. Для проектирования требуется следующее оборудование: компьютер - 50000 рублей.

$$I_{ам} = \frac{T_{ис}}{T_{г}} \cdot \frac{1}{T_{сл}} \cdot C_{обор};$$

где:

- $T_{ис}$  – время использования оборудования = 81 дней;
- $T_{г}$  – количество использования в год = 365 дней;
- $C_{обор}$  – стоимость оборудования;



- $T_{сл}$  – срок службы оборудования = 5 лет.

$$I_{ам} = \frac{T_{ис}}{T_{г}} \cdot \frac{1}{T_{сл}} \cdot C_{обор} = \frac{81}{365} \cdot \frac{1}{5} \cdot 50000 = 2219,17 \text{ руб.}$$

#### 9.3.4.5. Накладные расходы

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

$$З_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{нр} = (З_{осн} + З_{доп} + З_{внеб}) \cdot 0,16,$$

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

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

Расчет величины накладных расходов приведен в таблице 13.

Таблица 9.13 – Расчет величины накладных расходов

	$З_{накл}$ , руб.
Исполнение 1	37446,18
Исполнение 2	77123,19
Исполнение 3	33046,6

#### 9.3.4.6. 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 9.14.

Таблица 9.14 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	
1. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	153904,9	322726	145092	Пункт 3.4.1
2. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	18468,57	39481,2	17411,04	Пункт 3.4.2
3. Отчисления во внебюджетные фонды	46713,18	99861	44038,1	Пункт 3.4.3
4. Накладные расходы	37446,184	77123,2	33046,6	16 % от суммы ст. 1-5
5. Бюджет затрат НТИ	256532,8	539191,4	239587,74	Сумма ст. 1- 6

#### 9.4. Определение ресурсоэффективности проекта

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 как:

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

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

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – 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). Расчёт интегрального финансового показателя приведен в таблице 11.15.

Таблица 9.15 – Расчёт интегрального финансового показателя конкурентных технических решений

	$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$
Исполнение 1	0,48
Исполнение 2	1
Исполнение 3	0,26

Величина интегрального финансового показателя разработки схемы 3 (двухзонный электропривод постоянного тока) отражает соответствующее численное удешевление стоимости электропривода при одинаковой мощности. Схема 3 имеет наименьший интегральный показатель среди трёх конкурентных технических решений, и, следовательно, вариант схемы является наиболее финансово эффективным, что является определяющим критерием.

Определение ресурсоэффективности проекта схемы 3 можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

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

где:  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  – весовой коэффициент разработки;

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

Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности схем проводим в виде табличной формы.

Таблица 9.16 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии / Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Повышение производительности труда пользователя	0,05	3	3	5
Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	4	4	5
Надежность	0,05	4	5	5
Безопасность	0,1	3	3	5
Простота эксплуатации	0,1	5	3	5
Конкурентоспособность продукта	0,1	5	5	5

Продолжение таблицы 9.16.

Уровень проникновения на рынок	0,2	5	3	4
Финансирование научной разработки	0,1	5	4	3
Наличие сертификации разработки	0,2	5	3	5
ИТОГО	1			

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы 9.17.

Таблица 9.17 – Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности

	$I_{pi}$
Исполнение 1	4,55
Исполнение 2	3,5
Исполнение 3	4,6

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

Таким образом, применение электроприводов переменного тока и сейчас остается эффективным.

#### **Заключение по разделу финансовый менеджмент:**

В ходе выполнения данной части выпускной работы была доказана конкурентоспособность данного технического решения в сравнении с другими перспективами, был произведен SWOT-анализ, планирование, которое ограничило выполнение работы в 111 дней. Также был посчитан бюджет НИИ, основная часть которого приходится на зарплаты сотрудников.

# СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

## 10.1. Введение

Работа человека на производстве нередко приводит к получению различных травм и заболеваний. С целью предотвращения или уменьшения последствий опасных и вредных факторов существует наука об охране труда.

Электропривод питателя сушильного барабана является частью основного технологического оборудования и должен обеспечивать надёжную и непрерывную работу в течение всего срока эксплуатации. В качестве основного элемента электропривода используется частотный преобразователь.

