

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

Инженерная школа энергетика

Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение электроэнергетики и электротехники

Профиль – Энергосберегающие режимы работы электрических источников питания, комплексов и систем

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Электропривод питателя сушильного барабана

УДК 62-83:66.047.57

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Брусов Андрей Владимирович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев А.Ю.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко А.А.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ИШНКБ	Бородин Ю.В.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Отделение электроэнергетики и электротехники (ОЭЭ) инженерной школы энергетика (ИШЭ)	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭЭ ИШЭ	Дементьев Ю.Н.	Ph.D., к.т.н.		

Томск – 2018 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Универсальные компетенции	
Р1	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
Р2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками</i> как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
Р3	<i>Использовать</i> на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
Р4	<i>Использовать</i> представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.
Профессиональные компетенции	
Р5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социальноэкономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
Р6	<i>Ставить и 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.
Р7	<i>Выполнять 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.
Р8	<i>Проводить инновационные инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
Р9	<i>Проводить технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.

P10	Проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные</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 образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение электроэнергетики и электротехники

Профиль – Энергосберегающие режимы работы электрических источников питания, комплексов и систем

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель отделения

(Подпись) _____ (Дата) Дементьев Ю.Н.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Л	Брусову Андрею Владимировичу

Тема работы:

Электропривод питателя сушильного барабана

Утверждена приказом директора (дата, номер)

07.02.2018г. №795

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Материалы производственной практики, техническая литература, техническая документация
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ul style="list-style-type: none">- постановка задачи проектирования;- проектирование электропривода питателя сушильного барабана;- выбора типа преобразователя частоты и способа регулирования скорости;- расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристик электродвигателя;- разработка и исследование имитационной модели электропривода;- разработка раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»;- разработка раздела «Социальная ответственность»;- заключение.

Перечень графического материала	<ul style="list-style-type: none"> - функциональная схема электропривода; - компоновка технологического оборудования -имитационная модель; -графики переходных процессов электропривода; -план размещения светильников.
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Основное исследование	Чернышев А.Ю.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Фигурко А.А.
Социальная ответственность	Бородин Ю.В.

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев А.Ю.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Брусов А.В.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Л	Брусов Андрей Владимирович

Инженерная школа	ИШЭ	Отделение	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистр	Направление	Электроэнергетика и электротехника

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	30 % премии 20 % надбавки 16% накладные расходы 30% районный коэффициент
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	27,1 отчисления на социальные нужды

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Анализ конкурентных технических решений. Оценки перспективности проекта по технологии QuaD.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	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; - накладные расходы.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
2. <i>Оценочная карта QuaD</i>
3. <i>График Ганта</i>
4. <i>График проведения и бюджет НИ</i>
5. <i>Определение ресурсоэффективности проекта</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко А.А.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Брусов А.В		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Л	Брусову Андрею Владимировичу

Инженерная школа	ИШЭ	Отделение	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистр	Направление	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	<p>1. <i>Описание рабочего места на предмет :</i> <i>Разработка системы управления на пользовательском компьютере в помещении площадью 32 м². Проведение экспериментов на стенде с электрооборудованием напряжением до 380 вольт.</i></p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	<p>1. <i>Анализ вредных факторов, проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>Расчет освещения рабочей зоны, которое должно соответствовать СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03, не снижающее зрение человека.</i> – <i>Уменьшение уровня шума.</i> – <i>Проверка уровня воздействия электромагнитного излучения и статического электричества.</i> – <i>Мероприятия для решения проблемы низкой подвижности воздуха.</i> – <i>Мероприятия для уменьшения вибрации.</i> <p>2. <i>Анализ опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>Составление правил работы с исследуемым оборудованием для предотвращения травматизма от движущихся механизмов.</i> – <i>Электробезопасность.</i> <p>3. <i>Охрана окружающей среды:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>Правила утилизации твердых отходов.</i> – <i>Анализ влияния электромагнитного и теплового излучения. Меры уменьшения влияния данных факторов.</i> <p>4. <i>Защита в чрезвычайных ситуациях:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>Наиболее вероятным ЧС при исследовании и проверке системы ПЧ – АД являются пожар на рабочем месте.</i> <p>5. <i>Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>Перечень законодательных и нормативных документов в порядке их цитирования по пунктам раздела.</i>
Перечень расч-го и граф-го материала:	<p><i>Расчет искусственного освещения для помещения.</i></p>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ИШНКБ	Бородин Ю.В.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Брусов А.В.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит страниц 156, таблиц 29, рисунков 46, источников 28, приложений 1.

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	12
1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ЦЕХА СУШКИ	14
1.1. Описание технологического процесса	14
1.2. Сушильный барабан	17
2. ПИТАТЕЛЬ СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА	21
2.1. Состав, устройство и работа питателя	21
2.2. Кинематическая схема	25
2.3. Регулирование скорости питателя	27
2.4. Определение приведённого момента нагрузки и приведённого момента инерции электропривода питателя	28
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ВАО-92-12/8/6/4	31
3.1. Расчёт параметров двигателя при его работе на первой скорости	31
(6 пар полюсов)	31
4. ПОСТРОЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ВАО-92-12/8/6/4	37
4.1. Механические характеристики асинхронного двигателя ВАО-92-12/8/6/4	37
4.1.1. Первая скорость	37
4.5. Электромеханические характеристики асинхронного двигателя ВАО-92-12/8/6/4	40
5. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ ВАО-92-12/8/6/4	43
6. ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ	47
6.1. Обоснование выбора типа двигателя	47
6.2. Выбор двигателя	48
6.3. Проверка выбора двигателя	49
6.4. Расчёт основных параметров и характеристик двигателя	51
6.5. Динамическая модель двигателя АИМ 180 М6	58
7. ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ	63
7.1. Преобразователь частоты 6SL3200-6AM23-8AN0	63

8. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПИТАТЕЛЯ.....	65
8.1. Регулирование скорости короткозамкнутого асинхронного двигателя изменением частоты.....	65
8.2. Регулирование скорости электропривода с помощью закона $U_{1\phi} / f_1 = const$	67
8.3. Регулирование скорости электропривода с помощью закона $U_{1\phi} / f_1 = const$ с $I \cdot R$ - компенсацией	70
9. РАЗРАБОТКА ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ	76
9.1. Оптимизация системы автоматического управления регулируемого электропривода.....	76
9.1.1. Расчет параметров силовой цепи.....	76
9.1.2. Оптимизация САР потокосцепления	79
9.1.3. Оптимизация САР скорости	85
10. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОЗОННОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ	88
11. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	94
11.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	95
11.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования	95
Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.....	95
11.1.2. Технология QuaD	96
11.1.3. SWOT-анализ.....	99
11.2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	106
11.3. Планирование научно-исследовательских работ.....	107
11.3.1. Структура работ в рамках научного исследования	107

11.3.2	Определение трудоемкости выполнения работ	108
3.3	Разработка графика проведения научного исследования	109
11.3.4.	Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	113
11.3.4.1.	Основная заработная плата исполнителей темы	113
3.4.2	Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	116
11.3.4.3	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	116
11.3.4.4.	Накладные расходы	117
11.3.4.5.	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	118
11.4.	Определение ресурсоэффективности проекта	118
12.	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	122
12.1.1.	Описание технологического процесса и рабочего места.....	122
12.1.2.	Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению.....	123
12.1.3.	Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению.....	124
12.2.	Экологическая безопасность.....	127
12.3.	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	128
12.4.	Правила и организационные вопросы обеспечения безопасности ..	130
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	132
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	136

ВВЕДЕНИЕ

Деревообрабатывающая промышленность относится к взрывоопасным производствам с большой энергоемкостью. В настоящее время основные механизмы на предприятиях управляются с помощью электрических приводов. К системам электропривода для основных технологических механизмов предъявляются высокие требования. Поскольку, совершенство системы электропривода в большей степени увеличивает 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. Постоянное усовершенствование технологического процесса ставит задачу создания и внедрения регулируемых систем электропривода в производство.

На предприятиях взрывоопасных производств в основном применяются асинхронные взрывозащищённые электродвигатели. Технологические механизмы во многом отличаются друг от друга по своим режимам работы. Большинство таких механизмов исходя из технологического процесса, нуждаются в диапазоне регулирования скорости от 1:2 до 1:10, для обеспечения нужного качества и количества продукции. Так, для питателей различного типа, применяемых на деревообрабатывающих производствах, необходимо регулирование скорости в пределах 1:3 до 1:15, поскольку этого требует технологический процесс. 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 не позволяет в полной мере осуществить их комплексную автоматизацию. Использование регулируемого электропривода во множестве случаев, приводит не только к увеличению количества выпускаемой продукции и улучшению её качества, но и к значительной экономии электроэнергии.

В настоящее время электрический привод для большого количества механизмов может быть реализован на основе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, управляемым от статического преобразователя частоты. Регулирование скорости изменением частоты питающей сети можно осуществлять плавно, в широком диапазоне, а так же выше и ниже естественной характеристики. На ряду с этим регулировочные характеристики имеют высокую жёсткость, а двигатель сохраняет большую перегрузочную способность. За счет высоких характеристик, регулирование изменением частоты имеет все более широкое применение. К тому же, на деревообрабатывающих производствах, система преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД), является одним из возможных способов создания регулируемого электропривода. В сравнении с приводом постоянного тока система ПЧ-АД имеет свои достоинства, такие как простота в эксплуатации и настройке, так же есть недостаток – большая стоимость преобразователя частоты.

Целью настоящей магистерской диссертации является исследование механизма скребкового питателя для сушильного барабана с электроприводом переменного тока на основе системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель. Необходимо рассмотреть законы частотного регулирования скорости для разработки и создания имитационной модели рассмотрение законов регулирования скорости, системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель с целью построения имитационной модели для возможной реализации в системе регулируемого электропривода питателя сушильного барабана.

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ЦЕХА СУШКИ

1.1. Описание технологического процесса

Необходимый для процесса сушки горячий газ вырабатывается в топке. Он смешивается с обратным воздухом, тангенциально подается подается в смесительной камере, до достижения необходимой температуры на входе в сушилку. По каналу горячего газа смешанный воздух подается на вход в барабан.

Регулировка объема воздуха производится с помощью регулировочных заслонок в зависимости от величины разряжения в топке. Сырая стружка через загрузочный желоб подается во вращающийся барабан сушилки. Поступающая в барабан влажная стружка вступает в контакт с горячим газом и по мере нагрева происходит испарение влаги.

Во время процесса сушки горячий газ насыщается паром. Материал перемещается за счет вращения самого барабана и встроенных в него элементов. Поток горячего газа при этом поддерживает механическую транспортировку. Стружка мелкой фракции быстрее просушивается и пролетает через барабан, а более крупная и влажная стружка дольше задерживается внутри барабана. Тем самым достигается приблизительное равенство влажности материала на выходе из барабана. Под циклонами мелкая фракция объединяется и выводится посредством лоткового цепного транспортера. Основной поток стружки и поток мелкой фракции в нормальном режиме подаются в направлении технологической цепочки, а в случае неисправности и аварийных случаях – во временное хранилище.

Поток воздуха создается вентилятором большой мощности. Он регулируется либо за счет частотного привода, либо его мощность регулируется дроссельной заслонкой. С помощью системы регулирования вентилятор выводится в свою рабочую точку. Воздух насыщенный небольшим

количеством мелкой фракции стружки, с помощью батарей циклонов отделяется от материала и делится на обратный и отработанный воздух.

Температура отработанного воздуха является мерилем конечной влажности стружки, и она регулируется. За счет более высокой температуры на выходе достигается пониженная конечная влажность, а при низкой температуре на выходе – более высокая конечная влажность.

Подача тепла регулируется за счет температуры на выходе.

Для регулирования количества воздуха топки используется вакуум (разряжение).

Регулирование происходит с помощью двух регулируемых заслонок с электроприводом. В зависимости от экологических требований по выбросу пыли отработанный воздух выводится через фильтр или прямо в окружающую среду.

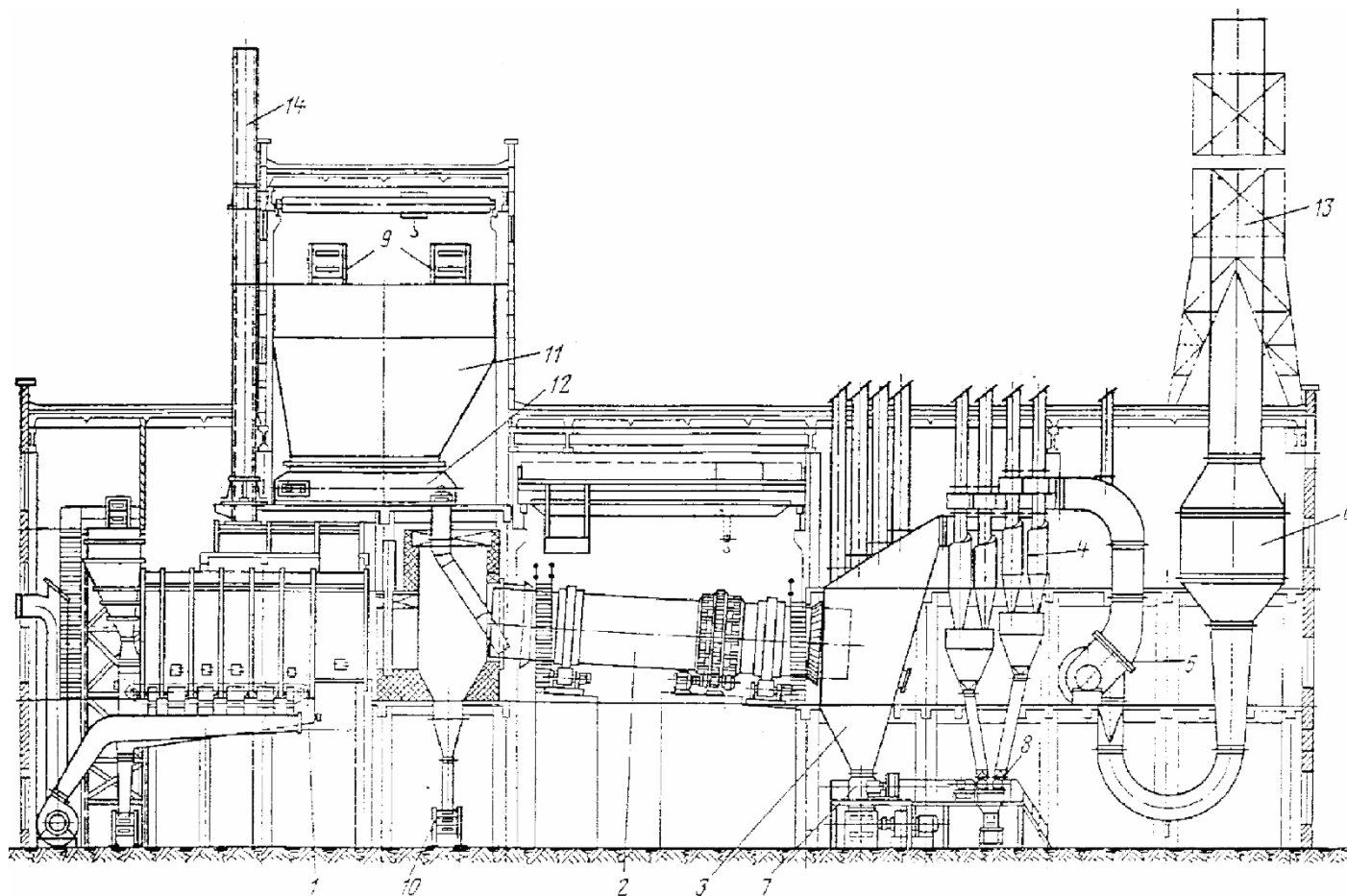


Рисунок 1.1 - Компоновка технологического оборудования: 1 – топка; 2 - сушильный барабан; 3 – разгрузочная камера; 4 – батареи циклонов; 5 - дымосос; 6 – мокрый аппарат; 7 – скребковый барабанный питатель; 8 – шлюзовой завор; 9 – конвейеры влажной стружки; 10 – гидрозатвор; 11 - бункер сырой стружки;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

1.2. Сушильный барабан

Сушильный барабан представляет из себя полый сварной цилиндр, с внутренней части которого к стенкам приварены лопасти. С горячей стороны барабана находится кожух, с его помощью мягкое манжетное уплотнение перенесено от горячей части сушильного барабана. Так же с горячей стороны 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 подсосу воздуха в количествах, увеличивающих объём газов за сушилкой примерно на 1/3 части общего расхода сушильного агента, получаемого при сжигании топлива и его разбавления.

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 ³ .	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

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 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.

Внешний вид сушильного барабана для сушки древесных частиц представлен на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 - Внешний вид сушильного барабана

Пуск барабанной сушилки осуществляется в следующем порядке:

- 1) включают систему промвентиляции;
- 2) открывают клапан растопочной трубы;
- 3) производят розжиг топки;
- 4) включают в работу конвейеры для выдачи сухого угля, питатели разгрузочной камеры, циклонов, а так же конвейеры угольной пыли;
- 5) подают защитный пар в смесительную и разгрузочную камеры;
- 6) включают в работу сушильный барабан;
- 7) включают дымосос с закрытым направляющим аппаратом при достижении температуры в топке более 500 °С;
- 8) включают подачу сырой стружки в сушилку при минимальной производительности, указанной в режимной карте;
- 9) открывают направляющие аппараты дымососа и одновременно закрывают клапан растопочной трубы;
- 10) увеличивают подачу стружки в сушилку до указанной в режимной карте и одновременно прекращают подачу защитного пара в смесительную и разгрузочную камеры;
- 11) увеличивают подачу топлива в топку.

После того как температура газов перед сушилкой и перед дымососом достигнет величин, указанных в режимной карте, сушильная установка обслуживается как при стационарной работе с непрерывной и равномерной подачей сырой стружки в сушилку.

Остановку барабанной сушилки осуществляют в следующем порядке:

- 1) подают защитный пар в смесительную и разгрузочные камеры;
- 2) прекращают подачу топлива в топку;
- 3) закрывают направляющие аппараты дутьевых вентиляторов и дымососа;
- 4) открывают клапан растопочной трубы;
- 5) прекращают подачу сырой стружки в сушильный барабан;
- 6) останавливают дымосос;

- 7) прекращают подачу пара в смесительную и разгрузочную камеры при снижении температуры в разгрузочной камере менее 100 °С;
- 8) останавливают сушильный барабан после прекращения выхода стружки из него;
- 9) после остановки сушильного барабана выключают питатели разгрузочной камеры, циклонов (батареи пылеуловителей) и конвейеры для выдачи сырой стружки;
- 10) после остановки всех транспортных средств выключают систему вентиляции.

При аварийной остановке устройств, подающих сырую стружку в сушильный барабан, или забивке его загрузочного желоба, необходимо:

- 1) остановить питатели сырой стружки (при забивке загрузочного желоба);
- 2) подать защитный пар в смесительную и разгрузочную камеры;
- 3) остановить дутьевые вентиляторы и прекратить подачу топлива в топку;
- 4) остановить дымосос и открыть клапан растопочной трубы;
- 5) прекратить подачу пара в сушильный тракт при снижении температуры в разгрузочной камере менее 100 °С;
- 6) остановить сушильный барабан (после прекращения выхода стружки из барабана), питатели разгрузочной камеры и циклонов (батареи пылеуловителей), выдачный тракт сухой стружки и промвентиляцию.

После полной остановки сушильного агрегата тщательно осмотреть и очистить весь сушильный тракт от отложений стружки и древесной пыли.

2. ПИТАТЕЛЬ СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА

Питатель скребковый протирочный ПСП предназначен для равномерной подачи, разрыхления и загрузки в сушильные барабаны влажных древесных частиц крупностью до 40 мм и влажностью до 30% [2].

2.1. Состав, устройство и работа питателя

Питатель это механизм непрерывного действия, с главным рабочим цепь с размещёнными на ней скребками, представляющий собой две пластинчатые втулочные цепи, связанные между собой скребками.

В движение цепь приводит приводной вал с двумя восьмью зубчатыми звездочками, который установлен на приводной секции.

Скребок питатель герметичен. Соединение секций между собой производится за счет фланцев, для большей герметичности между ними укладываются прокладки из асбеста.

Секция имеет вид закрытого желоба сварной конструкции. Внутри секции расположены нижние и верхние направляющие полосы, по которым передвигается тяговая цепь со скребками. Для устранения возможности загиба тяговой цепи в вертикальной плоскости, в связи со сходом её с тяговых звездочек, над направляющими сверху установлены ограничители.

Приводная секция представляет из себя сварную металлическую конструкцию, которая состоит из корпуса со смотровыми и разгрузочными люками. На секции монтируется приводной вал с подшипниками и тяговыми звёздочками.

Натяжная секция является сварной металлической конструкцией, которая состоит из герметичного корпуса, вала и натяжного устройства, верхней постели имеющей неподвижную решетку. Натяжная секция имеет люк для удобного монтажа, осуществления ремонта и замены верхней постели, тяговой цепи с расположенными на ней скребками и направляющих полос.

Натяжение тяговой цепи осуществляется с помощью натяжного устройства с двумя винтами для натяжения. Величина натяга составляет 350мм. Для того, чтобы не нарушалась герметичность питателя, натяжной вал снабжён уплотнительными устройствами.

В секция натяжения находится четыре люка, предназначенных для визуального осмотра внутренней части секции, и удобства проведения монтажных и ремонтных работ тяговой цепи со скребками, направляющих полос трения и верхней постели.

Длина питателя обусловлена расстоянием от оси бункера до точки загрузки сушильного барабана и может составлять от 3,5 до 6,5м.

Размеры а также параметры питателя ПСП приведены в таблице 1.2.

Электрическая часть питателя разработана для его эксплуатации в условиях помещений класса В – Ia. Электрооборудование, установленное в месте размещения питателя, выполнено взрывозащищенным, в соответствии с п. 7.3.66 ПУЭ. Управляющая аппаратура устанавливается в не опасном помещении по газу и пыли.

Таблица 2.1 - Параметры и размеры питателя ПСП

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

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

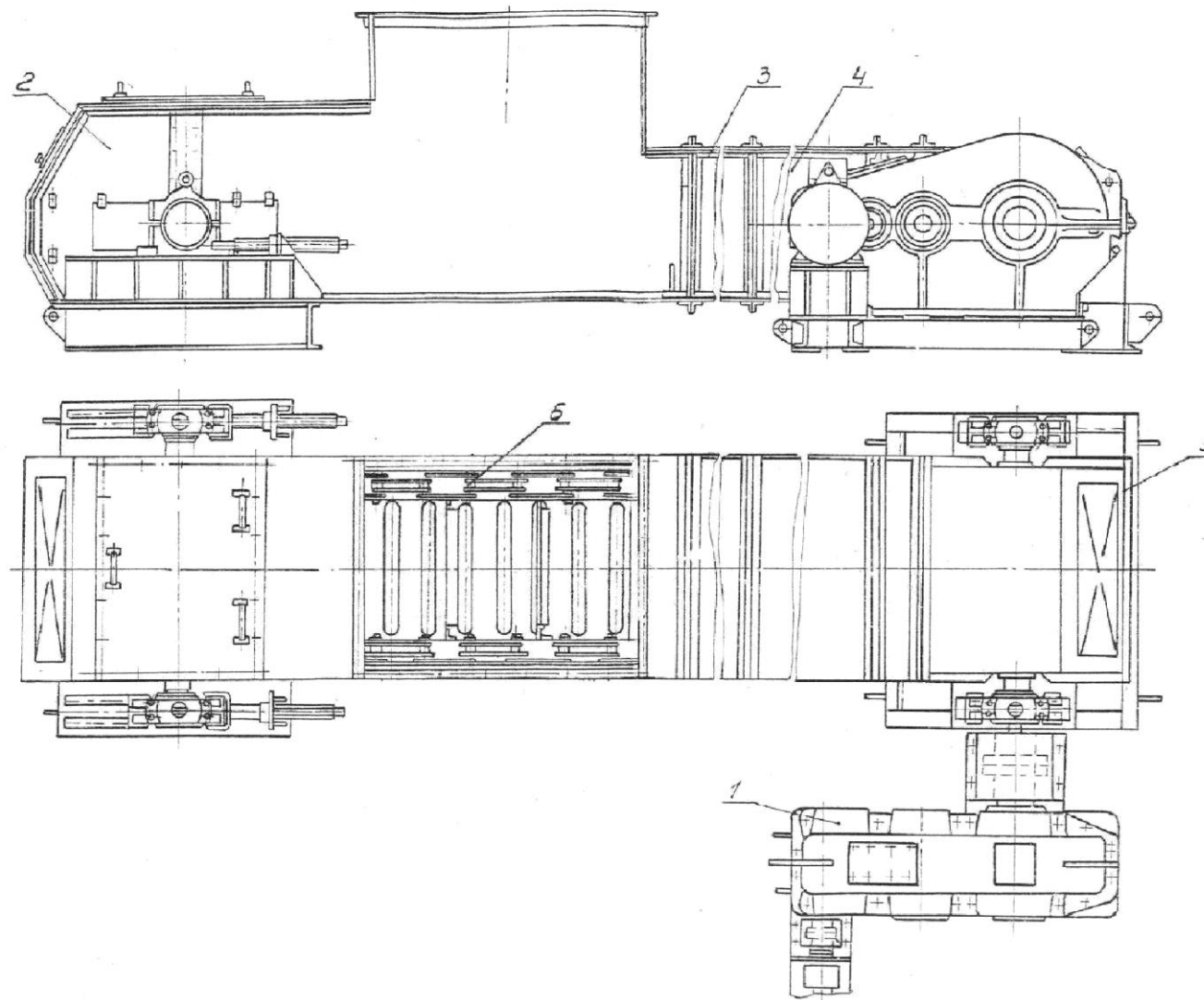


Рисунок 2.1 - Питатель скребковый протирочный: 1 – привод; 2 – секция натяжная; 3, 4 – секции; 5 – приводная секция;
6 – цепь тяговая со скребками

На деревообрабатывающих предприятиях в питатель работает в тяжелых условиях, в связи с этим к его эксплуатации предъявляют особые требования. Необходим регулярный надзор, чистка также своевременный профилактический ремонт обеспечивают безотказную 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
Мощность на валу, кВт	15	25	30	36
Частота вращения, об/мин	490	735	980	1470
КПД, %	79	85	88	87
cosφ	0,55	0,68	0,86	0,89
$M_n / M_{ном}$, о.е.	1,1	1	0,8	0,8
$M_{max} / M_{ном}$, о.е.	2	2	1,9	2
$I_n / I_{ном}$, о.е.	5	6	6	7
Момент инерции ротора, кг·м ²	0,69			

Таблица 2.3 - Параметры редуктора

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

Для надежной эксплуатации питателя необходимо соблюдать следующие условия:

- загрузка производится без остановок и равномерно в диапазоне производительности питателя, согласно его технологической характеристики;
- регулярно проводить технологическое обслуживание, являющееся основным мероприятием для профилактики, которое повышает срок работы питателя, уменьшает объем ремонтных работ, увеличивает производительность труда рабочих путем сокращения простоем оборудования;
- в цехе сушки, где используется питатель, должна соблюдаться чистота, регулярно производится уборка и чистка электрооборудования пылесобирающими устройствами;
- нижний уровень влажных древесных частиц в бункере должен быть на уровне, не менее одной третьей высоты бункера;
- силовое электрооборудование скребкового питателя необходимо питать от трёхфазной сети переменного тока напряжением
- силовое электрооборудование питателя должно питаться от сети переменного трёхфазного тока напряжением 380 В, частотой 50 Гц.

