

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

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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Система управления тягового электропривода подземного рудничного электровоза

УДК 62-831.1: 621.333: 621.313.333.2: 621.33: 629.423.1

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4Б	Изаак Андрей Владимирович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доценты	Кладиев Сергей Николаевич	Кандидат технических наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко Аркадий Альбертович	Кандидат экономических наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романцов Игорь Иванович	Кандидат технических наук		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дементьев Юрий Николаевич	Кандидат технических наук		

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

Код ре- зультата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Универсальные компетенции	
P1	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками</i> как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	<i>Использовать</i> на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	<i>Использовать</i> представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.
Профессиональные компетенции	
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	<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.
P7	<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.
P8	<i>Проводить инновационные инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	<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	<i>Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы</i> электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	<i>Осваивать новое</i> электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	<i>Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.

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

Институт - Энергетический
Направление подготовки - Электроэнергетика и электротехника
Кафедра - Электропривода и электрооборудования

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

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

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ4Б	Изаак Андрей Владимирович

Тема работы:

Система управления тягового электропривода подземного рудничного электровоза	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2016
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Напряжение питающей сети: постоянное напряжение 250В.</p> <p>Максимальная скорость подвижного состава рудничного электровоза: 15км/час .</p> <p>Максимальный момент, развиваемый электроприводом электровоза в пуско-тормозных режимах: $M_{эпмакс}=450 \text{ Н}\cdot\text{м}$.</p> <p>Максимальный момент нагрузки: $M_{СМАКС}=320 \text{ Н}\cdot\text{м}$.</p> <p>Минимальный момент нагрузки: $M_{СМИН}=70 \text{ Н}\cdot\text{м}$.</p> <p>Требования к тяговому частотно регулируемому электроприводу:</p> <p>Учесть при определении оптимальной конструкции тягового электропривода режимы работы электровоза, наличие ограничений по скорости, моменту;</p>
---	--

	<p>обеспечить требуемые параметры технологического процесса, по показателям разгона, торможения.;</p> <p>разработать адекватную компьютерную модель электромеханической системы рудничного электровоза;</p> <p>разработать метод активного обнаружения и компенсации эффекта буксования и юза</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Анализ конструкции и характеристик тяговых асинхронных электроприводов</p> <p>Математическая модель электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза</p> <p>Синтез системы автоматического управления и построение структуры тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза</p> <p>Исследование режимов буксования и юза колесной пары рудничного электровоза в переходных режимах</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Функциональная и структурная схемы. 2. Имитационная модель. 3. Результаты исследований.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Фигурко Аркадий Альбертович
«Социальная ответственность»	Романцов Игорь Иванович

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:
Введение; обзор литературы по вопросам тягового асинхронного электропривода, составление математического описания механической системы тягового рудничного электровоза, исследование процессов юза и буксования; заключение.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	9.09.2014 г.
---	--------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кладиев Сергей Николаевич	Кандидат технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4Б	Изаак Андрей Владимирович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ4Б	Изаак Андрей Владимирович

Институт	Энергетический	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Магистрант	Направление/специальность	Электротехника, электромеханика и электротехнологии

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	1. <i>Определить затраты на разработку проекта, в которую входят:</i> <ul style="list-style-type: none"> - Материалы и покупные изделия - Основная заработная плата - Дополнительная заработная плата - Отчисления в социальные фонды - Прочие и накладные расходы 2. <i>Для исследования необходимо два человека: руководитель, студент.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов»</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные страховые фонды – 30 %</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Анализ и оценка научно-технического уровня проекта (НТУ)</i>
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Не разрабатывается</i>
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Разработка календарного плана работ, сметы расходов.</i>
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Определить ресурсную и экономическую эффективность проекта.</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Календарный план</i>
2. <i>Смета затрат</i>
3. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко Аркадий Альбертович	Кандидат экономических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4Б	Изаак Андрей Владимирович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ4Б	Изаак Андрей Владимирович

Институт	Энергетический	Кафедра	ЭПЭО
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электротехника, электромеханика и электротехнологии

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</i></p>	<p>В качестве рабочего места машиниста оператора тягового рудничного электровоза с контактной сетью 250В выступают горные месторождения с шахтной выработкой. Зачастую данный вид транспорта применяется на урановых шахтах. Результаты диссертационной работы применимы и на других невзрывоопасных шахтных месторождениях.</p> <p style="text-align: center;">Вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Рудничный воздух и климатические условия; 2) Производственный шум, вибрация; 3) Недостаточная искусственная освещенность рабочей зоны; 4) Стесненность условий работы 5) Обводненность <p style="text-align: center;">Опасные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Поражение электрическим током; 2) Пожароопасность. 3) Механические опасные факторы <p style="text-align: center;">Чрезвычайные ситуации:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Техногенного характера (взрыв и пожар)
<p>2. <i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) ГОСТ 12.2.003-74 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация факторов». 2) ГОСТ 12.2.007.9-93. «Безопасность электротермического оборудования. часть 1. общие требования; 3) ГОСТ 12.2.007.11-75 «Система стандартов безопасности труда. Преобразователи электроэнергии полупроводниковые. Требования безопасности»; 4) ГОСТ 12.2.007.0-75 «Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности» 5) ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. «ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ (С ИЗМЕНЕНИЕМ N 1)»; 6) ПБ 05-618-03 «Правила безопасности в угольных шахтах»

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Отсутствие или недостаток естественного света; 2) Недостаточная освещенность рабочей зоны; 3) Повышенная запыленность атмосферы
<p>2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</i></p>	<p>Электробезопасность Пожаробезопасность Обеспечение безопасности при работе самоходных транспортных машин</p>
<p>3. <i>Охрана окружающей среды:</i></p>	-
<p>4. <i>Защита в чрезвычайных ситуациях:</i></p>	-

5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.
Перечень графического материала:	
При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)	Отсутствуют.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романцов Игорь Иванович	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4Б	Изаак Андрей Владимирович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 157 страниц, 39 рисунков, 12 таблиц, 45 источников, 3 приложения.

Ключевые слова: рудничный электровоз; тяговый асинхронный электродвигатель; частотно-регулируемый электропривод; динамические характеристики; система управления движением, люфт, буксование, многомассовая модель подвижного состава

Цель работы: Разработать критерии выбора оптимальной конструкции тягового асинхронного двигателя и преобразователя частоты для рудничного электровоза, учитывающие ограничение скорости движения по условиям торможения в режиме номинальной нагрузки, независимое охлаждение двигателей и исполнение корпуса. Разработать математическую модель электромеханической части подвижного состава рудничного электровоза в среде Matlab Simulink с учетом динамического перераспределения нагрузок между осями, при реализации тяги, люфты, и упругости сцепок состава. Разработка научно обоснованные технических решений проблем предотвращения буксования и юза применительно к асинхронному тяговому приводу на шахтных электровозах.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Office Word 2010 с использованием пакетов: Microsoft Visio 2010, Matlab Simulink и представлена на диске (в конверте на обороте обложки).

Содержание

Введение	12
1. Краткий анализ состояния рудничной электровозной тяги	14
1.1 Общая характеристика условной работы тяговых электроприводов рудничных электровозов.....	14
1.2 Вопросы применения асинхронного привода	21
1.3 Цели и задачи диссертационной работы.....	28
2 Принципы построения асинхронного тягового привода шахтного электровоза	30
2.1 Режимы работы тягового электропривода.....	30
2.2 Мощность тягового привода.....	32
2.3. Предварительный выбор ТАД.....	34
2.4 Математическая модель электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза.....	39
3 Расчет параметров асинхронного двигателя и настройка контуров регулирования	43
3.1 Структурная схема силового канала электропривода.....	43
3.2 Определение дополнительных параметров двигателя примененного в конструкции лабораторного стенда по справочным техническим данным.....	45
3.3 Определение параметров схемы замещения в абсолютных единицах по справочным техническим данным электродвигателя	46
3.4 Проверка адекватности расчетных параметров двигателя	49
3.5 Расчет естественной механической характеристики.....	51
3.6 Расчет естественной электромеханической характеристики	52
3.7 Оценка достоверности расчётных характеристик двигателя.....	57
3.8 Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода.....	57
3.9 Структурная схема и параметры механической системы электропривода	59
3.10 Структурная схема линеаризованной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением	60
3.11 Расчет параметров контуров САР регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением.....	63
3.12 Контур тока с ПИ-регулятором и аналоговым датчиком тока	63
3.13 Контур скорости с ПИ-регулятором и аналоговым датчиком скорости	66
3.14 Параметры элементов контура скорости с аналоговым датчиком.....	68
3.15 Контур потокосцепления ротора с ПИ-регулятором и аналоговым датчиком потока.....	70
3.16 Результаты моделирования.....	74
4. Разработка имитационной модели ТАД подвижного состава рудничного электровоза для решения проблем буксования и юза	81
4.1 Разработка имитационной модели электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза.....	81
4.2 Исследование процессов буксования колесной пары рудничного электровоза в переходных режимах.....	84
4.2.1 Постановка задачи	84
4.2.2 Исследования зависимостей линейных скоростей обода колесной пары относительно ее оси вращения к оси колесной пары относительно рельсового полотна.....	87
4.2.3 Построение структуры устройства обнаружения буксования.....	90
4.2.4 Исследование процессов буксования колесной пары рудничного электровоза в режимах разгона и торможения	92
4.3 Вывод по разделу.....	98
5. Экономический расчет создания испытательного Стенда	99
5.1 Введение.....	99
5.2 Анализ технологического процесса и технологического оборудования	99
5.3 Экономический расчет создания имитационной модели	102
5.3.1 Организация и планирование работ.....	102

5.3.2	Продолжительность этапов работ	103
5.3.3	Календарный план	104
5.3.4	Расчет сметы затрат на проектирование.....	107
5.4	Выводы по разделу	111
6	Социальная ответственность.....	112
6.1	Введение.....	112
6.2	Описание технологического процесса и рабочего места.....	112
6.3	Вредные производственные факторы.....	113
6.3.1	Рудничная атмосфера	113
6.3.2	Запылённость воздуха	114
6.3.3	Производственный шум и вибрационное воздействие	116
6.3.4	Рудничное освещение	117
6.3.5	Освещенность.....	118
6.4	Опасные факторы.....	121
6.4.1	Поражение электрическим током.....	121
6.4.2	Пожароопасность	123
6.4.3	Опасные механические факторы.....	125
6.5	Выводы по разделу	127
	Заключение.....	129
	Литература	131
	Приложение А.....	137
	Приложение Б	138
	Приложение В.....	139

Введение

Рельсовый подземный транспорт широко применяется в горнорудной промышленности ввиду своей высокой эффективности для перевозки грузов на большие расстояния. Новые технологические решения, модернизация шахтных транспортных линий, позволяют говорить об актуальности и востребованности данного направления.

Модернизация отрасли проходит в ключе улучшения показателей производительности, путем изменения конструкции вагонеток, внедрением двухсистемных контактно-аккумуляторных электровозов, монорельсовых транспортных систем. Фактором, сдерживающим развитие локомотивной откатки, является применение двигателей постоянного тока последовательного возбуждения с реостатно-контакторной схемой управления. Несмотря на все достоинства, используемого решения и большой опыт работы на шахтном подземном транспорте у данного решения имеется ряд недостатков:

- потеря энергии в силовом режиме, как в режимах пуска, так и при торможении в виду невозможности использовать рекуперативное торможение.

- мягкая механическая характеристика характерная для тягового привода в совокупности с реостатно-контакторной схемой управления усложняет задачу поддержания стабильности скорости электровоза в статических режимах работы;

- конструктивный недостаток тяговых двигателей постоянного тока в виде щеточно-коллекторного узла, ограничивает надежность, усложняет техническую обслуживание, а так же делает затруднительным их применение в шахтах с взрывоопасной атмосферой.

- отсутствие эффективных решений от пробуксовки и юза.

Имеющиеся противобуксовочные системы представляют собой сложные комплексные устройства, эффективность которых, в первую очередь апробирована на магистральных линиях. Для горнорудного транспорта

существующие решения имеют ограниченное применение, ввиду особенностей технологического процесса..

- Сложность реализации программных алгоритмов управления для повышения безопасности и энергоэффективности в виду отсутствия электронных блоков управления.

В качестве решения данных проблем может быть выбран вариант с заменой привода постоянного тока на тяговый асинхронный электропривод (ТАД) с цифровым управлением. Это позволит повысить показатели надежности, безопасности, снизит затраты на эксплуатацию в течение всего срока службы.

1. Краткий анализ состояния рудничной электровозной тяги

1.1 Общая характеристика условной работы тяговых электроприводов рудничных электровозов

Начало использования электрического привода на подземной откатке относится к началу XX века. За время эксплуатации практически все узлы подземной откаты претерпели конструктивные изменения, однако, основной принцип и исполнительный механизм оставался неизменным практически до настоящего времени. Исключительное место в данном комплексе занимает двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением. Такое положение объясняется целым рядом причин:

Во-первых, данный вид транспорта получил широкое распространение на городском и магистральном рельсовом сообщении, большая часть всех эксплуатируемых тяговых электроприводов имели единый принцип, следовательно, была накоплен теоретическая и практическая база для его работы.

Во-вторых, оказалось, что система тягового электроснабжения на постоянном токе с использованием преобразовательных тяговых подстанций наиболее пригодна к эксплуатации по совокупным свойствам [1].

В-третьих, в качестве питающих сетей в подземной откатке используются либо аккумуляторные станции, либо троллейный вид питания тягового привода, что в свою очередь ограничивало использование других видов электродвигателей.

Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения за длительный период эксплуатации в качестве тягового привода зарекомендовал себя с положительной стороны, благодаря качествам, присущим данной электрической машине, а именно, высокий предел по перегрузочной способности, мягкая механическая характеристика, упрощающая работу и настройку многодвигательных систем с индивидуальным распределением нагрузок на ведущие оси. Однако, ряд основных недостатков, включающих в

себя сложность поддержания скорости на разных уровнях движения подвижного состава, низкая энергоэффективность, ввиду частого использования релейно-реостатного управления, и потери мощности на активных элементах. Сложность конструктива самого привода и более строгое техническое обслуживание в процессе эксплуатации характеризует основные недостатки данного вида двигателя в качестве объекта дальнейшей модернизации.

Совместно в паре с двигателем постоянного тока зачастую используется система реостатного управления с силовым контроллером. Данная схема управления по факту морально устарела и используется на горнорудных предприятиях из-за своей простоты и относительно легкой ремонтпригодности. В то же время использование данной системы связано с большими потерями энергии; наличие реостата в цепи якоря снижает жесткость механической характеристики, что осложняет управление электровозом.

Так же присутствуют недостатки, свойственные управлению приводом с применением силового контроллера:

- конечное число пусковых позиций контроллера, сложность управления скоростью/моментом электропривода в моменты трогания, это приводит в случае достаточного сцепления с полотном рывки при движении, либо, в случае превышения момента сопротивления, колесная пара срывается в буксование. Данный факт в большей степени является причиной неполного использования сцепной массы локомотива[2];

- сложность введения блокировок, аварийных режимов, исключающих неправильные действия машиниста. Как известно, большинство поломок и выходов из строя оборудования обусловлено ненормативным использованием механизмов вне допустимых режимов работы: в том числе при резком переключении позиций контроллера на участке разгона, использование резкого торможения противовключением [3];

- сложность управления и мониторинга по системе множеств переменных. Так, в существующих решениях применяется совмещение

электровозов по силовым цепям. Данный подход лишает возможности стыковки более чем двух электровозов. Известны решения по автоматическому управлению с микроконтроллерными блоками. В качестве решения предлагается использовать силовой контроллер в паре с сервоприводом, и таким образом обеспечивать необходимые ограничения в управлении контурами скорости и момента. Так же имеются решения, ограничивающие свободу действий оператора и блокировку ряда некорректных команд. По факту используется строгий алгоритм выполнения отгрузки и загрузки вагонеток, движения на равномерных участках, режимах трогания и торможения. Однако, если первый вариант сложен при реализации, то второй вариант не целесообразно использовать по причине ограниченности функционала, и отсутствию коррекции алгоритма по каналам возмущения. Проблемы буксования и юза в данном решении не рассматриваются;

- трудность поддержания стабильности низкой скорости движения, которая необходима в определенных случаях по требованиям безопасности и состоянию рельсовых путей. Этот недостаток проявляется при движении с малыми нагрузками, в частности при движении с пустым составом, либо при большом уклоне пути. В данном случае машинисту или же системе управления требуется постоянно производить включения/выключение привода для поддержания требуемой скорости (работа в режиме релейного регулятора). Переходные процессы, сопровождаемые столь частым переключением режимов, сказываются на износе оборудования, броски тока приводят к перегреву двигателя и возможным неисправностям, как в механической, так и в электрических частях. В дополнение к этому на неравномерных участках движения подвижного состава машинисты используют в качестве дополнительного канала регулирования механический тормоз, тем самым увеличивая момент сопротивления, приводя к увеличению энергозатрат и износу тормозов;

- сложность выполнения операций. Зачастую все манипуляции, совершаемые машинистом-оператором, требуют значительной физической

силы, что приводит к повышенной утомляемости машиниста и, как следствие, повышению риска нарушения правил техники безопасности (ТБ).

Современные разработки шахтных электровозов идут в ключе ликвидации перечисленных недостатков.

В аккумуляторных электровозах А8, АРВ7,А8 [4] применена безреостатная схема управления ТД с разделением тяговой батареи по модульному принципу и ослаблением поля двигателя. Данный метод позволяет уменьшить потери путем исключения добавочных сопротивлений из якорной обмотки тягового двигателя (добавочное сопротивление используется только на первой ступени для ограничения рывка). Но при этом не исключаются другие минусы контроллерного управления, такие как толчки тока и момента при переключении позиций. В дополнение к существующим проблемам добавляется недостаток - понижение КПД установки при использовании метода по ослаблению поля обмотки якоря.

В электровозах нового поколения введен ряд защитных блокировок, повышающих безопасность эксплуатации оборудования. К примеру, в электровозе К14[4] присутствуют защиты, исключающие пуск двигателя. При открытых дверях кабины, отсутствие машиниста на сидении, нулевая защита – происходит автоматическое наложение пневмотормозов при возникновении внештатной ситуации: отключение питающей сети, создание автоматического нормирования задания на контур скорости. Введение данных блокировок стало возможным благодаря наличию специальной станции с силовыми контакторами.

Значительную часть из вышперечисленных недостатков можно устранить при внедрении импульсного управления ТД постоянного тока с использованием бесконтактных ключевых элементов. Данный способ реализован в системе ТЭРА-1М. Представленные системы позволяют построить оптимальные заданному процессу законы управления, по показателям энергоэффективности, точности обеспечить плавное регулирование параметров. Микропроцессорное управление на базе контроллера с сигнальным

процессором позволяет реализовывать широкий спектр алгоритмических задач, в частности, для реализации аварийных режимов, блокировок, автоматических переключений (помощь машинисту оператору) без модернизации аппаратной части [5]. Все это позволяет решить проблемы стабилизации заданного значения скорости, развиваемого двигателем вращающего момента и ограничение тока.

Недостатком, рассматриваемой системы ТЭРА-1М, можно выделить низкий уровень силовой электроники того времени: силовой триггер сброса исполнен на однооперационных тиристорах с цепями искусственной коммутации, а период тактирования сигнала ограничивался в значении 0.005с, что приводило к значительному увеличению размеров цепей запираания тиристоров и фильтров. В результате рассматриваемый блок содержал множество элементов с крупными габаритами и не нашел применения. В дополнение к вышесказанному, стоит отметить, что аппаратная часть была выполнена на зарубежной элементной базе, и именно данный факт ограничил распространение технологиям применимым в ТЭРА-1М в широкой массе.