Целью данного раздела является анализ вредных и опасных факторов при наладке и обслуживании во время работы регулируемого электропривода питателя сушильного барабана, мероприятия по устранению действия вредных и опасных факторов, анализ пожаробезопасности.

## 10.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Законодательством РФ регулируются отношения между организацией и работниками, касающиеся оплаты труда, трудового распорядка, социальных отношений, особенности регулирования труда женщин, детей, людей с ограниченными способностями и др.

Согласно [ТК РФ Статья 92], продолжительность рабочего дня не должна превышать 40 часов в неделю. Для работников до 16 лет – не более 24 часов в неделю, от 16 до 18 лет – не более 35 часов, как и для инвалидов I и II группы. Для работников, работающих на местах, отнесенных к вредным условиям труда 3 и 4 степени – не более 36 часов [23].

Согласно [ТК РФ Статья 93], возможно установление неполного рабочего дня для беременной женщины; одного из родителей (опекуна, попечителя), имеющего ребенка в возрасте до четырнадцати лет (ребенка-

инвалида в возрасте до восемнадцати лет). Оплата труда при этом производится пропорционально отработанному времени. Ограничений продолжительности ежегодного основного оплачиваемого отпуска, исчисления трудового стажа и других трудовых прав при этом не имеется[24].

Согласно [ТК РФ Статья 96], при работе в ночное время, продолжительность рабочей смены должна составлять на один час меньше. К работе в ночные смены не допускаются: беременные женщины; работники, не достигшие возраста 18 лет; женщины, имеющие детей в возрасте до трех лет, инвалиды, работники, имеющие детей инвалидов, а также работники, осуществляющие уход за больными членами их семей в соответствии с медицинским заключением, матери и отцы одиночки детей до пяти лет[25].

Согласно [ТК РФ Статья 122], организация обязана предоставлять ежегодные отпуска продолжительностью 28 календарных дней. Для работников, занятых на работах с опасными или вредными условиями, предусматривается дополнительный отпуск[28].

Согласно [ТК РФ Статья 108] работнику в течение рабочего дня должен предоставляться перерыв не более 2 часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается[26].

Согласно [ТК РФ Статья 113] всем работникам предоставляются выходные дни, работа в выходные дни производится только с письменного согласия работника[27].

На работах с вредными или опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением, выдаются прошедшие обязательную сертификацию или декларирование соответствия средства индивидуальной защиты в соответствии с типовыми нормами, утвержденными в порядке, установленном Правительством Российской Федерации [Статья 221 ТК РФ][29].

### 10.3. Производственная безопасность

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ	Нормативные документы
	Эксплуатация	
1. Поражение электрическим током	+	ГОСТ 12.1.009-2017 ГОСТ 12.1.019-2009
2. Превышение уровня шума	+	СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96
3. Отклонение показателей микроклимата	+	ГОСТ 12.1.003-2014 Сан ПиН 2.2.4.548 – 96
4. Превышение уровня вибрации	+	СанПиН 2.2.4/2.1.8.566–96 ГОСТ 12.4.002 – 97

### 10.4. Анализ опасных и вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на работающего

#### 10.4.1. Поражение электрическим током

В соответствии с [ГОСТ 12.1.009-2017] к поражению электрическим током может привести прикосновение человека к токоведущим частям электроустановок находящихся под напряжением. Поражение проявляется в парализующем и разрушительном воздействии тока на внешние и внутренние органы – кожный покров, мышцы, органы дыхания, сердце, нервную систему.

Человек ощущает ток величиной в 0,005 А . Ток величиной в 0,05 А считается опасным для жизни, а ток в 0,1 А – смертельным[15].