2.2. Кинематическая схема

Кинематическая схема электропривода питателя изображена на рисунке 2.2.

Цифрами на рисунке 2.2 обозначены: 1 – двигатель; 2 – муфта упругая МУВП1 – 48; 3 – редуктор ЦТНД – 500; 4 – муфта жесткая; 5 – приводной вал с ведущими звёздочками; 6 – тяговая цепь со скребками; 7 – ведомый вал.

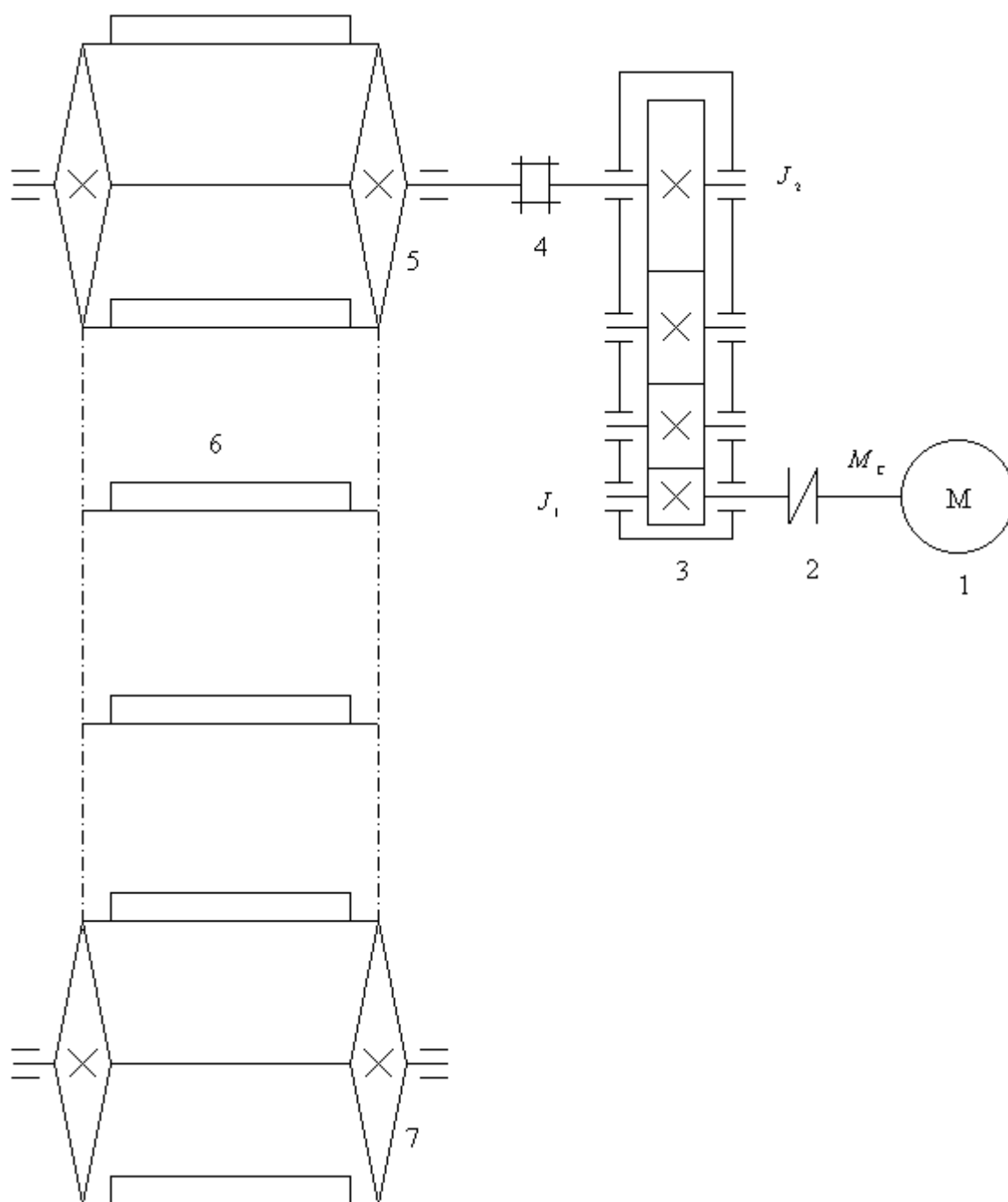


Рисунок 2.2 – Кинематическая схема привода питателя

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

$v_{\min} = 0,054$ 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;

ρ – радиус приведения кинематической схемы между исполнительным органом и валом двигателя;

η – общий КПД.

Так как питатель является скребковым конвейером [3], то тяговое усилие определим как

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

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

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

движению грузёной ветви, Н;

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

Н;

$L = 3,5 м$ - расстояние между осями приводного и натяжного валов;

$q_m = 52,4 \text{ кг} / \text{м}$ - масса 1м 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;

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

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

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

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

С учётом выше изложенного имеем:

$$q = const = 364 \text{ кг} / \text{м};$$

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

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

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

Определим общий КПД механизма питателя

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

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

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

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

Радиус приведения кинематической схемы:

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

Тогда момент нагрузки, приведённый к валу двигателя, будет равен:

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

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;

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

Моменты инерции определены по общепринятым выражениям с учётом массы, геометрических форм и размеров муфты и звёздочек.

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

элементов питателя,

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

$$\rho = \frac{v}{\omega_{\text{ДВ}}} = 0,0025 \quad - \text{ радиус приведения кинематической схемы, между}$$

исполнительным органом и валом двигателя.

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 СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ВАО-92-12/8/6/4

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

Для расчета механических и электромеханических характеристик АД нужно использовать его математическую модель, которая представляется множеством схем замещения. Более удобной и простой для инженерных расчетов АД приходится Т-образная схема замещения [9], представленная на рисунке 3.1.

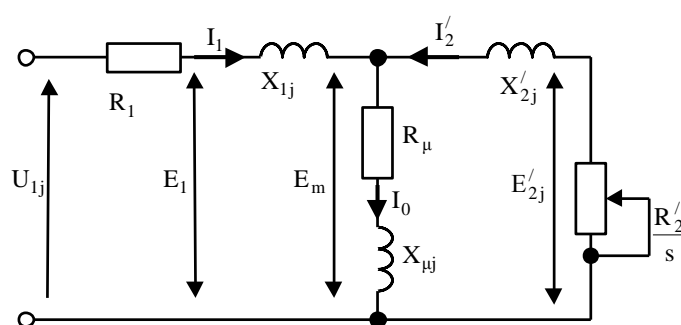


Рисунок 3.1 - Схема замещения АД

Основные уравнения АД, соответствующие данной схеме замещения:

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

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

Для определения параметров Т-образной схемы замещения АД нужны следующие каталожные данные:

- $P_n = 15 \text{ кВт}$ – 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;

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

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

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

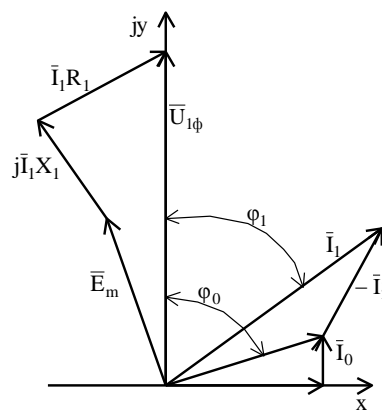


Рисунок 3.2 - Векторная диаграмма асинхронной машины

С помощью этих данных можно найти параметры схемы замещения при определенных допущениях:

- механические и магнитные потери в электродвигателе составляют $0,2P_n$;
- активные сопротивления обмоток ротора и статора считаются не зависящими от режима работы электродвигателя, т.е. не учитываются эффекты вытеснения.

Ток холостого хода двигателя рассчитаем из выражения:

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

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

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

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

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

при частичной нагрузке;

$$\cos \varphi_{ржс} = \cos \varphi_n \cdot 0,98 = 0,539 - \text{ коэффициент мощности при частичной}$$

нагрузке;

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

$$P_{жс} = \frac{P}{P_n} = 0,75 - \text{ коэффициент загрузки двигателя}.$$

КПД и коэффициент мощности при частичной нагрузке в литературе можно найти редко, а для многих электродвигателей такие данные вовсе отсутствуют. Данные параметры можно найти, исходя из следующих соображений:

– АД проектируются исходя из того, что самый большой КПД получается при нагрузке на 10 – 15 % меньше номинальной. Электродвигатели рассчитываются таким образом потому, что большая их часть в силу типовой дискретной шкалы мощностей работают с недогрузкой. В связи с этим КПД при номинальной нагрузке и нагрузке $P_{жс} = 0,75$ имеют практически одинаковые значения, т.е.

$$\eta_{ржс} \approx \eta_n \tag{3.2}$$

– $\cos \varphi$ при нагрузке $P_{жс} = 0,75$ сильно отличается от $\cos \varphi$ при номинальной нагрузке, это отличие в большей степени зависит от мощности электродвигателя и для многих серий АД с порядочной для применения точностью подчиняется зависимости, приведенной на рисунке 3.8.

Из формулы Клосса найдем соотношение для нахождения критического скольжения

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

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

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

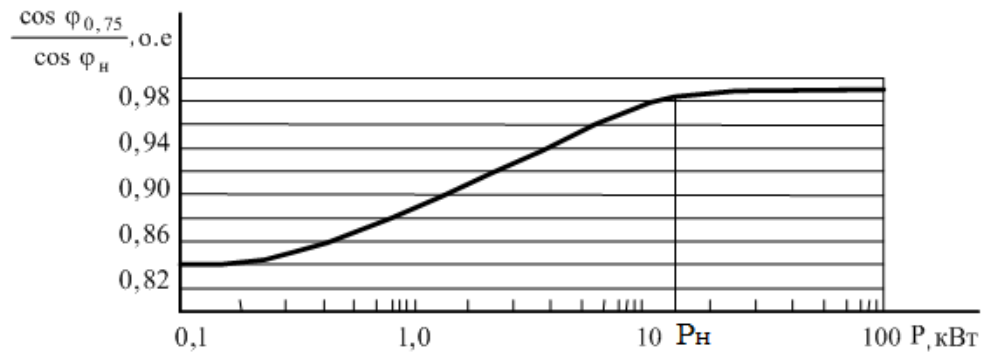


Рисунок 3.3 - Зависимость $\frac{\cos \varphi_{0,75}}{\cos \varphi_H}$ от мощности асинхронного двигателя

Величина коэффициента β расположена в пределах от 0,6 до 4, поэтому принимаем $\beta = 1$.

Далее найдем ряд промежуточных коэффициентов:

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

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

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

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

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

$$C = \frac{1}{s_H \cdot s_K} - \left(\frac{1}{s_K^2} + \frac{1}{s_H^2} \right) \cdot A_0 \cdot A_1 = \frac{1}{0,02 \cdot 0,086} - \left(\frac{1}{0,086^2} + \frac{1}{0,02^2} \right) \cdot$$

$$\cdot 0,122 \cdot 2,301 = -165,53$$

Теперь по рассчитанным значениям проверяем величину коэффициента β :

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

Активное сопротивление обмотки ротора, приведённое к обмотке статора АД:

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

Активное сопротивление обмотки статора найдем по следующему выражению:

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

Рассчитаем параметр γ , с помощью которого найти индуктивное сопротивление короткого замыкания $X_{кн}$:

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

Тогда:

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

Чтобы выделить из индуктивного сопротивления $X_{кн}$, сопротивления рассеяния фаз статора и ротора, воспользуемся соотношениями, которые справедливы для серийных асинхронных двигателей.

Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведённое к статорной, может быть найдено:

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

Индуктивное сопротивление обмотки статора рассчитаем по следующему выражению:

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

Исходя из 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:

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

Индуктивность фазы обмотки статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1n}}{2 \cdot \pi \cdot f_H} = \frac{0,735}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,002341 \text{ Гн.}$$

Индуктивность фазы обмотки ротора:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2n}}{2 \cdot \pi \cdot f_H} = \frac{0,735}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,003154 \text{ Гн.}$$

Индуктивность цепи намагничивания:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu n}}{2 \cdot \pi \cdot f_H} = \frac{18,019}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,043 \text{ Гн.}$$

Расчет параметров на остальных скоростях с изменением числа пар полюсов производим аналогично. Полученные данные сведем 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 ⁻³	$L'_{2\sigma},$ Гн·10 ⁻³	$L_{\mu},$ 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

Воспользуясь параметрами схемы замещения можно рассчитать электромеханические и механические характеристики.

4. 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 методике приведенной в разделе 3.3, используя данные для расчёта приведенные в таблице 3.1.

Расчёт параметров проведем в программной среде Mathcad, так как с её помощью можно быстро определить коэффициент β .

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

4.1.1. Первая скорость

Для построения механической характеристики асинхронного двигателя при его работе на первой скорости определим критический момент АД в двигательном режиме:

$$M_k = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2} \right]} =$$
$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 52,359 \cdot 1,026 \cdot \left[0,495 + \sqrt{0,495^2 + 1,749^2} \right]} = 584,357 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (4.1)$$

Принимая диапазон изменения скольжения от 1 до 0, с шагом 0,001, по формуле Клосса построим механическую характеристику электродвигателя:

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + a \cdot s_k)}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k} + 2 \cdot a \cdot s_k}, \quad (4.2)$$

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:

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

Механическая характеристика, при работе электродвигателя на первой скорости приведена на рисунке 4.1, характеристика 1.

Исходя из построенной механической характеристики произведём анализ полученных данных, и сравним их с паспортными.

Номинальный момент:

$$M_{n(\text{паспорт})} = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{15000}{51,312} = 292,325 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (4.3)$$

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:

$$M_k = k_{\max} \cdot M_{n(\text{паспорт})} = 2 \cdot 292,325 = 584,65 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (4.4)$$

Пусковой момент:

$$M_n = k_n \cdot M_{n(\text{паспорт})} = 1,1 \cdot 292,325 = 321,557 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (4.5)$$

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 электродвигателя при его работе на второй и третьей скоростях рассчитываются аналогично, расчеты сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1. Основные точки механической характеристики АД

Число пар полюсов	$M_{n, \text{расч}}$ Н · м	$M_{n, \text{пасп}}$ Н · м	$M_{n, \text{расч}}$ Н · м	$M_{n, \text{пасп}}$ Н · м	$M_{k, \text{расч}}$ Н · м	$M_{k, \text{пасп}}$ Н · м	ω_0 , рад / с	ω_n , рад / с	ω_k , рад / с
p = 6	121,2	321,557	293,572	292,325	584,351	584,65	52,36	51,313	47,844
p = 4	135,3	324,806	334,491	324,806	649,612	649,612	78,54	76,969	71,766
p=3	106,5	233,86	301,158	292,325	555,418	555,418	104,72	102,625	96,331

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 4.2. Паспортные характеристики приведены пунктирной линией.

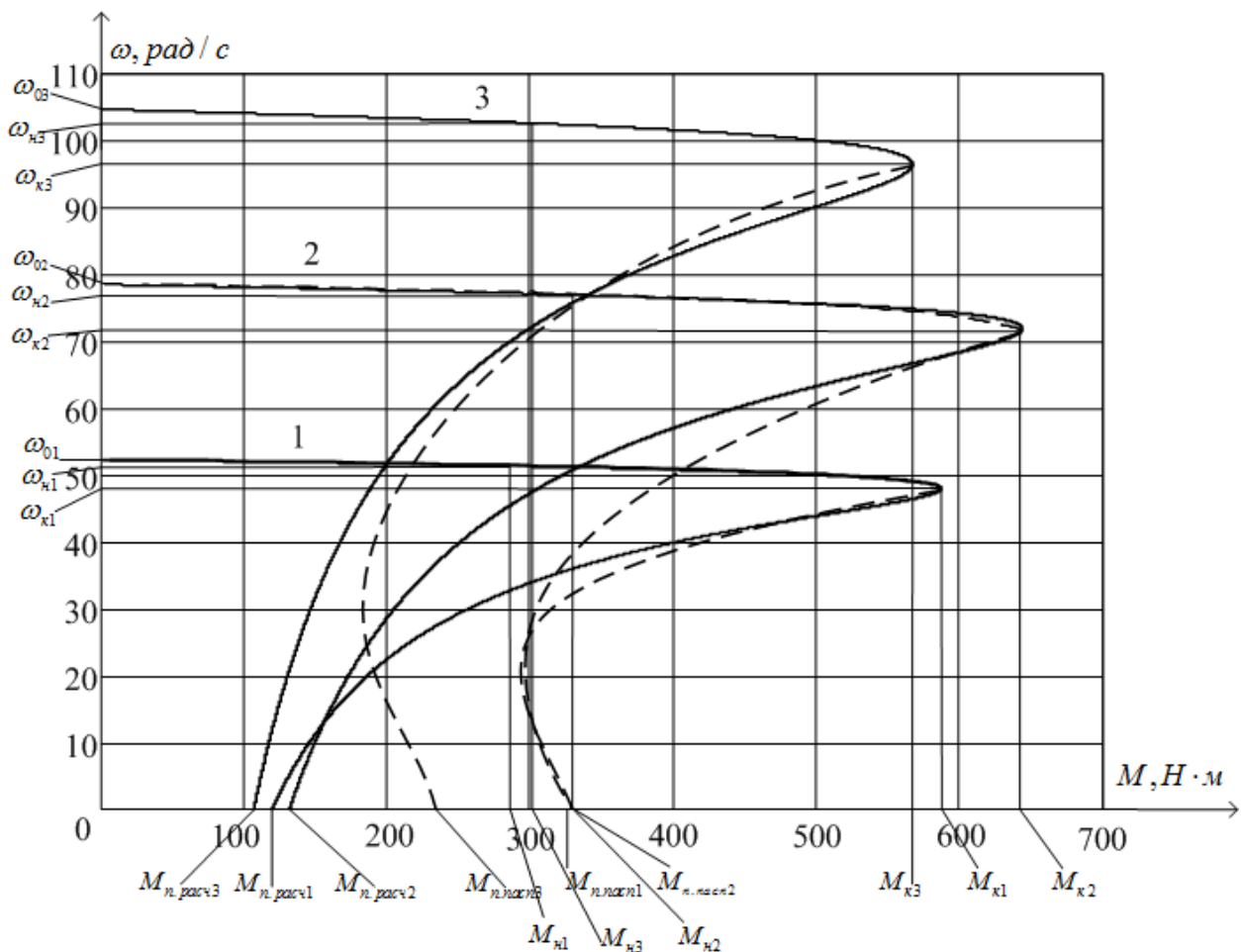


Рисунок 4.1 - Механические характеристики асинхронного двигателя ВАО-92-12/8/6/4, при включении его на первую(1), вторую(2) и третью(3) скорости

Полученная механическая характеристика аналогична характеристике асинхронного двигателя с ненасыщенной магнитной системой, вид данной характеристики задается зависимостью индуктивного сопротивления обмотки 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 ω_k до ω_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 .

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

Для АД с короткозамкнутым ротором интересна электромеханическая характеристика $I_1 = f(\omega)$, показывающая как зависит ток статора скорости. Ток в статорной обмотке I_1 находится из сложения векторов тока намагничивания \bar{I}_0 и тока ротора \bar{I}'_2 . Как правило это производится с использованием круговой диаграммы.

Предполагая ток намагничивания АД I_0 реактивным ($I_{0A} = 0$), ток статорной обмотки I_1 через приведённый ток обмотки ротора I'_2 можно рассчитать по формуле:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + (I'_2)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2 \cdot \sin \varphi_2}, \quad (4.6)$$

$$\text{где: } I'_2 = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2}}, \quad (4.7)$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_{кн}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2}}. \quad (4.8)$$

Для построения электромеханических характеристик подставим значения в формулы 4.6 – 4.8.

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.

Задав изменение скольжения в диапазоне от 0 до 1, с шагом 0,001, построим электромеханические характеристики АД токов обмоток ротора и статора. Электромеханические характеристики приведены на рисунке 4.2.

Электромеханические характеристики сравним с паспортными данными.

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

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

Полученные основные точки электромеханической характеристики сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2. 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

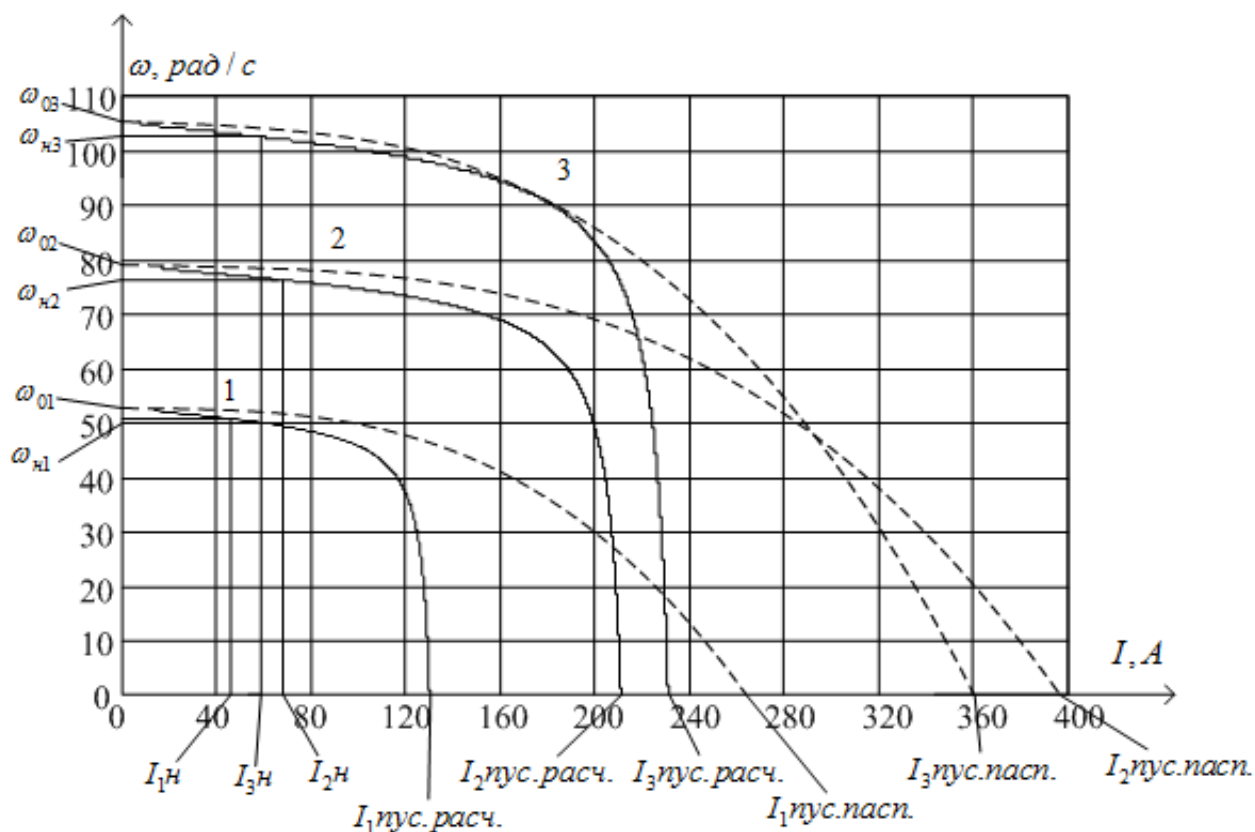


Рисунок 4.2 – Электромеханические характеристики двигателя ВАО-92-12/8/6/4 при включении его на первую (характеристика 1), вторую (характеристика 2) и третью (характеристика 3) скорости

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.

5. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ ВАО-92-12/8/6/4

Моделирование АД произведем в программе MATLAB Simulink. Для построения имитационной модели использованы параметры схемы замещения двигателя.

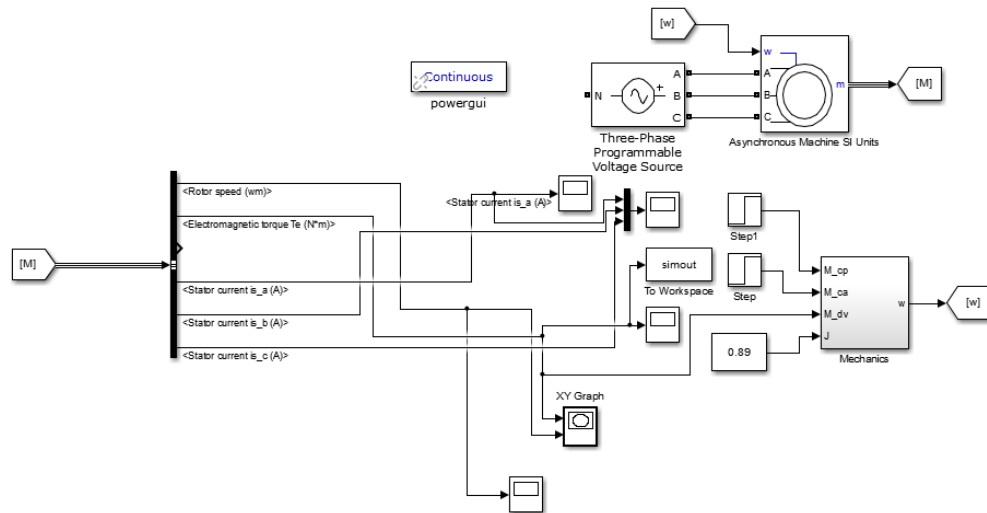


Рисунок 5.1 - Имитационная модель прямого пуска асинхронного двигателя

Поскольку динамическую механическую характеристику АД можно построить только в результате расчета переходных процессов, то сначала приведем графики п.п. скорости рисунок 5.4 и момента рисунок 5.5 при прямом пуске электродвигателя.