На сегодняшний день имеется ряд разработок на основе современной элементной базы, как зарубежного, так и отечественного производства. Создан опытный образец электровозов [6,7] с импульсной системой управления, построенной на базе (IGBT) транзисторов. Привод, построенный на базе полностью управляемых полупроводниковых ключей, позволяет реализовывать широкий спектр задач: вариация режимов работы привода (тяга-торможение), нулевая защита, введение токовых и моментных ограничений для двигателя, контроль бдительности машиниста.

Имеются и другие подобные разработки, с современным микропроцессорным управлением, обеспечивающим решение основных технологических задач. Общая особенность заключается в том, что все рассматриваемые решения используются в паре с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения, которому соответствуют все

вышеперечисленные недостатки, за исключением ограничений накладываемых реостатно-контакторной системой управления.

Необходимостью повышения надежности и эксплуатационных показателей для шахтной подземной откатки, обусловлен широкий интерес разработчиков в работах по замене двигателей постоянного тока последовательного возбуждения другими типами, без рассмотренных недостатков. Например, такой машиной является асинхронный двигатель.

Применение асинхронного привода в качестве тяговой машины предпринималось самого зарождения магистральной железной дороги. Первый электровоз оснащался ТАД с контактными кольцами, который был запитан от тяговой сети трехфазного тока. Регулирование скорости осуществлялось путем введением жидкостного реостата в цепь ротора, однако, конструктивные и технологические сложности в производстве данного типа двигателей не позволили ввести разработку в широкое применение.

Ограниченное развитие применения тяговых асинхронных двигателей в середине XX века можно связать с отсутствием элементной и материальной базы, позволяющей использовать технологические преимущества ТАД в сравнении двигателем постоянного тока последовательного возбуждения. В связи с этим, до 70х годов развитие ТАД производилось в плоскости сугубо экспериментальных и стендовых исследований. Разрабатывалась возможность применения как двухфазных, так и трехфазных тяговых двигателей, с питанием от тяговой сети однофазного переменного тока с использованием промежуточного силового электромеханического преобразователя. Рассматриваемые привода были конструктивно сложны в производстве.

Попытки внедрения силовой электроники и полууправляемых/управляемых выпрямителей начались с середины 70х годов, на базе однооперационных тиристоров. Отечественные разработки велись по направлению создания магистрального электровоза с асинхронным тяговым двигателем и статическим полупроводниковым преобразователем. Также созданы опытные электровозы ВЛ80А и ВЛ86Ф[8].

Сложность аппаратной части и несовершенство электроники, малое быстродействие, отсутствие высокопроизводительных микропроцессорных устройств, позволяющих работать в режиме реального времени, сдерживало внедрение частотно регулируемого электропривода на базе ТАД. Лишь в начале 90х годов, с появлением силовых модулей на базе IGBT, GTO модулей, а так же высокопроизводительных однокристалльных ЭВМ, ПЛИС микросхем позволило совершить качественный скачок в сторону уменьшения габаритов преобразовательной техники и повышению КПД. Это позволило открыть путь для внедрения бесколлекторных двигателей со статическими преобразователями на подземной откатке, магистральном сообщении, городском транспорте. В последние годы идут активные отечественные разработки в данной области [9, 10, 11].

Использование двигателей иной конструкции на шахтной подземной откатке имеет так же длинную историю. Первые попытки применения, в частности, асинхронных конденсаторных двигателей, были в середине XX века. Питание ТАД осуществлялось от сети однофазного переменного тока частоты 50 Гц. В качестве технической реализации разработки проект вылился в электровоз под маркой КЭ-2, рассмотренный в [12]. На нем использовались два двухфазных асинхронных привода с повышенным скольжением, управление скоростью осуществлялось путем переключения числа пар полюсов, а так же введением в цепь статора активного сопротивления. Данный подход имел недостатки в показателях энергоэффективности и ходовых качествах.

Предпринимались попытки применения асинхронного привода для самоходных вагонов. На этих вагонах используются специализированный ТАД в рудничном исполнении. Питание осуществляется от трехфазной сети по взрывобезопасному кабелю, регулирование – переключением пар полюсов.

Совместно с началом внедрения частотно регулируемого ТАД на магистральных железных дорогах шла адаптация имеющихся решений для горнорудного транспорта. Опыт конструирования двигателя для аккумуляторного шахтного электровоза приведен в [13].

Ведутся разработки проектной и первичной технической документации по созданию специального тягового двигателя с асинхронным приводом для шахтных электровозов, например [14], доведенных до промышленных испытаний.

1.2 Вопросы применения асинхронного привода

На актуальность данного направления указывает достаточное количество публикаций о попытках использования на шахтных электровозах асинхронного привода. А технический и эксплуатационный износ подземного транспорта требует мер по модернизации и внедрению новых технологий. Тем более существующие разработки имеют ряд недостатков:

- существующий тяговый привод шахтных электровозов базируется на применении двигателя постоянного тока, обладающего низкой эксплуатационной надежностью, требующего затрат на техническое обслуживание;

- традиционные системы управления ТД характеризуются повышенными потерями энергии, в частности на сложных участках путей, исключение которых требует специальных алгоритмов отработки сигналов по каналам возмущения;

- отставание в технологической сфере шахтного подземного транспорта от зарубежных компаний. Современная элементная база и технологии позволяют создать новый тяговый привод для подземной откатки, соответствующий всем современным тенденциям, причем на основе отечественных разработок.

Как было рассмотрено в общем обзоре, существующие проблемы подземной горнорудной откатки практически полностью решены на магистральном железнодорожном транспорте. Причины отсутствия схожих решений в смежной области можно формализовать как с научной, так и с

технической стороны. К примеру, не используется электрооборудование общепромышленного назначения на шахтном электровозе, причем помимо конструктивных особенностей корпусов ТАД влияет и среда работы двигателя, а для горнорудной откаты свойственны тяжелые условия по пыли/взрывозащищенности. Вторым ограничением выступают массогабаритные показатели. Для переоснащения существующего локомотивного парка шахтного транспорта необходимо уложиться в габаритные показатели применяемых двигателей постоянного с сохранением характеристик тягового привода, с перегрузками по моменту и току. Данная задача не является тривиальной и здесь имеется несколько путей решения.

Так же в качестве ограничения с технической точки зрения выступает необходимость создания специфической модификация преобразователя частоты, требуемая для исследуемой задачи. Существующие аналоги преобразователей частоты имеют общепромышленное исполнение и рассчитаны на стандартное напряжение. В случае же работы на троллейной подземной откатке напряжение в звене постоянного тока ограничивается значением 250В. Данная проблема требует более детального изучения, и здесь возможны разные подходы к решению поставленной задачи.

Рассмотренные факторы затрудняют применение асинхронного привода в технологическом процессе подземной откаты, однако, имеется ряд научно-технических вопросов, возникающих у проектировщиков шахтных электровозов с ТАД. К таким вопросам относятся:

- Согласование нагрузок двухдвигательной системы, на базу ПЧ-ТАД. Жесткая механическая характеристика в паре с сложным рельефом и режимами эксплуатации электровоза накладывает дополнительные трудности при создании системы управления двухдвигательной системы. Разброс естественных характеристик приводит к разным развиваемым моментам, а значит требует принятия определенных мер по равномерному распределению нагрузки между тяговыми двигателями;

- требует решения вопрос о выборе рациональной формы синтезируемой тяговой характеристики асинхронного привода;
- ввиду ограничения накладываемого зарубежными разработчиками электронной аппаратуры по поставкам высокопроизводительных микроконтроллеров и иной цифровой аппаратуры, выступает вопрос импортозамещения. В частности поиск и решение задач алгоритмизации и построения системы управления на базе отечественной электронной микропроцессорной техники;
- так же требует решения техническая задача проблемы буксования и юза. Как известно, применяемый двигатель постоянного тока обладает большой перегрузочной способностью в силу своих конструктивных свойств. Ограничения же накладываемые использованием системы ПЧ-ТАД, приводят перегрузку по моменту в 2-2.5 раза к номинальным значениям, учитывая сложную среду эксплуатации машины, тяжелые температурные режимы работы, синтез системы управления представляет собой нетривиальную задачу, а решение проблем буксования и юза требует более тщательного изучения процессов сцепления колесной пары о рабочий контакт рельса.

С появлением современных электроприводов с микропроцессорным управлением, в частности с применением статических частотных преобразователей, появилась возможность формирования требуемых тяговых характеристик средствами микропроцессорного управления. И в данном контексте выбор характеристики напрямую зависит от рельефа пути, нагрузки, усилия на ось. А так же возможное изменение коэффициента сцепления.

Рассмотрим методы выравнивания нагрузок тяговых двигателей для подвижного состава с ТАД.

Наиболее простым и очевидным решением выступает использование индивидуальных преобразователей частоты для каждого двигателя. В такой реализации количество приводов будет равно количеству преобразователей частоты. Положительными особенностями данного метода является:

- независимое управление индивидуально каждой осью ТАД с заданием частоты, момента и напряжения.

- практическая возможность использования замкнутых систем управления с обратными связями по скорости, току, положению;

- снижение энергопотребления за счет построения энергоэффективных алгоритмов управления силовыми ключами

Недостатком подобного решения является усложнение аппаратуры. Однако, в данном случае возможен вариант создания мехатронного модуля с интегрированным преобразователем частоты в корпус двигателя.

Так же проблема выравнивания нагрузок рассмотрена в [13215] в отношении к магистральному электровозу. Так же известны системы автоматического выравнивания с индивидуальным каналом управления на тяговые двигатели постоянного и переменного тока

Иным подходом к решению проблемы выравнивания нагрузок тяговых двигателей является питание ТАД от общего преобразователя частоты. В данном случае имеет место построение исключительно скалярной системы управления. Без введения сложных адаптивных алгоритмов реализовать энергоэффективную систему будет проблематично. Однако достоинства данного решения можно оценить в следующих пунктах:

- уменьшение габаритных размеров и массы преобразовательной установки благодаря уменьшению количества преобразователей частоты;

- упрощение системы управления.

Как уже было сказано выше, система имеет ряд ключевых недостатков:

- последовательное управление, ввиду того, что используется один преобразователь частоты на два двигателя;

- увеличения пульсаций тока из-за нерационально использования свойств асинхронного двигателя;

- сложность применения замкнутых систем управления, реализация которых потребует изменение, как конструкции преобразователя частоты

(потребуется дополнительный мост инвертора), так и введет чрезмерную нагрузку на микропроцессорную систему;

- задачей, не имеющей решения на данный момент, выступает невозможность создания способа индивидуального управления напряжением двигателей, питающихся от одного источника;

- усложняется отвод тепла с повышением мощности преобразовательной установки.

Так же известен способ выравнивания моментов на валах двухдвигательной системы путем пофазного соединения обмоток электрических машин с выходными клеммами преобразователя частоты. В качестве преимущества данная система может отличаться простотой реализации, и упрощению алгоритмов управления, что сказывается на стоимости самой разработки. Однако, представленное решение завышает требования к выходному напряжению инвертора в два раза, увеличивает массогабаритные показатели преобразователя частоты и удорожает его стоимость. Кроме того, до конца не исследована устойчивость работы подобной системы, в случае наличия большого рассогласования по моментам сопротивления между осями[13215]. В этом случае локомотив будет входить в режим буксования или юза, что крайне негативно сказывается на эффективности применяемой системы.

Иные способы решения проблем распределения нагрузки между ТАД отражаются в применении специальных двигателей. В частности в [16-18] для совмещения механических характеристик ТАД двигателя по моменту используют специальное соединение обмоток, подключая половину фазной обмотки одного двигателя последовательно с фазной обмоткой другого. Ограничением, выступающим при использовании данного метода, выступает усложнение конструкции двигателя и наличие большого количества выводов статорной обмотки.

Так же рассмотрим технические проблемы. В первую очередь, это массогабаритные показатели, расположение ТАД в габариты,

предусмотренные в электровозе подземной откатки для двигателя постоянного тока, малая скорость вращения ТАД, повышенная нагрузка на конструкцию тяговых машин.

Весь комплекс подобных работ был проведен применительно к магистральному и промышленному подвижному составу. Подобные работы приводились при создании тягового электровоза для подземной откатки, и практическая реализация заключалась в создании нового типа двигателя, исходя из требований технологического процесса. На сегодняшний день ведется ряд разработок по созданию ТАД малой мощности для городского транспорта, как рельсового, так и колесного. В [19] представлены тяговые двигатели, разработанные специально под эксплуатацию городского транспорта, взамен коллекторных двигателей. Особенностью применяемой конструкции является усиленный корпус, упрощение монтажа на трамваях, троллейбусах, возможность комплектации датчиками углового положения различной конструкции, для создания режимов управления плавного пуска, замкнутых систем управления. В дополнение используется нестандартное напряжение питания 450В.

При анализе литературных источников можно сделать предварительный вывод о необходимости применения двигателя специального исполнения на шахтном электровозе.

Выбор преобразователя так же остается неоднозначным.

Ограничивающим фактором может выступать особенность питания шахтного электровоза либо контактной сетью, либо аккумуляторными батареями. Применение аккумуляторов в виде питающего устройства ТАД имеет более широкое распространение на практике, нежели троллейная откатка. Контактная сеть имеет стандартное напряжение 250 В постоянного тока. В эксплуатации применяются и сети повышенного напряжения 550 В, в частности на специальных локомотивах с повышенной сцепной массой [4]. При питании от тяговой сети возможно появление относительно быстрых колебаний напряжения вплоть до полного исчезновения при отрывах

токоприемника. Данный факт в первую очередь связан с износом механических контактов троллея, иногда машинисту оператору приходится в ручном режиме поддерживать рукой пружинные контакты троллея для фиксированного контакта с токоведущей частью.

Напряжение питания аккумуляторной батареи более низкое - от 40 до 185 В [4].

Обобщая особенности описанных выше источников питания, можно выделить главный ограничивающий фактор - это пониженное напряжение, из-за чего невозможно применить серийные инверторы и двигатели общепромышленного назначения, используемые на магистральном транспорте

Возможны различные подходы к решению данной проблемы:

- разработка двигателя на пониженное напряжение с питанием преобразователя от имеющегося источника питания. Решение представляется наиболее простым. Реализации проекта потребует учитывать ограничения по следующим параметрам: необходимость разработать двигатель специального назначения на нестандартное напряжение, инвертор для работы на пониженном напряжении с током соответствующему номинальному моменту двигателя;

- питание преобразователя частоты через импульсный повышающий трансформатор напряжения, повышающий напряжение сети до промышленного стандарта. Данное решение позволяет убрать часть нагрузки от инвертора напряжения, позволяя ему работать в более легком режиме, следовательно, уменьшаются требования к силовым ключам, что удешевляет установку и более унифицирует выбор оборудования.. Однако, усложнения аппаратной части из-за двойного преобразования энергии повышает потери и с точки зрения энергоэффективности не подходит.

Возможен промежуточный вариант, в случае присутствия дополнительного преобразователя, который, помимо повышения напряжения, выполняет функции управления приводом. Однако данный подход крайне усложняет аппаратную часть преобразователя частоты. Создает дополнительные трудности в написании алгоритмов управления. В качестве

преимущества можно отметить комплектное исполнение устройства, что крайне упрощает монтаж и позволяет создать устройство требуемой защитной оболочкой (IP).

1.3 Цели и задачи диссертационной работы

На основании проведенного анализа состояния работ по применению ТАД в подземной откатке, можно сделать вывод, что имеющиеся разработки в смежных областях, затрагивающие проблематику отрасли не применимы в данном случае. Остается ряд нерешенных вопросов:

1. Необходимость использования ТАД новой конструкции
2. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод на существующий день применяется в различных областях промышленности благодаря преимуществам, которые отсутствуют в коллекторных машинах. Расширение областей работы микропроцессорной техники и разработки силовой электроники дает возможность управлять сложными механизмами и использовать асинхронный двигатель в электрической тяге, что позволяет уменьшить габариты и массу на 30%, а также сам по себе двигатель прост в изготовлении и не создает сложностей в обслуживании. На основе опытных данных внедрения ТАД на электровозах промышленного сектора предлагается замена тяговых приводов с МПТ рудничных электровозах на приводы с тяговым асинхронным двигателем для повышения надежности, улучшения тяговых характеристик и экономии в энергопотреблении.

3. Для управления бесконтактными электроприводами можно применять алгоритмы векторного управления, но инвариантность параметрического возмущения такой алгоритм не обеспечит. Поэтому необходимо разработать новый алгоритм управления. Если применить релейную систему выбора стандартного вектора напряжения статора, то это позволит управлять изменением угла у электромагнитного момента двигателя, а также повысить быстродействие и уменьшить чувствительность к изменениям параметров

системы. Но при этом перераспределение нагрузки между двигателями будет сложно осуществима, так как такая ситуация носит случайный характер.

4. Для распределения усилий в режимах разгона и торможения, а также юза и буксования, удобна система векторного управления, так как она решает проблему распределения нагрузки и может быть построена на базе ПЧ и ТАД специального назначения с программной реализацией данной задачи.

На основании анализа состояния работ на шахтных электровозах по применению асинхронного тягового привода отмечен ряд нерешенных вопросов, такие как:

1. При учете требований технологии и возможности реализации необходимо обосновать рационального вида тяговой характеристики шахтного электровоза.
2. Выбор мощности асинхронного тягового привода.
3. Разработка алгоритма системы управления.

Тогда требуется решить основные задачи:

1. Рассмотреть технологические ограничения на тяговые характеристики привода.
2. Выбрать необходимую жесткость характеристики в отношении противобуксовочных свойств локомотива и окончательно построить требуемую характеристику.
3. Разработать имитационную модель электромеханической системы подвижного состава, учитывающую наличие ограничения по сцеплению, динамическому при реализации тяги, люфты и упругость сцепок состава.
4. Предложить и доказать рациональный способ активного обнаружения и компенсации эффекта буксования и юза, при ускорении и торможении состава..

Существуют особенности контактных электровозов, которые следует учитывать при применении полученных результатов относительно аккумуляторных электровозов, такие как ограниченная мощность аккумуляторных батарей, сложность реализации рекуперативных режимов.

2 Принципы построения асинхронного тягового привода шахтного электровоза

2.1 Режимы работы тягового электропривода

Рассматривая работы [20, 21] по исследованию производственных условий электровозной подземной откатки можно выделить, что факторами, определяющими условия работы, являются грузопотоки, расстояния откатки, логистика работы транспорта, а также план, профиль и состояние железнодорожных путей.

Показатель грузопотока можно оценить, рассмотрев данные по участкам подземной откатки из нескольких регионов. Для шахт Донбасса характерными условиями работы являются длины откатки от 2000 м – 94,6% и относительно небольшой грузопоток до 700 т в сутки – 93,6%. Перегоны откатки больше 3000 м, составляют не более 1,5%, а грузопотоки, превышающие 1000 т в сутки – 3% [20, 21].

В процессе работы на перегонах, электровоз занят 28% продолжительности смены, а при выполнении вспомогательных и маневровых работ – 19,2% (погрузка, разгрузка вагонеток, постановка сошедших с рельсов вагонеток, формирование состава на маневровых участках,) [20]. Остальное время занимает простой, связанный с организационно-технологическими факторами (заготовка песка, технический осмотр силовых агрегатов тягового электровоза). Так же стоит отметить, что продолжительность маневровых мероприятий составляет 33,6% от общей продолжительности работы электродвигателя, при этом приходится более 700 переключений контроллера за один час работы электродвигателя. Данный факт свидетельствует о большом количестве динамических режимов работы электропривода

На основе действующих норм на отечественных шахтах по эксплуатации электровозов, скорость движения ограничена и составляет для открытых перегонов - 9 км/час; для маневровых участков при заталкивании состава – 3,6 км/час, при иных маневровых мероприятиях – 5,4 км/час. Стоит учитывать так

же нормативные документы по допустимым значениям уклонов продольного рельефа профиля. Средний уклон пути в расчетах принимается 3-7 промилле. Так же рассматривая проблемы буксования и юза, следует учитывать такой показатель, как состояние поверхности рельса и состояния бандажа колес. Данный показатель можно оценить в процентном выражении:

сухие рельсы	-	2,5%;
чистые рельсы	-	0,7%;
покрытые водой		1,3%;
утопленные в грязи до головки		9%;
рельсы в пыли или в засохшей грязи		23,5%;
затянутые пленкой жидкой грязи		24.7% [37].