В соответствии с требованиями ПУЭ и [ГОСТ 12.1.019-2009][16]. Для защиты персонала от случайного прикосновения к токоведущим частям электрооборудования предусмотрены следующие основные технические мероприятия[30]:

- 1) ограждение токоведущих частей;
- 2) применение блокировок электрических аппаратов;



- 3) установка в РУ заземляющих разъединителей;
- 4) устройство защитного отключения электроустановок;
- 5) заземление или зануление электроустановок;
- 6) применение разделяющих трансформаторов и малых напряжений;
- 7) применение устройств предупредительной сигнализации;
- 8) защите персонала от электромагнитных полей;
- 9) использование индивидуальных средств защиты.

Так как электропривод питателя относится к электроустановкам с напряжением не более 1000 В, с глухозаземлённой нейтралью и мощностью не выше 100 кВА, то сопротивление заземляющего устройства должно не превышать 4 Ом. Организационные мероприятия для обеспечения безопасности работ – это выполнение работ в электроустановках по наряду, распоряжению, в порядке текущей эксплуатации.

#### **10.4.2. Меры безопасности при обслуживании питателя**

Обслуживающий персонал постоянного рабочего места не имеет. Продолжительность технического обслуживания, осуществляемого при работающем питателе, не превышает 1 ч в смену. К обслуживанию питателя допускаются лица, которые сдали испытания в объёме техминимума, прошли инструктаж по технике безопасности и ознакомлены с руководством по эксплуатации питателя и его комплектующих изделий.

На предприятиях, опасных по газу и пыли, производство сварочных и автогенных работ (в каждом отдельном случае) должно производиться по специальному разрешению лица, ответственного за соблюдение правил безопасности на данном предприятии.

Ремонт взрывобезопасного электрооборудования должен производиться в соответствии с действующей инструкцией на данном предприятии.

Для обеспечения безопасных условий работы обслуживающего персонала должны быть выполнены следующие требования:

- опорные строительные конструкции должны быть рассчитаны, исходя из статических и динамических нагрузок от питателя и обеспечивать санитарные нормы уровня вибраций перекрытий, на которых устанавливается питатель;
- корпус и электрооборудование питателя должны быть заземлены путём присоединения к общему заземляющему контуру (магистрале) фабрики;
- ширина свободного прохода, а также прохода для надзора и ухода за механизмом должны быть не менее 1 м от наиболее выступающих частей.

При осмотре, ремонте и регулировке питателя его отключение от токоведущей сети должно быть произведено таким образом, чтобы была исключена возможность случайного включения питателя. На пусковых устройствах в обязательном порядке должна быть вывешена табличка с надписью «Не включать – работают люди».

### **10.4.3. Превышение уровня шума**

Шум — один из наиболее распространенных неблагоприятных факторов производственной среды. Основные производственные процессы, сопровождающиеся шумом — это работа насосов, вентиляторов и др. Учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, изменяются двигательная и секреторная функции желудка и других органов. Неблагоприятно отражается шум на нервной системе, вызывая головные боли, бессонницу, ослабление внимания, замедление психических реакций, что в конечном счете приводит к понижению работоспособности[14].

Для защиты от шума по [СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96] предусматриваются:

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты;
- установка звукоизолирующих кабин;
- звукоизолирующие кожухи и экраны;

Предельно допустимые уровни шума представлены в таблице, согласно вышеуказанному нормативному правовому акту СанПин[19].

Таблица – Предельно допустимые уровни шума

Рабочее место	Уровни звукового давления, дБ									По шкале
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Цех	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80
Щит управления	96	83	74	68	63	60	57	55	54	65

#### 10.4.4. Отклонение показателей микроклимата

Микроклимат производственных помещений – это комплекс физических факторов, оказывающих влияние на теплообмен человека и определяющих самочувствие, работоспособность, здоровье и производительность труда. Поддержание микроклимата рабочего места в пределах гигиенических норм – важнейшая задача охраны труда. Жизнедеятельность человека может нормально протекать лишь при условии сохранения температурного гомеостаза организма, что достигается за счет системы терморегуляции и деятельности других функциональных систем: сердечно-сосудистой, выделительной, эндокринной и систем, обеспечивающих энергетический, водно-солевой и белковый обмен. Для сохранения постоянной температуры тела организм должен находиться в термостабильном состоянии, которое оценивается по тепловому балансу. Тепловой баланс достигается координацией процессов теплопродукции и теплоотдачи.