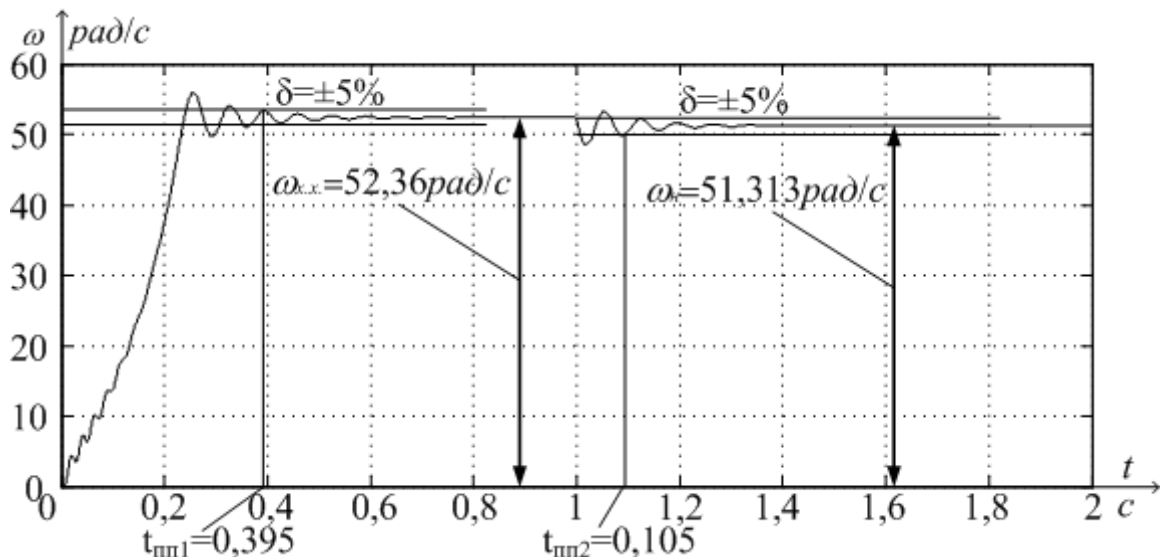


Рисунок 5.2 - Переходный процесс скорости при прямом пуске АД с короткозамкнутым ротором ВАО 92-12/8/6/4

Основные показатели качества для характеристики скорости : t_p

перерегулирование - $\sigma = 2,5\%$,

время переходного процесса до скорости холостого хода - $t_{mn1} = 0,395$ с,

время переходного процесса со скорости холостого хода на номинальную скорость при набросе нагрузки на 1 секунде - $t_{mn2} = 1,105$ с,

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

установившееся значение номинальной скорости - $\omega_{н.} = 51,313$ рад/с.

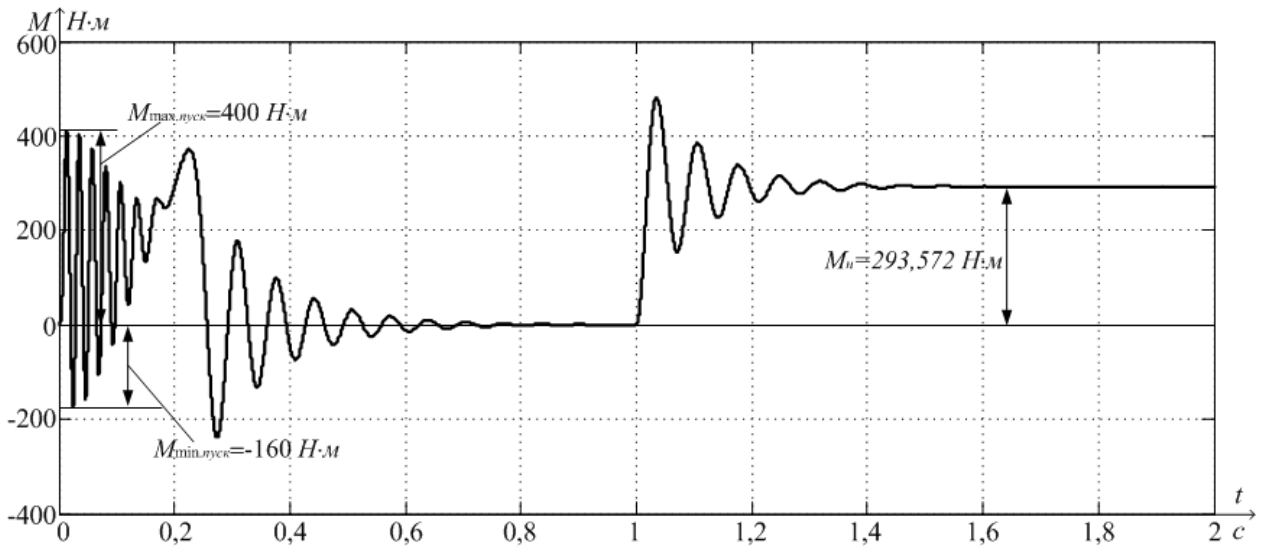


Рисунок 5.3 - Переходный процесс электромагнитного момента при прямом пуске АД с короткозамкнутым ротором ВАО 92-12/8/6/4

С помощью полученных графиков переходных процессов $\omega = f(t)$ и $M = f(t)$ строим механическую динамическую характеристику (рисунок 5.4) при прямом пуске АД ВАО-92-12/8/6/4.

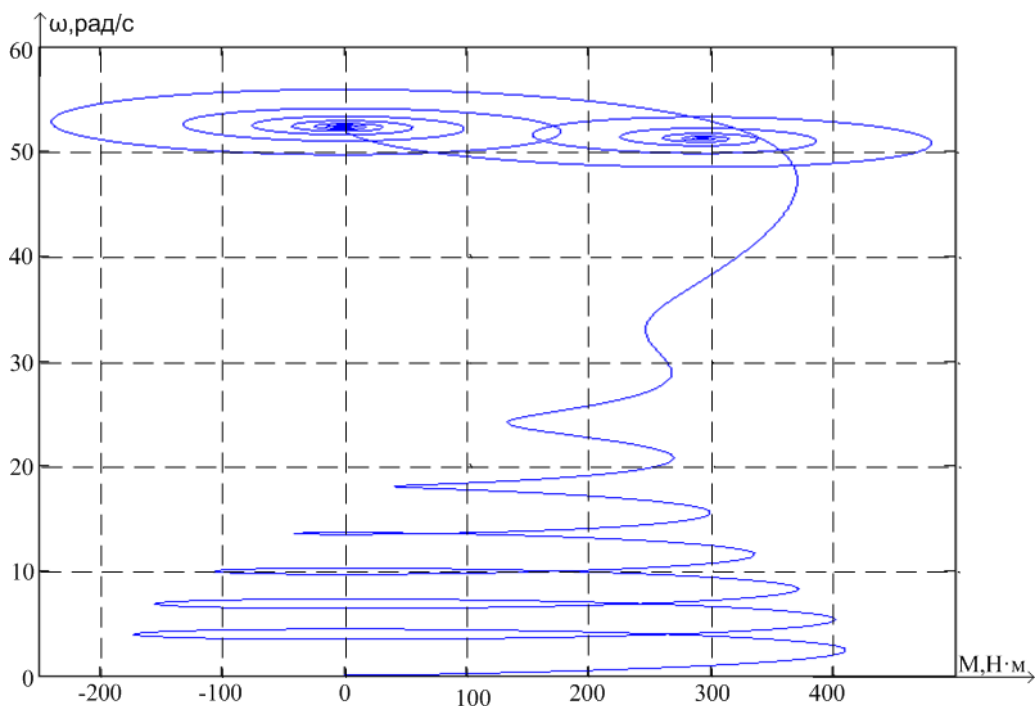


Рисунок 5.4 – Динамическая механическая характеристика асинхронного двигателя ВАО-92-12/8/6/4

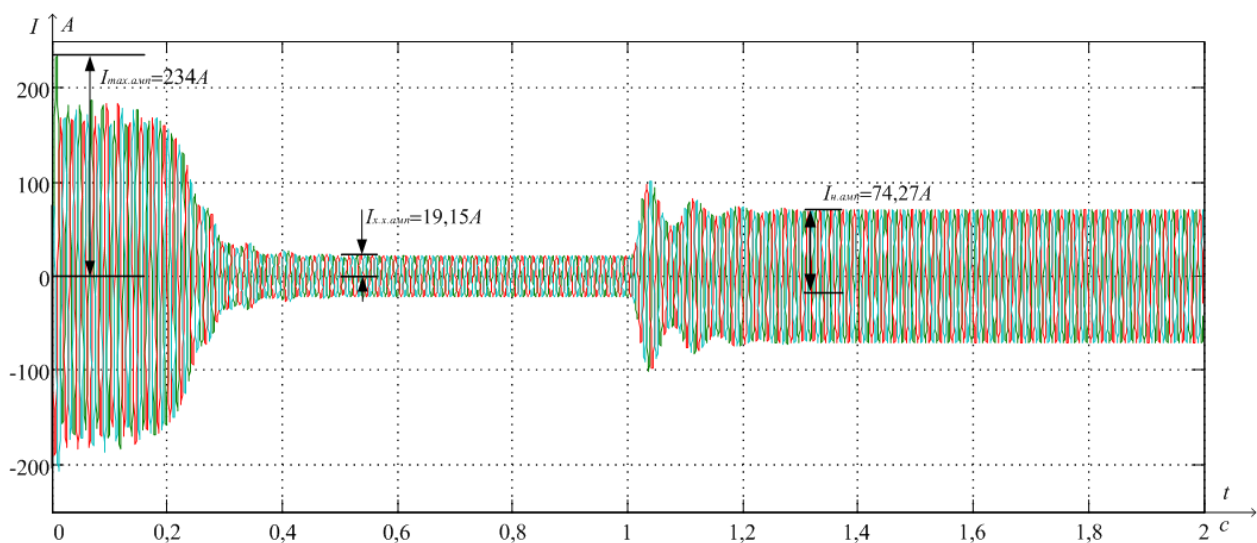


Рисунок 5.6 – Переходный процесс тока статора при прямом пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором ВАО 92 – 12/8/6/4

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

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 $M_H = 293,572 \text{ Н} \cdot \text{м}$ равно $I_{н.амп.} = 74,27 \text{ А}$.

Определим действующее значение тока статора при номинальной нагрузке:

$$I_{н.дейст.} = \frac{I_{н.амп.}}{\sqrt{2}} = \frac{74,27}{\sqrt{2}} = 52,517 \text{ А}$$

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

$$I_{н.дейст.} = \frac{I_{н.амп.}}{\sqrt{2}} = \frac{74,27}{\sqrt{2}} = 52,517 \text{ А}$$

Вид п.п. при пуске АД прямым включением в сеть имеет колебательную составляющую в кривой электромагнитного момента изменяющейся в пределах от -160 до $+410 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и затухающей при разгоне двигателя. Наибольшее ускорение электродвигатель имеет при достижении динамической характеристикой критического значения, когда момент достигает значения в $410 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Большие ударные моменты во время пуске электродвигателя могут приводить к поломке механизма питателя (поломка редуктора, обрыв тяговой цепи). Значения токов статорной обмотки в момент разгона электродвигателя имеют значения в 165 А , это приводит к выводу из работы обмотки статора, по окончании разгона ток снижается до номинального. Можно сделать вывод, что пуск прямым включением в сеть АД не позволяет достигнуть удовлетворительных переходных характеристик. Также существующий привод не обеспечивает необходимый для технологического процесса диапазон регулирования.

Так как существующий привод не удовлетворяет необходимым требованиям, необходимо спроектировать новый привод.

6. ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ

6.1. Обоснование выбора типа двигателя

Главное требование, которое предъявляется к электроприводу питателя, это повышенная взрыв надёжность против 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, будем использовать на наиболее простой, надёжный и дешёвый 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.

6.2. 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:

$$n_{зв.макс} = \frac{v \cdot 60000}{z \cdot \rho} = \frac{0,81 \cdot 60000}{8 \cdot 250} = 8,1 \text{ об/мин}, \quad (6.1)$$

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

Тогда нужна минимальная и максимальная скорость двигателя:

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

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

Исходя из этих данных необходим электродвигатель со скоростью холостого хода 1000 об/мин.

Поскольку питатель является разновидностью скребкового конвейера [3], необходимую мощность двигателя (кВт) определим по формуле:

$$P = \frac{k_з \cdot F \cdot v}{1000 \cdot \eta}, \quad (6.2)$$

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

$k_з = 1,3$ - 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.

Таблица 6.1

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 ²	0,32

6.3. Проверка выбора двигателя

Для верного выбора электродвигателя в асинхронном приводе нужно соблюдать условие:

$$M_{дв} \geq M_{мех},$$

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

$M_{мех}$ – момент сопротивления механизма.

Поскольку электродвигатель снабжён самовентиляцией, при снижении скорости охлаждение ухудшается, также уменьшается и допустимый момент по нагреву.

Необходимо чтобы на всем диапазоне регулирования момент двигателя был выше момента нагрузки.

Для работы двигателя, выбранного в разделе 6.2, на максимальной скорости необходимо увеличение частоты напряжения питания до уровня:

$$f_{\max} = \frac{n_{\max} \cdot f_{\text{ном}}}{n_{\text{дв.0}}} = \frac{1012,5 \cdot 50}{1000} = 50,625 \text{ Гц.} \quad (6.3)$$

Для работы двигателя на минимальной скорости необходимо уменьшение частоты напряжения питания до:

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

Создаваемый питателем момент нагрузки не изменяется на протяжении диапазона регулирования, т.е. нужно выполнить следующие условия:

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

Для электродвигателя с самовентиляцией на частоте 50,625 Гц нужно ограничение момента $0,91M_{\text{дв.ном}}$. Поэтому, для максимальной скорости необходимо выполнение условия:

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

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

При работе на частоте 10,125 Гц для электродвигателя с самовентиляцией, нужно ограничение момента $0,77M_{\text{дв.ном}}$. Поэтому, для минимальной скорости необходимо выполнение условия:

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

Из этих двух условий выбираем меньшее ограничение, т.е.:

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

Известно, что между номинальным моментом и мощностью имеется такая связь:

$$M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n}, \quad (6.4)$$

тогда требуемая мощность асинхронного двигателя:

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

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

6.4. 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.

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

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

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

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

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

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

$\cos \varphi_n = 0,83$ – коэффициент мощности;

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

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

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

Ток холостого хода АД рассчитаем из выражения:

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

$$= \sqrt{\frac{28,705^2 - (0,75 \cdot 37,733 \cdot (1 - 0,025) / (1 - 0,75 \cdot 0,025))^2}{1 - (0,75 \cdot (1 - 0,025) / (1 - 0,75 \cdot 0,025))^2}} = 8,647 \text{ A},$$

где: $I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{18500}{3 \cdot 220 \cdot 0,83 \cdot 0,895} = 37,733 \text{ A}$ – номинальный ток

статора двигателя;

$$\eta_{\text{ржс}} = \eta_H = 0,79 - \text{КПД при частичной нагрузке};$$

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

двигателя при частичной нагрузке;

$$\cos \varphi_{\text{ржс}} = \cos \varphi_H \cdot 0,98 = 0,813 - \text{коэффициент мощности при частичной}$$

нагрузке;

$$p_{\text{жс}} = \frac{P}{P_H} = 0,75 - \text{коэффициент загрузки двигателя.}$$

По формуле Клосса найдем соотношение для расчёта критического скольжения:

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

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

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 обмотки ротора, приведённое к статорной обмотке АД:

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

Активное сопротивление обмотки статора найдем из следующего выражения:

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

Найдем параметр γ , с помощью которого определим индуктивное сопротивление короткого замыкания $X_{кн}$,

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

Тогда

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

Чтобы выделить из индуктивного сопротивления $X_{кн}$, сопротивления рассеяния фаз статора и ротора, воспользуемся соотношениями, которые справедливы для серийных асинхронных двигателей.

Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведённое к статорной, может быть найдено:

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

Индуктивное сопротивление обмотки статора рассчитаем по следующему выражению:

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

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

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

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания определим как:

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

Индуктивность фазы обмотки статора:

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

Индуктивность фазы обмотки ротора:

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

Индуктивность цепи намагничивания:

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

С помощью найденных значений C_1 , R_2' и $X_{кH}$ рассчитаем критическое скольжение

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

Для построения механической характеристики асинхронного двигателя критический момент АД в двигательном режиме:

$$M_k = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{кH}^2} \right]} = \\ = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,719 \cdot 1,023 \cdot \left[0,171 + \sqrt{0,171^2 + 1,45^2} \right]} = 443,66 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Принимая диапазон изменения скольжения от 1 до 0, с шагом 0,001, по формуле Клосса построим механическую характеристику электродвигателя:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\kappa} \cdot (1 + a \cdot s_{\kappa})}{\frac{s_{\kappa}}{s} + \frac{s}{s_{\kappa}} + 2 \cdot a \cdot s_{\kappa}},$$

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:

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

Механическая характеристика, АД приведена на рисунке 6.2.

Исходя из построенной механической характеристики произведём анализ полученных данных, и сравним их с паспортными.

Номинальный момент:

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

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:

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

Пусковой момент

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

То же значение, но по формуле 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 построим механическую характеристику, характеристика приведена на рисунке 6.2. Характеристика построенная по паспортным данным изображена пунктирной линией.

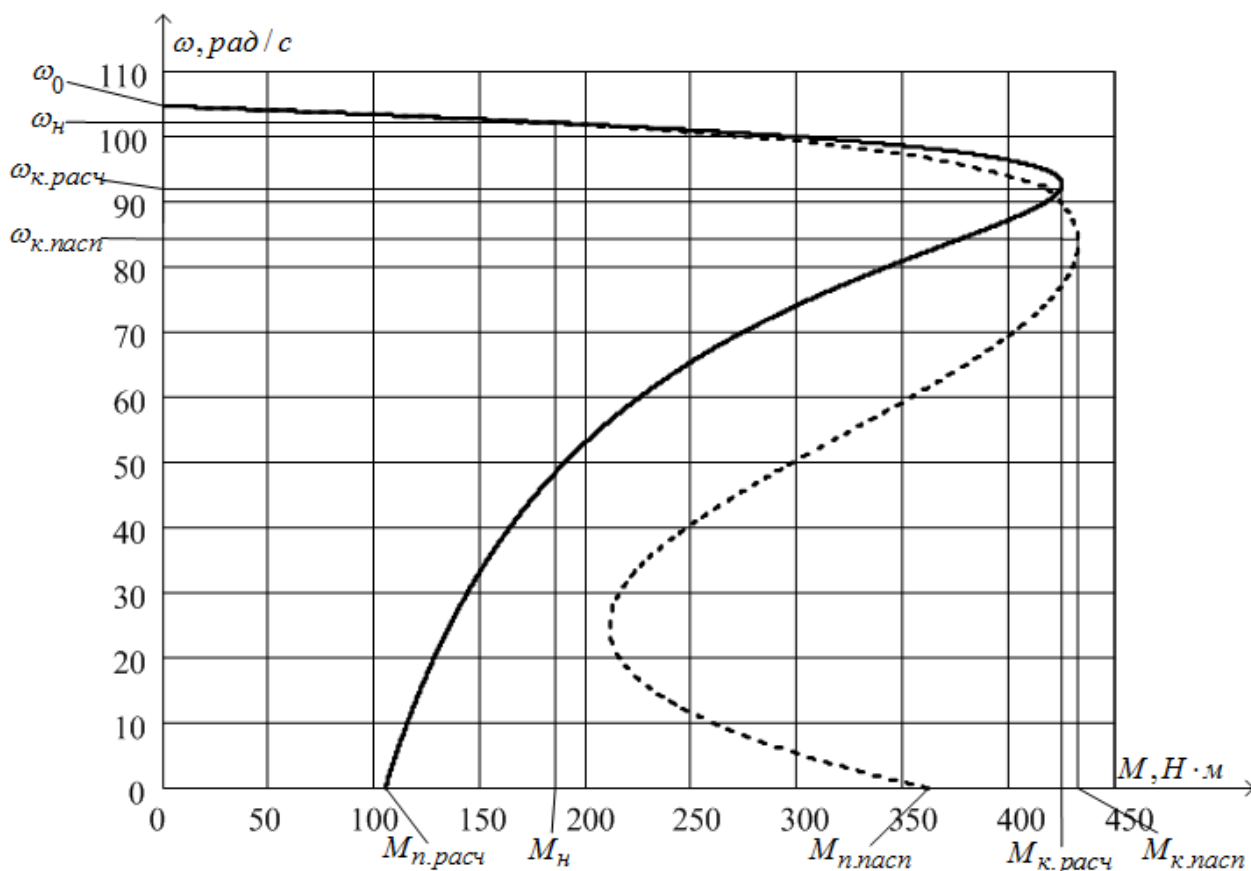


Рисунок 6.2 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя АИМ 180 М6

Полученная механическая характеристика аналогична характеристике асинхронного двигателя с ненасыщенной магнитной системой, вид данной характеристики задается зависимостью индуктивного сопротивления обмотки 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 ω_k до ω_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 .

Для АД с короткозамкнутым ротором интересна электромеханическая характеристика $I_1 = f(\omega)$, показывающая как зависит ток статора скорости. Ток в статорной обмотке I_1 находится из сложения векторов тока намагничивания \bar{I}_0 и тока ротора \bar{I}'_2 . Как правило это производится с использованием круговой диаграммы.

Предполагая ток намагничивания АД I_0 реактивным ($I_{0A} = 0$), ток статорной обмотки I_1 через приведённый ток обмотки ротора I'_2 можно рассчитать по формуле:

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

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

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

Задав изменение скольжения в диапазоне от 0 до 1, с шагом 0,001, построим электромеханические характеристики АД токов обмоток ротора и статора. Электромеханические характеристики приведены на рисунке 6.3.

Электромеханические характеристики сравним с паспортными данными:

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

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

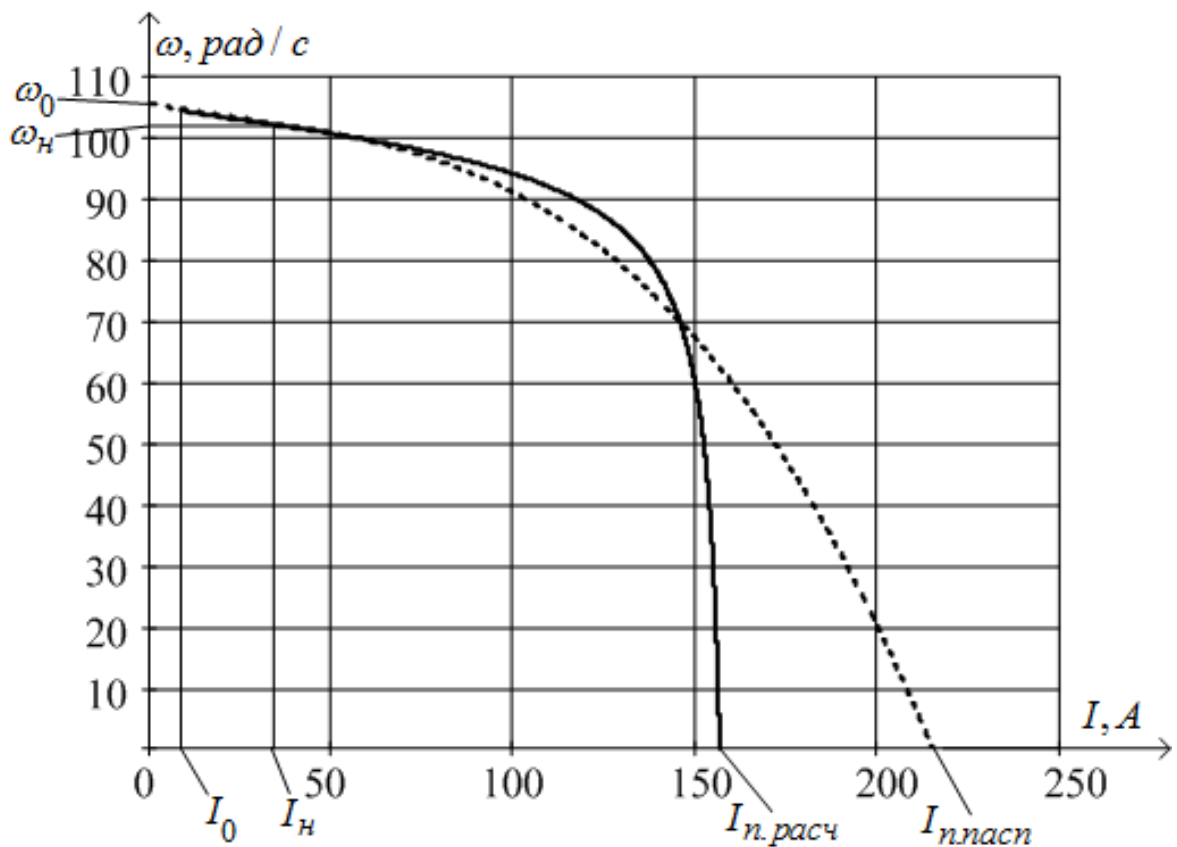


Рисунок 6.3 –Электромеханическая характеристика АД АИМ 180 М6

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.

6.5. Динамическая модель двигателя АИМ 180 М6

Моделирование АД произведем в программе MATLAB Simulink. Для построения имитационной модели использованы параметры схемы замещения двигателя.

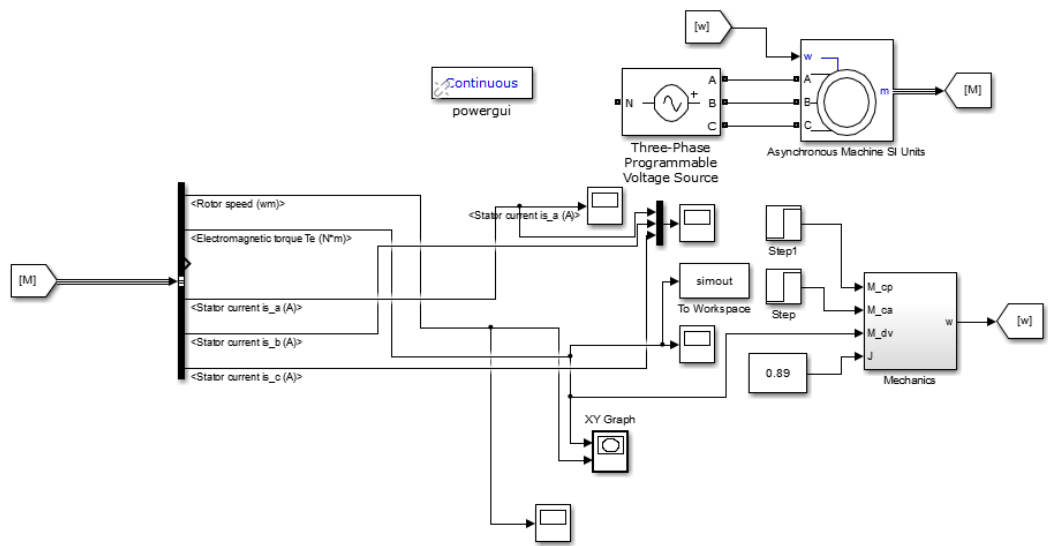


Рисунок 6.4 - Имитационная модель прямого пуска асинхронного двигателя

Поскольку динамическую механическую характеристику АД можно построить только в результате расчета переходных процессов, то сначала приведем графики п.п. скорости рисунок 6.5 и момента рисунок 6.6 при прямом пуске электродвигателя.