Коэффициент сцепления колеса с ребордой рельса соответствует диапазону 0,07-0,1. Это создает возможность для избыточного скольжения колес. При исследовании динамических режимов работы необходимо рассматривать реальные условия эксплуатации, загруженность состава, показатели сцепления. Одним из эффективных решением повышения коэффициента сцепления является подсыпка песка под ведущие оси. При использовании данного метода коэффициент сцепления возрастает до 0.4. Песок, раздавленный в результате предыдущей поездки, дает $V=0.15-0.18$ м/с[37].

Ввиду возможно потенциального повышения коэффициента сцепления, существует вероятность увеличения наклона падающей ветви характеристики сцепления, что может привести к разносному буксованию колес. Из-за существующих решений, применяемых на производстве, ограничений вводимых правилами эксплуатации, и технологическими особенностями подземной откатки, повышение тяговых свойств рудничных электровозов стоит выполнять средствами электропривода, значит, необходим глубокий анализ электромеханических переходных процессов при возникновении и развитии избыточной скорости скольжения колес.

Учитывая данные ограничения необходимо построить математическую модель механической системы, учитывающую коэффициент сцепления, уровень уклона пути, а так же степень загруженности подвижного состава.

2.2 Мощность тягового привода

Выбор мощности это такое определение номинальной «типовой» мощности ТАД, что бы в реальных условиях эксплуатации не проходила перегрузка двигателя, которая может привести к недопустимому перегреву.

Рассматривая тяговый привод, можно выделить как продолжительную мощность привода, так и часовую, что является основным классификационным параметром, в том числе и часовой ток.

Область работы электропривода в общем случае задается в 2-х (нереверсивный электропривод) или 4-х (реверсивный электропривод) квадрантах плоскости координат: угловая скорость вращения ω , рад/с, – момент M , Н·м, и ограничена максимальными значениями скорости вращения $\omega_{\text{ЭП макс}}$ и момента $M_{\text{ЭП макс}}$ электропривода. Для 4-х квадрантного электропривода и реактивного характера нагрузки допустимая область работы представлена на рис. 2.1, а:

– область длительной работы (заштрихованная область) ограничена максимальной скоростью электропривода $\omega_{\text{ЭП макс}}$, рад/с и интервалом изменения момента полезной нагрузки (приведенным к валу двигателя) в длительном режиме работы $M_{\text{с мин}} \div M_{\text{с макс}}$, Н·м;

– область кратковременной работы ограничена максимальной скоростью электропривода $\omega_{\text{ЭП макс}}$, рад/с и значением максимального момента электропривода на валу двигателя в пуско-тормозных режимах $M_{\text{ЭП макс}}$, Н·м.

Длительный режим работы электропривода происходит в первом и третьем квадрантах (в заштрихованной области на рис. 2.1, а), а во втором и четвертом квадрантах имеют место только кратковременно протекающие

процессы электрического торможения. Момент сопротивления M_c может быть постоянным по значению при изменении скорости, а может представлять собой зависимость от скорости $M_c(\omega)$, например, для механизмов с вентиляторным характером нагрузки (на рис. 2.1, а показана пунктирной линией) или для механизмов с постоянной мощностью на валу (рис. 2.1, б). Во втором случае регулирование скорости выше значения $\omega_{\text{эп1}}$ осуществляется за счет ослабления потока возбуждения двигателя, и система управления электропривода реализуется как двухзонная [27].

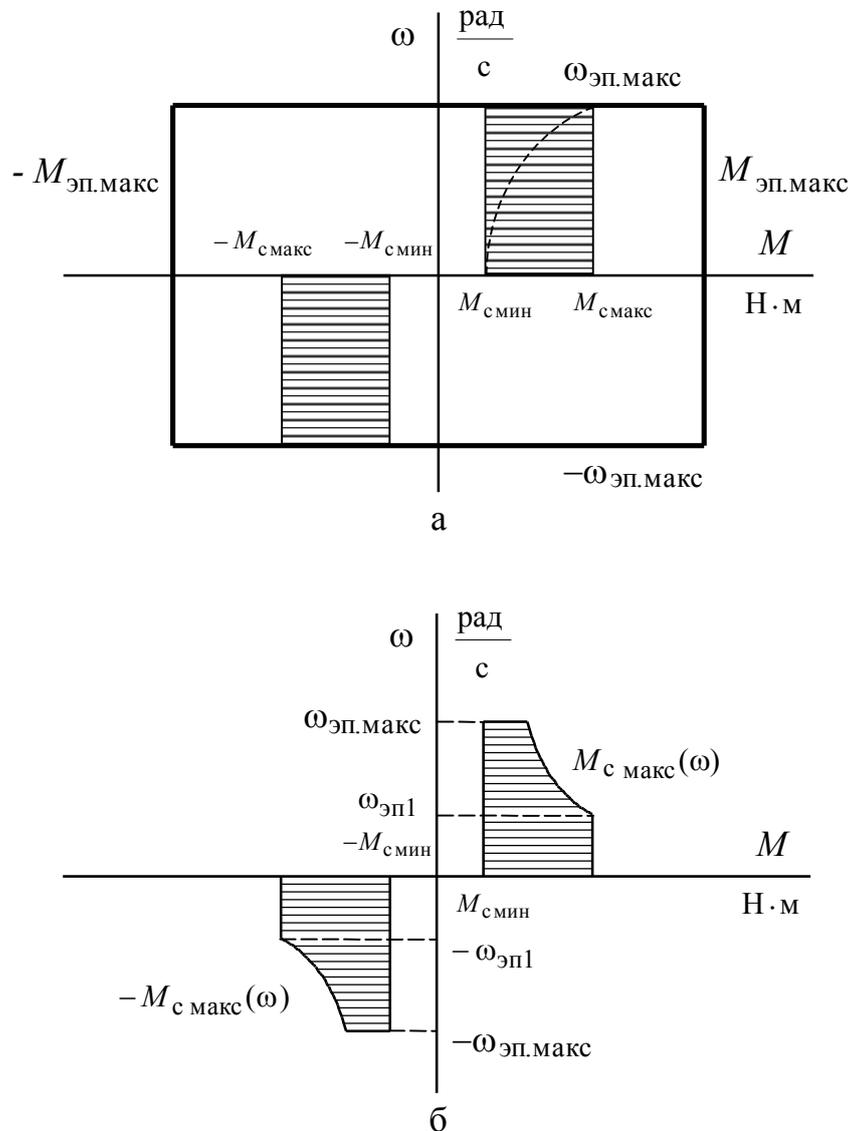


Рисунок 2. 1.- Заданная область работы электропривода: а – однозонного электропривода; б – двухзонного электропривода

Момент сопротивления на валу двигателя M_c может быть и активным по характеру. Тогда область длительного режима работы из первого (или третьего) квадранта частично (рис. 2.2, а), например, в случае движения электровоза под уклон или подъёма пустой кабины лифта, или полностью (рис. 2.2, б), например, работа на спуск грузов канатной дороги или подъёмной лебёдки электрического крана, переходит во второй (или четвертый) квадрант.

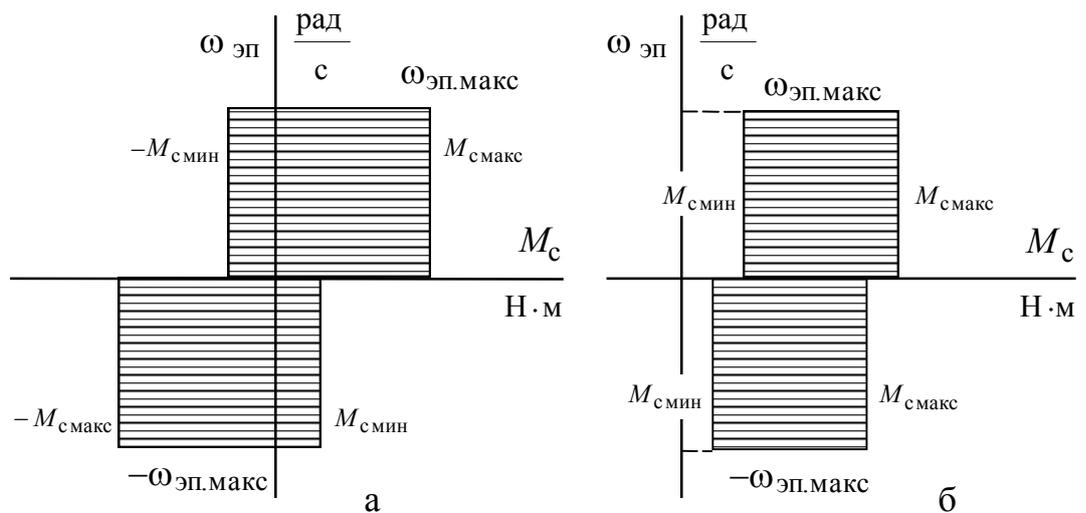


Рисунок 2. 2-. Область изменения статических нагрузок: а – подъёмной лебёдки лифта; б – подъёмной лебёдки крана

2.3. Предварительный выбор ТАД

Для рационального выбора электродвигателей необходимо определиться с условиями и режимами работы тягового электропривода рудничного электровоза. Рассчитан номинальный момент сопротивления на валу электродвигателя, суммарный момент инерции, приведенный к ротору исполнительного двигателя. Был проведен анализ имеющейся технической литературы, рассчитаны номинальный момент сопротивления на один двигатель при полной загрузке, суммарный момент инерции груженого состава с электровозом, приведенный к валу двигателя. Таким образом, получены исходные данные для выбора электродвигателя, которые характеризуют его условия работы: большой момент инерции движущихся масс, возможные

кратковременные перегрузки с учетом возможного изменения уклона. Поэтому важными показателями электропривода являются плавность пуска и торможения, перегрузочная способность электродвигателя, и, естественно, энергетические показатели.

С целью сравнения тяговых свойств и применимости для частотного регулирования выбраны три асинхронных электродвигателя близкие по техническим характеристикам, массе и габаритам с прототипом тяговым двигателем постоянного тока ДК-812. В расчетах использованы каталожные данные общепромышленного двигателя 5А225М6 производства Владимирского электромоторного завода (ОАО ВЭМЗ) [22] и крановых 4МТКМ225М6, 4МТКМФ2П 225М6 производства ОАО «Сибэлектромотор» г. Томск [23].

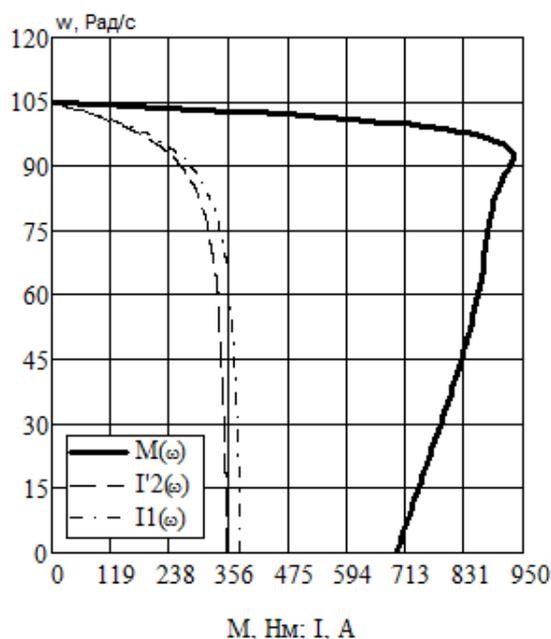


Рисунок 2.3-. Механические характеристики общепромышленного асинхронного двигателя 5А225М6

Данные электродвигатели имеют три пары полюсов и обладают максимальным моментом в данном типоразмере и предназначены для тяжелых условий пуска, обладают высокой перегрузочной способностью. Двигатели имеют класс изоляции F и H, обладают хорошими пусковыми свойствами, высокой перегрузочной способностью, кроме того, крановые двигатели

предполагают передвижение по рельсовому пути, имеют прочный корпус и прилитую коробку выводов [23].

Несомненно, разработка ТАД на базе выпускаемой серии позволит значительно сократить время, средства и цену на изделие при освоении новой продукции.

Рассчитанные параметры схемы замещения выбранных для анализа асинхронных двигателей показали хорошую сходимость с обмоточными данными заводов изготовителей.

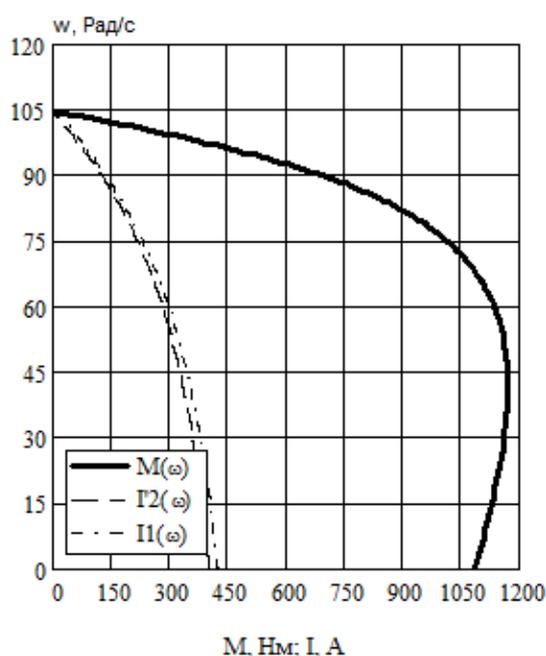


Рисунок 2.4- Механические характеристики кранового асинхронного двигателя 4МТКМ225М6

Получены механические характеристики при прямом пуске электродвигателей: общепромышленного – 5А225М6, кранового – 4МТКМ225М6 (Рисунок 2.3) и рабочий участок механической характеристики кранового частотно-регулируемого двигателя 4МТКМФ2П225М6 (Рисунок 2.4). В связи с использованием преобразователя частоты, в первую очередь важны параметры рабочего участка этих характеристик. Согласно рисункам 2.3-2.4 наиболее жесткая естественная механическая характеристика

принадлежит крановому частотно-регулируемому двигателю 4МТКМФП225М6.

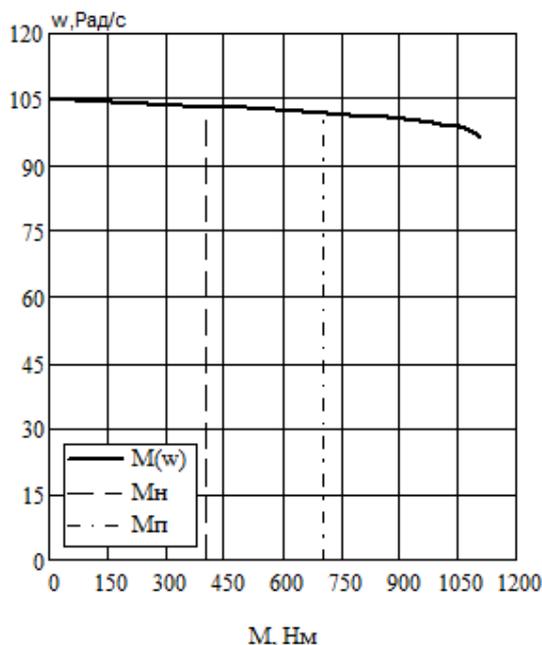


Рисунок 2.5. Рабочий участок механической характеристики кранового частотно-регулируемого двигателя 4МТКМФ2П225М6

Для анализа внешних характеристик выбранных двигателей разработана имитационная модель асинхронных двигателей во вращающейся системе координат в среде моделирования MatLab/Simulink. Получены механические характеристики двигателей при прямом пуске и при работе с преобразователем частоты.

Приведены динамические характеристики пуска трех выбранных двигателей при разгоне нагруженного состава из электровоза и двенадцати груженых тележек общей массой 134 тонны до скорости 4 км/час (См. рис. 2.6...2.8). Как видно из этих графиков наименьшее время переходного процесса обеспечивает частотно-регулируемый крановый электродвигатель 4МТКМФП225М6.

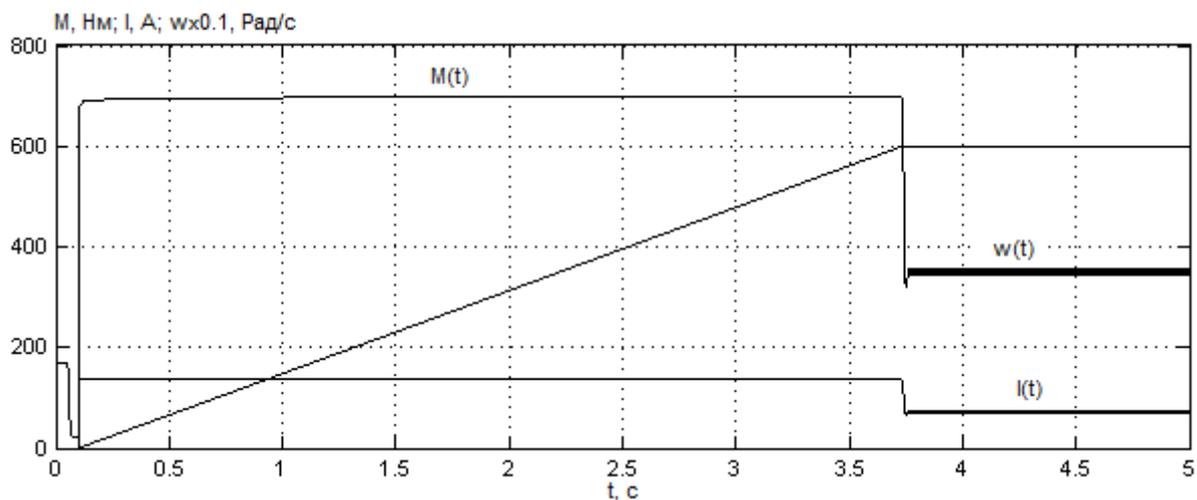


Рисунок 2.6. Переходные процессы пуска общепромышленного асинхронного двигателя 5А225М6 в системе ПЧ-АД

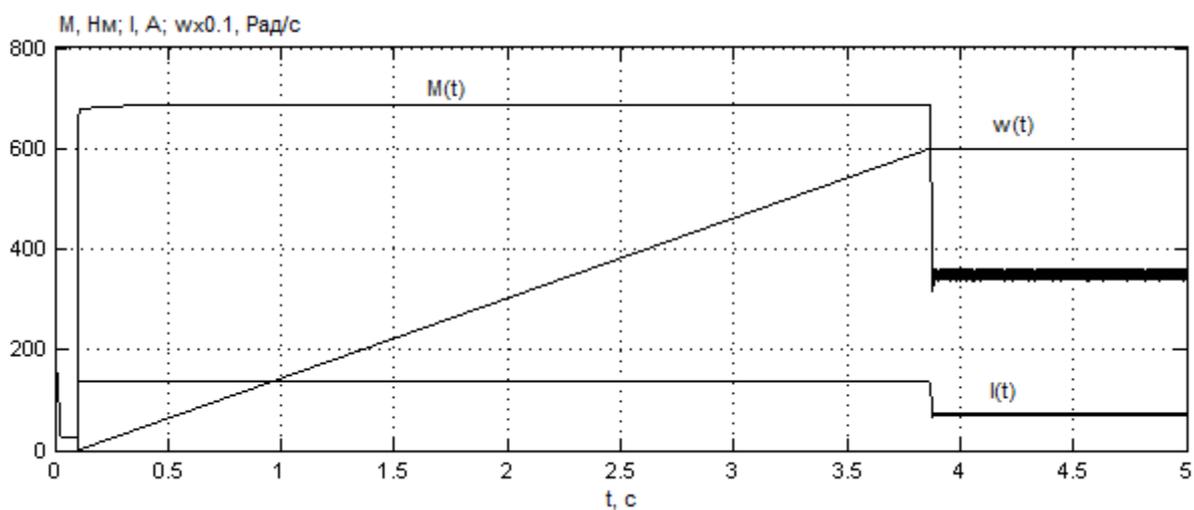


Рисунок 2.7 Переходные процессы при пуске кранового асинхронного двигателя 4МТКМ225М6 в системе ПЧ-АД