Микроклимат по степени влияния на тепловой баланс человека подразделяется на:

- нейтральный;
- нагревающий;
- охлаждающий.

Нейтральный микроклимат – это такое сочетание его составляющих, которое при воздействии на человека в течение рабочей смены обеспечивает тепловой баланс организма, разность между величиной теплопродукции и суммарной теплоотдачей находится в пределах  $\pm 2$  Вт, доля теплоотдачи испарением влаги не превышает 30%.

Охлаждающий микроклимат – это сочетание параметров, при котором имеет место превышение суммарной теплоотдачи в окружающую среду над величиной теплопродукции организма, приводящее к образованию общего и/или локального дефицита тепла в теле человека ( $>2$  Вт).

Охлаждающий микроклимат приводит к обострению язвенной болезни, радикулита, обуславливает возникновение заболеваний органов дыхания, сердечно-сосудистой системы. Охлаждение человека (как общее, так и локальное) приводит к изменению его двигательной реакции, нарушает координацию и способность выполнять точные операции, вызывает тормозные процессы в коре головного мозга, что может быть причиной возникновения различных форм травматизма. При локальном охлаждении кистей снижается точность выполнения рабочих операций.

Нагревающий микроклимат – сочетание его параметров, при котором имеет место изменение теплообмена человека с окружающей средой, проявляющееся в накоплении тепла в организме ( $>2$  Вт) и/или в увеличении доли потерь тепла испарением влаги ( $>30\%$ ).

Воздействие нагревающего микроклимата вызывает нарушение состояния здоровья, снижение работоспособности и производительности труда. Нагревающий микроклимат может привести к заболеванию общего

характера, которое проявляется чаще всего в виде теплового коллапса. Он возникает вследствие расширения сосудов и уменьшения давления в них крови. Обморочному состоянию предшествует головная боль, чувство слабости, головокружение, тошнота.

Требования для обеспечения нормального микроклимата предусматривается, в соответствии с [Сан ПиН 2.2.4.548 – 96][21].

Микроклимат производственного помещения согласно вышеуказанному документу о санитарных правилах и нормах характеризуются:

- температурой воздуха:
  - в холодный период года  $t=(18\div 20)^{\circ}\text{C}$ ;
  - в тёплый период года  $t=(21\div 23)^{\circ}\text{C}$ ;
- влажностью воздуха:
  - в холодный период года  $(40\div 60)\%$ ;
  - в тёплый период года  $(40\div 60)\%$ ;
- скорость движения воздуха:
  - в холодный период года 0,2 м/с;
  - в тёплый период года 0,3 м/с.

Вредные химические вещества и пары на данном производстве отсутствуют.

Производственный процесс в цехе сушки относится к 1а группе (избытки явного тепла незначительны, отсутствуют значительные выделения влаги, пыли, особо загрязняющих веществ).

Работа выполняется в спецодежде. Вспомогательные помещения имеют гардеробное оборудование и душевые комнаты.

#### **10.4.5. Превышение уровня вибрации**

Одним из наиболее опасных для человеческого организма производственных факторов является вибрация. Под вибрацией понимается

колебание твердых тел. Основными источниками вибрации на производстве являются мощные и высокоскоростные механизмы, станки оптического производства, механической обработки, а также рассматриваемый объект ВКР в частности. Большое негативное воздействие этот фактор оказывает на отделы центральной нервной системы, желудочно-кишечного тракта и вестибулярного аппарата человека. Длительное воздействие вибрации на организм приводит к развитию профессиональных заболеваний, основным из которых является – виброболезнь, сопровождающаяся головокружением, онемением нижних конечностей и потерей ориентации в пространстве. Большую опасность для организма представляют вибрации частотой 6-9 Гц, так как эти частоты наиболее близки к собственным частотам внутренних органов человека.

Гигиенические нормы вибрации, воздействующей на человека на постоянном рабочем месте в цехе сведены в таблице согласно [СанПиН 2.2.4/2.1.8.566–96][20].