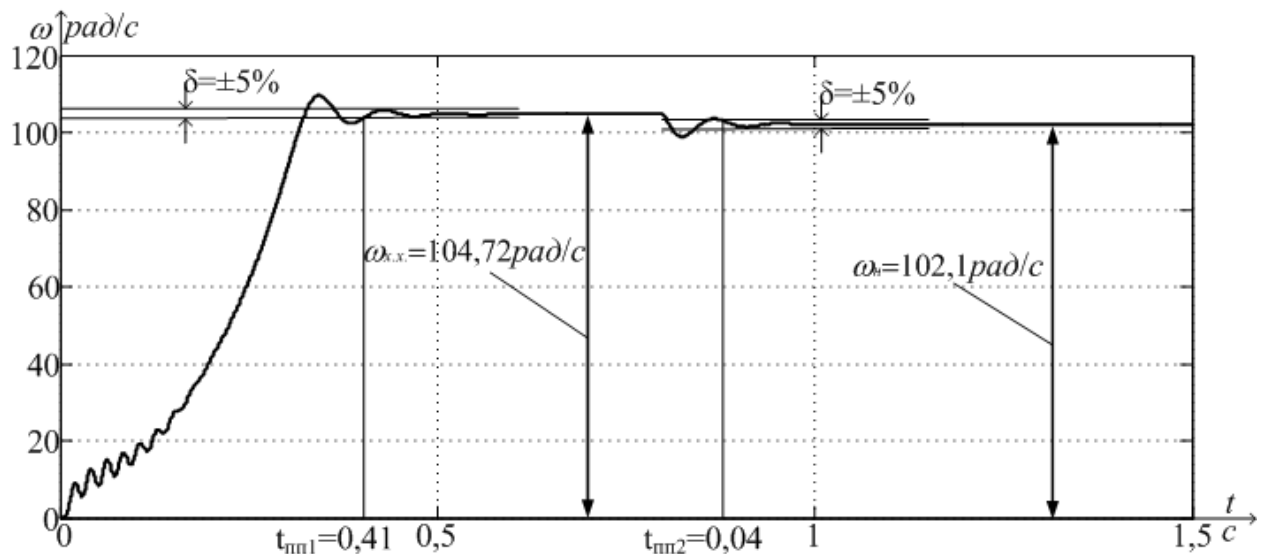


Рисунок 6.5 - Переходный процесс скорости при пуске короткозамкнутого асинхронного двигателя АИМ 180 Мб прямым включением в сеть

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 - $t_{m2} = 0,04c$ с,

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

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

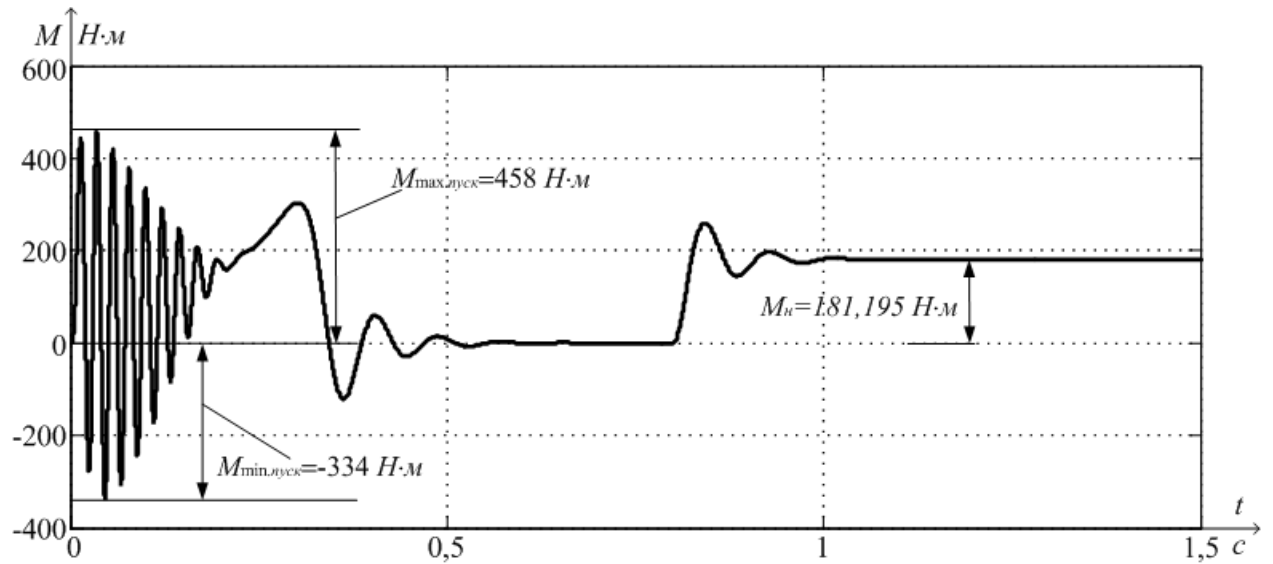


Рисунок 6.6 - Переходный процесс электромагнитного момента при пуске асинхронного двигателя АИМ 180 М6 прямым включением в сеть

С помощью полученных графиков переходных процессов $\omega = f(t)$ и $M = f(t)$ строим механическую динамическую характеристику (рисунок 6.7) при прямом пуске АИМ 180 М6.

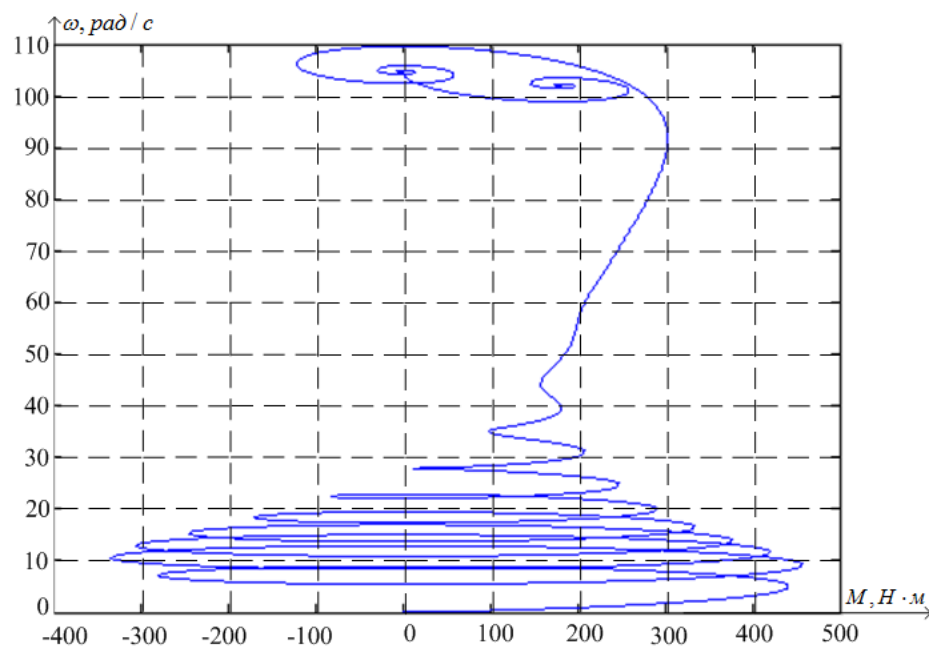


Рисунок 6.7 – Динамическая механическая характеристика асинхронного двигателя АИМ 180 М6 при прямом пуске

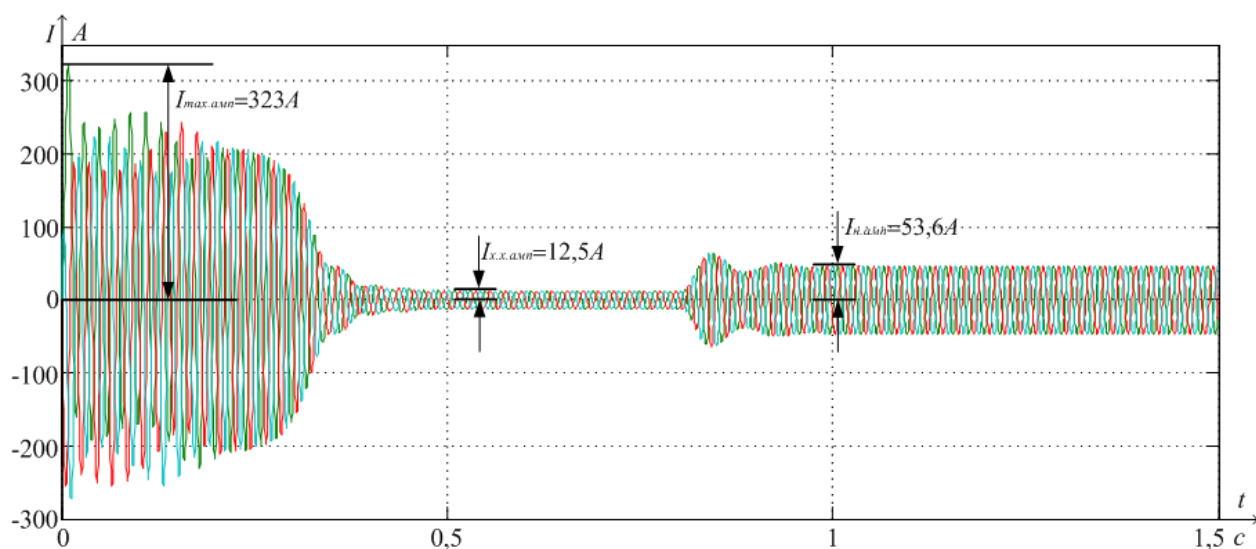


Рисунок 6.8 – Переходный процесс тока статора при прямом пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором АИМ 180 М6

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

Определим действующее значение тока статора без нагрузки:

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

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 п.п. при пуске АД прямым включением в сеть имеет колебательную составляющую в кривой электромагнитного момента изменяющейся в пределах от -160 до $+410 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и затухающей при разгоне двигателя. Значения токов статорной обмотки в момент разгона электродвигателя имеют значения в $228,4 \text{ А}$, это приводит к выводу из работы обмотки статора, по окончании разгона ток снижается до номинального..

В результате выбора нового двигателя удалось уменьшить момент инерции привода примерно в два раза, что положительно сказалось на динамических характеристиках, 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.

7. ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

7.1. Преобразователь частоты 6SL3200-6AM23-8AN0

Выбор преобразователя произведён в соответствии с требованиями к приводу. В соответствии с питающей сетью, мощностью двигателя и характером нагрузки, выбран преобразователь общего применения 6SL3200-6AM23-8AN0, с необходимыми функциями, производства корпорации Siemens. На рисунке 7.2 приведен внешний вид преобразователя частоты.



Рисунок 7.1 – 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 сбоях.

Применяемые защиты привода:

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

Основные характеристики:

- Напряжение питания: $3 \times 380 - 500 \text{ В} +10\%-15\%$,
- Номинальный выходной ток: 38 А,
- Входная частота: 47 / 63 Гц,
- Выходная частота: 0-550 Гц,
- КПД при номинальной мощности: 98 %,
- Степень защиты IP55,
- Габаритные размеры (мм): $230 \times 620 \times 249$,
- Масса: 10,21 кг.

Более подробная информация приведена в руководстве по эксплуатации

[7].

8. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПИТАТЕЛЯ

8.1. Регулирование скорости короткозамкнутого асинхронного двигателя изменением частоты

Управление двигателем, в соответствии с соотношением, 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.

Таким образом, для того, чтобы наиболее эффективно реализовать принципы частотного управления асинхронным двигателем, необходимо в соответствии с видом нагрузки на валу двигателя управлять напряжением, подводимым к статору, взаимосвязано с изменением частоты тока статора. Перечисленные режимы управления достаточны для большинства механизмов. Однако закон управления 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 8.1. Так, например, при законе управления $U_{1j} / f_{1j} = const$, предполагающем постоянство критического момента, наблюдается его снижение при уменьшении частоты f_{1j} .

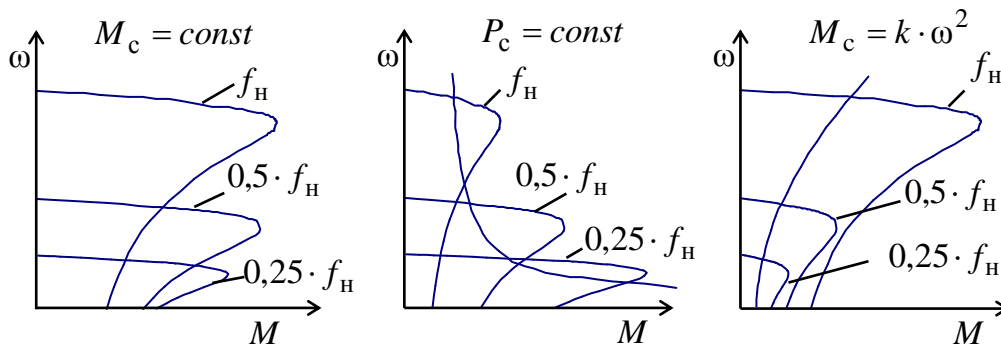


Рисунок 8.1 - Механические характеристики производственных механизмов и электроприводов «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»

Функциональная схема электропривода выполненного по системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель», реализующая различные законы управления класса U_{1j}/f_{1j} приведена на рисунке 8.2.

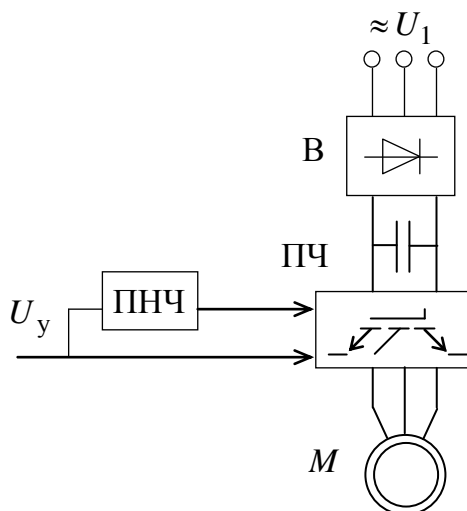


Рисунок 8.2 - Функциональная схема скалярного частотного управления скоростью асинхронного двигателя

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 (8.6) – (8.8) класса U_{1j}/f_{1j} .

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

8.2. Регулирование скорости электропривода с помощью закона

$$U_{1\phi} / f_1 = const$$

В приводах со скалярным управлением при регулировании либо стабилизации скорости применяют разные соотношения между напряжением и частотой. Выбор определенного соотношения зависит от характера нагрузки.

Для электродвигателя типа АИМ 180 М6 управляемого преобразователем частоты 6SL3200-6AM23-8AN0, по данным паспорта, рассчитаем параметры схемы замещения и построим механические и электромеханические характеристики при его питании от статического ПЧ законом управления:

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

Найдем значения относительных напряжений, частот и синхронных скоростей:

$$f_{1*} = \frac{f_{1j}}{f_{1H}} = \frac{\{50; 40; 30; 20; 10\}}{50} = \{1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2\} \text{ о.е.}; \quad (8.11)$$

$$U_{1j} = U_{1\phi} \cdot f_{1*} = 220 \cdot \{1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2\} = \{220; 176; 132; 88; 44\} \text{ В}; \quad (8.12)$$

$$\begin{aligned} \omega_{0j} &= \omega_{0H} \cdot f_{1*} = 104,719 \cdot \{1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2\} = \\ &= \{104,719; 83,775; 62,831; 41,887; 20,943\} \text{ рад / с}; \end{aligned} \quad (8.13)$$

Расчет электромеханических характеристик произведем, подставляя в выражения значения для каждой характеристики $f_{1*}, U_{1j}, \omega_{0j}$. Задавая диапазон от 0 до значения соответствующего нужной характеристики $\omega_{0j} \cdot 1,25$ с шагом $0,001 \cdot \omega_{0j}$, подставив в выражение для относительного

скольжения. Далее полученные значения относительного скольжения подставим в выражения для токов статорной и роторной обмоток.

$$\begin{aligned} \Gamma_{2j}(S) &= \frac{U_{1j}}{\sqrt{X_{kH}^2 \cdot f_{1H}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2}{S}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{S \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}}\right)^2}} = \\ &= \frac{U_{1j}}{\sqrt{1,45^2 f_{1*}^2 + \left(0,171 + \frac{0,168}{S}\right)^2 + \left(\frac{0,171 \cdot 0,168}{S \cdot 23,409 \cdot f_{1*}}\right)^2}}; \end{aligned} \quad (8.14)$$

$$\begin{aligned} I_{1j}(S) &= \frac{\sqrt{I_0^2 + \Gamma_{2j}^2(S) + 2 \cdot I_0 \cdot \Gamma_{2j}(S)} \cdot \frac{X_{kH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{S}\right)^2 + X_{kH}^2}}}{1,45} = \\ &= \frac{\sqrt{8,647^2 + \Gamma_{2j}^2(S) + 2 \cdot 8,647 \cdot \Gamma_{2j}(S)} \cdot 1,45}{\sqrt{\left(0,171 + \frac{0,168}{S}\right)^2 + 1,45^2}} \end{aligned} \quad (8.15)$$

Полученные характеристики для заданного закона управления представлены на рисунке 8.3.

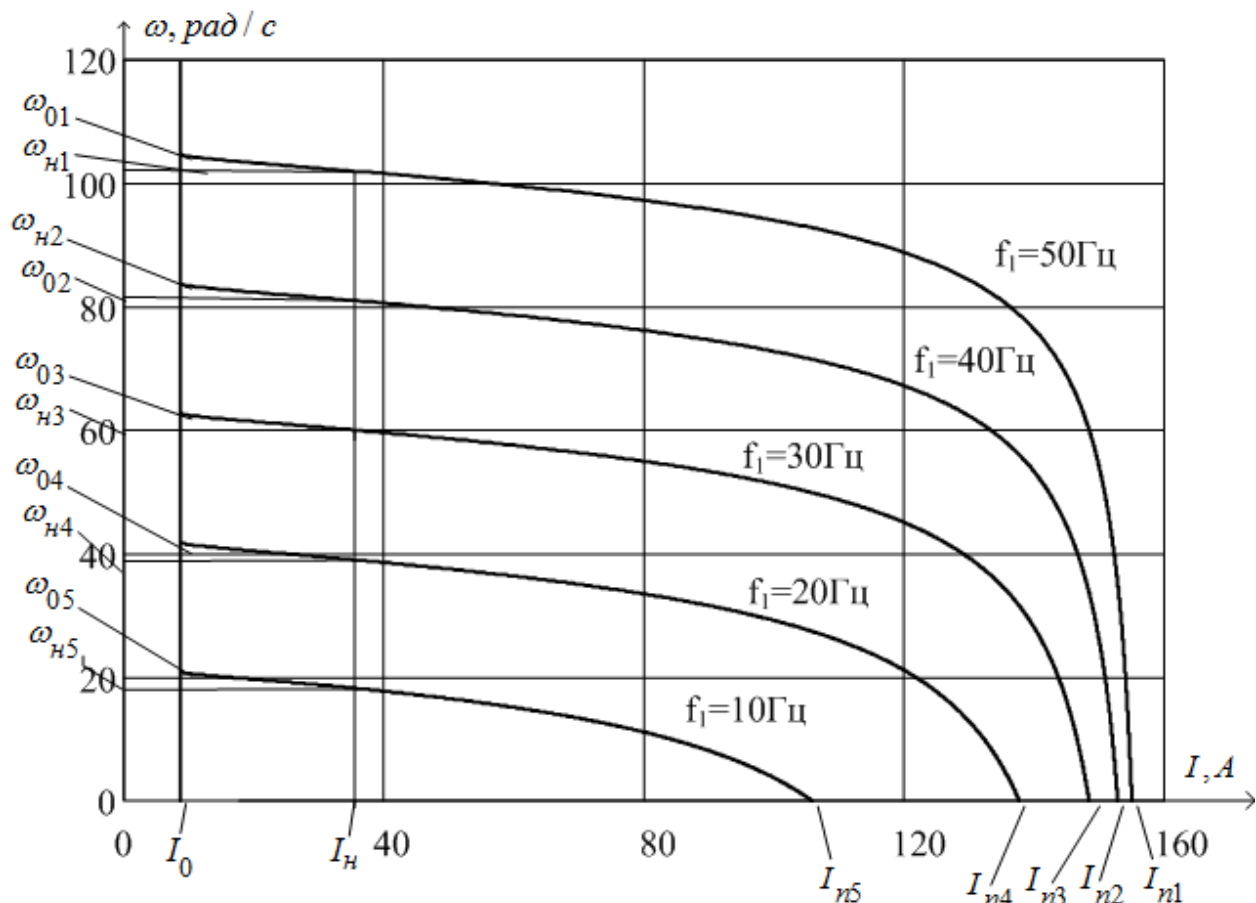


Рисунок 8.3 - Электромеханические характеристики двигателя АИМ 180 М6 при законе регулирования скорости $U_{1\phi} / f_1 = const$

Построение механических характеристик АД при законе управления $U_{1\phi} / f_1 = const$, будем использовать следующие выражения

$$M(S) = \frac{3 \cdot U_{1j} \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot S_j \left[X_{кн}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{S_j} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{S_j \cdot X_{\mu n} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]} ; \quad (8.16)$$

$$= \frac{3 \cdot U_{1j} \cdot 0.149}{\omega_{0j} \cdot S_j \left[1,45^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(0,171 + \frac{0,168}{S_j} \right)^2 + \left(\frac{0,171 \cdot 0,168}{S_j \cdot 23,409 \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]}$$

Механические характеристики электродвигателя при законе управления $U_{1\phi} / f_1 = const$, изображены на рисунке 8.4.

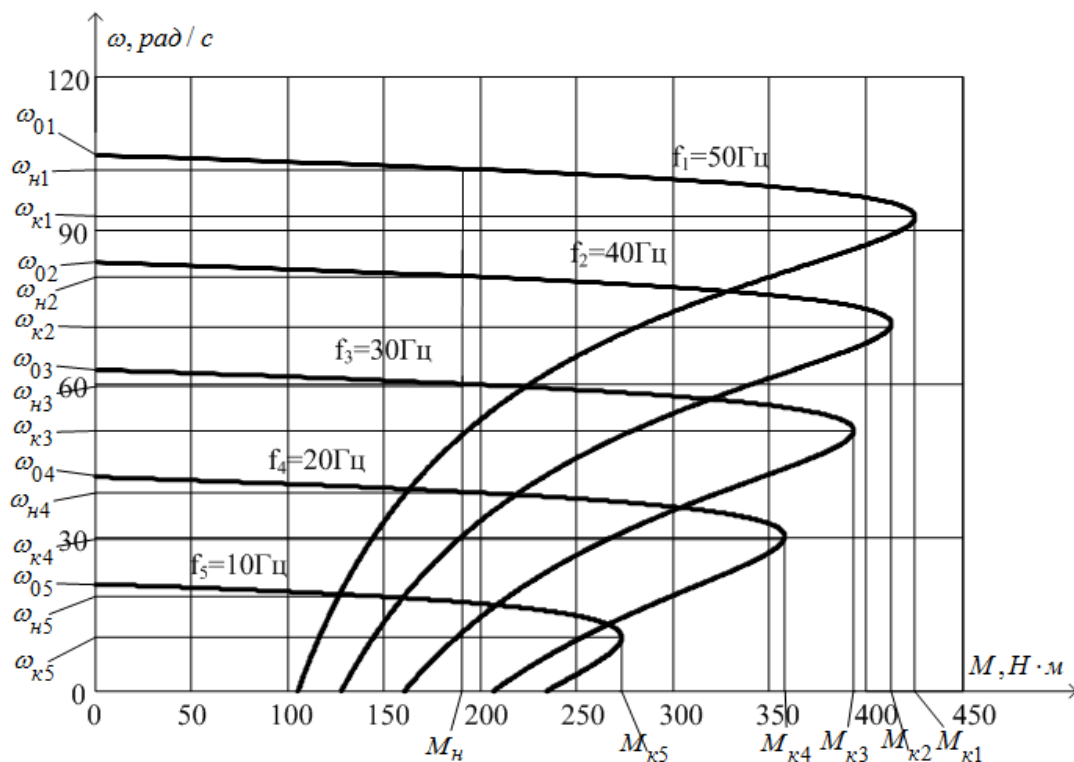


Рисунок 8.4 - Механические характеристики двигателя при законе регулирования скорости $U_{1\phi} / f_1 = const$

Механические и электромеханические характеристики электродвигателя АИМ 180 М6, при регулировании законом $U_{1\phi} / f_1 = const$, построены в программной среде MathCad.

Из полученных характеристик видно, что для данного электродвигателя для закона управления $U_{1\phi} / f_1 = const$ с понижением частоты питания большое влияние активного сопротивления статорной обмотки. За счет чего критический момент на низких частотах падает, это для привода питателя недопустимо, поскольку при пуске питателя есть возможность увеличения статического момента в 1,5 раза.

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

С целью регулирования скорости электродвигателя с постоянным критическим моментом нужно изменять напряжение по закону $U_{1j} = U_{1\phi} \cdot f_{1*} + I_{li} \cdot R_1$ ((пропорциональное регулирование с $I \cdot R$ -

компенсацией) [12]. Для того чтобы реализовать данную зависимость нужно организовать положительную обратную связь по току с коэффициентом передачи $R_1 \cdot K_{км}$, величина $K_{км}$ показывает степень компенсации падения напряжения активном сопротивлении статорной обмотки. Когда $K_{км} = 1$ получаем полную компенсацию R_1 . При полной $I \cdot R$ -компенсации получаем регулирование с законами класса $E_{1j} / f_{1j} = const$.

Общий вид расчета механической и электромеханической характеристик идентичен предыдущему. Только при этом нужно учесть положительную связь по току и регулярно корректировать значение U_{1j} . Характеристики с $I \cdot R$ – компенсацией рассчитаны и построены в математической системе Mathcad.

Механическая характеристика АД при неполной $I \cdot R$ - компенсации, и переменных величинах напряжения и частоты питающей сети рассчитывается по выражению

$$M(S) = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot S_j \cdot \left[X_{кн}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(R_{1экв} + \frac{R_2'}{S_j} \right)^2 + \left(\frac{R_{1экв} \cdot R_2'}{S_j \cdot X_{мн} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]}, \quad (8.17)$$

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

$$M_{к} = \frac{3 \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_{0j} \cdot X_{кн} \cdot f_{1*}}. \quad (8.18)$$

Критическое скольжение определим по формуле:

$$S_{кj} = \pm \frac{R_2'}{X_{кн} \cdot f_{1*}}. \quad (8.19)$$

Электромеханическая характеристика, показывающая зависимость приведенного значения тока обмотки ротора от скольжения при неполной $I \cdot R$ - компенсации.

$$I_2'(S) = \frac{U_{1j}}{\sqrt{\left(R_{1\text{экв}} + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(\frac{R_{1\text{экв}} \cdot R_2'}{S \cdot X_{\text{мн}} \cdot f_{1*}}\right)^2}}. \quad (8.20)$$

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

$$I_1(S) = \sqrt{I_0^2 + (I_2'(S))^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(S) \cdot \frac{X_{\text{кн}} \cdot f_{1*}}{\sqrt{\left(R_{1\text{экв}} + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2}}}. \quad (8.21)$$

Построение для режима частичной $I \cdot R$ - компенсации электромеханических и механических характеристик, производим подставив значения в уравнения 8.17; 8.20; 8.21.