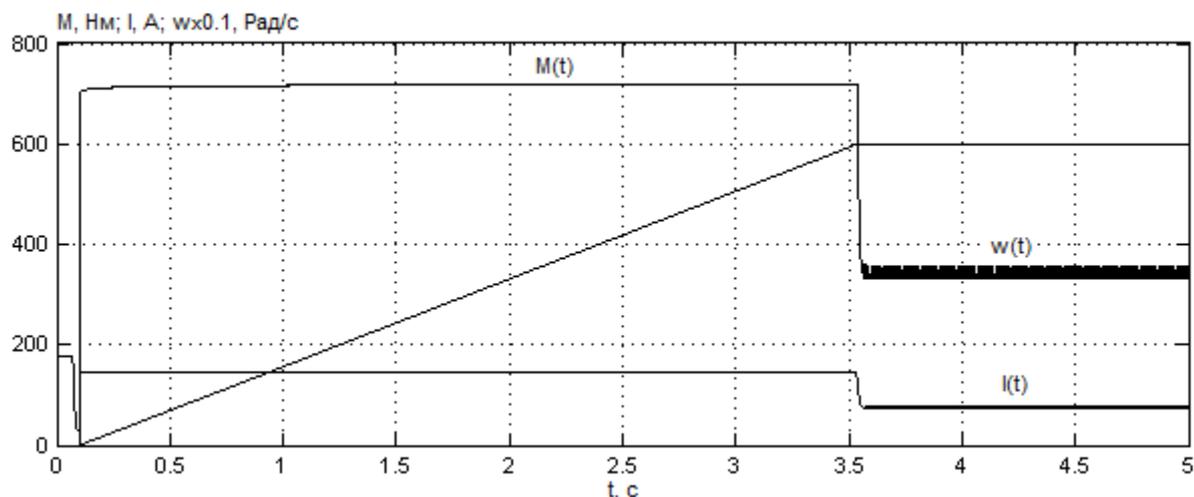


Рисунок 2.8. Переходные процессы при пуске частотно-регулируемого асинхронного двигателя 4МТКМФ2П225М6 в системе ПЧ-АД

Анализируя конструкции представленных серийных электродвигателей, в соответствии с ГОСТ 17516.1-90 уровень внешних механических воздействий при эксплуатации на рельсовом пути достаточно высок и конструкция общепромышленного двигателя 5А225М6 не обеспечивает необходимого уровня надежности [13324].

Анализ полученных результатов и по динамике разгона, энергетическим показателям и конструктивным особенностям позволил выделить наиболее перспективный двигатель 4МТКМФП225М6.

2.4 Математическая модель электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза

Современная теория асинхронного электропривода предоставляет математический аппарат, который с высокой точностью позволяет рассчитывать параметры и режимы работы тяговых электроприводов, поэтому для оптимизации разработки эффективных систем управления ими необходимо применять методы имитационного моделирования. Начальный этап создания системы управления движением тягового рудничного электропривода с асинхронным двигателем требует разработки адекватной математической и имитационных моделей, что позволит избежать грубых ошибок и сократить

время разработки на следующем этапе натуральных исследований режимов работы. В математической модели необходимо учесть:

- ограничение по коэффициенту сцепления колесных пар;
- наличие упругого крепления рамы электровоза к буксам колесных пар и, как следствие, наличие крутильного момента относительно центра массы локомотива при реализации тяги;
- наличие люфта и упругости в сцепных устройствах вагонеток, что приводит к необходимости рассматривать состав как механическую систему с распределенными параметрами.

Известно, что ранее предпринимались попытки исследования влияния этих факторов на динамику электромеханической системы подвижного состава по отдельности, но учета их совокупного влияния не производилось [25, 26]

Подвижный состав представляет собой электромеханическую систему, поведение которой можно с известной степенью приближения можно описать системой линейных дифференциальных и алгебраических уравнений. Причем, эти уравнения образуют две подсистемы: одна описывает электромеханическую часть, состоящую собственно из тяговых электроприводов двух колесных пар рудничного электровоза, другая механическую часть электровоза совместно с подвижным составом. Взаимное влияние этих частей с силовым воздействием на сцепное устройство электровоза и процессы прямого и обратного преобразования энергии, проходящие в электромеханическом преобразователе электропривода, необходимо учесть при имитационном моделировании. Кроме этого, в модели механической части электровоза нужно учитывать эффект буксования колёс, что является важным свойством работы состава.

Все вышеперечисленные рекомендации были учтены при разработке имитационной модели и реализованы с помощью модуля Simulink программного пакета MatLab.

Электрическая часть электровоза включает в себя два преобразователя частоты с векторным управлением и два асинхронных тяговых

электродвигателя, приводящие во вращение независимо первую и вторую колесные пары (КП). Системы уравнений, описывающие движение переменных математической модели каждого двигателя, получены в предположении, что проекции вектора потокосцепления ротора на оси подвижной системы координат x, y приняты: $\Psi_{R_x} = \left| \bar{\Psi}_{R_{НОМ}} \right| \Psi_{R_x} = \left| \bar{\Psi}_{R_{НОМ}} \right|$, $\Psi_{R_y} = 0$ и описываются системой уравнений (2.2) [28, 29]:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{s_x} = (U_{s_x} + L'_s \omega_{\kappa} i_{s_y} + \frac{k_R}{T_R} \Psi_{R_x}) \frac{1}{R(1+T'_s p)}; \\ i_{s_y} = (U_{s_y} - L'_s \omega_{\kappa} i_{s_x} - p_{\pi} \omega_{\kappa} \Psi_{R_x}) \frac{1}{R(1+T'_s p)}; \\ \Psi_{R_x} = \frac{T_s}{(1+T_R p)} k_R R i_{s_x}; \\ M = \frac{3}{2} p_{\pi} k_R \Psi_{R_x} i_{s_y}; \\ \omega_{\kappa} = p_{\pi} \omega + k_R R \frac{i_{s_y}}{\Psi_{R_x}}, \end{array} \right. \quad 2.1$$

где U_{s_x}, U_{s_y} - составляющие напряжения источника тока по осям x и yx ;

i_{s_x}, i_{s_y} - составляющие тока статора по оси x и y ;

ω_{κ} - частота вращения подвижной системы координат x, yx ;

ω - частота вращения ротора;

$p_{\pi} p_{\pi}$ - число пар полюсов;

T_R, T_s - постоянные времени статора и ротора;

L'_s - индуктивность статора.

Механическая часть модели учтена как многомассовая система, состоящая из масс первой и второй колесных пар (КП), а также масс локомотива и вагонов. Эти массы взаимосвязаны за счет упругих связей в конструкции подвижного состава и режима буксования колесных пар

относительно рельсового пути. Система уравнений, описывающих динамику механической части представлена ниже (2.2) [26]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta V_i = V_{к_i} - V_{эв}; \\ F_{сц_i} = \varphi(\Delta V) P_i; \\ M_i = R F_{сц_i}; \\ V_{эв} = \frac{1}{m_{эв}} \int ((\sum_{i=1}^m F_{сц_i}) - F_n - m_{эв} g \sin(\alpha)) dt; \\ P_i = (\frac{P}{2} - \frac{2h}{l} F_n) \cos(\alpha); \\ \omega_i = V_{к_i} R, \end{array} \right. \quad 2.2$$

где $i = 1..m$, $n = 1..l$ (m - количество колесных пар, l - количество вагонов);

ΔV_i - избыточная скорость скольжения i -ой КП;

$V_{к_i}$ - величина линейной скорости на ободе колеса (i - номер КП);

$V_{эв}$ - величина линейной скорости электровоза;

$F_{сц_i}$ - сила сцепления i -ой колесной пары;

$\frac{h}{l}$ - отношение высоты сцепки от головки рельса к расстоянию между

осями КП;

$\varphi(\Delta V)$ - коэффициент сцепления;

$m_{эв}$ - масса локомотива;

ω_i - угловая частота вращения КП;

M_i - момент КП;

F_n - сила n -го вагона;

P - вес локомотива;

α - угол наклона пути.

Данная математическая модель использована для реализации имитационной модели механической системы, которая необходима для алгоритма идентификации явления буксования и юза.

3 Расчет параметров асинхронного двигателя и настройка контуров регулирования

3.1 Структурная схема силового канала электропривода

Рассмотрим силовой канал электропривода:

- электродвигатель, выполняющий функцию электромеханического преобразователя;
- преобразователь частоты, отвечающий за функцию электрического преобразователя;
- механическая система, выполняющая функцию механического преобразователя [27].

Структурная схема силового канала частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением реализуется на базе структурной схемы двухфазного асинхронного электродвигателя во вращающейся системе координат d, q , ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора, и представлена в общем случае на рисунке 3.1.

В структурной схеме рисунке 3.1 учтены нелинейные перекрестные обратные связи двигателя. Если они не учитываются или скомпенсированы, то структурная схема системы преобразователь – асинхронный электродвигатель во вращающейся двухфазной системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора, приводится к виду, показанному на рисунке 3.2[27].

На схемах рисунке 3.1 обозначены: 1 – преобразователь – формирователь фазных напряжений управления двухфазным асинхронным электродвигателем; 2 – двухфазный асинхронный электродвигатель во вращающейся системе координат d, q , ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора; 3 – одномассовая механическая система в общем случае с нагрузкой активного $M_{сА}$ и реактивного $M_{сР}$ характера [24].

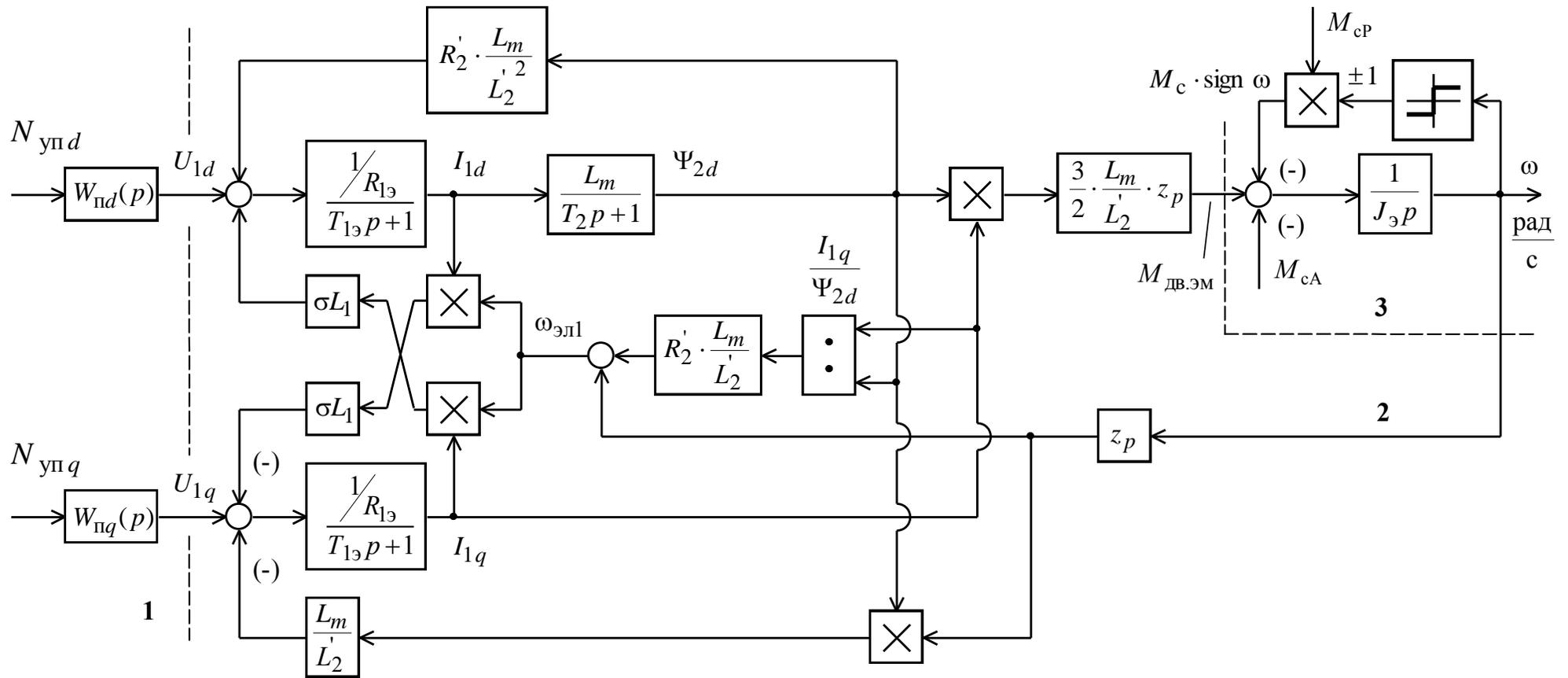


Рисунок 3.1 - Структурная схема силового канала асинхронного электропривода с векторным управлением

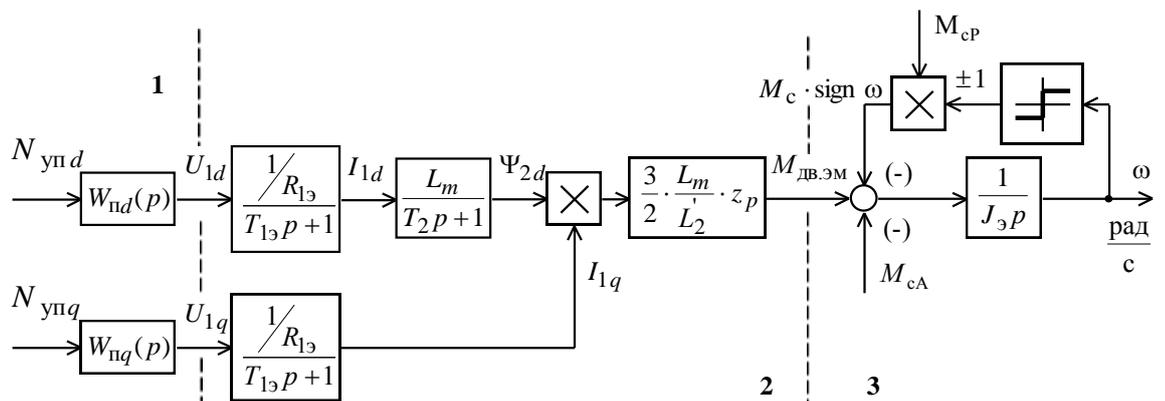


Рисунок 3.2 - Структурная схема силового канала асинхронного электропривода с векторным управлением и компенсацией внутренних перекрестных связей двигателя

3.2 Определение дополнительных параметров двигателя примененного в конструкции лабораторного стенда по справочным техническим данным

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3.14 \cdot 1000}{30} = 104.712 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Номинальная скорость вращения двигателя

$$n_{\text{дв.н}} = (1 - s_{\text{н}}) \cdot n_0 = (1 - 0.03) \cdot 1000 = 970 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

$$\omega_{\text{дв.н}} = \frac{n_{\text{дв.н}}}{9.55} = \frac{970}{9.55} = 101.571 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{37 \cdot 10^3}{101.571} = 364.277 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Номинальное фазное напряжение и номинальный фазный ток статора. Для определения номинального фазного тока необходимо знать схему соединения обмоток статора. Соединение обмоток неизвестно, принимаем соединение Y.

$$U_{1\phi н} = \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.}$$

$$I_{1\phi н} = I_{1лн} = \frac{P_{дв.н}}{3 \cdot U_{1\phi н} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{37 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.86 \cdot 0.92} = 70.85 \text{ А.}$$

Примечание: $I_{1лн}$ – ток, потребляемый двигателем из сети в номинальном режиме работы.

Максимальный потребляемый ток двигателя при прямом пуске

$$I_{1макс} = I_{1лн} \cdot K_{идв} = 70.85 \cdot 7 = 459.98 \text{ А.}$$

Критический момент двигателя на естественной характеристике

$$M_k = m_k \cdot M_{дв.н.} = 364.277 \cdot 2.1 = 764.9817 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Пусковой момент двигателя при прямом пуске

$$M_{дв.пуск} = m_k \cdot M_{дв.н.} = 364.277 \cdot 2.2 = 764.9817 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

3.3 Определение параметров схемы замещения в абсолютных единицах по справочным техническим данным электродвигателя

Ток фазы статора при частичной нагрузке

$$I_{1p^*} = \frac{p^* \cdot P_{\text{дв.н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{p^*} \cdot \eta_{p^*}} = \frac{p^* \cdot P_{\text{дв.н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{p^*} \cdot \eta_{p^*}} = 55.062 \text{ А.}$$

где $\cos \varphi_{p^*} = 0.79$ – коэффициент мощности при частичной нагрузке [2];

$\eta_{p^*} = 0.92$ – КПД при частичной нагрузке [2];

$p^* = 0.75$ – коэффициент загрузки двигателя [2].