Таблица – Гигиенические нормы вибрации

Вид вибрации	Среднеквадратичная вибростойкость (числитель), $\text{м/с} \cdot 10^{-2}$ , не более, и логарифмический уровень вибростойкости (знаменатель), дБ, в октановых полосах, со среднегеометрическими частотами, Гц.					
	2	4	8	16	31,5	63
Общая	<u>1,3</u>	<u>0,45</u>	<u>0,22</u>	<u>0,2</u>	<u>0,2</u>	<u>0,2</u>
технология	108	99	93	92	92	92

При работе с ручным механизированным и пневматическим инструментом применяются средства индивидуальной защиты рук от вибрирующих объектов, указанные в [ГОСТ 12.4.002 – 97]. К ним относятся антивибрационные рукавицы с поролоновыми прокладками или

наладонниками из резины. Для изоляции рабочих от вибрирующего пола применяют специальную обувь на антивибрационной подошве; резино-войлочные маты; антивибрационные площадки; антивибрационные сидения[17].

В целях профилактики развития вибрационной болезни для работающих с вибрирующим оборудованием регламентируется режим работы – продолжительность рабочей смены, обязательные перерывы, отдых.

### **10.5. Экологическая безопасность**

Научно-технический прогресс - основа концепции ускорения социально-экономического развития общества. Неизбежным следствием научно-технического прогресса является не только улучшение качества жизни человека, защищённость его от многих природных факторов, но и резко возрастающие антропогенные нагрузки на объекты окружающей среды и, в первую очередь, на её наиболее уязвимый компонент-биосферу .

Характерным примером отрицательного воздействия на природную среду результатов хозяйственной деятельности в нашей стране может служить эксплуатация сушильных установок. Сушильные установки выбрасывают в воздушный бассейн отработанные дымовые газы с относительно высокими остаточной запыленностью и содержанием продуктов сгорания топлива. Основными видами загрязнений, выделяемыми в атмосферу после газоочистных аппаратов сушилок, является мельчайшая угольная пыль и в незначительной степени – окислы серы и азота. Предельно допустимый выброс (ПДВ) угольной пыли и сернистого газа после газоочистных аппаратов сушильных установок регламентируется приказом Минприроды России (Министерства природных ресурсов и экологии РФ) [об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе]. Указанными нормами предусматривается предельно допустимая концентрация (ПДК) выбрасываемых в атмосферу веществ в

приземном слое воздуха. Для угольной пыли и сернистого газа разовые ПДК принимаются равными 0,5 мг/м<sup>3</sup>, что при существующей высоте выбросов газов из сушилок 30 – 40 м обязывает производить очистку отработанных газов до 100 – 170 мг/м<sup>3</sup> (в зависимости от климатических условий в районе расположения предприятия)[22].

Для предотвращения проблем, связанных с охраной окружающей среды от негативных воздействий промышленных предприятий, предлагается следующие мероприятия: использование очистных устройств и сооружений, которые позволяют локализовать выброс. А также применение “безотходной технологии”, под которой следует понимать: комплекс мероприятий в технологических процессах, от обработки сырья до использования готовой продукции, в результате чего сокращается до минимума количество вредных выбросов и уменьшается воздействие отходов на окружающую среду до приемлемого уровня.

В этот комплекс мероприятий входят:

- создание и внедрение новых процессов получения продукции образованием наименьшего количества отходов;
- разработка систем переработки отходов производства во вторичные материальные ресурсы;
- разработка различных типов бессточных технологических систем и водооборотных систем на базе способов очистки сточных вод;
- создание территориально – промышленных потоков сырья и отходов внутри комплекса.

## **10.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Наиболее вероятные чрезвычайные ситуации на рассматриваемом рабочем месте: возникновение пожара, затопление и землетрясение.



### 10.6.1. Пожар как источник ЧС

Все производства подразделяются по пожароопасности на 5 основных категорий согласно [НБП 105-03]. Пожарная безопасность. Общие требования», для большинства помещений рабочего места установлена категория «Д». В помещении, где идет монтаж и наладка привода, установлен пожарный щит. Установлены огнетушители типа ОХВП и имеется пожарный кран[18].