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

$$I_2'(S) = \frac{U_{1j}}{\sqrt{\left(0,103 + \frac{0,168}{S_j}\right)^2 + 1,45^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(\frac{0,103 \cdot 0,168}{S_j \cdot 23,409 \cdot f_{1*}}\right)^2}},$$

$$I_1(S) = \sqrt{8,647^2 + (I_2'(S))^2 + 2 \cdot 8,647 \cdot I_2'(S) \cdot \frac{1,45 \cdot f_{1*}}{\sqrt{\left(0,103 + \frac{0,168}{S}\right)^2 + 1,45^2 \cdot f_{1*}^2}}}. \quad (8.21)$$

Расчет и построение электромеханических характеристик произведем, подставив в выражения, данные для каждой характеристики $f_{1*}, U_{1j}, \omega_{0j}$.
Задавая диапазон для скольжения от 1 до 0, с шагом 0,001.

По формулам 8.18 и 8.19 рассчитаем значения критических моментов и скольжений, результаты расчёта занесены в таблицу 8.1.

Таблица 8.1

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

Механические характеристики асинхронного двигателя при законе регулирования скорости $U_{1\phi} / f_1 = const$ с $I \cdot R$ - компенсацией представлены на рисунке 8.4, электромеханические – на рисунке 8.5.

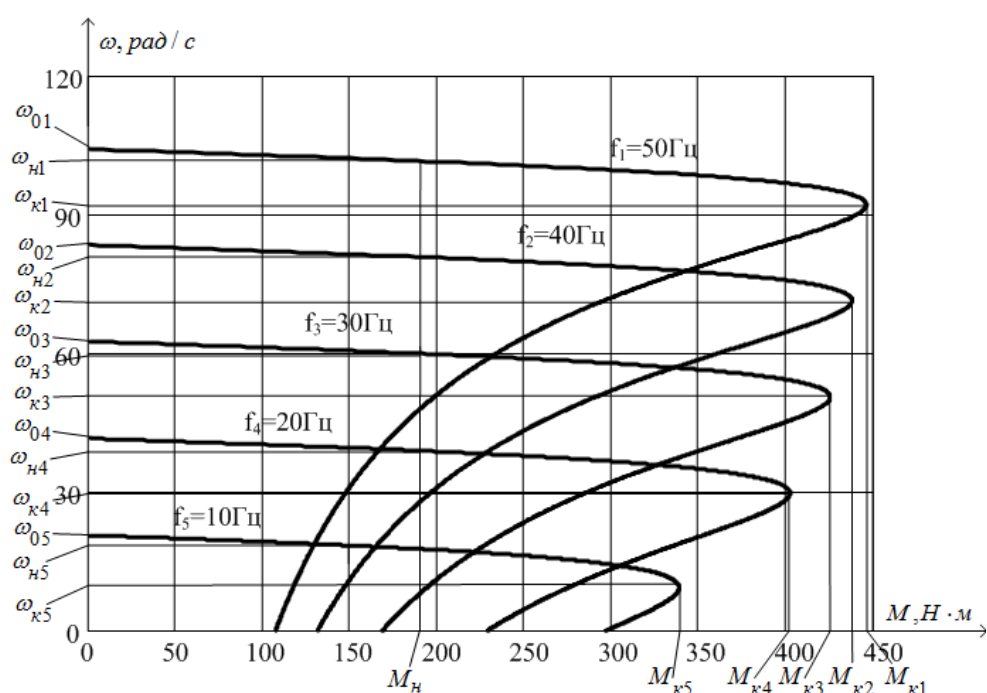


Рисунок 8.4 – Механические характеристики двигателя АИМ 180 Мб для закона регулирования скорости $U_{1\phi} / f_1 = const$ с $I \cdot R$ – компенсацией

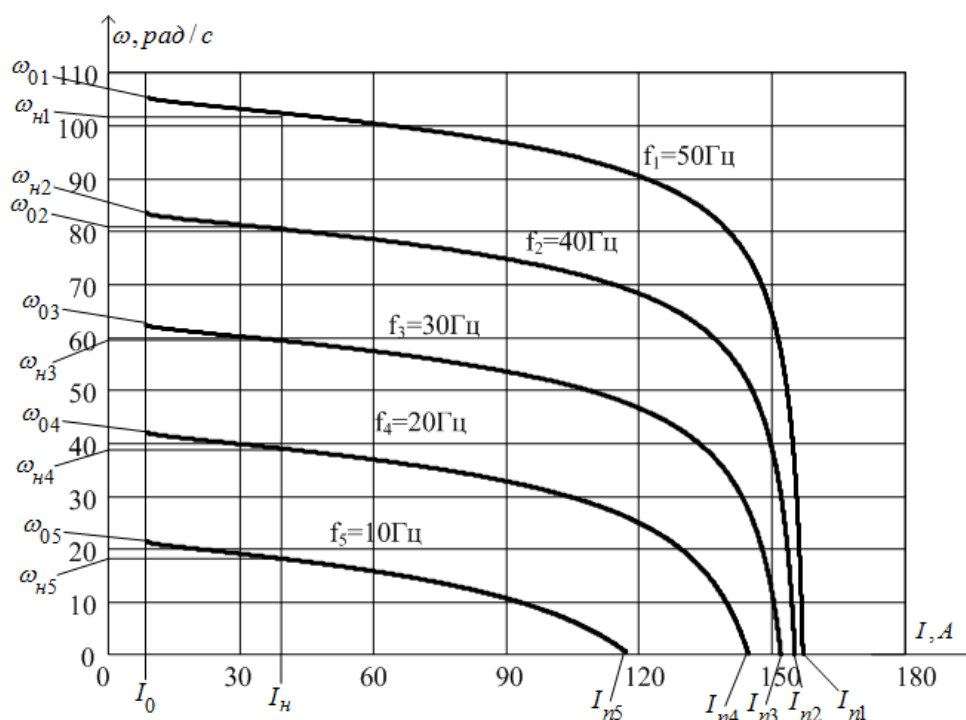


Рисунок 8.5 – Электромеханические характеристики двигателя АИМ 180 М6 для закона регулирования $U_{1\phi} / f_1 = const$ с $I \cdot R$ – компенсацией

Из полученных электромеханических и механических характеристик привода видно, что при введении положительной обратной связи по току значение максимального момента увеличивается, но в тоже время это ведет к увеличению напряжения в статорной обмотке.

Из построенных механических и электромеханических характеристик электропривода следует, что введение положительной обратной связи по току увеличивает значение максимального момента механических характеристик, однако одновременно ведёт к дополнительному увеличению напряжения в обмотке статора. В области близкой к номинальным частотам вращения незначительно повышается жёсткость механических характеристик. Влияние дополнительного подмагничивания системы на низких скоростях электродвигателя чревато перегревом двигателя, и при заданном диапазоне регулирования скорости это 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.

9. РАЗРАБОТКА ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

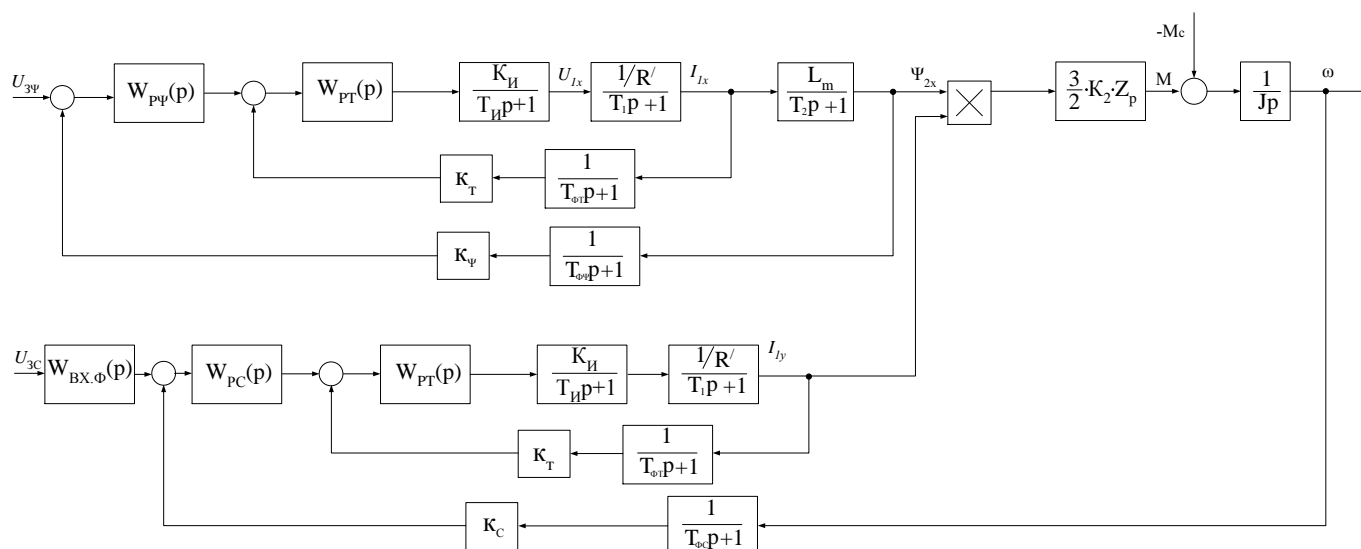


Рисунок 9.1 – Структурная схема асинхронного электропривода с векторным управлением

9.1. Оптимизация системы автоматического управления регулируемого электропривода

9.1.1. Расчет параметров силовой цепи

Коэффициент обратной связи по току:

$$k_{mx} = k_{my} = \frac{U_{3t \max}}{I_{3t \max}} = \frac{10}{38} = 0,263 \text{ В / А},$$

принять $U_{3t \max} = 10 \text{ В}$;

Коэффициент обратной связи по потокосцеплению:

$$k_{\Psi} = \frac{U_{3\Psi \max}}{\Psi_n} = \frac{10}{1} = 10 \text{ В / Вб},$$

принять $U_{3\Psi \max} = 10 \text{ В}$,

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

Коэффициент обратной связи по скорости:

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

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_n – 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. 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

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

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

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

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:

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

9.1.2. Оптимизация САР потокосцепления

Структурная схема линеаризованной двухконтурной САР потокосцепления приведена на рисунке 9.3.

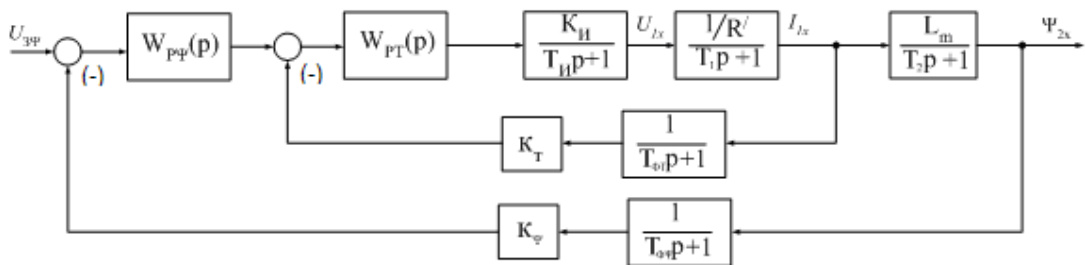


Рисунок 9.3 – Структурная схема линеаризованной двухконтурной

Оптимизация контура тока

Структурная схема контура приведена на рисунке 9.4.

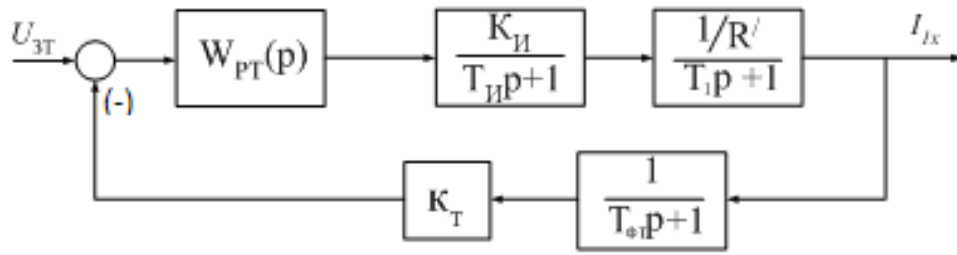


Рисунок 9.4 – Структурная схема контура тока

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

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.

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

$$T_{\mu ОК} = T_{фГ} + T_{АЦП} = 0,001 c;$$

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

Контур тока настраивается на модульный оптимум (МО). Учитывая параметры контура выбираем ПИ – регулятор который имеет передаточную функцию

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

где: $T_{pm} = T_1 = 0,014 c$ – постоянная времени регулятора;

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

усиления регулятора;

$$k_m = \frac{U_{зт.макс}}{I_{1макс}} = \frac{10}{38} = 0,263 \frac{B}{A} \quad - \quad \text{коэффициент обратной связи по току;}$$

$U_{зт.макс}$ – максимальное напряжение задания на ток $U_{зт.макс} = 10B$;

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

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

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

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;

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

фазе.

На основании структурной схемы контура тока (см. рисунок 9.4) строим имитационную модель, приведенную на рисунке 9.5.

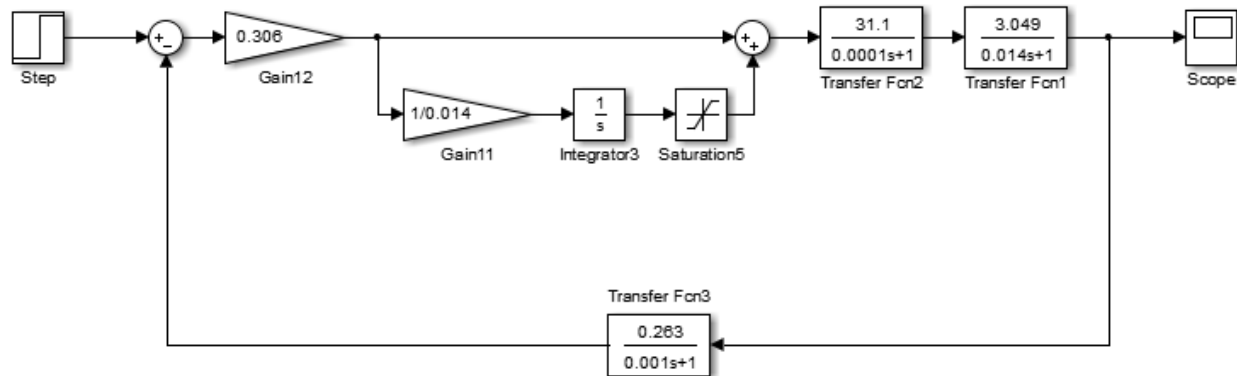


Рисунок 9.5 – Имитационная модель контура тока

Результаты переходных процессов при моделировании контура тока, который настроен на МО при обработке ступенчатого входного воздействия

$U_{zm} = 0,1\text{В}$ представлены в виде характеристики $I(t)$ на рисунке 9.6.

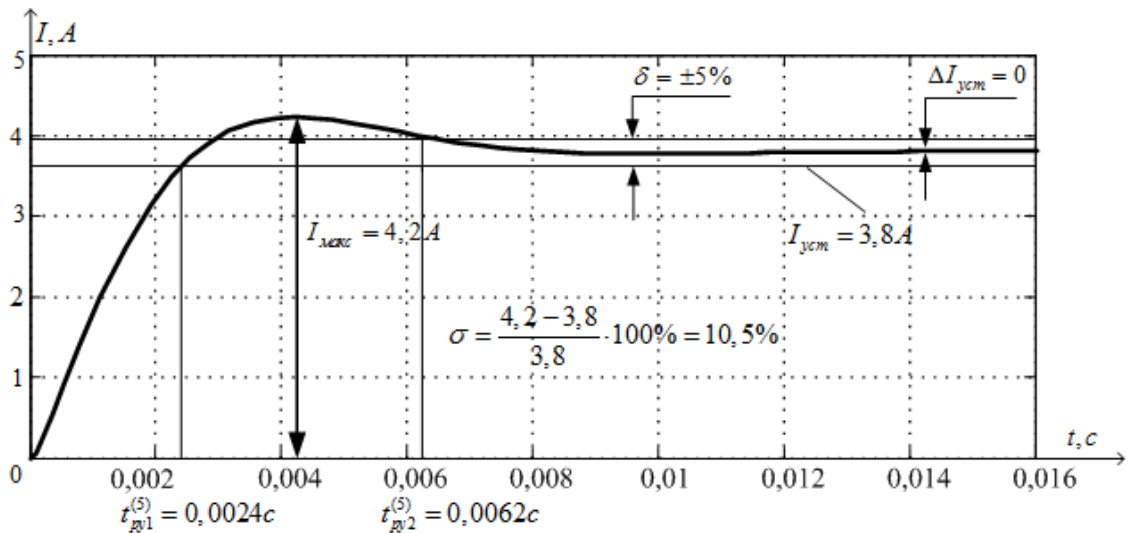


Рисунок 9.6 – Переходная характеристика $I(t)$ контура тока по структурной схеме рисунок 9.5

Анализируя полученные результаты моделирования можно сказать, что они лучшим образом согласуются с ожидаемыми показателями работы контура.

Для лучшего восприятия результаты сведены в таблицу 9.1.

Таблица 9.1 – Показатели 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 представлена на рисунке 9.7.

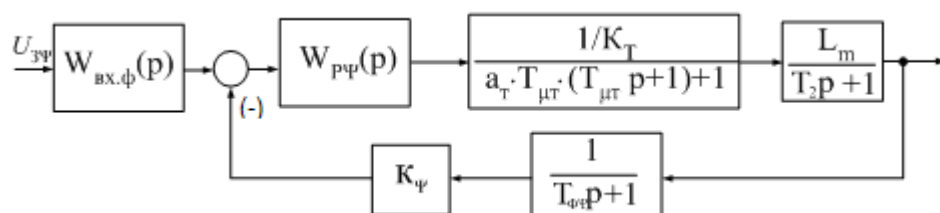


Рисунок 9.7 – Структурная схема контура потокосцепления

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,

$T_{\mu\Psi} = a_m \cdot T_{\mu m} + T_{\Phi\Psi} = 2 \cdot 0,00105 + 0,001 = 0,0031 \text{ с}$ – 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 устанавливается фильтр, передаточная функция которого имеет вид:

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

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура скорости, настроенного на модульный оптимум:

$\sigma = 8,1\%$ – перерегулирование;

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

$t_{py2}^{(5)} = 12 \cdot T_{\mu m} = 12 \cdot 0,00105 = 0,0126 \text{ с}$ – время переходного процесса

при обработке 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.

На основании структурной схемы контура потокосцепления (см. рисунок 9.7) строим имитационную модель, приведенную на рисунке 9.8.

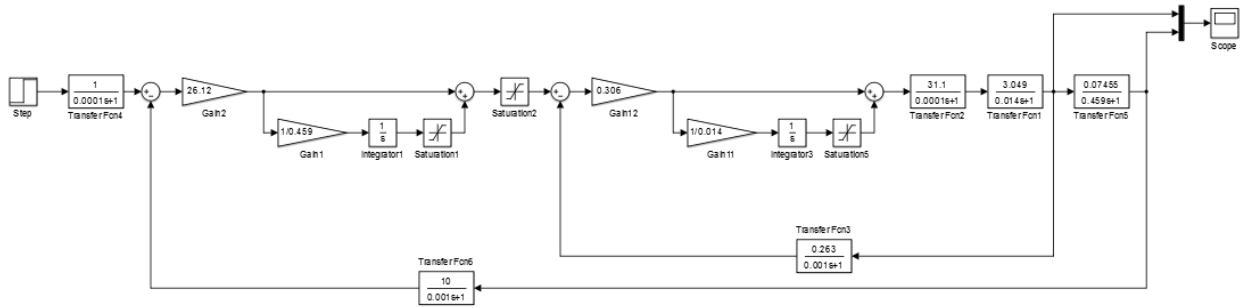


Рисунок 9.8 – Имитационная модель контура потокосцепления

Результаты переходных процессов при моделировании контура потокосцепления, который настроен на МО при обработке ступенчатого входного воздействия $U_{зп} = 0,1В$ представлены в виде характеристики $\Psi(t)$ и $I(t)$ на рисунке 9.9.

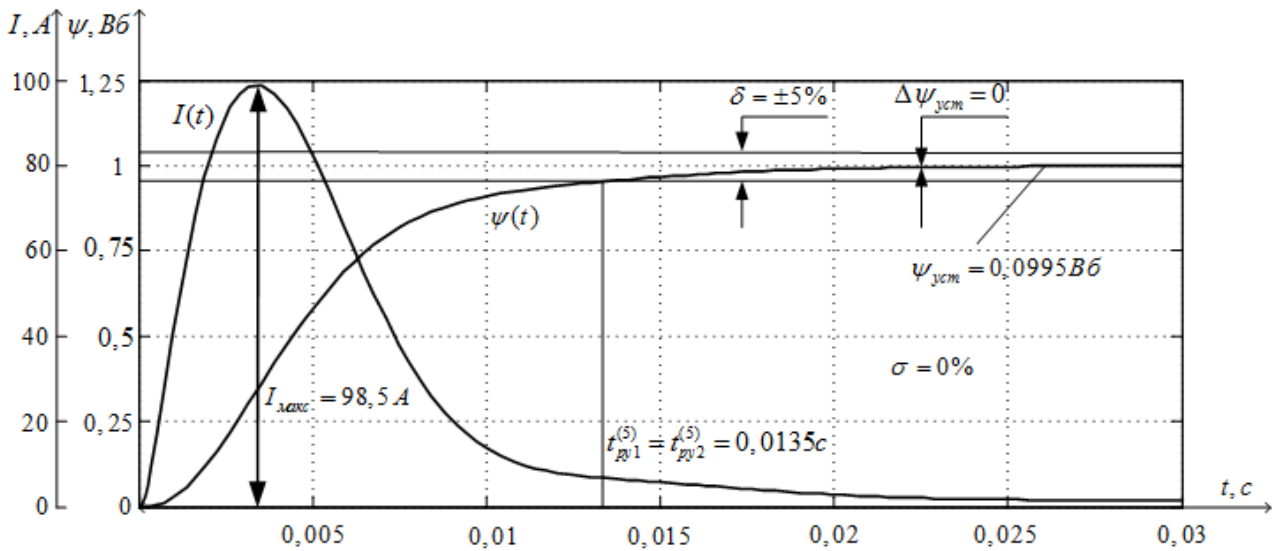


Рисунок 9.9 – Переходные характеристики $\Psi(t)$ и $I(t)$ контура потокосцепления

Таблица 9.2 – Показатели работы замкнутого контура потокосцепления

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

Разница экспериментальных и ожидаемых параметров связана с наличием аperiodического 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.

9.1.3. Оптимизация САР скорости

Структурная схема линейризованной САР скорости приведена на рисунке 9.10.

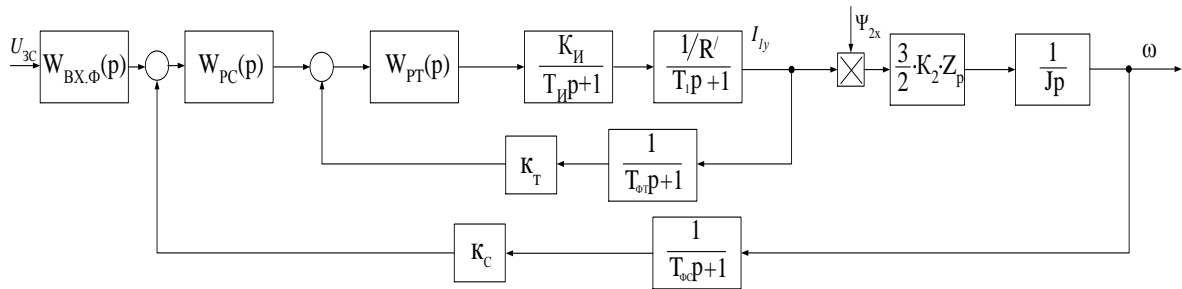


Рисунок 9.10 – Структурная схема контура скорости
Оптимизация контура скорости

Производим настройку контура скорости на СО. Учитывая параметры контура выбираем ПИ – регулятор, который имеет передаточную функцию

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

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

коэффициент усиления регулятора скорости;

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

$$T_{\mu c} = a_m \cdot T_{\mu \Gamma} + T_{\Phi C} = 2 \cdot 0,00105 + 0,001 = 0,0031 \text{ с} \quad - \quad \text{малая постоянная}$$

времени контура скорости;

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

скорости;

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

$$T_{PC} = v_c \cdot a_c \cdot T_{\mu c} = 2 \cdot 2 \cdot 0,0031 = 0,0124 \text{ с} \quad - \quad \text{постоянная времени}$$

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.

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура скорости, настроенного 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 обработке 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.

На основании структурной схемы контура скорости строим имитационную модель, приведенную на рисунке 9.11.

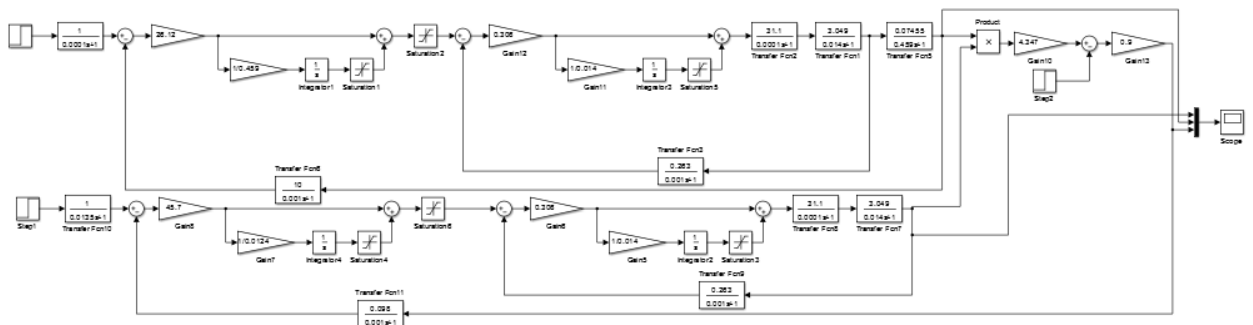


Рисунок 9.11 – Имитационная модель контура скорости

Результаты переходных процессов при моделировании контура скорости, который настроен на СО при обработке ступенчатого входного

воздействия $U_{zc} = 0,1В$, представлены в виде характеристики $\omega(t)$ на рисунке 9.12.