Ток холостого хода асинхронного двигателя

$$I_0 = I_{1H} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{I_{1p^*}}{I_{1H}}\right)^2 \cdot \left[\frac{p^* \cdot (1-s_H)}{(1-p^* \cdot s_H)}\right]^2}{1 - \left[\frac{p^* \cdot (1-s_H)}{(1-p^* \cdot s_H)}\right]^2}} =$$

$$= 70.855 \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{55.062}{70.855}\right)^2 \cdot \left[\frac{0.75 \cdot (1-0.03)}{(1-0.75 \cdot 0.03)}\right]^2}{1 - \left[\frac{0.75 \cdot (1-0.03)}{(1-0.75 \cdot 0.03)}\right]^2}} = 23.721 \text{ А.}$$

Из формулы Клосса определим соотношение для расчета критического скольжения

$$s_k = s_H \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} =$$

$$= 0.03 \cdot \frac{2.1 + \sqrt{2.1^2 - [1 - 2 \cdot 0.03 \cdot 1.01 \cdot (2.1 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0.03 \cdot 1.1 \cdot (2.1 - 1)} = 0.133$$

где β – коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статора и ротора, принимаем $\beta = 1.01$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя

$$R_2' = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot m_k \cdot P_{\text{дв.н}} \cdot C_1^2 \left(\beta + \frac{1}{s_k} \right)} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0.03)}{2 \cdot 2.1 \cdot 37000 \cdot 1.024^2 \left(1.01 + \frac{1}{0.133} \right)} = 0.101 \text{ Ом},$$

где $C_1 = 1.024$ – коэффициент, характеризующий соотношение $\frac{X_\mu + X_{1\delta}}{X_\mu}$;

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1.024 \cdot 0.101 \cdot 1.01 = 0.105 \text{ Ом}.$$

Определим параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление

короткого замыкания

$$\gamma = \sqrt{(1/s_k^2) + \beta^2} = \sqrt{(1/0.133^2) + 1.01^2} = 7.467$$

тогда, индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_{\text{кн}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 7.467 \cdot 1.024 \cdot 0.101 = 0.773 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора

$$X_{1\delta} = 0.42 \cdot X_{\text{кн}} = 0.42 \cdot 0.773 = 0.325 \text{ Ом}.$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме

$$L_{1\delta} = \frac{X_{1\delta}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0.325}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1.034 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора в номинальном режиме

$$X'_{2\delta} = 0.58 \cdot \frac{X_{\text{кн}}}{C_1} = 0.58 \cdot \frac{0.773}{1.024} = 0.438 \text{ Ом.}$$

ЭДС ветви намагничивания E_1 , наведённая потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме,

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1\text{н}} \cdot \cos \varphi - R_1 \cdot I_{1\text{н}})^2 + (U_{1\text{н}} \cdot \sin \varphi - X_{1\delta} \cdot I_{1\text{н}})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0.86 - 0.105 \cdot 70.855)^2 + (220 \cdot 0.558 - 0.325 \cdot 70.855)^2} = 202.513 \text{ В,} \end{aligned}$$

тогда индуктивное сопротивление намагничивания

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{202.513}{23.721} = 8.537 \text{ Ом.}$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{8.537}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.027 \text{ Гн.}$$

3.4 Проверка адекватности расчетных параметров двигателя

При найденных параметрах рассчитываются значения номинального электромагнитного момента двигателя $M_{\text{эм.н}}$ и $M_{\text{эм.н}}^*$:

$$M_{\text{эм.н}}(s_{\text{н}}) = M_{\text{эм.н}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{\text{н}} \cdot \left[(X_{\text{кн}})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{н}}}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{\text{н}} \cdot X_{\mu}}\right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0.101}{104.712 \cdot 0.03 \cdot \left[(0.773)^2 + \left(0.105 + \frac{0.101}{0.03}\right)^2 + \left(\frac{0.105 \cdot 0.101}{0.03 \cdot 8.537}\right)^2 \right]} = 368.505 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{эм.н}}^* = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_{\mu}}{(L_{\mu} + L'_{2\delta})} \cdot \Psi_{2\text{н}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\text{н}}^2 - I_0^2} =$$

$$= \frac{3}{2} \cdot 3 \cdot \frac{0.027}{(0.027 + 0.001395)} \cdot 0.912 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{70.855^2 - 23.721^2} = 368.442 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

где $\Psi_{2\text{н}} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_{\mu} = \sqrt{2} \cdot 8.843 \cdot 0.073 = 0.907 \text{ Вб}$.

Должны выполняться условия:

$$M_{\text{эм.н}}^* \approx M_{\text{эм.н}};$$

$$M_{\text{эм.н}}^* = (1.05 \div 1.1) \cdot M_{\text{дв.н}} = (1.05 \div 1.1) \cdot 364.252 = (382.464 \div 400.677) \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

По результатам расчета эти условия выполняются.

Параметры схемы замещения электродвигателя сведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры схемы замещения электродвигателя

$R_1, \text{ Ом}$	$X_{1\delta}, \text{ Ом}$	$L_{1\delta}, \text{ Гн}$	$X_{\mu}, \text{ Ом}$	$L_{\mu}, \text{ Гн}$	$R_2', \text{ Ом}$	$X_{2\delta}, \text{ Ом}$	$L'_{2\delta}, \text{ Гн}$	$X_{\text{кн}}, \text{ Ом}$
0,105	0,325	$1,034 \cdot 10^{-3}$	8.537	0.027	0.101	0.438	$1,395 \cdot 10^{-3}$	0.773

3.5 Расчет естественной механической характеристики

Естественная механическая характеристика $M_{эм}(s)$ электродвигателя для частоты $f_{1н} = 50$ Гц рассчитывается по выражению

$$M_{эм}(s) = \frac{3 \cdot U_{1фн}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]},$$

где $M_{эм}$ – электромагнитный момент двигателя, Н·м.

По результатам расчета строится механическая характеристика $\omega(M_{эм})$ (рисунок 3.1, а), где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s), \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Параметры характерных точек на естественной механической характеристике двигателя:

– значение электромагнитного номинального момента при номинальном скольжении s_H

$$M_{эм}(s_H) = M_{эм.н} = \frac{3 \cdot U_{1фн}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_H \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}, \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– значение критического скольжения

$$s_k = R_2' \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_1'}{X_{\mu}} \right)^2}{R_1^2 + X_{кн}^2}};$$

– значение электромагнитного критического момента при критическом скольжении

$$M_{\text{ЭМ}}(s_{\text{к}}) = M_{\text{ЭМ.к}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left\{ R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{\text{кн}}^2) \cdot \left[1 + \left(\frac{R_1}{X_{\mu}} \right)^2 \right]} \right\}}, \text{ Н} \cdot \text{ м}.$$

3.6 Расчет естественной электромеханической характеристики

Естественные электромеханические характеристики $I_1(s)$ и $I_2'(s)$ электродвигателя рассчитывается для частоты $f_{1\text{н}} = 50$ Гц по выражению

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

где $I_1 = I_{1\text{ф}}$ – действующее значение фазного тока двигателя, А;

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\text{фн}}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{\text{кн}}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2}},$$

– приведенный к обмотке статора ток ротора, А;

$$I_0 = \frac{U_{1\text{фн}}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_{\mu})^2}},$$

– действующее значение тока холостого хода, А;

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{\text{кн}})^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2}}.$$

По результатам расчета строятся электромеханические характеристики $\omega(I_1)$ и $\omega(I_2')$ (рис. 6, б), где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s), \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Для скольжения $s = s_H$ рассчитываются значения номинального тока статора $I_{1H}(s_H)$. Сравнив значения расчетных параметров характерных точек естественных характеристик двигателя с его справочными данными, следует сделать вывод об адекватности расчетных параметров схемы замещения двигателя.

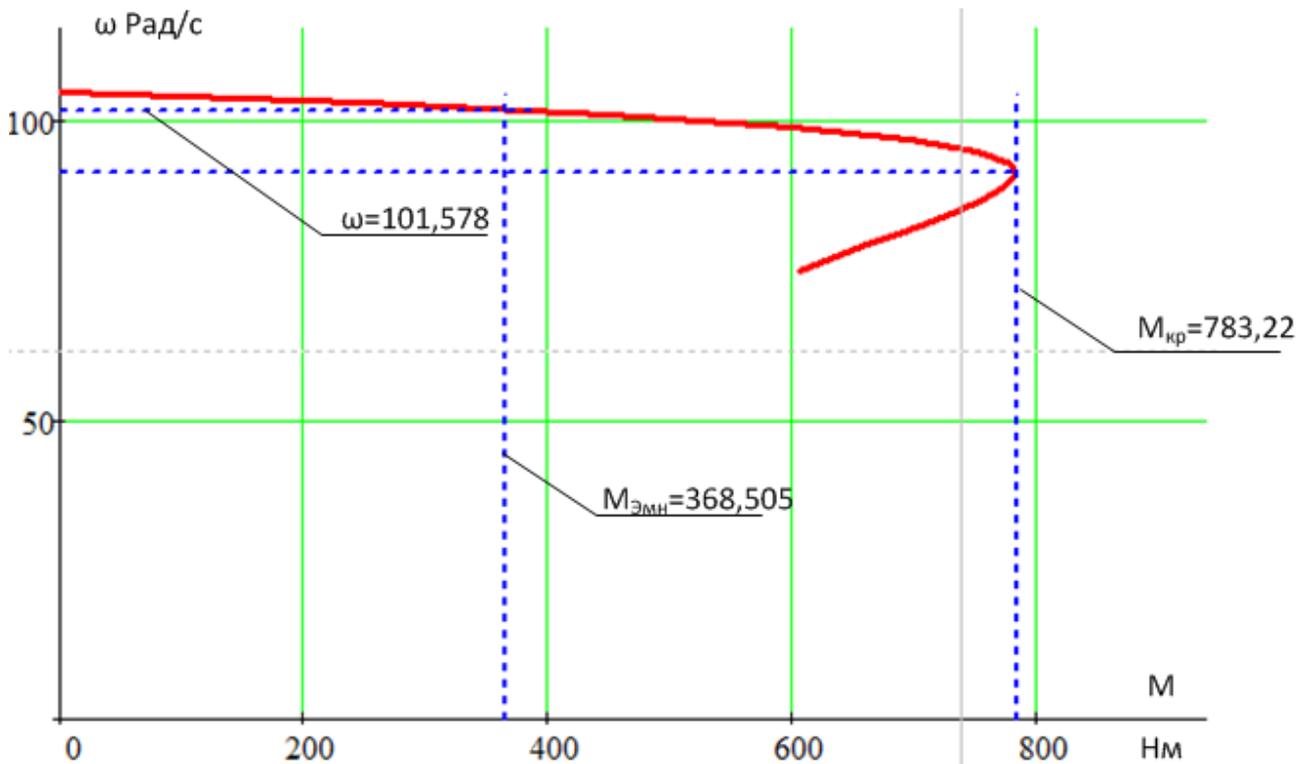


Рисунок 3. 3. – Естественная механическая характеристика асинхронного электропривода

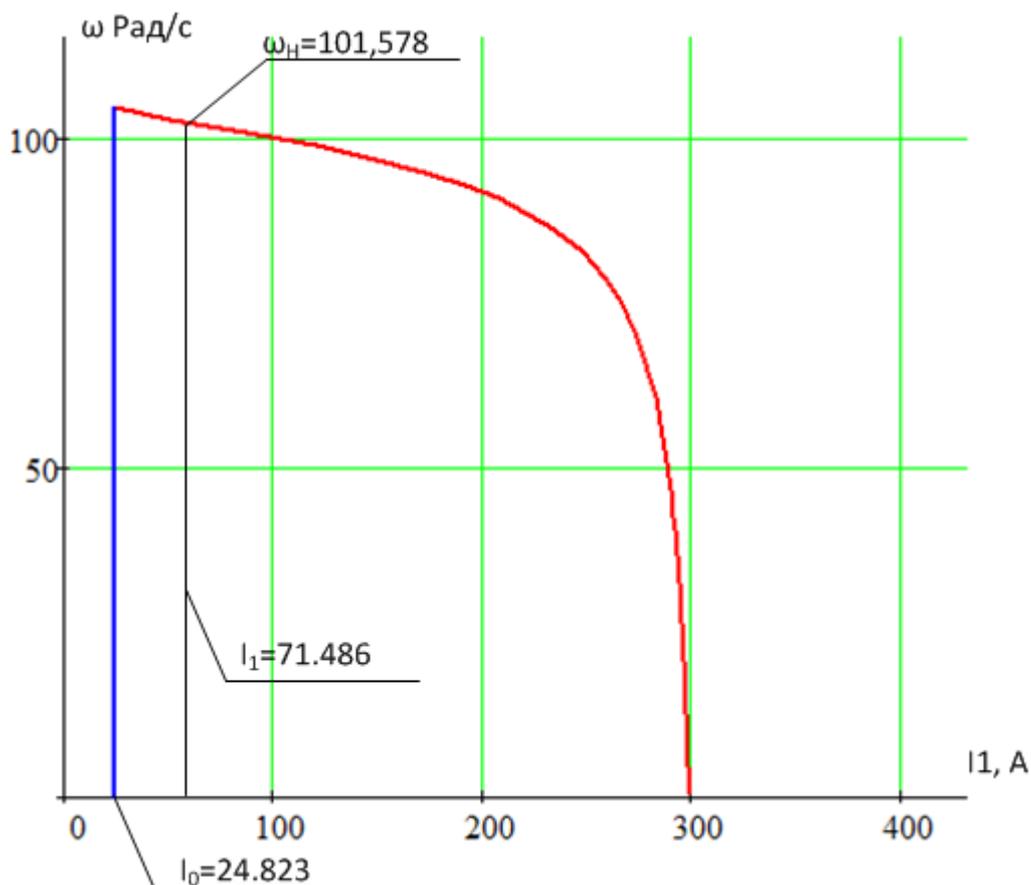


Рисунок 3. 4 - Естественные электромеханическая характеристика асинхронного электродвигателя.

1. На полученное семейство механических характеристик $M(\omega)$ рисунка 3.3 наносятся граничные характеристики для длительного и кратковременного режимов работы:

$$M_{с\text{прив.макс}} + \Delta M_{с\text{дв}} = 366.097 + 4.254 = 370.351 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{эп.макс} + \Delta M_{с\text{дв}} = 2 \cdot 366.097 + 4.254 = 736.448 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

2. Рассчитывается и строится зависимость длительно допустимого тока электродвигателя $I_{дв.длит.доп}(\omega)$ при значении коэффициента вентиляции $k = 0.9$:

$$I_{дв.длит.доп}(\omega) = I_{дв.н} \cdot \left(k + \frac{(1-k) \cdot 2 \cdot \omega}{\omega_{дв.н}} \right) \text{ при } \omega \leq 0.5 \cdot \omega_{дв.н} ;$$

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = I_{\text{дв.н}} = 70.855 \text{ А при } \omega > 0.5\omega_{\text{дв.н}}.$$

Результаты расчета сведены в таблице 3.1.

Таблица 3.2 – Результаты расчета зависимости $I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$

ω , рад/с	0	$0.5\omega_{\text{дв.н}} = 50.785$	$\omega_{\text{эп.макс}} = 90.471$
$I_{\text{дв.длит.доп}}$, А	63.77	70.855	70.855

3. Рассчитывается и строится зависимость длительно допустимого момента электродвигателя $M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$:

$$M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_{\mu}}{L_2} \cdot \Psi_{2н} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{\text{дв.длит.доп}}^2(\omega) - I_0^2},$$

где

$$\Psi_{2н} = \frac{M_{\text{эм.н}}}{\frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_{\mu}}{L_2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_1^2(\omega_{\text{дв.н}}) - I_0^2}} = \frac{368.505}{\frac{3}{2} \cdot 3 \cdot \frac{0.02718}{0.076} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{70.855^2 - 23.721^2}} = 0.954 \text{ Вб}$$

– значение номинального потокосцепления двигателя.

Результаты расчета занесены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчета зависимости $M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$

ω , рад/с	0	$0.5\omega_{\text{дв.н}} = 50.785$	$\omega_{\text{эп.макс}} = 100,1$
$M_{\text{дв.длит.доп}}$, Н·м	327.827	364.252	364.252

Рассчитанные в пунктах 1–5 зависимости отображены на соответствующих рисунках и. На Рисунок 3.5 показаны механические характеристики электропривода и нагрузки при векторном управлении; на Рисунок 3.6 показаны электромеханические характеристики электропривода при векторном управлении.

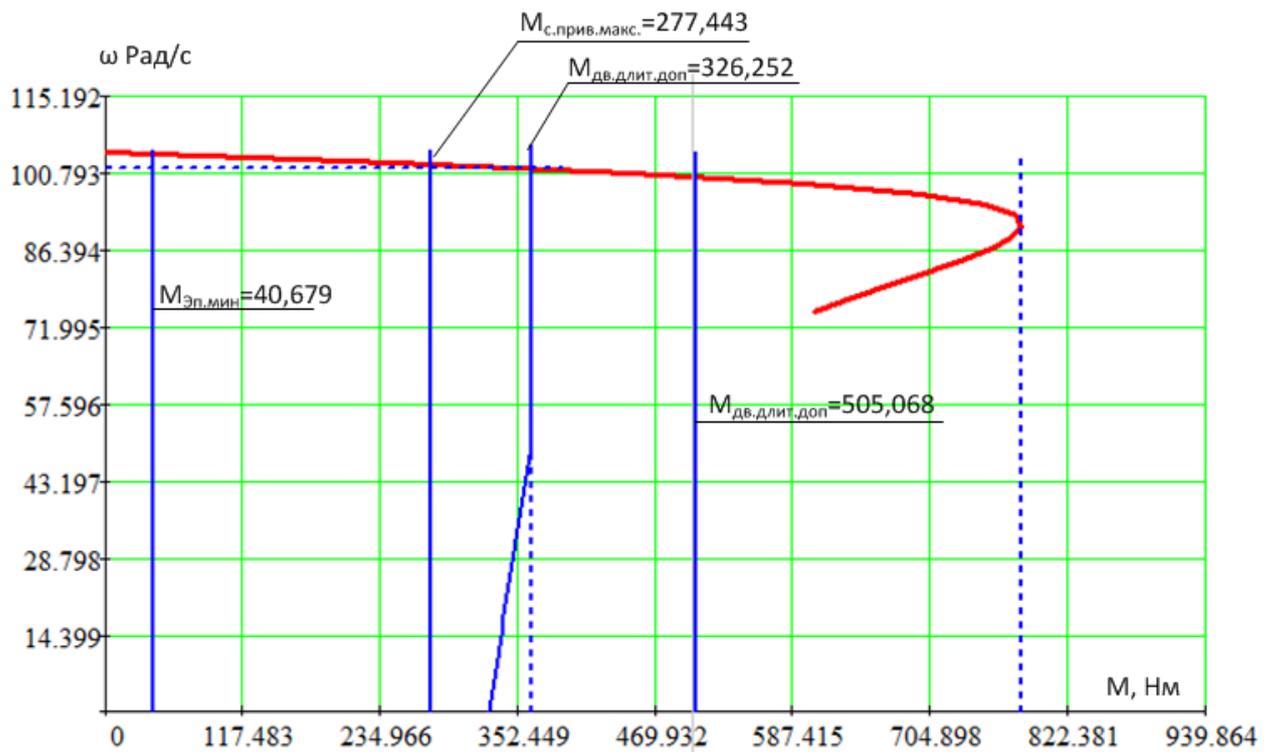


Рисунок 3.5 – Механические характеристики электропривода

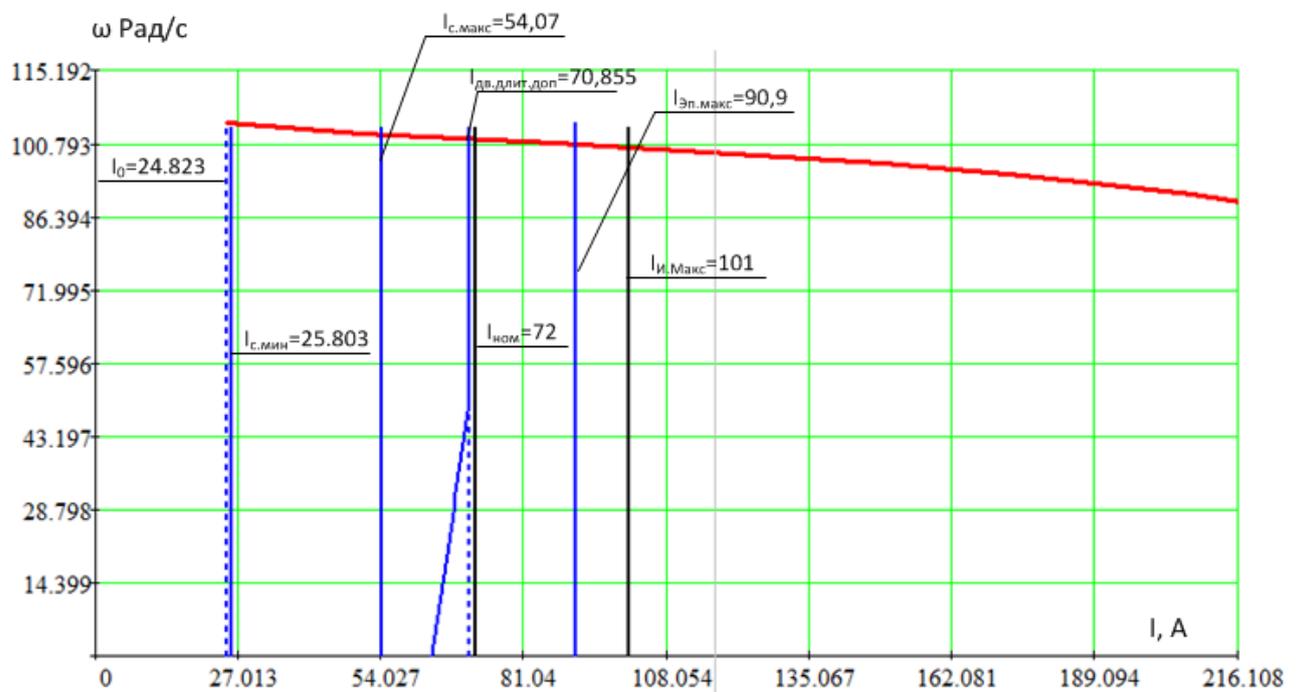


Рисунок 3.6 – Электромеханические характеристики электропривода

3.7 Оценка достоверности расчётных характеристик двигателя

По результатам построения механических характеристик электропривода $\omega(M)$ и нагрузки $M(\omega)$ (рисунок 1.9) проверяется правильность выбора двигателя по моменту [27]. Во всем диапазоне должны выполняться условия:

$$M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) \geq M_{\text{сприв.макс}} + \Delta M_{\text{сдв}}$$

$$M_{\text{дв.макс}}(\omega) \geq M_{\text{эп.макс}} + \Delta M_{\text{сдв}}$$

Из характеристик видно, что условия выполняются

Следовательно, двигатель по моменту выбран правильно.