Пожарная безопасность является одним из важнейших разделов охраны труда на производстве. Существенную роль в профилактике и предотвращении пожаров играет правильный выбор режима работы электрооборудования с учётом класса по пожароопасности, применения молниеотводов. В процессе получения изделия на линии видимые признаки, обуславливающие возникновения пожара, отсутствуют и, следовательно, данное производство можно отнести к категории Д (производство, в котором негорючие вещества и материалы находящиеся в холодном состоянии). Однако, в данном технологическом процессе пожар может возникнуть из-за таких короткого замыкания, вызывающих высокую температуру нагревания проводников, что приводит к их выплавлению из изоляционного материала. В этом отношении опасны недопустимые электрические перегрузки проводов и обмоток электрических машин. В местах плохого контакта соединения проводников вследствие большого переходного сопротивления выделяется большое количество тепла. Это приводит к повышению температуры и воспламенения изоляции. Были установлены общие требования пожарной безопасности к объектам различного назначения всех отраслей народного хозяйства при строительстве и эксплуатации. Пожарная безопасность должна обеспечиваться:

- системой предотвращения пожара;
- системой противопожарной защиты;
- организационно–техническими мероприятиями.

Пожарный ручной инструмент и инвентарь, размещенный на объекте, подлежит периодическому обслуживанию, включающему следующее:

1. Очистка от пыли, грязи и коррозии;
2. Восстановление соответствующей окраски.

Ящики с песком должны быть укомплектованы лопатой и иметь вместимость до 3 м<sup>3</sup>.

Конструкция помещения предусматривает безопасную эвакуацию людей на случай пожара. Число эвакуационных выходов должно быть не менее 2. Ширина путей эвакуации не менее 1 метра. При возникновении пожара необходимо принять меры по ликвидации очага пожара, вызвать пожарную команду, а свободные работники должны немедленно покинуть здание согласно плану эвакуации.

Основные мероприятия для снижения пожарной опасности:

- обеспечить прохождение первичного инструктажа при приеме на работу, затем не реже одного раза в год сдавать экзамен;
- для курения должны быть отведены специальные места;
- разместить на видных местах планы эвакуации и правила пожарной безопасности;
- иметь возможность снятия напряжения со всего оборудования с помощью расположенных вне помещения рубильников;
- следить за наличием и исправностью противопожарного инвентаря;
- контактная аппаратура должна быть снабжена искро- и дугогасящими устройствами;
- обязательное наличие блокировок и отключения электроустановок на случай короткого замыкания.

Производство сварочных и автогенных работ (в каждом отдельном случае) должно производиться по специальному разрешению лица, ответственного за соблюдение правил безопасности на предприятии.

## **10.8. Выводы по разделу**

На основании данного раздела были приняты проектные решения, которые способствуют уменьшению несчастных случаев и профессиональных заболеваний в производстве. А также обеспечивающие снижение вредных воздействий на окружающую среду, безопасность в чрезвычайных ситуациях, экономное расходование ресурсов.

Было рассмотрено влияние таких факторов, как: шум, вибрация и микроклимат. Реализованы методы предотвращения электропоражения персонала. Для обеспечения безопасности рассмотрены различные методы защиты от разных негативных факторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью выпускной квалификационной работы являлось исследование электропривода регулируемого сушильного барабана, а также его возможная структура, на основе комплектного преобразователя частоты 6SL3200-6AM23-8AN0.

В ходе работы было предложено через систему преобразователь частоты - асинхронный двигатель реализовать систему РЭП питателя, с реализацией законов скалярного управления по разомкнутой структуре.

В ходе исследования статического режима работы скалярного управления выяснилось, что электропривод не обеспечивает заданную область работы в указанном диапазоне регулирования скорости. Это не удовлетворяет техническому заданию.

Во время имитационного моделирования динамических режимов работы выяснилось, что система скалярного управления, которая была разработана, работает не устойчиво в требуемом диапазоне. При диапазоне регулирования 1:15 электропривод работает на пределе. Также система не обеспечивает требуемые показатели качества и не отработывает заданную диаграмму движения.