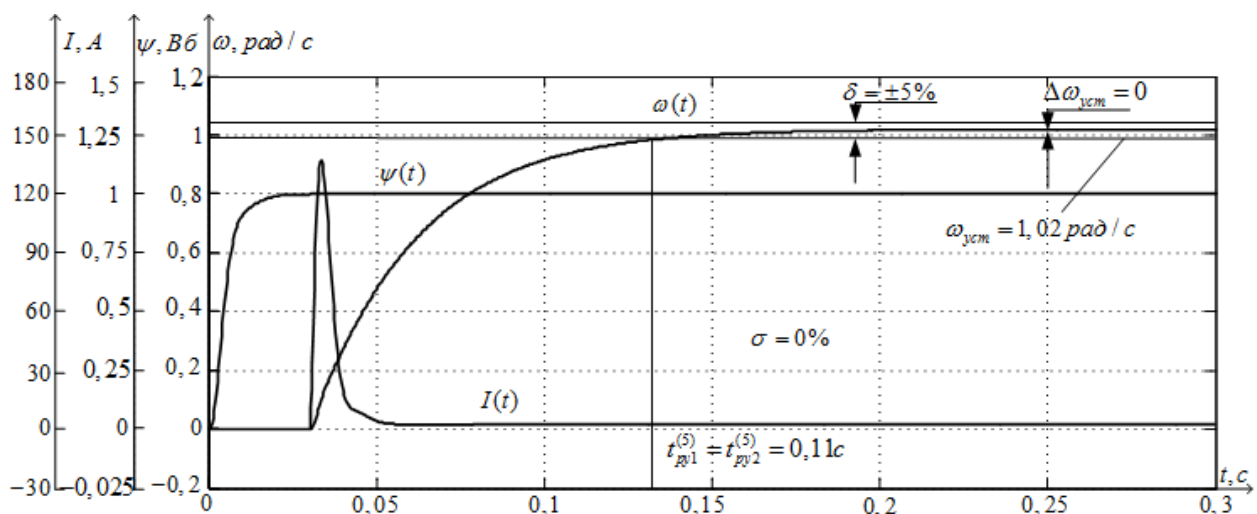


Рисунок 9.12 – Переходные характеристики $\omega(t)$, $\Psi(t)$ и $I(t)$ контура скорости

Таблица 9.3 – 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

Отличие экспериментальных показателей качества переходных процессов от ожидаемых объясняется наличием малой постоянной времени не только в прямом, но и в обратном канале контура.

10. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОЗОННОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Структурная схема САР электропривода для установившегося режима стабилизации скорости приведена на рисунке 10.1.

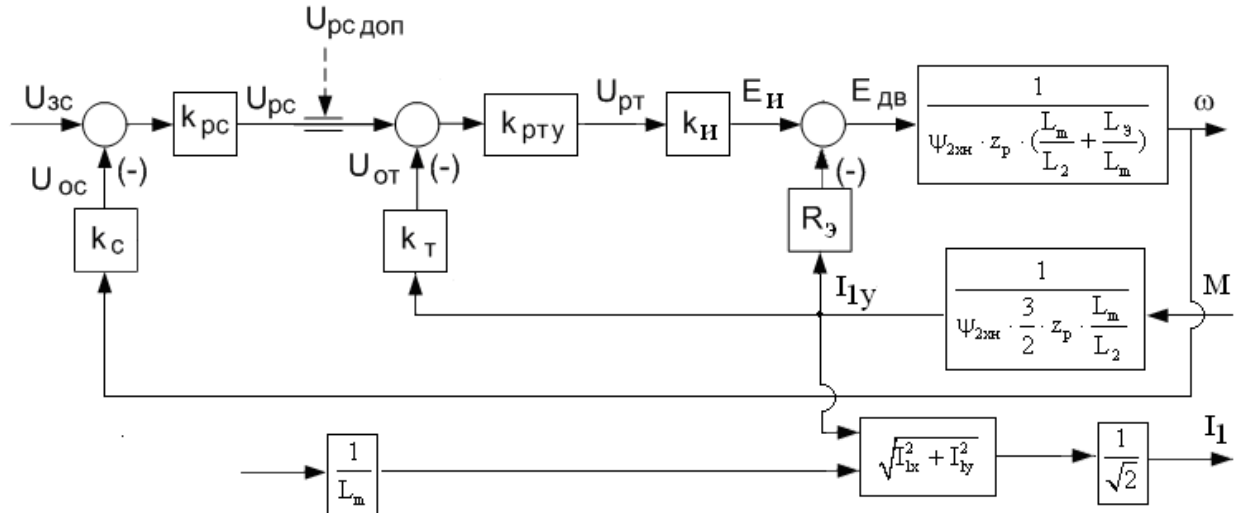


Рисунок 10.1 - Структурная схема САР скорости однозонного электропривода для статического режима стабилизации скорости

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

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

где: $\omega_0(U_{zc}) = \frac{k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_c}{\psi_{2xn} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_c} \cdot \frac{U_{zc}}{k_c}$ - скорость идеального

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$M_{макс} = M_{дв.н} + M_{с.дв}$ - максимальное значение нагрузки.

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

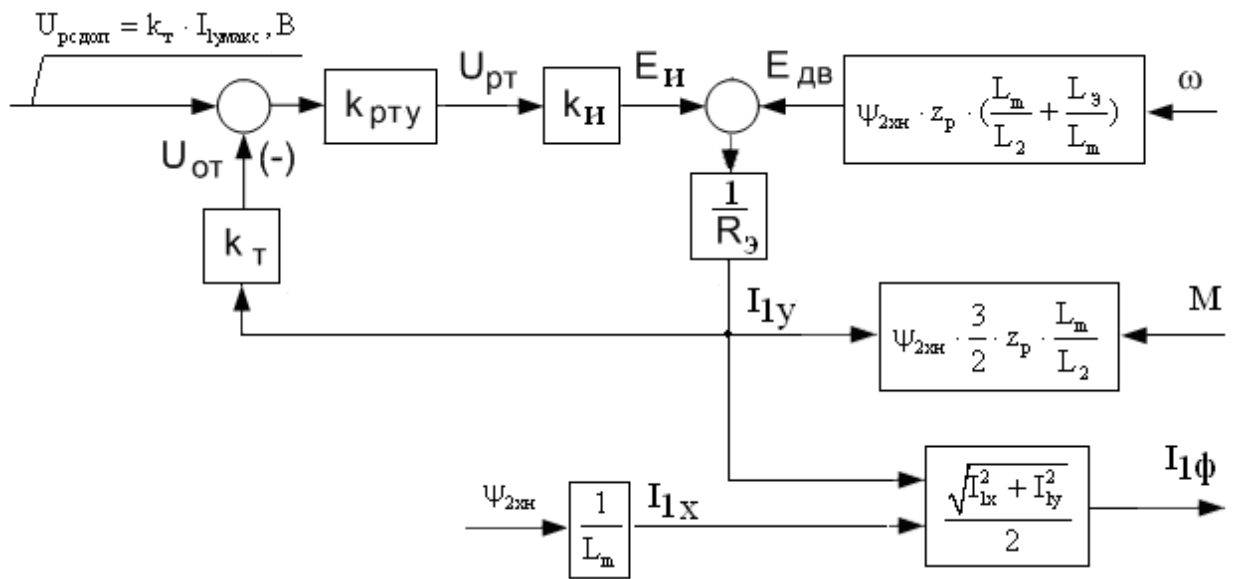


Рисунок 10.2 – Структурная схема САР скорости однозонного с постоянным токоограничением для статического режима стабилизации тока

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

$$I_{1y}(\omega) = I_{1у\text{стоп}}(U_{рсдоп}) - \Delta I_{1y}(\omega) = \frac{k_{рты} \cdot k_u \cdot k_m}{R_э + k_{рты} \cdot k_u \cdot k_m} \cdot \frac{U_{рсдоп}}{k_m} - \frac{\Psi_{2хн} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right)}{R_э + k_{рты} \cdot k_u \cdot k_m} \cdot \omega,$$

где: $I_{1у\text{стоп}}(U_{рсдоп}) = \frac{k_{рты} \cdot k_u \cdot k_m}{R_э + k_{рты} \cdot k_u \cdot k_m} \cdot \frac{U_{рсдоп}}{k_m}$ - фактическое значение

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

$$I_{1y, \max} = \frac{U_{pc \text{ доп}}}{k_m} - \text{заданное значение максимального тока, А;}$$

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

электропривода при изменении скорости ω , рад/с;

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

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

$$M(\omega) = M_{cton}(U_{pc \text{ доп}}) - \Delta M(\omega) = \frac{k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_m}{R_3 + k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_m} \cdot \psi_{2xh} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \frac{U_{pc \text{ доп}}}{k_m} -$$

$$- \frac{\psi_{2xh}^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p^2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \right)}{R_3 + k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_m} \cdot \omega$$

где: $M_{\max}(U_{pc \text{ доп}}) = \psi_{2xh} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \frac{U_{pc \text{ доп}}}{k_m}$ - заданное значение максимального

момента двигателя, Н·м;

$$M_{cton}(U_{pc \text{ доп}}) = \frac{k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_m}{R_3 + k_{pmy} \cdot k_u \cdot k_m} \cdot \psi_{2xh} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \frac{U_{pc \text{ доп}}}{k_m} - \text{ фактическое}$$

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

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

максимального электромагнитного момента двигателя при скорости ω , Н·м.

Результаты расчётов электромеханических характеристик и погрешности сводим в таблицу 10.1.

Таблица 10.1 – 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	$2,02 \cdot 10^{-4}$
$U_{\text{рзодн}} = 9,994 В$	$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	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 10.3 и 10.4 соответственно.

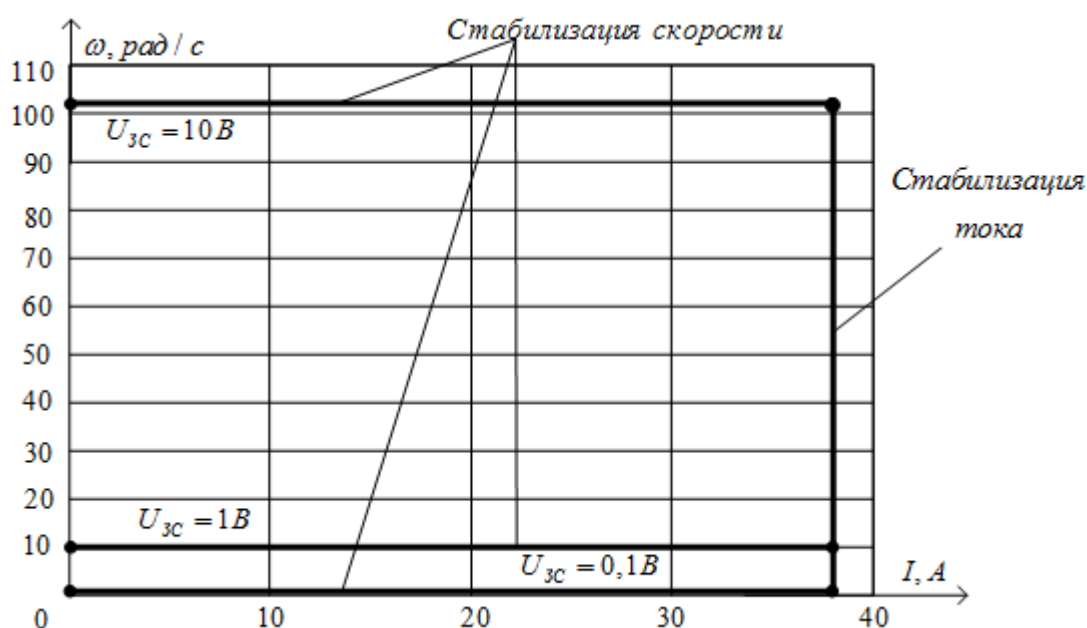


Рисунок 10.3 – Электромеханические характеристики в режимах стабилизации скорости и тока

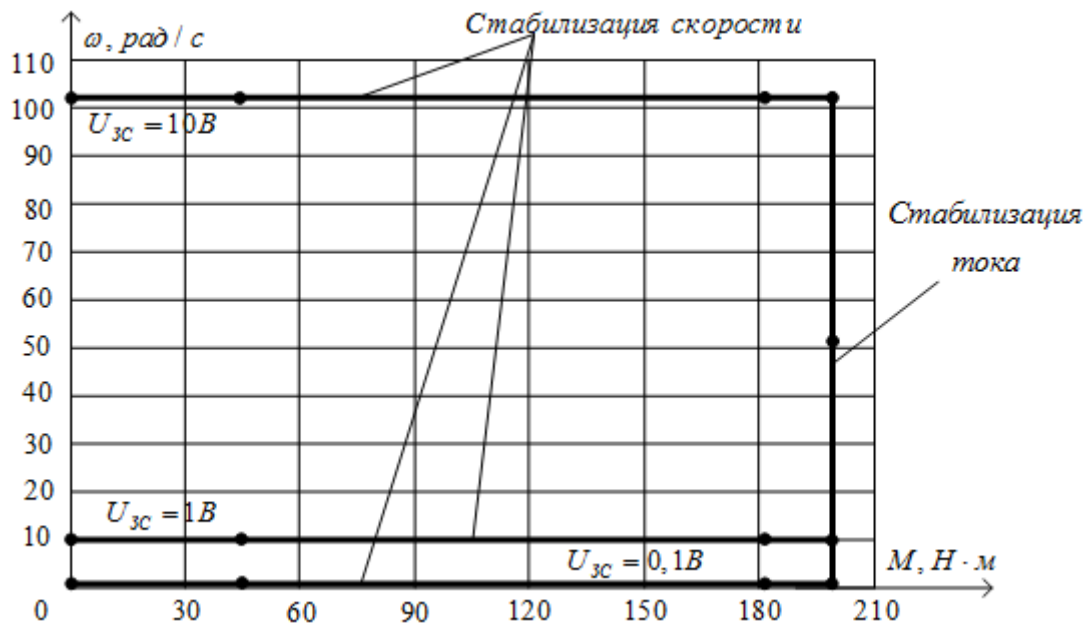


Рисунок 10.4 –Механические характеристики в режимах стабилизации скорости и тока

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.

11. 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».

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

11.1.1. 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).


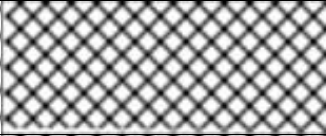

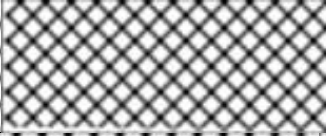

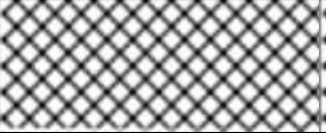
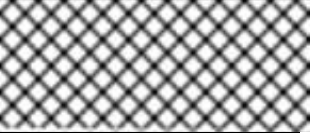

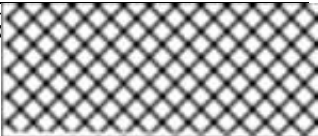
В данном случае сегментирование целесообразно провести по критерию точности, т.к. для разных типов режимов работы, требуется разная величина подачи стружки в установки соответствующей мощности.

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.11.1.

Таблица 11.1– 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.

11.1.2. 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 11.2).

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

Таблица 11.2– 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
Показатели оценки качества разработки					
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
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
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
Итого	1				83,35

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.

11.1.3. 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. 11.3).

Таблица 11.3– Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями. С4. Повышение производительности труда. С5. Высокий срок эксплуатации. С6. Надежность данной системы по сравнению с другими. С7. Возможность автоматизированного управления. С8. Высокое качество продукции.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца Сл2. Большой срок поставок материалов и комплектующий, используемые при проведении научного исследования Сл3. Отсутствие возможности проверки теоретических данных.</p>
<p>Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт В3. Снижение стоимости на электроэнергию и материалы, используемые при научных исследованиях В4. Повышение стоимости конкурентных разработок В5. Развитие технологий в данной отрасли инновационной инфраструктуры ТПУ</p>		

<p>Угрозы: 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 матрицы проекта представлена в табл. 11.4.

Таблица 11.4– 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 4.

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

Результаты анализа таблицы:

B4Сл2

B5Сл1Сл3

Продолжение таблицы 4.

Сильные стороны проекта									
Угрозы		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
		У1	-	-	-	-	+	-	-
	У2	0	0	-	+	-	-	-	-
	У3	+	0	+	+	-	+	0	0
	У4	-	-	-	0	-	-	-	-
	У5	0	-	-	-	+	-	-	-

Результаты анализа таблицы:

У1С5

У2С8

У3С1С3С4С6

У5С5

Слабые стороны проекта				
Угрозы		Сл1	Сл2	Сл3
	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. 11.5).

Таблица 11.5– Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</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>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</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>Возможности:</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>

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

11.2. 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.

11.3. Планирование научно-исследовательских работ

11.3.1. 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 11.6.

Таблица 11.6– 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
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер
	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

11.3.2 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.

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 11.7.

Таблица 11.7– 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			$t_{ожи}$, 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	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 теоретическими 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.

11.3.4. 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.

11.3.4.1. 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 11.9.

Таблица 11.9.– Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов			Исполнители по категориям			Трудо-емкость, чел.-дн.			Заработная 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	6464,94			
			Инженер								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	7850,29			
			Лаборант								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	4156,03			
			Инженер								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	3860,99		
5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер	Инженер	5,6	11,6	5,6	1848,18	1848,18	1848,18	10349,80	21438,88	10349,80			
			Лаборант								13996,09				
6	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Инженер	Инженер	32,8	32,8	7,4	1848,18	1848,18	1848,18	60620,30	60620,30	13676,53			
			Лаборант								39575,16				
7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими данными	Инженер	Научный руководитель	5,8	14	5,8	1848,18	1848,18	1848,18	10719,44	32324,74	10719,44			
			Инженер								25874,52				
8	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер	Научный руководитель	2,4	9,2	2,4	1848,18	1848,18	1848,18	4435,63	21241,972	4435,632			
			Инженер								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	9610,53		
10	Публикация полученных результатов	Инженер	Инженер	Инженер	3,4	3,4	3,4	1848,18	1848,18	1848,18	6283,81	6283,81	6283,81		
Итого:											153904,9	322725,86	86336,58		

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

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d},$$

где: Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Расчет баланса рабочего времени приведен в таблице 11.10.

Таблица 11.10 – 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:

$$Z_m = Z_{ТС} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p,$$

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

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

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 11.11.

Таблица 11.11– Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, руб.	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}$, руб	$Z_{дн}$, руб.	$T_{р}$, 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

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.

11.3.4.3 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 11.12.

Таблица 11.12– 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			

11.3.4.4. 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:

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

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 11.13 – Расчет величины накладных расходов

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

11.3.4.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Расчитанная 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 11.14.

Таблица 11.14 – 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

11.4. 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:

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}},$$

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

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

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

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля). Расчёт интегрального финансового показателя приведен в таблице 11.15.

Таблица 11.15 – Расчёт интегрального финансового показателя конкурентных технических решений

	$I_{\text{фин}}^{\text{исп.}i}$
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 11.16 – 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
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 11.17.

Таблица 11.17 – 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.

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.

12. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Социальная ответственность - сознательное отношение субъекта социальной деятельности к требованиям социальной необходимости, гражданского долга, социальных задач, норм и ценностей, понимание последствий осуществляемой деятельности для определенных социальных групп и личностей, для социального прогресса общества.

В данном разделе рассматриваются безопасность и экологичность лаборатории где исследуется и проверяется электропривод питателя сушильного барабана. Здесь будет рассмотрено необходимое обеспечение условий труда в лаборатории (санитарно-гигиенические условия, защита от негативных производственных факторов, обеспечение пожарной безопасности) в соответствии с действующими нормативными документами, а также вопросы экологической безопасности.

Безопасность включает в себя влияние опасных и вредных факторов, их анализ и меры их профилактики.

12.1. Производственная безопасность

12.1.1. Описание технологического процесса и рабочего места

Технологический процесс исследования и проверки электропривода питателя сушильного барабана заключается в следующем:

1. Ознакомление и анализ литературы (статьи, диссертации, учебные пособия и монографии) по данной тематике;
2. Исследование работы системы электропривода питателя сушильного барабана в лаборатории;
3. Выбор необходимого оборудования;
4. Расчет регуляторов;
5. Создание модели электропривода и анализ его работы;
6. Лабораторное апробирование регуляторов на математической модели системы ПЧ – АД (преобразователь частоты – асинхронный двигатель);

7. Анализ полученных результатов

В описанном технологическом процессе основным оборудованием является:

- монитор;
- компьютер;
- источник напряжения, необходимый для работы оборудования;
- исследуемый асинхронный двигатель и преобразователь частоты ;
- шкаф диагностики и управления;

12.1.2. Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

Проведем анализ опасных производственных факторов в вышеописанном технологическом процессе исследования и проверки электропривода питателя сушильного барабана.

Лаборатория в которой проводится исследование электрического привода, по опасности поражения электрическим током относится к помещениям без повышенной опасности. Поскольку в данном помещении отсутствует условия, создающие повышенную или особую опасность, такие как: сырость; токопроводящая пыль; высокая температура; возможность одновременного прикосновения человека к металлоконструкциям зданий, имеющим соединение с землей, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования (открытым проводящим частям), с другой; химически активная или органическая среда. [28]

Основным опасным фактором является возможность поражения человека электрическим током, так как работа производится с рабочими электрическими установками, в частности двигателями. Для снижения уровня опасности проводится заземление электроустановок и полное или частичное ограждение токоведущих частей. Данные операции должны производиться на основании. [15-19]

Следующая опасность заключается в том, что работа проводится с рабочим двигателем, соответственно вал двигателя находится в движении, что может привести к механическим повреждениям частей тела человека. Однако, благодаря конструкции двигателей, опасность представляют лишь выходные концы валов и места соединений. Для снижения риска устанавливают кожухи или защитные экраны в местах открытых движущихся механических частей.

12.1.3. Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

Часть технологического процесса исследования и проверки электропривода питателя сушильного барабана, а именно п.2, представленные в разделе 1.1. основана на работе с двигателем, который в свою очередь является источником повышенного уровня шума, что является вредным фактором производственной среды [21]. Чтобы уменьшить влияние шума, можно применять различные меры такие как: замена подшипников качения на подшипники-скольжения, проверка и своевременная замена смазочных материалов у подшипников. Но такие меры слишком затратные и трудоемкие. Также имеются и другие способы решения данной проблемы. Можно использовать различные ограждения из звукопоглощающих материалов и отдельных частей установки для снижения уровня шума. Возможно также закрытие звукоизолирующими кожухами всей установки, но это может вызвать затруднения при работе с оборудованием.

Следующий вредный фактор – недостаток естественного света [15], при работе в условиях недостаточной освещённости, связанным с временем суток и погодными условиями.

Однако недостаток освещенности рабочей зоны и помещения в целом плохо сказывается на здоровье работника [15,22]. Для улучшения ситуации, необходимо установить светильники на основании следующего расчета:

Данные, необходимые для расчета искусственного освещения:

- длина помещения $A_{\text{пом}} = 8 \text{ м};$
- ширина $B_{\text{пом}} = 4 \text{ м};$
- высота $H_{\text{пом}} = 3 \text{ м};$
- коэффициент отражения стен $R_c = 30\%;$
- высота рабочей поверхности $h_p = 0,75 \text{ м};$
- коэффициент отражения потолка $R_n = 50\%;$
- коэффициент запаса $k = 1,5;$
- коэффициент неравномерности $Z = 1,1.$

Требуется создать освещенность $E = 300 \text{ Лк};$

Рассчитаем систему общего освещения (люминесцентного).

Выбором являются светильники типа ОД с интегральным критерием оптимальности расположения светильников $\lambda = 1,4.$

Расстояние светильников от перекрытия принимаем $h_c = 0,1 \text{ м}$ и получаем:

$$h = H - h_c - h_p = 3 - 0,1 - 0,75 = 2,15 \text{ м};$$

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,15 = 3,01 \text{ м};$$

$$\frac{L}{3} = \frac{3,01}{3} = 1 \text{ м};$$

Светильники размещаем в два ряда. В каждом из рядов будет установлено 5 светильников типа ОД. Мощность светильника 30 Вт, длина 0,9 м. Разрывы между светильниками, которых будет 4 в ряду, составят 27 см. План размещения светильников представлен на рисунке 1. В каждом светильнике установлено по две лампы, соответственно общее число ламп в помещении $n = 20.$

Найдем индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{8 \cdot 4}{2,15 \cdot (8 + 4)} = 1,2$$

Тогда, коэффициент использования светового потока равен:

$$\eta = 0,43.$$

Рассчитаем световой поток:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot k \cdot Z}{n \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 32 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{20 \cdot 0,43} = 1841,8 \text{ Лм}$$

Определим потребный световой поток ламп в ряде. Для этого выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛДД 40 Вт со световым потоком 2100 Лм. Делаем проверку условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% = \frac{2100 - 1841,8}{2100} \cdot 100 \leq 20\%$$

Получаем

$$-10\% \leq 13,7\% \leq +20\% \text{ – условие выполнено.}$$

Определяем электрическую мощность осветительной установки

$$P = 20 \cdot 30 = 600 \text{ Вт}$$

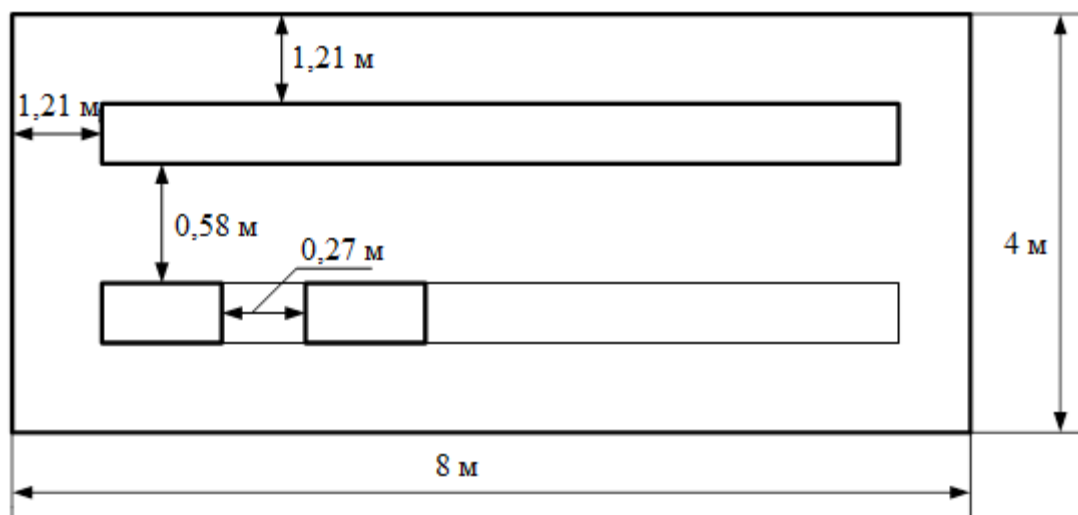


Рисунок 12.1 – План размещения светильников с люминесцентными лампами

Пониженная контрастность в взаимодействии с плохой освещенность является наиболее опасным для зрительных органов работника и может привести к травмам, при работе с движущимися частями установки [15]. Простым решением для снижения риска является покраска отдельных частей установки в различные отчетливо видные цвета.

Другим вредным фактором является пониженная подвижность воздуха [23], связанная с плохой вентиляруемостью лаборатории, в связи с отсутствием вентиляционной системы.