По результатам построения электромеханических характеристик электропривода $\omega(I_1)$ проверяется правильность выбора двигателя по току

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) \geq I_{\text{смакс}}$$

Условия также выполняются.

Следовательно, двигатель по току выбран правильно

3.8 Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода

Параметры преобразователя

В простейшем случае без учета ШИМ инвертор представляет собой линейный усилитель с чистым запаздыванием на величину периода широтно-импульсной модуляции $T_{\text{ШИМ}}$

$$T_{\text{и}} = T_{\text{ШИМ}} = \frac{1}{f_{\text{ШИМ}}} = \frac{1}{10000} = 1 \cdot 10^{-4}, \text{ с,}$$

где $f_{\text{ШИМ}}$ – несущая частота инвертора (частота ШИМ), Гц.

В случае рассмотрения нормальных условий эксплуатации ТАД при питании привода от промышленного напряжения, максимальные значения действующего и

амплитудного фазного напряжения двигателя принимаются, соответственно, равными:

$$U_{1\text{фн}} = 220 \text{ В}; \quad U_{1\text{фm}} = \sqrt{2} \cdot U_{1\text{фн}} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311.1 \text{ В}.$$

С учетом ШИМ напряжения инвертора и при соединении обмоток статора двигателя в звезду параметры преобразователя выбираются в соответствии с приведенными ниже выражениями[27].

$$U_{d0} = 1.35 \cdot U_c - \text{напряжение звена постоянного тока преобразователя, В,}$$

где

$$U_c - \text{линейное напряжение источника питания преобразователя, В;}$$

$\gamma_{\text{макс}} < 1$ – максимальное значение коэффициента относительной продолжительности включения ключей инвертора (рекомендуется принять $\gamma_{\text{макс}} = 0.95$), о.е.

Условие согласования напряжения преобразователя и двигателя

$$U_{d0} \geq \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{1\text{н}}}{\gamma_{\text{макс}}} \geq \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 220}{0.95} \geq 567.25, \text{ В.}$$

Коэффициент усиления инвертора

$$k_{\text{и}} = \frac{U_{d0}}{\sqrt{3}} = \frac{567.25}{\sqrt{3}} = 327.502.$$

Однако ввиду особенностей эксплуатации, и по факту наличия звена постоянного тока. В качестве троллея, существует возможность отказаться от выпрямителя и использовать входное напряжение в 250В, для звена постоянного тока. В случае использования стандартного ТАД, рассматриваемого в диссертационной работе, необходимо критически завышать мощность двигателя, ввиду необходимости обеспечивать тяговый момент в районе номинальных показателей при стандартном напряжении общепромышленной сети переменного тока. Ввиду этого возможен вариант пересчета обмоток статора на пониженное напряжение, для обеспечения требуемого момента. Последующие исследования представлены для сети 380/220В.

Параметры звеньев структурной схемы двигателя

Эквивалентная индуктивность обмоток [27]:

статора

$$L_1 = L_{1\delta} + L_{\mu} = 0.02821 \text{ Гн} ;$$

ротора

$$L_2 = L'_{2\delta} + L_{\mu} = 0.02857 \text{ Гн} .$$

Коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - \frac{L_{\mu}^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{0.02718^2}{0.02821 \cdot 0.02857} = 0.084 .$$

Эквивалентное сопротивление

$$R_3 = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_{\mu}^2}{L_2^2} = 0.105 + 0.101 \cdot \frac{0.0272^2}{0.02859^2} = 0.1964 \text{ Ом} .$$

Электромагнитные постоянные времени

$$T_3 = \frac{\delta \cdot L_1}{R_3} = 0.01202 \text{ с} ;$$

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2'} = 0.28292 \text{ с} .$$

3.9 Структурная схема и параметры механической системы электропривода

В качестве первичной итерации рассмотрим одномассовую механическую систему регулируемого электропривода приведенную, на Рисунок 3.7. для рудничного ТАД в сцепке с пустым составом вагонеток.

На схеме (Рисунок 3.7) приняты следующие обозначения:

$\Delta M_{с.дв} = M_{эм.н}^* - M_{дв.н}$ – момент от сил трения собственно двигателя,

Н·м;

$M_{ср}$ – приведенный к валу двигателя статический момент нагрузки реактивного характера, учитывающий полезный момент и момент сил трения механизма, Н·м;

$M_{сА}$ – приведенный к валу двигателя статический момент нагрузки активного характера без учета момента сил трения механизма, Н·м;

$J_{э}$ – приведенный к валу двигателя эквивалентный момент инерции привода

$$J_{э} = 1.1 \cdot J_{дв} + 1.1 \cdot \frac{J_{м}}{i_{ред}^2} = 1.1 \cdot 0.14 + 1.1 \cdot \frac{134.9}{14.2^2} = 0.89 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$J_{м}$ – приведенный к валу двигателя момент инерции механизма, кг·м²;

$(0.1 \div 0.2) \cdot J_{дв}$ – момент инерции соединительной муфты, тормоза, кг·м².

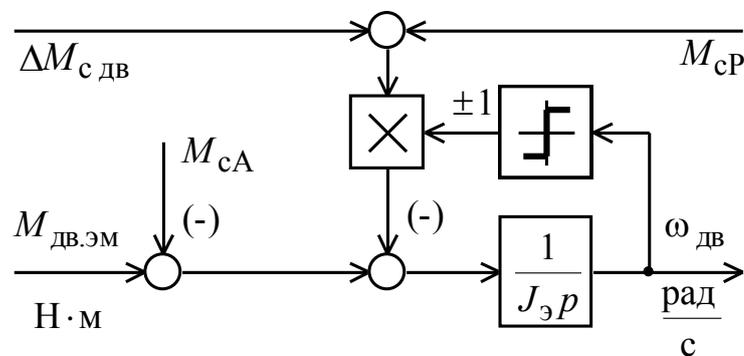


Рисунок 3.7 - Структурная схема одномассовой механической системы регулируемого электропривода

3.10 Структурная схема линеаризованной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением

Структурная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода приемника с векторным управлением приведена на рисунке 3.8. Электропривод реализован по схеме с независимым управлением потокосцеплением.

На схеме Рисунок 3.8 приняты следующие обозначения:

$W(p)_{pT}, W(p)_{p\Psi}, W(p)_{p\omega}$ – передаточные функции регуляторов тока, потокосцепления и скорости;

k_T – коэффициент обратной связи по току, 1/А ;

k_Ψ – коэффициент обратной связи по потокосцеплению ротора, 1/Вб ;

k_ω – коэффициент обратной связи по скорости, 1/рад/с .

$T_{\mu T0}, T_{\mu\Psi0}$ и $T_{\mu\omega0}$ – малые постоянные времени цепи обратной связи по току, потокосцеплению и скорости, с

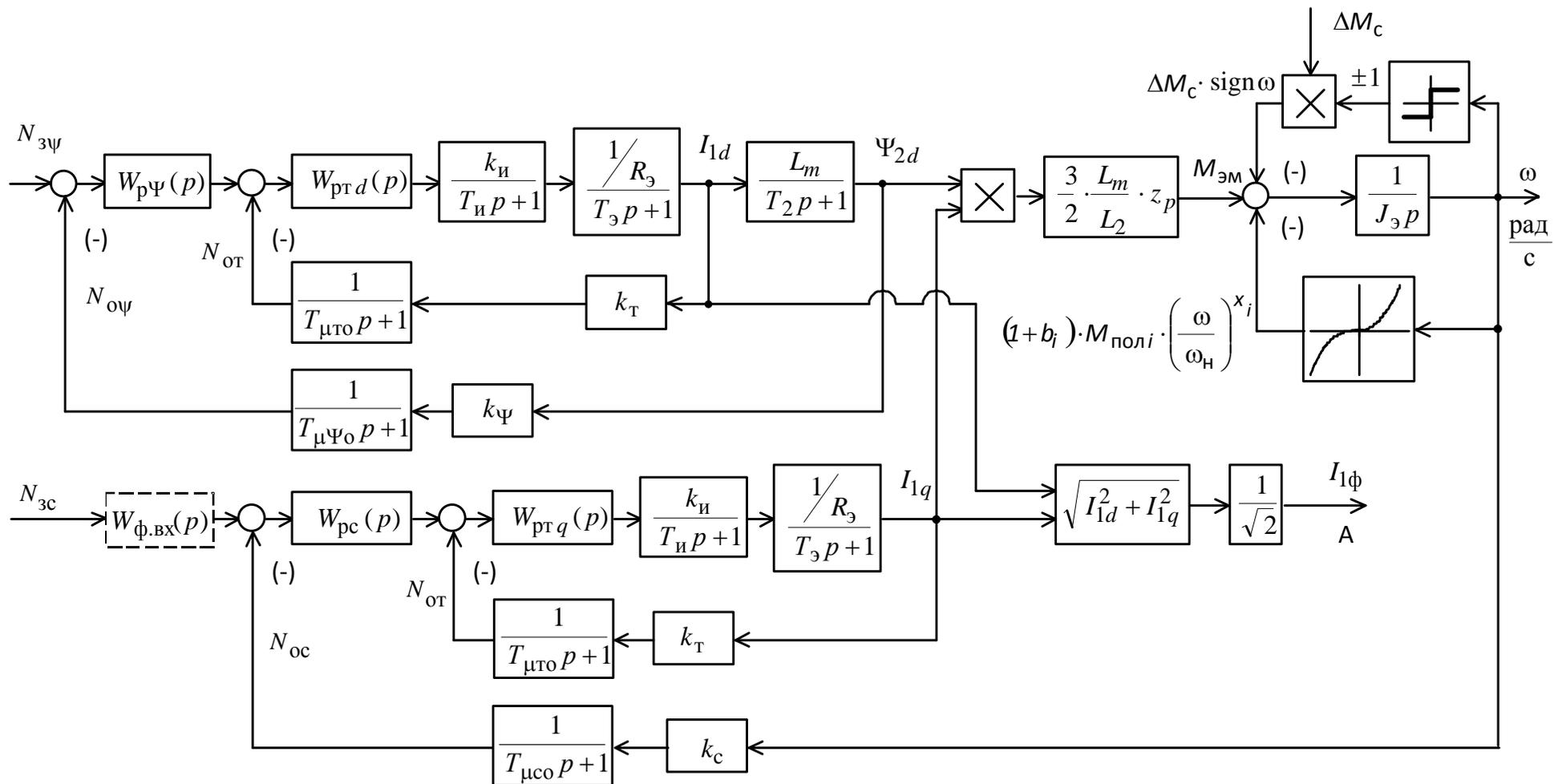


Рисунок 3.8 – Структурная схема линейризованной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении

3.11 Расчет параметров контуров САР регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением

В многоконтурной системе управления подчиненного регулирования электропривода регуляторы включены последовательно. Расчет управлений начинается с внешнего контура. Регулятор контура рассчитывает управление после того, как будут определены сигнал задания на входе контура N_{zi} и сигнал обратной связи N_{oi} . Сигнал обратной связи рассчитывается и остается постоянным на интервале квантования сигнала $T_{oc.i}$ в цепи обратной связи. Выходной сигнал регулятора рассчитывается и остается постоянным на интервале квантования сигнала $T_{пк.i}$ в прямом канале контура. Рассчитанное регулятором тока управление подается на ключи инвертора только на следующем интервале ШИМ, т.е. с временной задержкой $T_{зу.и} = T_{шим}$. Наибольшее быстродействие электропривода достигается при максимальном быстродействии внутреннего контура тока I_{1q} [27].

3.12 Контур тока с ПИ-регулятором и аналоговым датчиком тока

Контуров токов I_{1d} и I_{1q} реализованы по одной схеме и имеют одинаковые параметры. Аналоговые сигналы с первичных преобразователей тока двух фаз обмотки статора преобразуются с помощью АЦП в цифровые сигналы.

Разрядность АЦП датчика тока преобразователя;

$$n_{\text{ацп. дт}} = 12$$

Коэффициент передачи датчика тока, $1/\text{А}$, где σ_T – коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование тока;

Принимаем $\sigma_T = 1.2$

$$k_{\text{дт}} = \frac{0.5 \cdot 2^{n_{\text{ап.дт}}}}{\sigma_{\text{т}} \cdot (\sqrt{2} \cdot I_{\text{эп.макс}})} = \frac{0.5 \cdot 2^{12}}{1.2 \cdot (\sqrt{2} \cdot 4.886)} = 246.97.$$

Интервал квантования сигналов в цепи обратной связи контура тока, с,
где $n_{\text{ос.т}} \geq 1$ целое число;

$$T_{\text{ос.т}} = n_{\text{ос.т}} \cdot T_{\text{шим}} = 1 \cdot 10^{-4} = 1 \cdot 10^{-4}$$

интервал квантования управления в прямом канале контура тока, с;

$$T_{\text{пк.т}} \leq T_{\text{ос.т}}$$

интервал времени задержки подачи управления от регулятора тока к ключам инвертора, с;

$$T_{\text{зу.и}} = T_{\text{шим}}$$

Установка аналогового фильтра в цепи измерения тока определяется только необходимостью обеспечить помехозащищенность регулятора тока по цепи обратной связи. Если значение постоянной времени аналогового фильтра неизвестно, следует принять $T_{\text{ф.от}} = 0$.

максимальное значение задания на входе контура тока, соответствующее максимальному значению тока электропривода $I_{\text{эп.макс}}$.

$$N_{\text{зт.макс}} = \frac{1}{\sigma_{\text{т}}} = \frac{1}{1.2} = 0.833$$

Максимальное значение обратной связи на входе контура тока принимаем

$$N_{\text{от.макс}} = 1$$

Расчетные параметры настройки и ожидаемые показатели качества работы контура тока

Передаточная функция ПИ-регулятора тока

$$W(p)_{\text{рт}} = k_{\text{рт}} \cdot \frac{T_{\text{рт}} \cdot p + 1}{T_{\text{рт}} \cdot p}.$$

Параметры настройки регулятора:

– постоянная времени регулятора тока

$$T_{\text{пр}} = T_{1\Omega} = 6.114 \cdot 10^{-3}, \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{\text{пр}} = \frac{T_{1\Omega} \cdot R_{1\Omega}}{k_{\text{и}} \cdot k_{\text{т}} \cdot a_{\text{т}} \cdot T_{\text{мтэ}}} = \frac{6.114 \cdot 10^{-3} \cdot 12.412}{327.502 \cdot 0.121 \cdot 2 \cdot 1.5 \cdot 10^{-4}} = 6.405,$$

где

$$k_{\text{т}} = \frac{N_{\text{эт.макс}}}{\sqrt{2} \cdot I_{\text{эп.макс}}} = \frac{0.833}{\sqrt{2} \cdot 4.886} = 0.121$$

– коэффициент обратной связи по току, 1/А;

$$\dot{\sigma}_{\text{моду}} = \frac{\dot{\sigma}_{\text{и.п.д}}}{n_{\text{д}}} + \dot{\sigma}_{\text{сб.д}} + \dot{\sigma}_{\text{д.ид}} = \frac{10^{-4}}{2} + 10^{-4} + 0 = 1.5 \cdot 10^{-4} \tilde{\text{н}}$$

– эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура тока, с;

$n_{\text{т}} = 2$ – коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном;

$a_{\text{т}} = 2$ – коэффициент типовой настройки контура тока на модульный оптимум (МО).

Максимальное быстродействие контура тока достигается при выборе $T_{\text{ос.т}} = T_{\text{пк.т}} = T_{\text{шим}}$.

Настройка контура тока близкая к типовой настройке на МО достигается при выборе коэффициента $n_{\text{т}} = 2$. Динамические показатели качества работы контура тока определяются, главным образом, значением эквивалентной малой постоянной времени $T_{\text{мтэ}}$, но так, же слабо зависят и от соотношения малых постоянных времени в прямом канале и в цепи обратной связи контура.

Коэффициент согласования сигналов обратной связи и задания на входе контура тока

$$k_{\text{ос.т}} = \frac{k_{\text{т}}}{k_{\text{дт}}} = \frac{0.121}{246.97} = 4.883 \cdot 10^{-4}.$$

3.13 Контур скорости с ПИ-регулятором и аналоговым датчиком скорости

Структурная схема контура скорости с аналоговым датчиком приведена на Рисунок 3. 9. Аналоговый сигнал с аналогового датчика скорости (например, тахогенератора постоянного тока) преобразуется с помощью АЦП в цифровой сигнал.

Внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{т.зам}} \approx \frac{1}{T_{\text{т}} \cdot p + 1},$$

где

эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока, с.

$$T_{\text{т}} = a_{\text{т}} \cdot T_{\mu\text{тэ}} = 2 \cdot 1.5 \cdot 10^{-4}$$

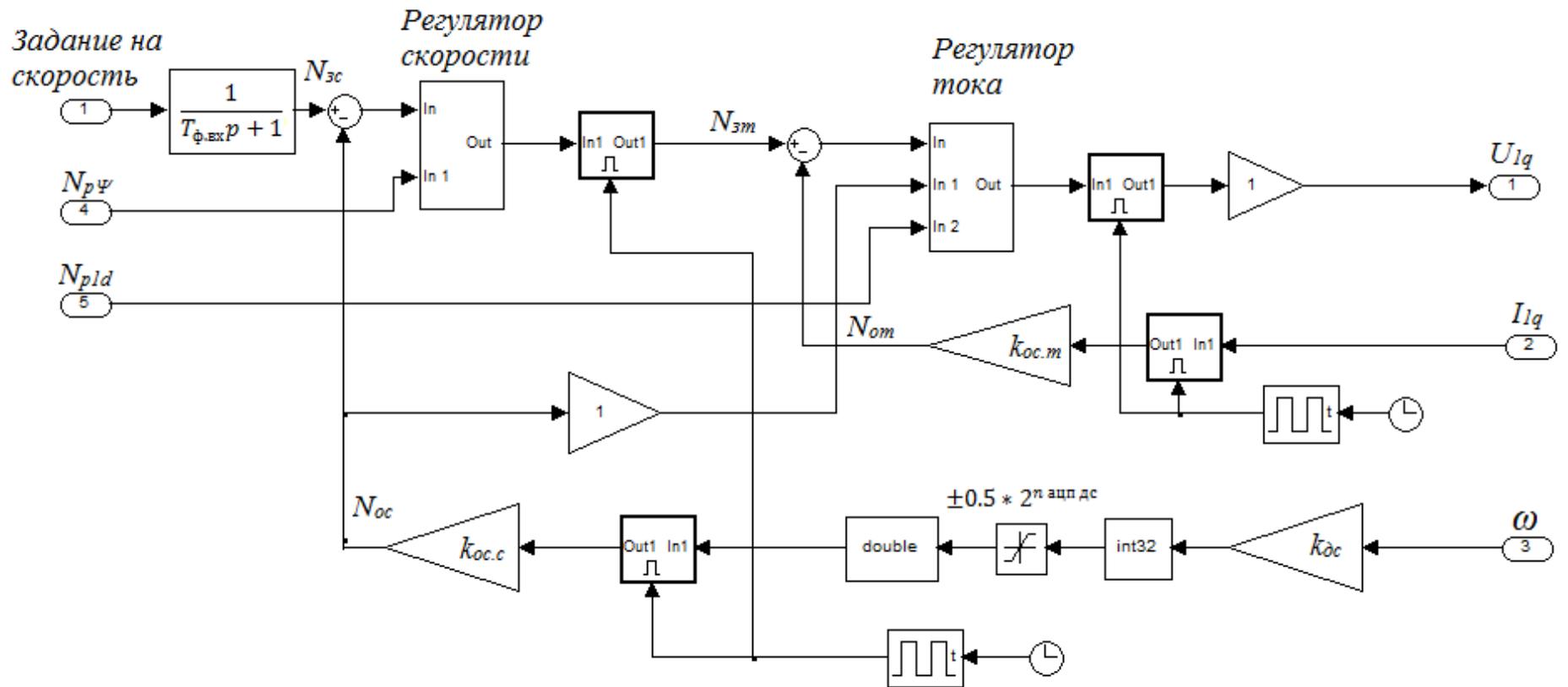


Рисунок 3. 9 - Имитационная модель контура скорости с аналоговым датчиком и внутренним контуром тока I_{1q}

3.14 Параметры элементов контура скорости с аналоговым датчиком

Разрядность АЦП датчика скорости;

$$n_{\text{ацп.дс}} = 14$$

Коэффициент передачи датчика скорости, с/рад, где σ_c – коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование скорости;

Принимаем $\sigma_c = 1.5$

$$k_{\text{дс}} = \frac{0.5 \cdot 2^{n_{\text{ацп.дс}}}}{\sigma_c \cdot \omega_{\text{эп.макс}}} = \frac{0.5 \cdot 2^{14}}{1.5 \cdot 147.655} = 36.987$$

Интервал квантования по времени сигналов в цепи обратной связи контура скорости, с, где $n_{\text{ос.с}} \geq 1$ целое число;

$$T_{\text{ос.с}} = n_{\text{ос.с}} \cdot T_{\text{шим}} = 10 \cdot 10^{-4} = 10^{-3}$$

Интервал квантования управления в прямом канале контура скорости, с;

$$T_{\text{пк.с}} \leq T_{\text{ос.с}}$$

Постоянная времени аналогового фильтра в цепи измерения скорости, с;

$$T_{\text{ф.ос}} = 0$$

Максимальное значение задания на входе контура скорости, соответствующее значению максимальной скорости привода $n_{\text{эп.макс}}$.

$$N_{\text{зс.макс}} = \frac{1}{\sigma_c} = \frac{1}{1.5} = 0.667$$

Максимальное значение обратной связи на входе контура скорости

$$N_{\text{ос.макс}} = 1$$

Расчетные параметры настройки контура скорости с аналоговым датчиком

Передаточная функция ПИ-регулятора скорости

$$W(p)_{\text{pc}} = k_{\text{pc}} \cdot \frac{T_{\text{pc}} p + 1}{T_{\text{pc}} \cdot p}$$

Параметры настройки регулятора скорости:

– постоянная времени регулятора

$$T_{pc} = b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu c \varepsilon} = 2 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 10^{-4} = 3.2 \cdot 10^{-3}, \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора

$$k_{pc} = \frac{J_{\varepsilon} \cdot k_T}{c_M \cdot k_c \cdot a_c \cdot T_{\mu c \varepsilon}} = \frac{0.019 \cdot 0.121}{2.863 \cdot 4.515 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 8 \cdot 10^{-4}} = 109.901,$$

где c_1 - коэффициент электромагнитного момента двухфазного двигателя во вращающейся системе координат при номинальном потоке, $\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}$.

$$c_1 = \Psi_{2f} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'} \cdot z_{\delta} = 1.013 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0.724}{0.769} \cdot 2 = 2.863,$$

коэффициент обратной связи по скорости, с/рад;

$$k_c = \frac{N_{\text{зс.макс}}}{\omega_{\text{эп.макс}}} = \frac{0.667}{147.655} = 4.515 \cdot 10^{-3}$$

эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура скорости, с;

$$T_{\mu c \varepsilon} = T_r + \frac{T_{\text{ос.с}}}{n_c} + T_{\text{ф.ос}} = 3 \cdot 10^{-4} + \frac{10^{-3}}{2} + 0 = 8 \cdot 10^{-4}$$

коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном;

$$n_c = 2$$

коэффициенты типовой настройки контура скорости на симметричный оптимум (СО) с ПИ-регулятором.

$$b_c = a_c = 2$$

От выбора значения коэффициента n_c следующим образом зависит настройка контура скорости: при выборе $n_c = 2$ – настройка контура с ПИ-регулятором – к типовой настройке на СО (Симметричный оптимум). Динамические показатели качества работы контура скорости определяются, главным образом, значением эквивалентной малой постоянной времени $T_{\mu c \varepsilon}$,

но так, же зависят и от соотношения малых постоянных времени в прямом канале и в цепи обратной связи контура.

$$k_{\text{ос.с}} = \frac{k_c}{k_{\text{дс}}} = \frac{4.515 \cdot 10^{-3}}{36.987} = 1.221 \cdot 10^{-4}.$$

3.15 Контур потокосцепления ротора с ПИ-регулятором и аналоговым датчиком потока

Имитационная модель контура потокосцепления с аналоговым датчиком приведена на рисунке 3.10. Аналоговый сигнал с аналогового датчика потока преобразуется с помощью АЦП в цифровой сигнал. В состав аналогового датчика потока может быть включен аналоговый фильтр.

Внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{т.зам}} \approx \frac{1}{T_T \cdot p + 1},$$

где

Эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока, с.

$$\dot{O}_o = 2 \cdot 1.5 \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^{-4} \tilde{n}.$$

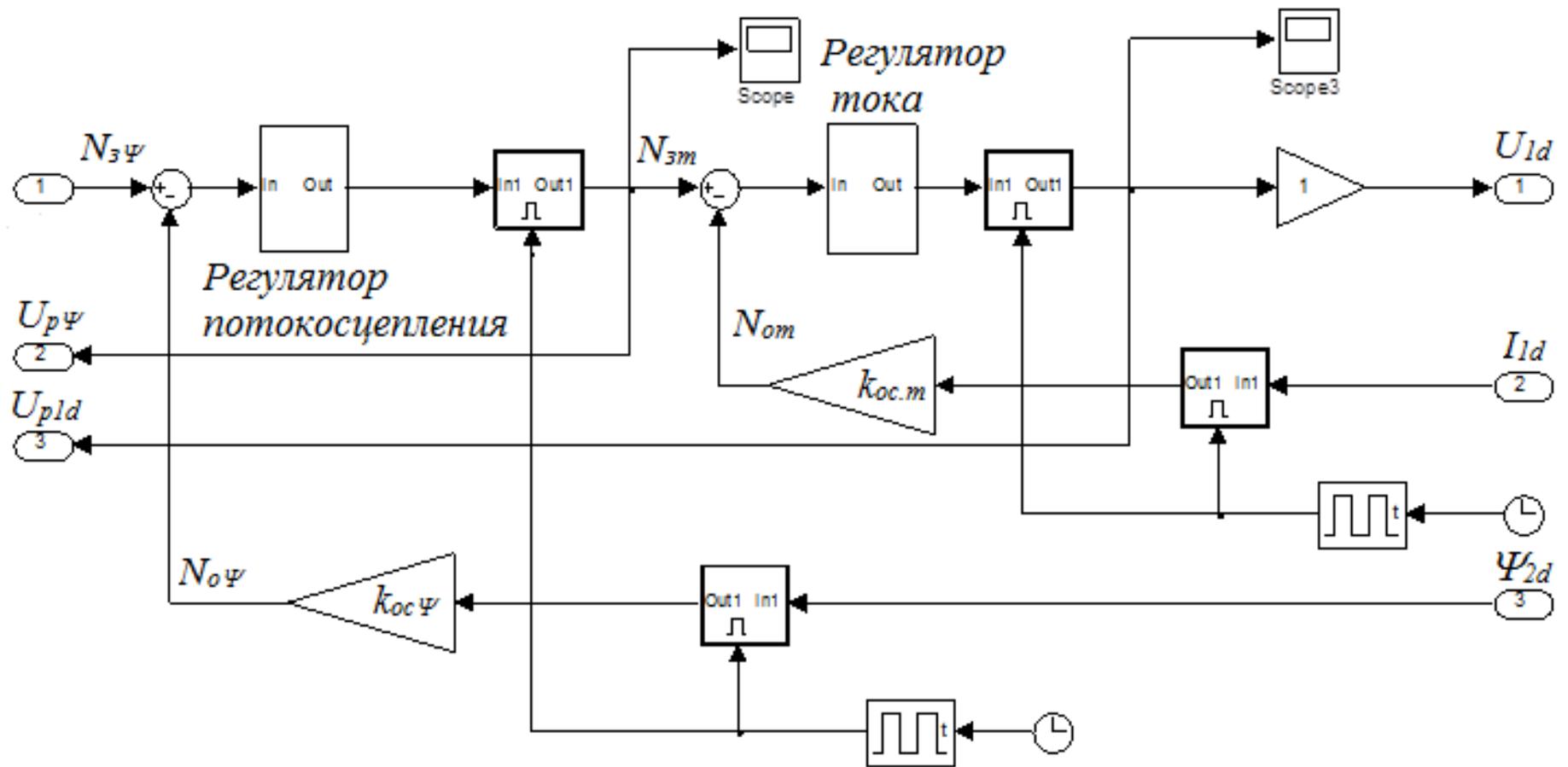


Рисунок 3.10 - Имитационная модель контура потокосцепления с внутренним контуром тока I_{1d}

Параметры элементов контура потокосцепления с аналоговым датчиком

разрядность АЦП датчика потока

$$n_{\text{ацп.д}\Psi} = 12.$$

Коэффициент передачи датчика потока $k_{\text{а}\Psi}$, 1/Вб,

где $\sigma_{\text{н}} = 1.2$ – коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование потока;

$$k_{\text{д}\Psi} = \frac{0.5 \cdot 2^{n_{\text{ацп.д}\Psi}}}{\sigma_{\Psi} \cdot \Psi_{2\text{н}}} = \frac{0.5 \cdot 2^{12}}{1.2 \cdot 0,862} = 1.98 \cdot 10^3.$$

интервал квантования по времени сигналов в цепи обратной связи контура потокосцепления, с, где $n_{\text{ос.}\Psi} = 10$ целое число

$$T_{\text{ос.}\Psi} = n_{\text{ос.}\Psi} \cdot T_{\text{шим}} = 10 \cdot 10^{-4} = 10^{-3} \text{ с.}$$

интервал квантования управления в прямом канале контура потокосцепления, с;

$$T_{\text{пк.}\Psi} = T_{\text{ос.}\Psi} = 10^{-3} \text{ с.}$$

максимальное значение задания на входе контура потокосцепления, соответствующее значению номинального потокосцепления ротора двигателя $\Psi_{2\text{н}}$.

$$N_{\text{з}\Psi, \text{макс}} = \frac{1}{\sigma_{\Psi}} = \frac{1}{1.2} = 0.833.$$

Максимальное значение обратной связи на входе контура потокосцепления

$$N_{\text{о}\Psi, \text{макс}} = 1$$

Расчетные параметры настройки контура потокосцепления с аналоговым датчиком

Передаточная функция ПИ-регулятора потокосцепления

$$W(p)_{\text{р}\Psi} = k_{\text{р}\Psi} \cdot \frac{T_{\text{р}\Psi} \cdot p + 1}{T_{\text{р}\Psi} \cdot p}.$$

Параметры настройки регулятора потокосцепления ротора:

– постоянная времени регулятора

$$T_{p\Psi} = T_2 = 0.119, \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора

$$k_{p\Psi} = \frac{T_2 \cdot k_T}{L_m \cdot k_\Psi \cdot a_\Psi \cdot T_{\mu\Psi_3}} = \frac{0.119 \cdot 0.121}{0.724 \cdot 0.966 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 10^{-4}} = 12,9,$$

где

Коэффициент обратной связи по потоку, 1/Вб;

$$k_\Psi = \frac{N_{3\Psi.\text{макс}}}{\Psi_{2н}} = \frac{0.833}{0,862} = 0.966.$$

Эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура скорости, с;

$$T_{\mu\Psi_3} = T_T + \frac{T_{oc.\Psi}}{n_\Psi} + T_{ф.о\Psi} = 3 \cdot 10^{-4} + \frac{10^{-3}}{2} + 0 = 8 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания аperiodическим звеном;

$$n_\Psi = 2$$

коэффициент типовой настройки контура потокосцепления на модульный оптимум (МО).

$$a_\Psi = 2$$

От выбора значения коэффициента n_Ψ следующим образом зависит настройка контура потокосцепления: при выборе $n_\Psi = 1$ настройка контура близка к типовой настройке на СО ($\sigma = 0\%$); при $n_\Psi = 2$ – к типовой настройке на МО ($\sigma \approx 5\%$), а при $n_\Psi > 2$ быстродействие и перерегулирование в контуре незначительно увеличиваются.

Коэффициент согласования выходного сигнала датчика потока и задания на входе контура потокосцепления

$$k_{oc.\Psi} = \frac{k_\Psi}{k_{д\Psi}} = \frac{0.966}{1.980 \cdot 10^3} = 4.88 \cdot 10^{-4}$$

3.16 Результаты моделирования:

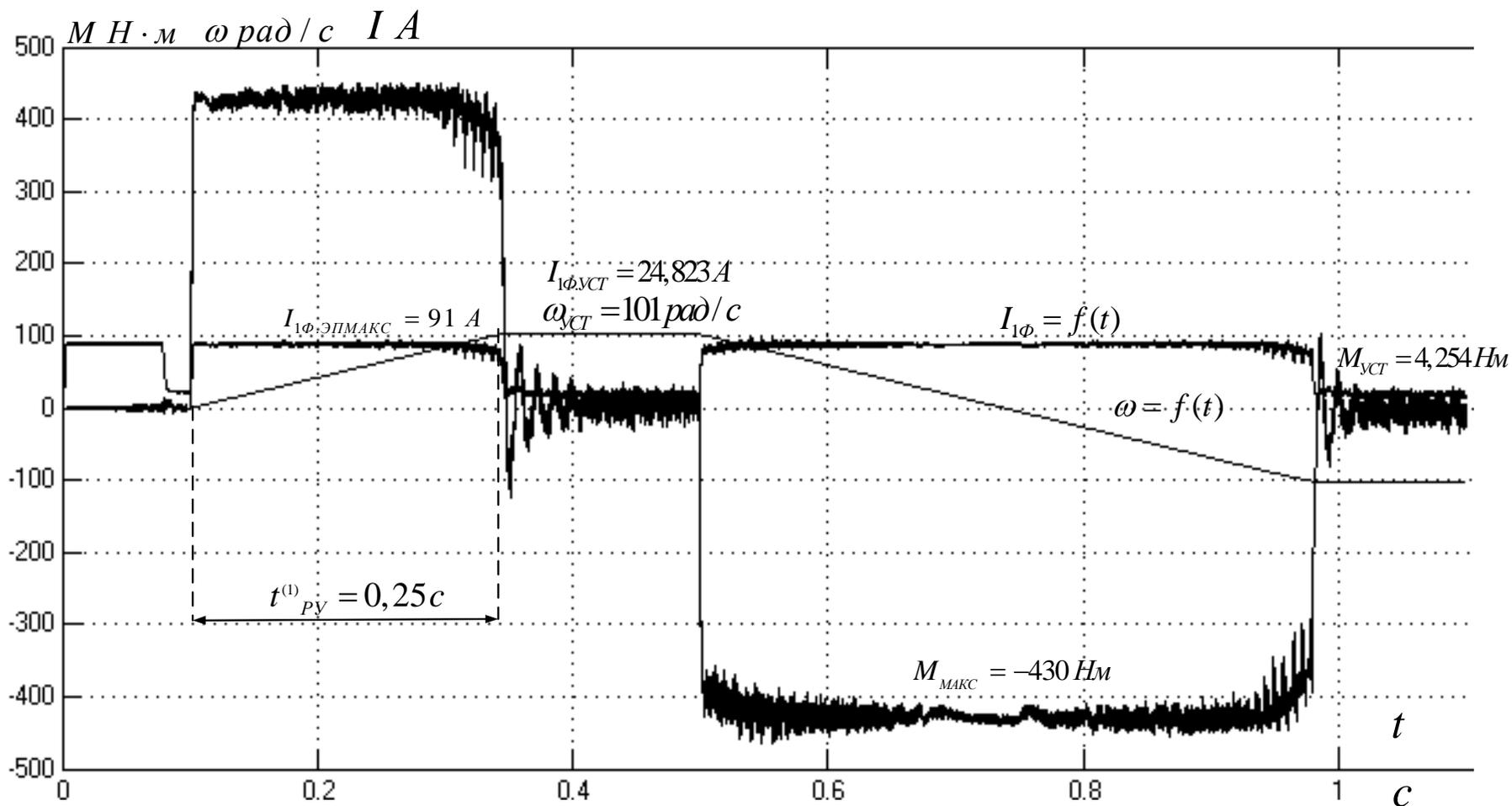


Рисунок 3.11 – Диаграммы электромагнитного момента $M_{эм}(t)$, скорости вращения двигателя $\omega(t)$ и фазного тока $I(t)$ при отработке электроприводом цикла «пуск-реверс» с реактивным моментом нагрузки $M_{с\text{мин}} = 4,254 \text{ Н} \cdot \text{м}$ на максимальной скорости