В связи с вышперечисленным, было реализовано бездатчиковое векторное управление асинхронным электроприводом.

Главное преимущество векторного закона регулирования над скалярным – повышенное качество переходных характеристик. Но тогда требуется настройка регуляторов контуров тока. Процесс оптимизации параллельных контуров соответствует оптимизации системы двухзонного электропривода постоянного тока без учёта влияния перекрёстных обратных связей. При использовании законов векторного управления в системе РЭП питателя получились примерно одинаковые результаты при отклонении нагрузки либо в меньшую, либо в большую сторону от номинальной. В момент

пуска в системе векторного частотно-токового управления, соответствующая настройка параметров регулятора, переходный процесс тока носит апериодический характер с максимальным значением.

Модели, которые построены во время работы, используют информацию без преобразовательных устройств, то есть напрямую. Данное упрощение является необходимым для реализации настройки параметров регуляторов, так как она возможна только во вращающейся системе. В реальных же системах используют прямое и обратное преобразование координат.

В разделе «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» было рассмотрена оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Также было проведено планирование и формирование бюджета научных исследований и определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

### Список использованных источников

1. Бабушкина Т.Б. Технологический режим производства ДСП-300, 2015.
2. Питатель скребковый протирочный ПСП для загрузки сушильных барабанов. Руководство по эксплуатации. 1985.
3. Пухов Ю.С. Транспортные машины. М., «Недра», 1991.
4. Мощинский Ю. А., Беспалов В. Я., Кирякин А. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным. – Электричество, 2015.
5. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Под общ. ред. Копылова И.П. Т.1. М., «Юрайт», 2012.
6. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для студентов высших учебных заведений. – М., «Академия», 2011. 368 с.
7. Преобразователь частоты 6SL3200-6AM23-8AN0 фирмы Siemens: Руководство по эксплуатации.
8. Чернышев А. Ю., Ланграф С. В., Чернышев И. А. Исследование систем «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель»: Методические указания. – Томск: Изд. ТПУ, 2003. 24с.
9. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых электроприводах. – Чебоксары: 1998. 172 с.
10. Справочник по автоматизированному электроприводу/ Под ред. Елисеева и Шинянского. – М.: Энергоатомиздат: 1983. 616 с.
11. Дементьев Ю. Н., Чернышев А. Ю., Чернышев И. А. Электрический привод: учебное пособие. – М.: Юрайт, 2018. 223 с.
12. Чернышев А. Ю., Ланграф С. В., Чернышев И. А. Исследование систем скалярного частотного управления асинхронным двигателем: Методические указания. – Томск: Изд. ТПУ, 2012. 23с.
13. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и

технологических комплексов. М: Издательский центр «Академия», 2014. 576 с.

14. ГОСТ 12.1.003 – 2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
15. ГОСТ 12.1.009-2017 ССБТ. Электробезопасность. Термины и определения
16. ГОСТ 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
17. ГОСТ 12.4.002 – 97 ССБТ. Средства индивидуальной защиты рук от вибрации. Общие технические требования
18. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности
19. СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки
20. СанПиН 2.2.4/2.1.8.566 – 96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы
21. Сан ПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений" (утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 1 октября 1996 г. N 21)
22. Приказ Минприроды России (Министерства природных ресурсов и экологии РФ) об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе
23. ТК РФ Статья 92. Сокращенная продолжительность рабочего времени
24. ТК РФ Статья 93. Неполное рабочее время
25. ТК РФ Статья 96. Работа в ночное время
26. ТК РФ Статья 108. Перерывы для отдыха и питания
27. ТК РФ Статья 113. Запрещение работы в выходные и нерабочие праздничные дни. Исключительные случаи привлечения работников к работе в выходные и нерабочие праздничные дни

28. ТК РФ Статья 122. Порядок предоставления ежегодных оплачиваемых отпусков
29. ТК РФ Статья 221. Обеспечение работников средствами индивидуальной защиты
30. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Глава 1.7 Заземление и защитные меры электробезопасности (Издание седьмое)