Следствием предыдущего вредного фактора и наличием теплоотдающих при работе элементов установки будет повышенная температура воздуха рабочей зоны [23], которая пагубно влияет на состояние человека.

Для решения проблем низкой подвижности воздуха и повышенной температуры рабочей зоны необходимо установить вентиляционную систему.

Вентиляция позволяет осуществлять регулируемый воздухообмен, обеспечивающий нормальные санитарно-гигиенические условия в помещениях.

Также вредным фактором является повышенный уровень вибрации, который возникает во время работы исследуемого двигателя при нагрузках выше номинальной. Для избегания влияния вибраций на человека необходимо провести мероприятия на основании [20], а именно, жесткая фиксация рабочих механизмов на своих местах с использованием виброгасящих материалов.

12.2. Экологическая безопасность

Технологический процесс исследования и проверки системы ПЧ – АД, а также её использование не представляет угрозы для окружающей среды. Это связано с тем, что процесс является безотходным, и в течении работы нет выделения опасных для экологического состояния элементов. Показатели выделяемого тепла, электромагнитных излучений также не выше допустимых значений. Данная система может применяться на любых предприятиях, которые нуждаются в ней.

Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681 [27]. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки.

При разработке системы приточной вентиляции используется ПЭВМ. В ПЭВМ содержится множество компонентов, которые содержат токсичные вещества. Например:

1. Свинец (накапливается в организме, может поражать нервную систему и почки);
2. Никель и цинк (могут вызывать дерматит);
3. Щелочи (опасность для кожных покровов и слизистых);

Поэтому ПЭВМ требует особых способов утилизации:

1. Отделение неметаллических и металлических частей;
2. Неметаллические части должны быть подвержены специальной переработке
3. Металлические части должны быть переплавлены и использованы для последующего производства

Данные мероприятия позволяют обеспечить максимально эффективную утилизацию отходов и максимально уменьшить их неблагоприятное воздействие на окружающую среду.

12.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятными чрезвычайными ситуациями при исследовании и проверке электропривода питателя сушильного барабана являются пожар или взрыв на рабочем месте [23,24,25]. Потенциальное возникновение пожара связано с возможным накоплением токоведущей пыли внутри компьютера, что может привести к короткому замыканию, возгоранию пыли и, если не будет принято никаких мер, распространению пожара. К воспламенению материалов может привести также наличие нагреваемых элементов в ходе работы установки. Достаточно следить за тем, чтобы вблизи установки во время её работы не находились легко воспламеняемые материалы и вещества.

Цех сушки стружки, согласно СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» и Техническому регламенту о пожарной безопасности

относится к категории «В». Категория В – это категория помещений в которых горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только греть.

Согласно Постановлению Правительства РФ от 25.04.2012 N 390 "О противопожарном режиме"[26], тушение пожара организуется первичными средствами, такими как: огнетушитель порошковый (ОП-5, 4 штуки), огнетушитель углекислый (ОУ-5, 4 штуки, вместительность баллона составляет 7,2 л.). В случае если потушить очаг возгорания не удастся, привести в действие ручной пожарный извещатель. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь.

В связи с возможной угрозой возникновения пожара был разработан план действий:

- в случае обнаружения возгорания необходимо сообщить руководителю и попытаться потушить очаг возгорания своими силами с помощью средств первичного пожаротушения такими как: огнетушитель (порошковый, углекислотный);

- в случае если потушить очаг возгорания не удастся, привести в действие ручной пожарный извещатель;

- немедленно сообщить о чрезвычайной ситуации в пожарную охрану по телефону 01 (сотовый 010), назвать адрес объекта, место и причины возникновения пожара;

- принять меры по эвакуации людей, материальных ценностей;

- приступить к тушению пожара, отключив электроэнергию;

- встретить подразделения пожарной охраны и, при необходимости, оказать помощь при выборе наилучшего пути для подхода к очагу пожара.

Возникновение других видов ЧС маловероятно, соответственно рассмотрению не подлежат.

12.4. Правила и организационные вопросы обеспечения безопасности

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" при размещении рабочих мест с ПЭВМ расстояние между рабочими столами с видеомониторами (в направлении тыла поверхности одного видеомонитора и экрана другого видеомонитора) должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов - не менее 1,2 м.

Рабочие места с ПЭВМ при выполнении работы, требующей значительного умственного напряжения или высокой концентрации внимания, рекомендуется изолировать друг от друга перегородками высотой 1,5 - 2,0 м.

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 - 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы. При этом допускается использование рабочих столов различных конструкций, отвечающих современным требованиям эргономики. Поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения 0,5 - 0,7.

Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ.

Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого

параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию.

Поверхность сиденья, спинки и других элементов стула (кресла) должна быть полумягкой, с нескользящим, слабо электризующимся и воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной работы являлся вопрос исследования возможной структуры регулируемого электропривода питателя сушильного барабана на основе комплектного преобразователя частоты 6SL3200-6AM23-8AN0.

В работе предложено реализовать систему РЭП питателя как систему преобразователь частоты - асинхронный двигатель с возможностью реализации законов скалярного управления по разомкнутой структуре.

В результате исследования статического режима работы скалярного управления установлено, что электропривод не обеспечивает заданную область работы в указанном диапазоне регулирования скорости, что не удовлетворяет техническому заданию.

В ходе имитационного моделирования динамических режимов работы установлено, что разработанная система скалярного управления работает не устойчиво в требуемом диапазоне, при диапазоне регулирования 1:15 электропривод работает на пределе.

В ходе имитационного моделирования динамических режимов работы установлено, что разработанная система не отрабатывает заданную диаграмму движения и не обеспечивает требуемые показатели качества.

Поэтому было реализовано бездатчиковое векторное управление асинхронным электроприводом.

Преимущество векторного закона регулирования над скалярным заключается в повышенном качестве переходных характеристик, однако при этом необходимо осуществить настройку регуляторов контуров потока, скорости и тока, правильно выбрав постоянные времени контуров. Процесс оптимизации параллельных контуров соответствует оптимизации системы двухзонного электропривода постоянного тока без учёта влияния перекрёстных обратных связей. В случае применения законов векторного управления в системе РЭП питателя были получены приблизительно одинаковые результаты при отклонении нагрузки в большую и меньшую стороны от номинальной. В системе векторного частотно-токового

управления в момент пуска в соответствии с настройкой параметров регулятора переходный процесс тока носит апериодический характер с максимальным значением.

Модели, построенные в работе, используют информацию напрямую без преобразовательных устройств. Это упрощение необходимо для осуществления настройки параметров регуляторов, т.к. реализация регуляторов возможна только во вращающейся системе. В реальных системах используется прямое и обратное преобразование координат.

В технико-экономическом обосновании применения РЭП проведен анализ состава и стоимости ПНР, составлена смета на проведение работ, построен график их выполнения. Установлено, что разработанная система пожаробезопасна и не наносит вред окружающей среде.

Таким образом, разработанная система РЭП питателя полностью удовлетворяет техническим требованиям. Спроектированный электропривод позволит в дальнейшем автоматизировать процесс загрузки сушильного барабана.

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 12.0.003 – 2015. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
15. ГОСТ Р 12.1.019 – 2009. ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
16. ГОСТ 12.0.004 – 2015 ССБТ. Обучение работающих безопасности труда
17. ГОСТ 12.1.030 – 81 ССБТ. Защитное заземление, зануление
18. ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов
19. ГОСТ 12.1.012 – 2004 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования
20. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменением N 1)
21. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий
22. СП 60.13330.2012 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003
23. ГОСТ 12.1.004 – 91 система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования (с Изменениями N 1)
24. ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования
25. Постановлению Правительства РФ от 25.04.2012 N 390 "О противопожарном режиме"
26. Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681 "Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств"
27. Правила устройства электроустановок (7 изд.)
28. СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Optimization of automatic control system for a variable speed drive

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Брусов Андрей Владимирович		

Консультант отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Образцов К.В.			

Консультант – лингвист отделения ИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Соколова Э.Я.			

INTRODUCTION

The woodworking industry belongs to explosive dangerous industries with high energy intensity. At present electric drives drive the main mechanisms at enterprises. Strict requirements are specified to the systems of electric drive for the main technological mechanisms. The perfection of the electric drive system increases the efficiency of electric power utilization. It is obvious that the requirement of explosion-proof imposes certain restrictions on a regulated electric drive system application which is widely used in industrial production (thyristor converter system - DC motor) because of the lack of DC motors in explosion-proof design in full scale production. Constant improvement of the technological process sets the task of creating and implementing regulated electric drive systems in production.

Asynchronous explosion-proof electric motors are mainly used at explosive production enterprises. Technological mechanisms differ from each other in their modes of operation. Most of these mechanisms based on the technological process need a range of speed control from 1: 2 to 1:10 in order to meet the requirements of the desired quality and quantity of products. Thus, speed regulation should range from 1: 3 to 1:15 for feeders of various types used in woodworking industries due to technological process requirements. At present speed regulation is not applied at all to these mechanisms or multi-speed asynchronous motors, mechanical gears or interchangeable pulleys with different gear ratios are used. This significantly inhibits the integration of high-performance, continuous technological processes and does not allow full implementation of complete integrated automation. The utilization of an adjustable electric drive in many cases leads not only to an increase in the number of products manufactured and to improve its quality, but also to a significant electricity conservation.

At present the electric drive for a large number of mechanisms can be applied on the basis of an induction motor with a squirrel cage rotor controlled by a static frequency converter. Speed regulation can be done gradually by changing network frequency in a wide range as well as specified characteristics. In addition to this, the

adjusting characteristics have a high stiffness, and the motor retains a large overload capacity. Due to the high characteristics, changing the frequency regulation has a wider application. In addition, the frequency converter system - asynchronous motor (FCS-AD) used in woodworking plants, is one of the possible ways to create a variable frequency electric drive. In comparison with the DC drive, the FCS - AD system has its advantages, such as ease of operation and tuning, but the high cost of the frequency converter is its disadvantage.

The purpose of this master's thesis is to study the mechanism of a scraper feeder for a drying drum with an AC electric drive based on a frequency converter system - an asynchronous motor. It is necessary to consider the laws of frequency regulation speed, to develop and create a simulation model for the consideration of the laws of speed regulation in the system frequency converter - asynchronous motor for the purpose to construct a simulation model.

1. Optimization of automatic control system for a variable speed drive

1.1. Calculation of power circuit parameters

This equation is used for current feedback coefficient calculation:

$$k_{mx} = k_{my} = \frac{U_{zt\ max}}{I_{ed\ max}} = \frac{10}{38} = 0,263\ V / A,$$

where $U_{zt\ max} = 10\ V$;

Coefficient of feedback on flux linkage:

$$k_{\Psi} = \frac{U_{z\Psi\ max}}{\Psi_n} = \frac{10}{1} = 10\ V/Wb,$$

where $U_{z\Psi\ max} = 10\ V$,

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

Coefficient of feedback for speed:

$$k_c = \frac{U_{zc\max}}{\omega_{ed\max}} = \frac{10}{102,09} = 0,098 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{rad},$$

where $U_{zc\max} = 10 \text{ V}$;

The minimum delay time in the calculation of stator current instantaneous value can be determined from the position of Kotelnikov's theorem. Information distortion will not occur if the following condition is met:

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

where f_n – the carrier frequency of the voltage inverter;

f_{to} – calculations frequency of the instantaneous stator current;

$k_k \geq 2$ – coefficient.

Then the minimum delay time in calculating the instantaneous value of the stator current:

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

The high carrier frequency f_n of the inverter brings the stator current to sinusoidal (see Figure 9.3). This is one of the reasons why the carrier frequency of the inverter is increased to tens of kilohertz. However, an excessive increase in the carrier frequency results in an increase in switching losses in the inverter's keys. The optimum value of the carrier frequency should provide a sinusoidal stator current close to the sinusoidal value with acceptable switching losses in the inverter keys. As a rule, the carrier frequency in modern voltage inverters is in range from 5 kHz to 20 kHz and is determined in practice at the final tuning of the converter.[1]

We take the value of the carrier frequency $f_n = 10000$ and $k_k = 2$.

Then the stator current computation:

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

To eliminate the randomness in calculating the motor stator current, it is smoothed with filters. In this case, we finally accept:

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

Time constant of delay in the flux linkages loop is:

$$T_{\mu\psi_0} = 8 \cdot T_{\mu T_0} = 8 \cdot 0,00025 = 0,002 \text{ s}.$$

The time constant of the delay in the speed loop is:

$$T_{\mu\omega} = 4 \cdot T_{\mu T_0} = 4 \cdot 0,00025 = 0,001 \text{ s}.$$

Inverter time constant:

$$T_i = \frac{1}{f_i} = \frac{1}{10000} = 0,0001 \text{ s}.$$

Stator winding full inductive resistance:

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

Rotor winding total inductive resistance:

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

Coefficient of scattering:

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

Then

$$K_2 = \frac{X_1}{X_2} = \frac{23,409}{24,233} = 0,966.$$

The value of rotor circuit inductance:

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

The rotor circuit time constant:

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

The value of stator circuit inductance:

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

The reduced value of the rotor circuit inductance:

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

The reduced value of total active resistance:

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

The time constant of the stator circuit:

$$T_1 = \frac{L_1'}{R'} = \frac{0,00448}{0,328} = 0,014 \text{ s.}$$

Inductance value of the magnetizing circuit:

$$L_t = \frac{X_t}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = \frac{23,409}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,07455 \text{ H.}$$

1.2. Optimization of ACS (Automatic Control System) flux linkage

The block diagram of the linearized two-loop ACS flux link is shown in Figure A.1.

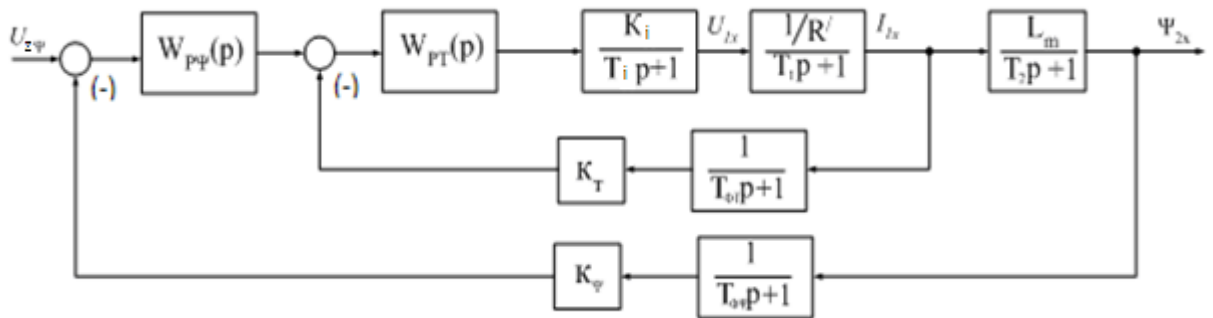


Figure A.1 - Block diagram of a linearized two-circuit [2]

Current loop optimization

The block diagram of the circuit is shown in Figure A.2.

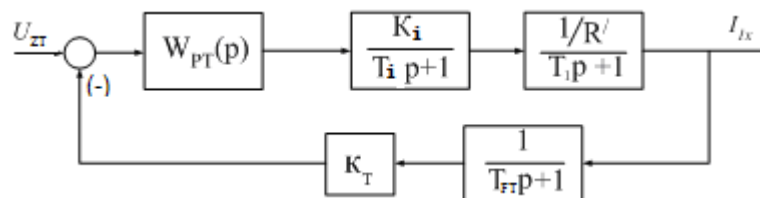


Figure A.2 - Block diagram of the current loop [2]

The loop contains inertial links of the first order with time constants: $T_1 = 0,014s$, $T_i = 0,0001s$ and $T_{FT} = 0,001s$.

We take a small uncompensated time constant of the contour, $T_{\mu t} = T_{\mu PK} + T_{\mu OK}$

where $T_{\mu PK}$ – forward channel time constant of the current circuit,

$T_{\mu OK}$ – return channel time constant of the current circuit.

$$T_{\mu PK} = 0,5 \cdot T_i = 0,5 \cdot 0,0001 = 0,00005 \text{ s};$$

$$T_{\mu OK} = T_{FT} + T_{ADC} = 0,001 \text{ s};$$

$$T_{\mu t} = T_{\mu PK} + T_{\mu OK} = 0,00005 + 0,001 = 0,00105 \text{ s}.$$

The current loop is tuned to the modular optimum (MO). Taking into account the parameters of the circuit, we select the PI controller with the transfer function:

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

where $T_{pt} = T_1 = 0,014 \text{ s}$ – regulator time constant;

$$k_{pt} = \frac{T_1 \cdot R'}{k_i \cdot k_t \cdot a_t \cdot T_{\mu t}} = \frac{0,016 \cdot 0,328}{31,1 \cdot 0,263 \cdot 2 \cdot 0,00105} = 0,306 \text{ – regulator gain};$$

$$k_t = \frac{U_{zt.\max}}{I_{1m\max}} = \frac{10}{38} = 0,263 \frac{\text{V}}{\text{A}} \text{ – current feedback coefficient};$$

$U_{zt.\max}$ – maximum current reference voltage $U_{zt.\max} = 10\text{V}$;

$a_t = 2$ – optimization coefficient of the current loop by MO;

$I_{1max} = 38 \text{ A}$ – maximum short-time converter current.

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

Expected closed-loop performance:

$\sigma = 4,3\%$ – overshooting;

$t_{py1}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu t} = 4,1 \cdot 0,00105 = 0,004305 \text{ s}$ – first agreement time;

$t_{py2}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu t} = 4,1 \cdot 0,00105 = 0,004305 \text{ s}$ – transient process time during the

development of the step signal;

$$\omega_n^{(m)} = \omega_n^{(\phi)} = \frac{0,71}{T_{\mu t}} = \frac{0,71}{0,00105} = 676,2 \frac{rad}{s} - \text{module and phase bandwidths.}$$

According to the block diagram of the current loop (see Figure A.2), an imitation model is constructed. The model is shown in Figure A.3.

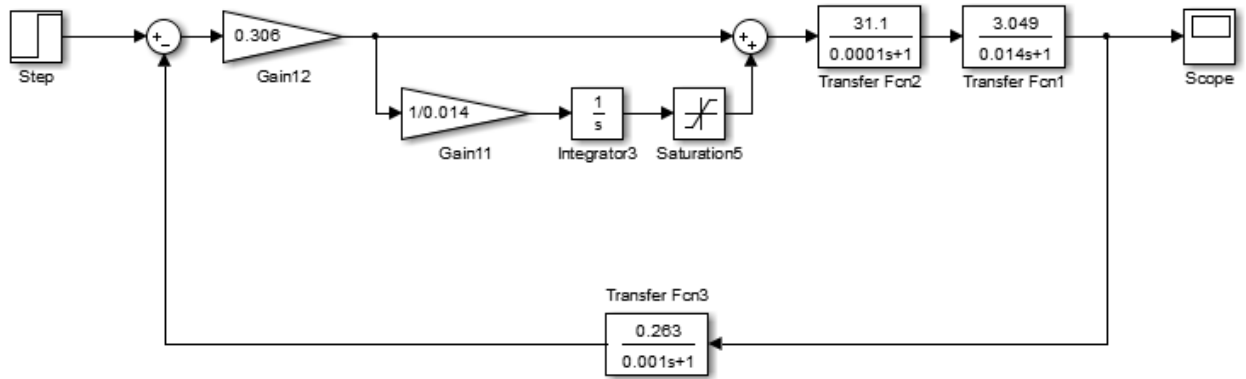


Figure A.3 – The model of current loop imitation

The results of modeling the transient processes in the current loop which are tuned to the modular optimum when the step input is processed are given in the form of a transient response in Figure A.4.

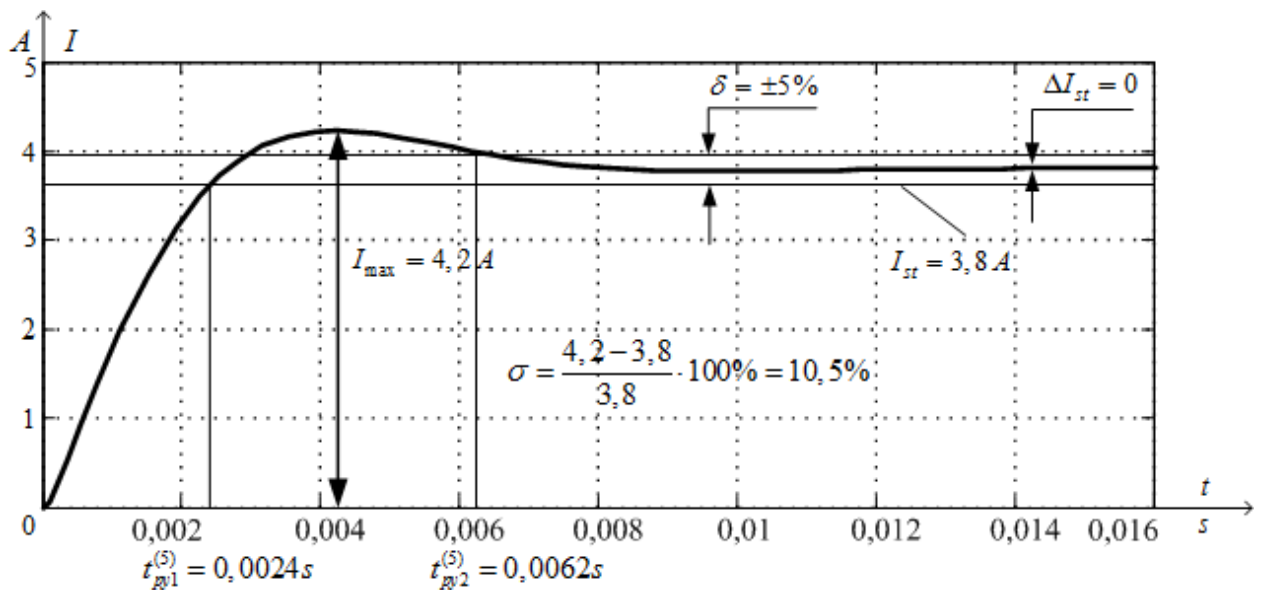


Figure A.4 – The transient response $I(t)$ of the current loop according to the block diagram is shown in Figure A.3

An analysis of the obtained modeling results shows that they are in the best agreement with the expected performance of the circuit.

To clarity, we summarize the results of the simulation in Table A.1.

Table A.1 – Indicators of current loop work

Indicators	Expected	Obtained
$\sigma, \%$	4,3	10,5
$t_{py1}^{(5)}, s$	0,00435625	0,0024
$t_{py2}^{(5)}, s$	0,00435625	0,0062

Optimization of flux linkage loop

The structure diagram of flux linkage loop is presented in Figure A.5.

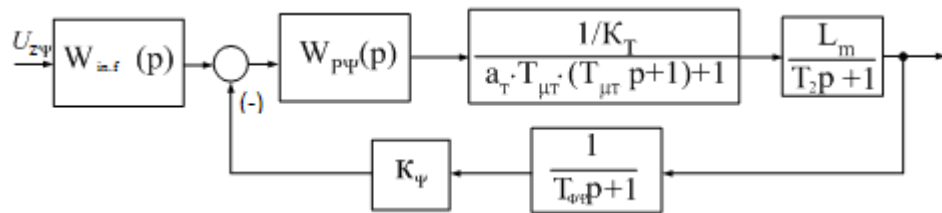


Figure A.5 – Structure diagram of flux linkage loop

Parameters of loop elements [2]

The flux linkage loop is tuned on MO. Taking into account the parameters of the loop the PI-regulator transfer function can be chosen as:

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

where $k_{p\psi} = \frac{k_T \cdot T_2}{k_\psi \cdot L_m \cdot 2 \cdot T_{\mu\psi}} = \frac{0,263 \cdot 0,459}{10 \cdot 0,07455 \cdot 2 \cdot 0,0031} = 26,12$ – gain of the flux

linkage regulator,

$T_{\mu\psi} = a_m \cdot T_{\mu m} + T_{F\psi} = 2 \cdot 0,00105 + 0,001 = 0,0031s$ - short time constant of the flux linkage loop.

$L_m = L_m = 0,07455$ - inductance of the magnetizing loop.

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

On the input of the loop of the flux-linkage, we establish a filter whose transfer function is defined by expression:

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

Expected indicators of the closed speed loop work tuned on MO.

$\sigma = 8,1\%$ – overshooting;

$t_{py1}^{(5)} = 7 \cdot T_{\mu m} = 7 \cdot 0,00105 = 0,00735 \text{ s}$ –first agreement time;

$t_{py2}^{(5)} = 12 \cdot T_{\mu m} = 12 \cdot 0,00105 = 0,0126 \text{ s}$ –transient process time during the development of the step signal;

$\omega_n^{(M)} = \frac{0,5}{T_{\mu m}} = \frac{0,5}{0,00105} = 476,2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ –module bandwidth;

$\omega_n^{(\phi)} = \frac{0,35}{T_{\mu m}} = \frac{0,35}{0,00105} = 333,3 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ – phase bandwidth.

The structural diagram of the flux-link contour is represented in Figure A.5.

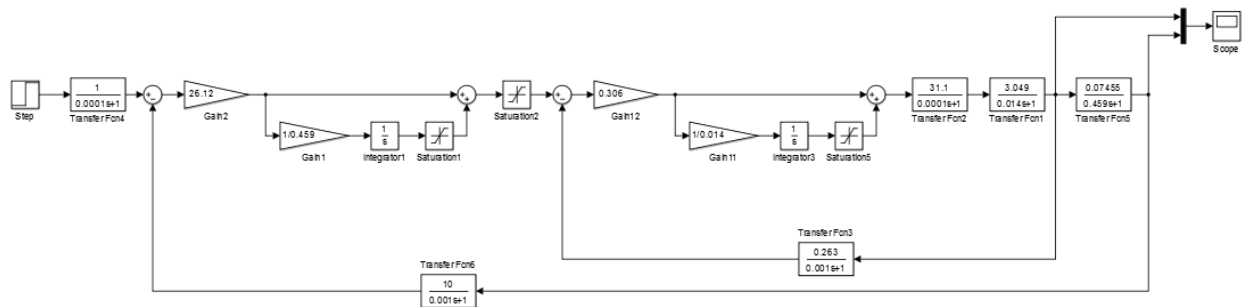


Figure A.6 – Imitation module of the flux linkage loop.

The results of modeling the transient processes in the flux-linking loop tuned to the modular optimum, when the step signal like $U_{z\Psi} = 0,1V$ takes place, are shown in the form of the transient characteristics $\Psi(t)$ and $I(t)$ in Fig. A.7.

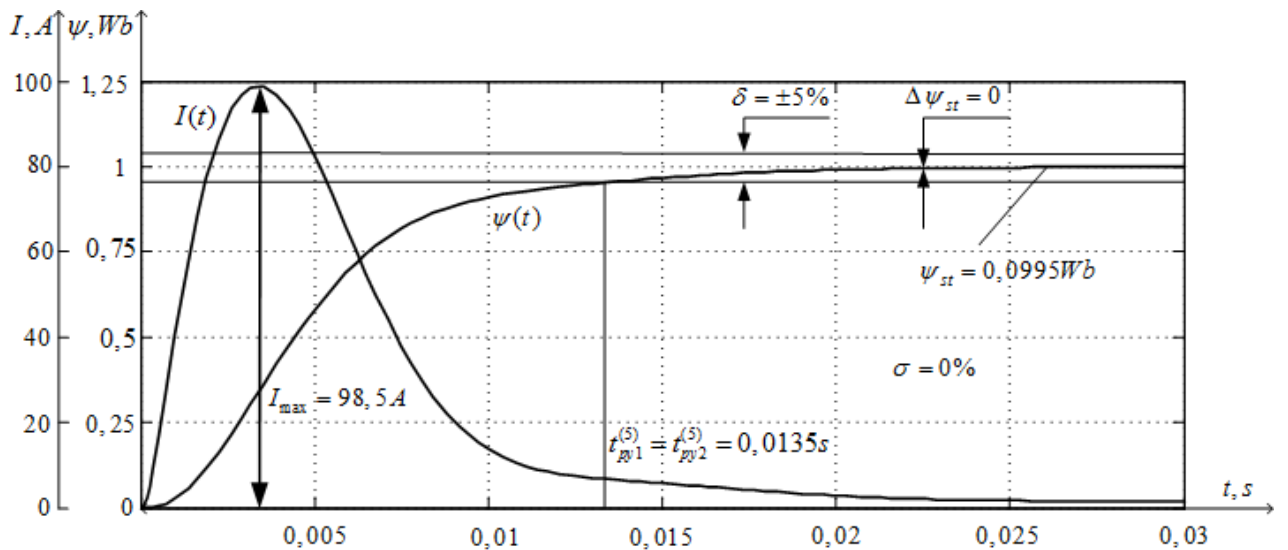


Figure A.7 – The transient characteristics $\Psi(t)$ and $i(t)$ of the flux-link loop

Table A.2 – Indicators of closed loop operation

Indicators	Expected	Obtained
$\sigma, \%$	8,1	0
$t_{py1}^{(5)}, s$	0,00735	0,0135
$t_{py2}^{(5)}, s$	0,01275	0,0135

The difference between the experimental and the expected parameters is caused by the presence of a first-order aperiodic link in the feedback loop of the circuit and at its input.

The analysis of the transient processes of starting the engine shows that they completely meet the requirements of the technical assignment.

1.3. Optimization of the ACS of speed

The structure diagram of linear ACS of speed is represented in the Figure A.8.

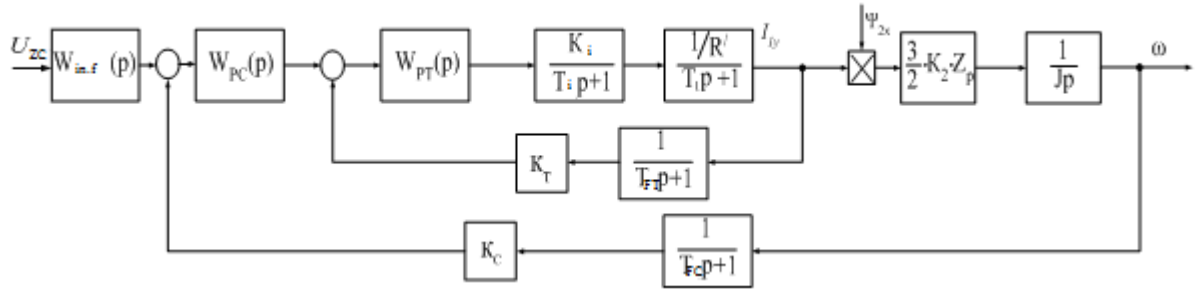


Figure A.8 – Structure diagram of the speed loop

Speed loop optimization [2]

The speed loop is set to CO. Taking into account the parameters of the loop, we select the PI controller with the transfer function:

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

$$\text{where } k_{PC} = \frac{k_T \cdot J}{\frac{3}{2} \cdot K_2 \cdot Z_P \cdot k_C \cdot \Psi_{2x} \cdot 2 \cdot T_{\mu C}} = \frac{0,263 \cdot 0,459}{\frac{3}{2} \cdot 0,966 \cdot 3 \cdot 0,098 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0,0031} = 45,7 -$$

speed regulator gain;

$a_c = 2$ – optimization coefficient of the speed loop by MO;

$T_{\mu C} = a_m \cdot T_{\mu I} + T_{FC} = 2 \cdot 0,00105 + 0,001 = 0,0031 s$ – short speed loop time

constant;

$$k_c = \frac{U_{zc \max}}{\omega_{\max}} = \frac{10}{102,09} = 0,098 \frac{V \cdot s}{rad} - \text{coefficient of speed feedback;}$$

$$U_{zc \max} = 10 V;$$

$T_{PC} = \epsilon_C \cdot a_C \cdot T_{\mu C} = 2 \cdot 2 \cdot 0,0031 = 0,0124 s$ – time constant of the speed loop;

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

On the input of the speed loop, we set up a filter whose transfer function is determined by expression:

$$W_{in.F}(p) = \frac{1}{(4 \cdot T_{\mu C} + T_{FC}) \cdot p + 1} = \frac{1}{0,0135 \cdot p + 1},$$

where $T_{FC} = 0,001 s$ – the filter time constant in the feedback loop.

Expected performance of closed loop speed tuned to CO:

$\sigma = 6,2\%$ – overshooting;

$t_{py1}^{(5)} = 13,6 \cdot T_{\mu m} = 13,6 \cdot 0,00105 = 0,01428\text{ s}$ – first agreement time;

$t_{py2}^{(5)} = 13,6 \cdot T_{\mu m} = 13,6 \cdot 0,00105 = 0,01428\text{ s}$ – transient process time during the

development of the step signal;

$\omega_n^{(m)} = \frac{0,284}{T_{\mu m}} = \frac{0,284}{0,00105} = 270,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ – module bandwidth;

$\omega_n^{(f)} = \frac{0,18}{T_{\mu m}} = \frac{0,18}{0,00105} = 171,4 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ - phase bandwidth.

According to the structural scheme of the speed loop, an imitation model is created, shown in Figure A.9.

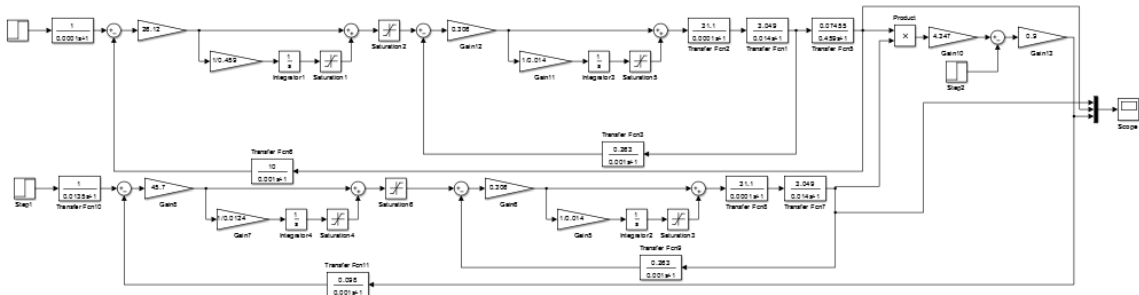


Figure A.9 - Speed loop simulation model

The results of simulation of transient processes in a speed loop tuned to a symmetrical optimum, when the stepped input $U_{zc} = 0,1V$ is processed, are given in the form of the transient characteristic $\omega(t)$ in Fig. A.10.

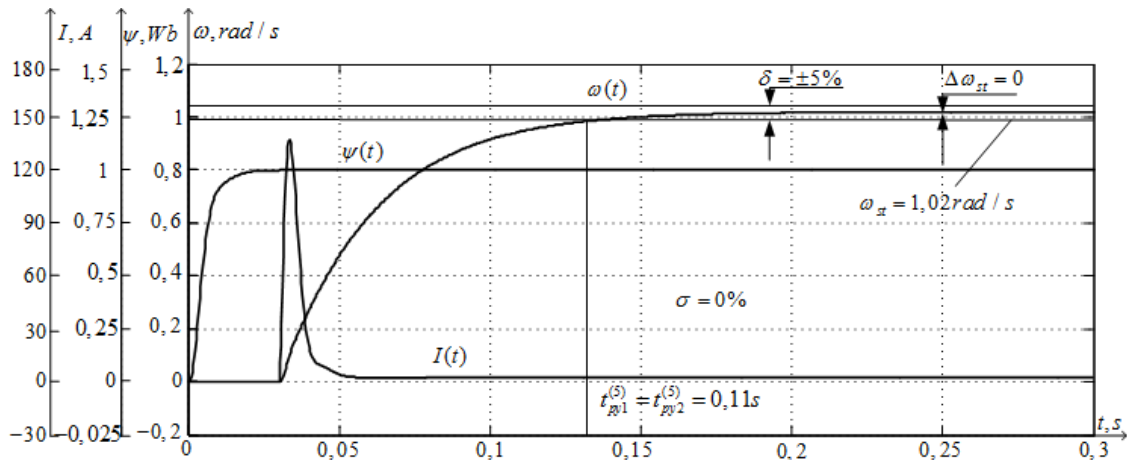


Figure A.10 – Transient characteristics $\omega(t)$, $\Psi(t)$ and $i(t)$ of the speed loop

Table A.3 – Indicators of the Speed closed loop performance

Indicators	Expected	Obtained
$\sigma, \%$	6,2	0
$t_{py1}^{(5)}, s$	0,01428	0,11
$t_{py2}^{(5)}, s$	0,01428	0,11

The difference in the experimental quality of transient processes from the expected ones is explained by the presence of a small time constant not only in the forward but also in the reverse channel of the loop.

2. Calculation of static characteristics of a single-zone asynchronous electric drive with vector control

The structural diagram of the ACS of the electric drive for the steady-state regime of speed stabilization is shown in Figure A.11.[3]

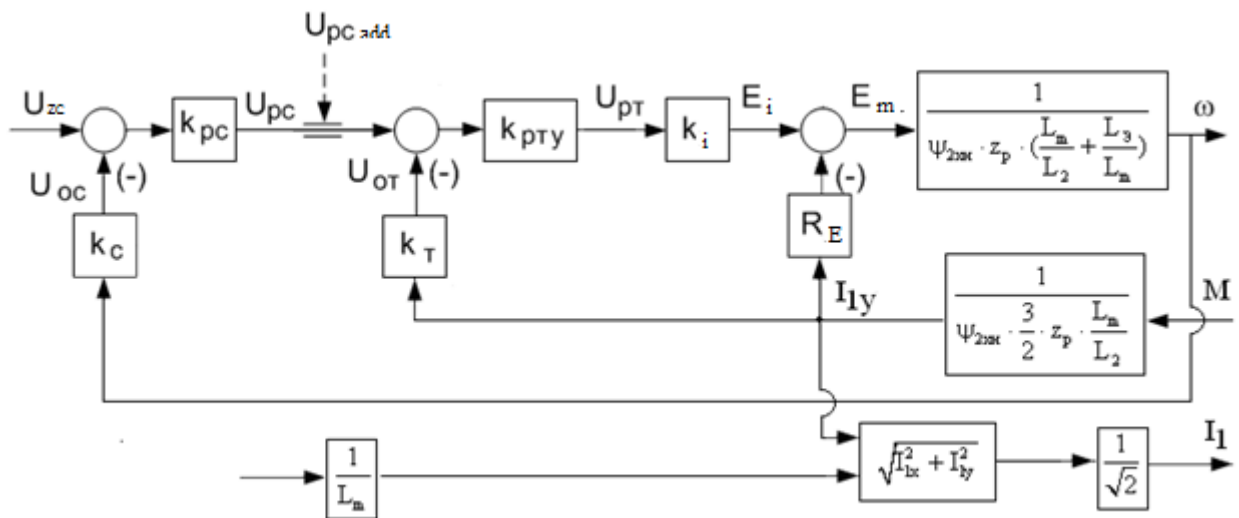


Figure A.11 - Structural diagram of ACS speed of single-zone electric drive for speed stabilization static mode

The expression for the electromechanical characteristic $\omega(I_{1y})$ of the ACS of the electric drive in the mode of speed stabilization has the form:

$$\omega(I_{1y}) = \omega_0(U_{zc}) - \Delta\omega_B(I_{1y}) = \frac{k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_c}{\psi_{2xn} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_c} \cdot \frac{U_{zc}}{k_c} - \frac{R_E + k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_c}{\psi_{2xn} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_c} \cdot I_{1y},$$

where $\omega_0(U_{zc}) = \frac{k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_c}{\psi_{2xn} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_c} \cdot \frac{U_{zc}}{k_c}$ - the ideal open circuit

speed in a closed system with a control voltage U_{zc} , rad/s;

$$\omega_i(U_{zc}) = \frac{U_{zc}}{k_c} - \text{given value of the speed, rad/s;}$$

$$\Delta\omega_B(I_{1y}) = \frac{R_E + k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_c}{\psi_{2xn} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_c} \cdot I_{1y}, \text{ rad/s} -$$

absolute error of the speed of the electric drive in a closed system by disturbance when the load current of the electric drive changes I_{1y} ;

$k_{pc} = 500000$, $k_{pmy} = 50000$ - gains of operational amplifiers on which speed and current regulators are implemented,

Absolute error of speed for control of electric drive closed system, rad / s

$$\Delta\omega_y(U_{zc}) = \omega_i(U_{zc}) - \omega_0(U_{zc}) = \frac{\psi_{2xn} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right)}{\psi_{2xn} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_c} \cdot \frac{U_{zc}}{k_c}.$$

The expression for the mechanical characteristic $\omega(M)$ of an electric drive has the form:

$$\omega(M) = \frac{k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_c}{\psi_{2xn} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_c} \cdot \frac{U_{zc}}{k_c} - \frac{\frac{R_E + k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_c}{\psi_{2xn} \cdot z_p \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2}}}{\psi_{2xn} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_c} \cdot M,$$

Where M-load torque when the friction moment on the motor shaft takes place, N · m.

$$\Delta\omega(M) = \frac{\frac{R_E + k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_c}{\psi_{2xn} \cdot z_p \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2}}}{\psi_{2xn} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right) + k_{pc} \cdot k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_c} \cdot M, \text{ rad/s}$$

- absolute error of the speed of the electric drive in a closed system with respect to disturbance when the load moment is changed.

The relative error of the velocity with respect to the perturbation (when the load moment is changed) is calculated with the help of the equation:

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

where $M_{\min} = 0,15 \cdot M_{m.n} + M_{c.m}$ – load minimum value ;

$$M_{\max} = M_{m.n} + M_{c.m} \text{ – load maximum value.}$$

Structure diagram for the steady state current stabilization mode given in the Figure A.12

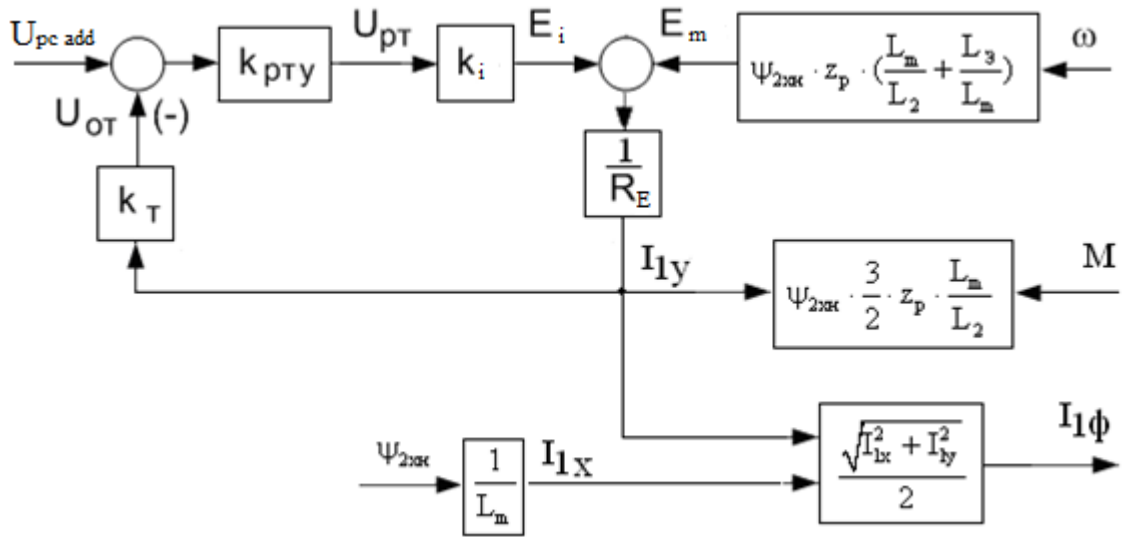


Figure A.12 – Structural diagram of ACS speed of single-zone with constant current limitation for static mode of current stabilization [4]

The expression for the electromechanical characteristic $I_{1y}(\omega)$ of the ACS of the electric drive in the mode of speed stabilization has the form:

$$I_{1y}(\omega) = I_{1ystop}(U_{pc\ add}) - \Delta I_{1y}(\omega) = \frac{k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_m}{R_E + k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_m} \cdot \frac{U_{pc\ add}}{k_m} - \frac{\psi_{2xn} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right)}{R_E + k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_m} \cdot \omega,$$

where $I_{1ystop}(U_{pc\ add}) = \frac{k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_m}{R_E + k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_m} \cdot \frac{U_{pc\ add}}{k_m}$ – the actual value of the maximum current I_{1y} at $\omega = 0$ (in the stop mode)

$$I_{1y\ max} = \frac{U_{pc\ add}}{k_m} - \text{given value of maximum current } a, \text{ A;}$$

$$\Delta I_{1y}(\omega) = \frac{\psi_{2xn} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right)}{R_E + k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_m} \cdot \omega, \text{ rad/s} - \text{absolute error of the drive current}$$

when the speed is changed ω , rad/s;

$k_{pty} = 50000$ - amplification factor of operational amplifiers on which the current controller is used.

The expression for the mechanical characteristic $M(\omega)$ of an electric drive has the form:

$$M(\omega) = M_{stop}(U_{pc\ add}) - \Delta M(\omega) = \frac{k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_m}{R_E + k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_m} \cdot \psi_{2xn} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \frac{U_{pc\ add}}{k_m} - \frac{\psi_{2xn}^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p^2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right)}{R_E + k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_m} \cdot \omega$$

where: $M_{max}(U_{pc\ add}) = \psi_{2xn} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \frac{U_{pc\ add}}{k_m}$ – given value of maximum motor torque, N·m;

$$M_{stop}(U_{pc\ add}) = \frac{k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_m}{R_E + k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_m} \cdot \psi_{2xn} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \frac{U_{pc\ add}}{k_m}$$
 - The actual value of

the maximum electromagnetic moment of the motor at $\omega = 0$;

$$\Delta M(\omega) = \frac{\psi_{2xn}^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p^2 \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} + \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m}\right)}{R_E + k_{pmy} \cdot k_i \cdot k_m} \cdot \omega$$
 - absolute error of the maximum

electromagnetic moment of the motor at speed ω , N·m.

The results of calculations of electromechanical characteristics and inaccuracies are summarized in Table A.4.

Table A.4 - Static characteristics of a single-zone electric drive

U_{zc}, V	I_{1y}, A	0				$I_{1y\ max} = 38$	$\Delta, \%$
	$M, N \cdot m$	0	$M_{min} = 45,185$	$M_{max} = 199,02$	$M_n = 181,2$		
10	$\omega, \frac{rad}{s}$	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	$2,02 \cdot 10^{-4}$
$U_{pc\ add} = 9,994V$	$\omega, \frac{rad}{s}$	0		51,045		102,09	
	I_{1y}, A	37,966		37,966		37,996	
	$M, N \cdot m$	199,02		199,02		199,02	

The results of calculations of the static electromechanical and mechanical characteristics of a single-zone electric drive in the regimes of speed and current stabilization are shown in Figures A.13 and A.14 respectively.

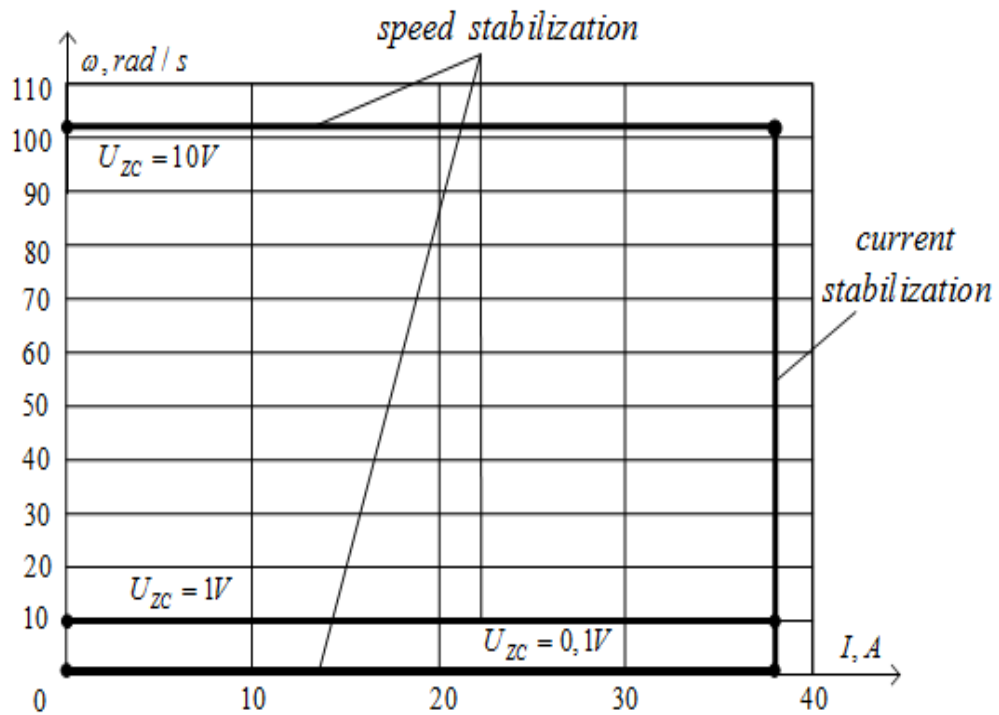


Figure A.13 - Electromechanical characteristics in the modes of speed and current stabilization

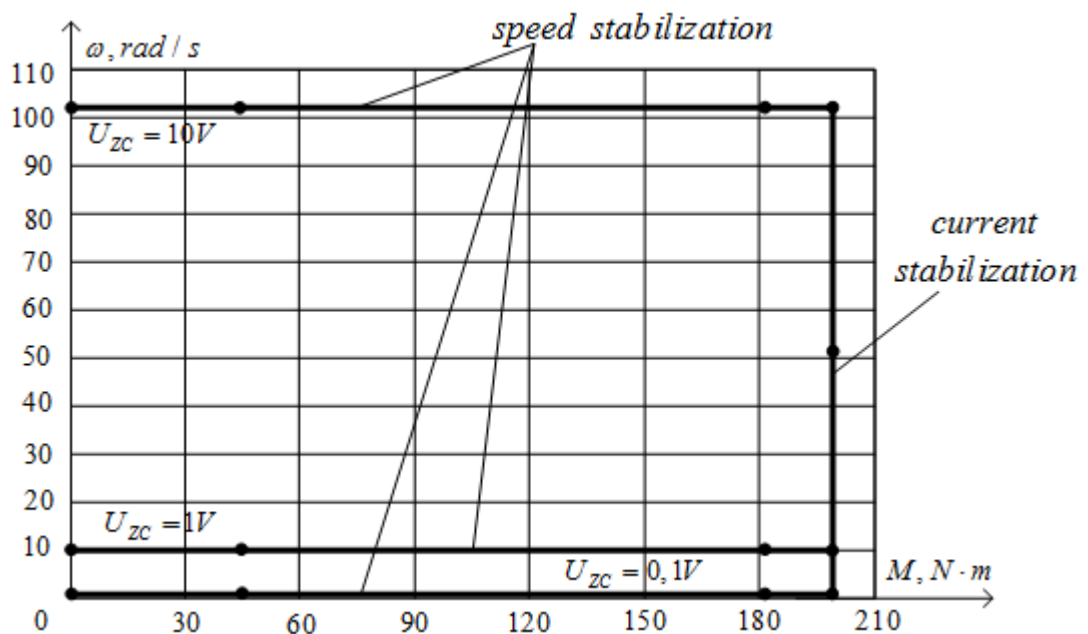


Figure A.14 – Mechanical characteristics in the modes of speed and current stabilization

CONCLUSION

The purpose of this work was to investigate the possible construction of a controlled electric drive for a drying drum feeder based on the complete 6SL3200-6AM23-8AH0 frequency converter.

In the paper, it is proposed to implement a feeder-relay AED system as a frequency converter system - an asynchronous motor with the possibility of applying the laws of scalar control in an open-loop structure.

After the investigation of the static mode of the scalar control, it is established that the electric drive does not provide the specified range in the specified speed control range, which does not meet the requirements of technical specification.

During the simulation of dynamic operation modes it was established that the developed scalar control system does not work steadily in the required range, at the regulation range of 1:15 the electric drive operates at the limit.

During the simulation of dynamic operating modes it was determined that the developed system does not fulfill the specified traffic pattern and does not provide the required quality indicators.

Therefore, sensorless vector control of an asynchronous electric drive was put into practice.

The advantage of the vector control law over scalar is the increased quality of the transient characteristics, but it is necessary to adjust the flow, velocity and current regulators by selecting the loop time constants correctly. The process of parallel circuits optimization corresponds to optimization of a two-zone DC drive system without taking into account the effect of cross feedbacks. When applying vector control laws in the feeder REF system, approximately the same results were obtained for the deviation of the load on the large and smaller sides of the nominal load. In the system of vector frequency-current control, the current transient process has an aperiodic character with the maximum value at the moment of start-up in accordance with the adjustment of the regulator parameters.

Built models use information directly without converter devices. This simplification is necessary for making adjustments to the parameters of the

regulators. The implementation of regulators is possible only in a rotating system. Direct and inverse coordinate transformations are used in real systems.

The analysis of the composition and cost of the commissioning works were carried out in the technical and economic justification for the application of the AED. A timetable for their implementation was drawn up. It is established that the developed system is fireproof and does not harm the environment.

Thus, the developed feeder AED system fully meets the technical requirements. The designed electric drive will allow further automation of the drying drum loading process.

REFERENCES:

1. Dementiev Yu. N., Chernyshev A. Yu., Chernyshev I. A. Electric drive. Moscow, Yurayt Publ., 2018. 223 p.
2. Eliseev V. A., Sinyansky A. V. Manual for automated electric drive. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 616 p.
3. Chernyshev A. Yu., Langraf S. V., Chernyshev I. A. Study of the system " frequency converter - asynchronous motor ". Tomsk, TPU Publ., 2003. 24p.
4. Moskalenko V. V. Electric drive. Moscow, Academy Publ., 2015. 368 p.