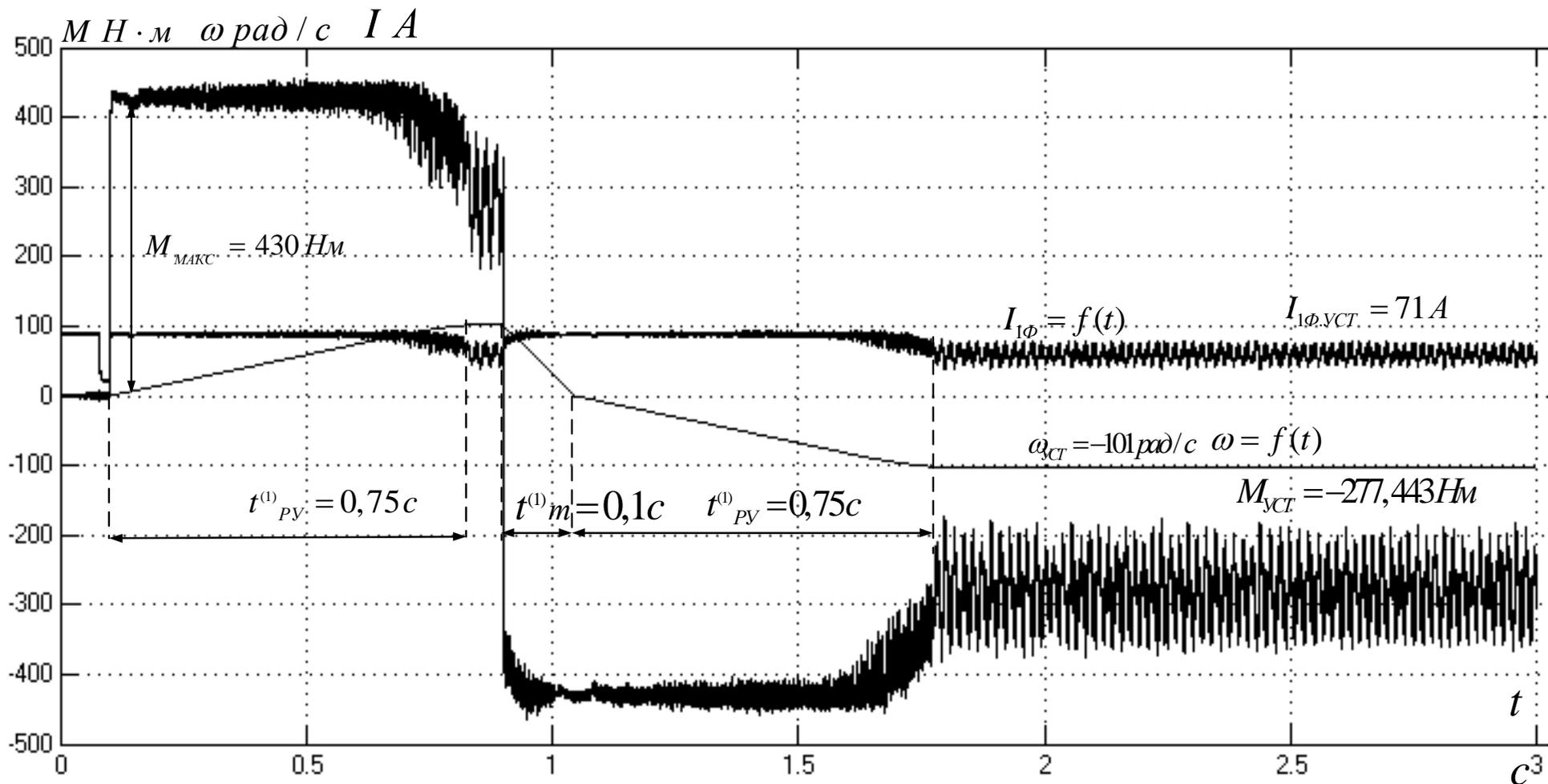


Рисунок 3.12 – Диаграммы электромагнитного момента $M_{эм}(t)$, скорости вращения двигателя $\omega(t)$ и фазного тока $I(t)$ при отработке электроприводом цикла «пуск-реверс» с реактивным моментом нагрузки $M_{с\text{ макс}} = 277 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и задании

$$\omega_{зад} = \omega_{эп.макс}$$

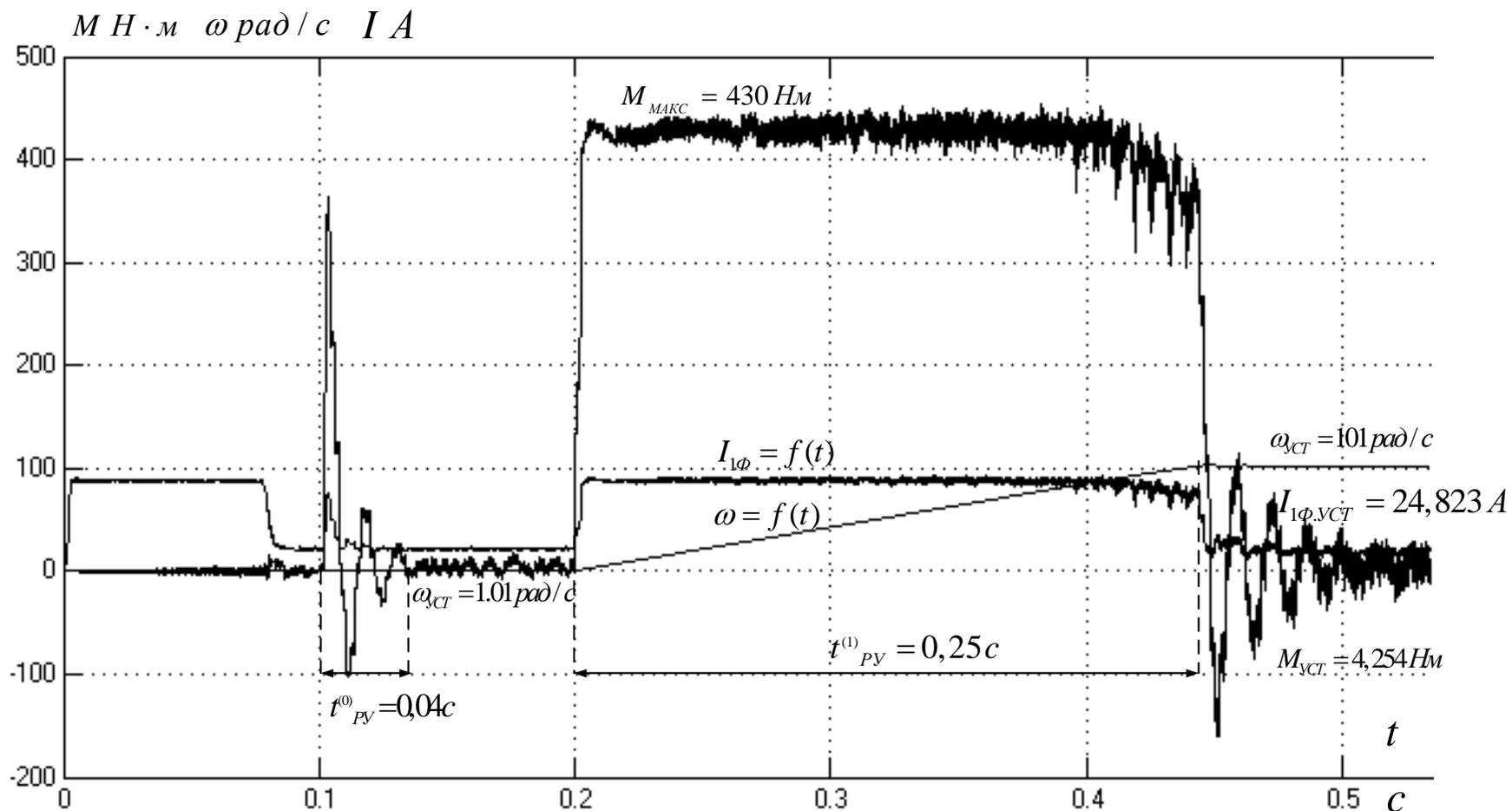


Рисунок 3.13 – Диаграммы электромагнитного момента $M_{\text{эм}}(t)$, скорости вращения $\omega(t)$ и фазного тока $i_1(t)$ двигателя при отработке электроприводом цикла «пуск-реверс» с реактивным моментом нагрузки $M_{\text{с макс}} = 4,254 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и задании $\omega_{\text{зад}}(0,1) = \omega_{\text{эп.мин}}$, $\omega_{\text{зад}}(0,2) = \omega_{\text{эп.макс}}$

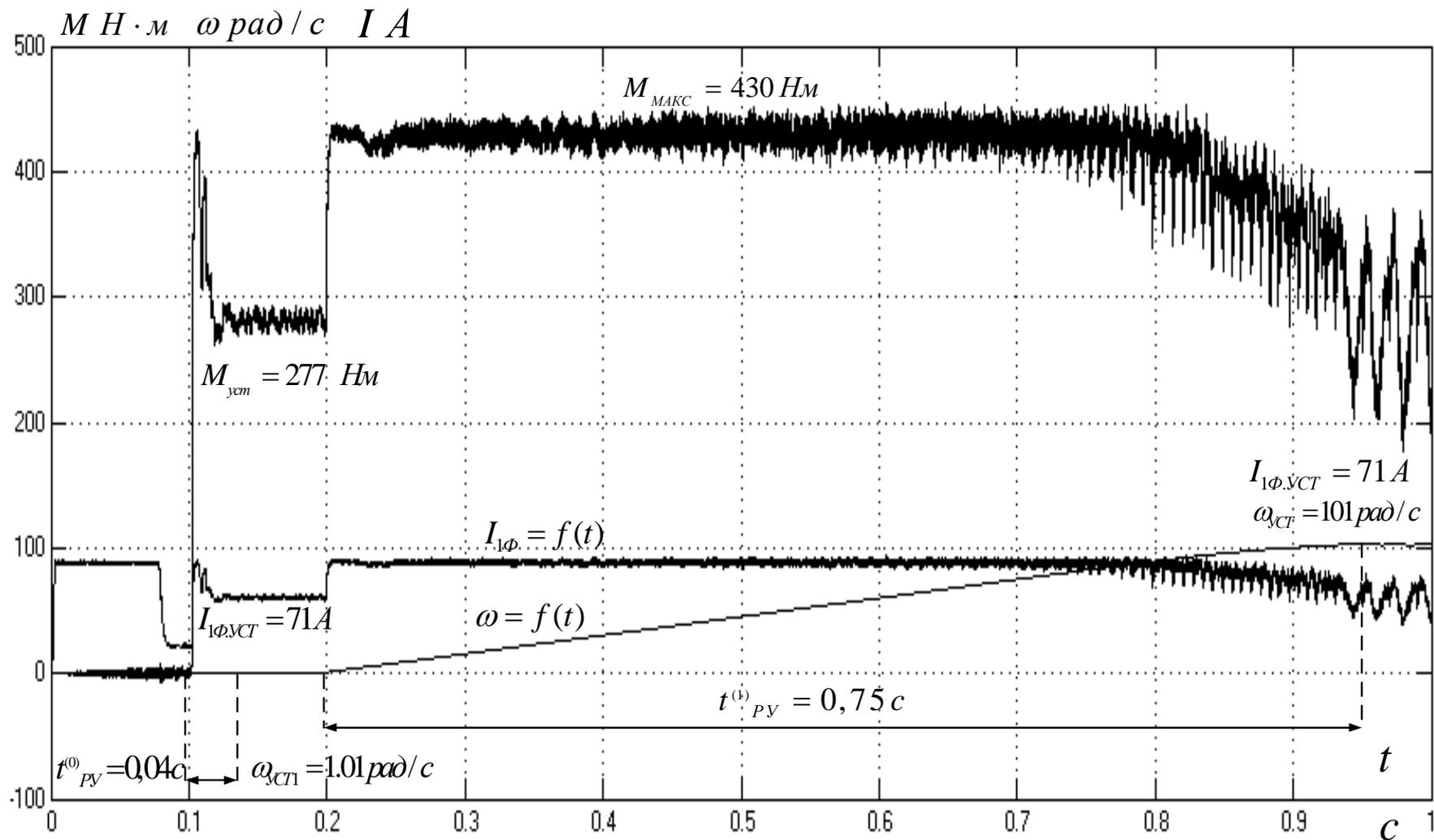


Рисунок 3.14 – Диаграммы электромагнитного момента $M_{эм}(t)$, скорости вращения $\omega(t)$ и фазного тока $i_1(t)$ двигателя при отработке электроприводом цикла «пуск-реверс» с реактивным моментом нагрузки $M_{с\text{макс}} = 277 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и задании

$$\omega_{\text{зад}}(0,1) = \omega_{\text{эп.мин}}, \quad \omega_{\text{зад}}(0,2) = \omega_{\text{эп.макс}}$$

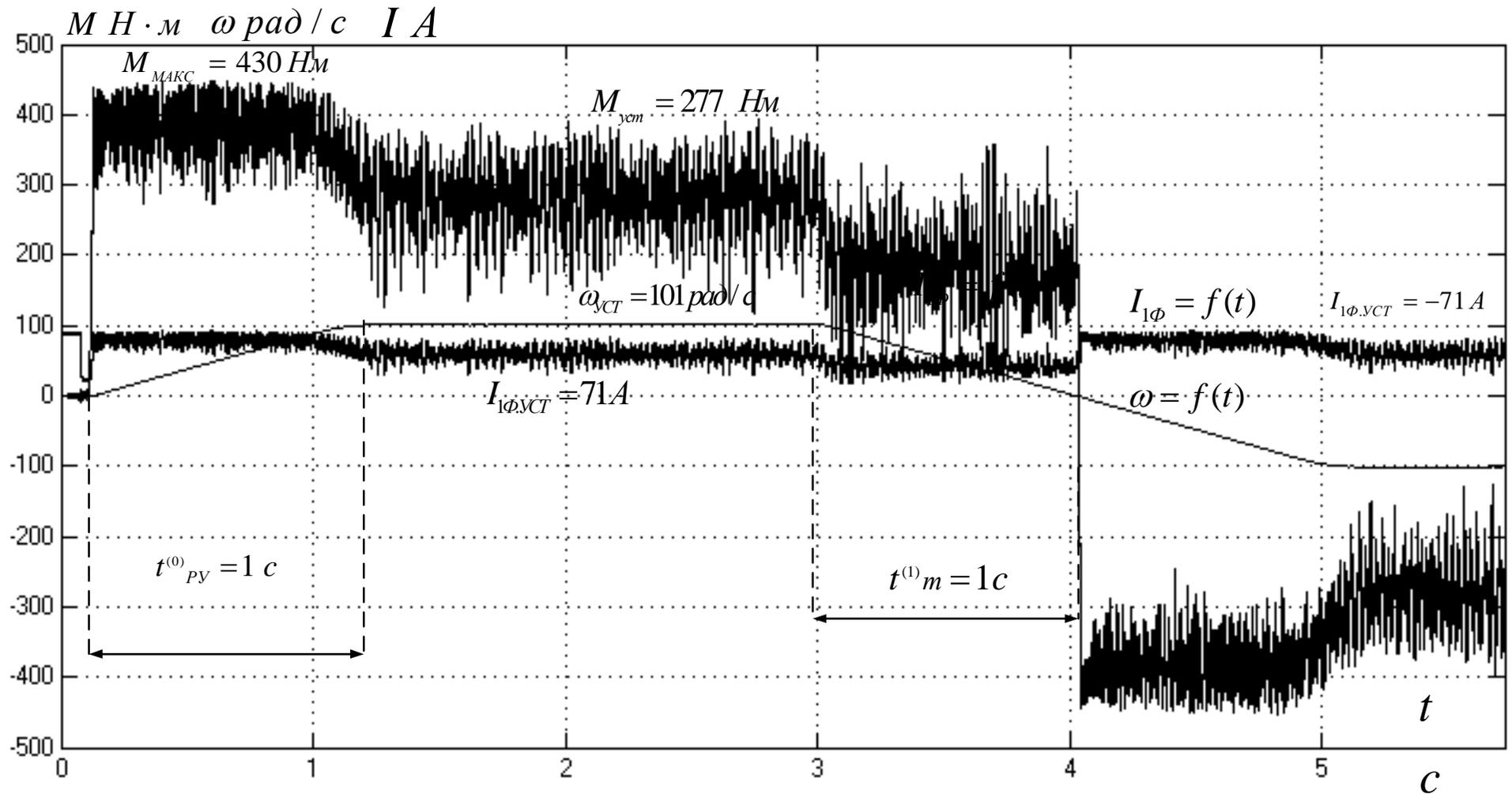


Рисунок 3.15 – Диаграммы электромагнитного момента $M_{\text{эм}}(t)$, скорости вращения $\omega(t)$ и фазного тока $i_1(t)$ двигателя при отработке цикла «пуск под нагрузкой – реверс» с линейным s-образным задатчиком интенсивности

$$(\omega_{\text{зад}} = \omega_{\text{эп.макс}}, \Delta M_{\text{с}} = 277 \text{ Н}\cdot\text{м})$$

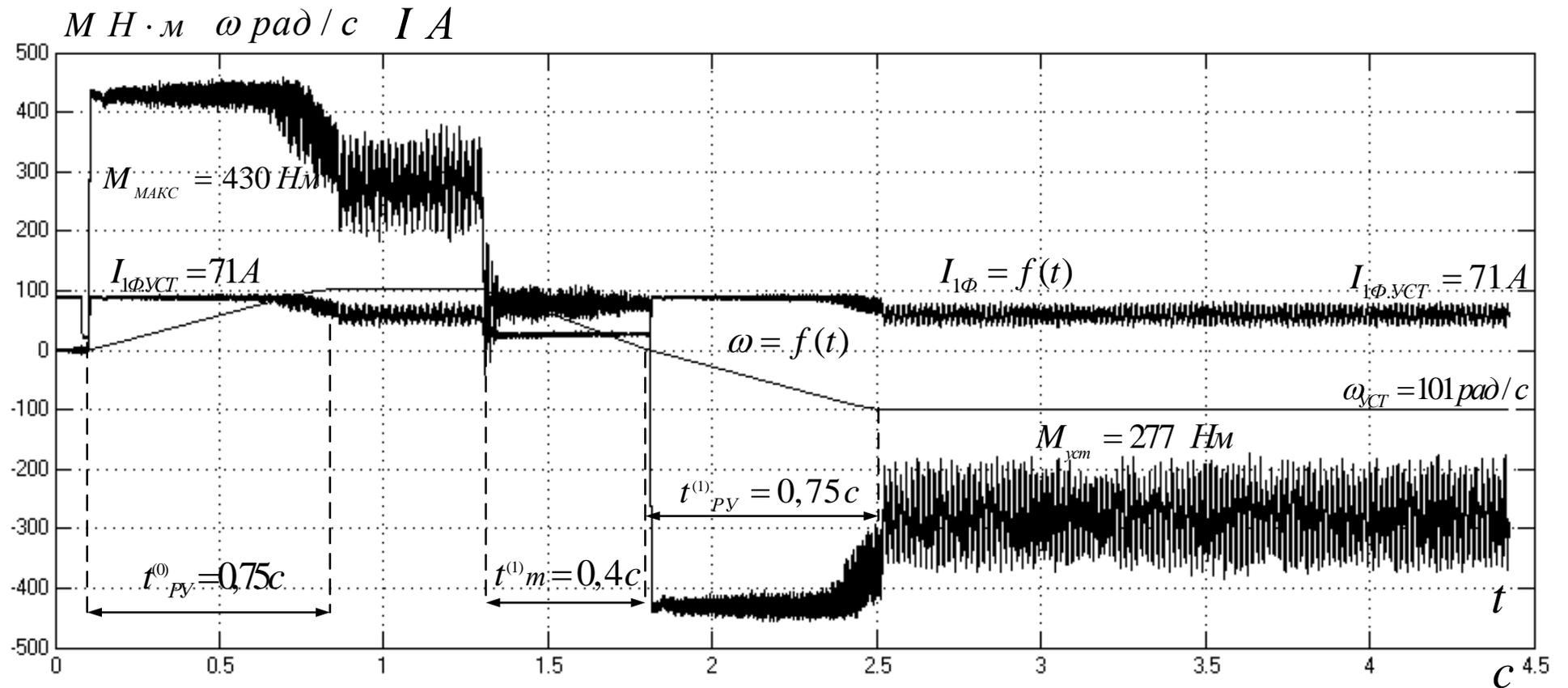


Рисунок 3.16 – Диаграммы электромагнитного момента $M_{\text{эм}}(t)$, скорости вращения $\omega(t)$ и фазного тока $i_1(t)$ двигателя при отработке цикла «пуск под нагрузкой – реверс» с линейным задатчиком интенсивности

$$(\omega_{\text{зад}} = \omega_{\text{эл.макс}}, \Delta M_{\text{с}} = 277 \text{ Н}\cdot\text{м})$$

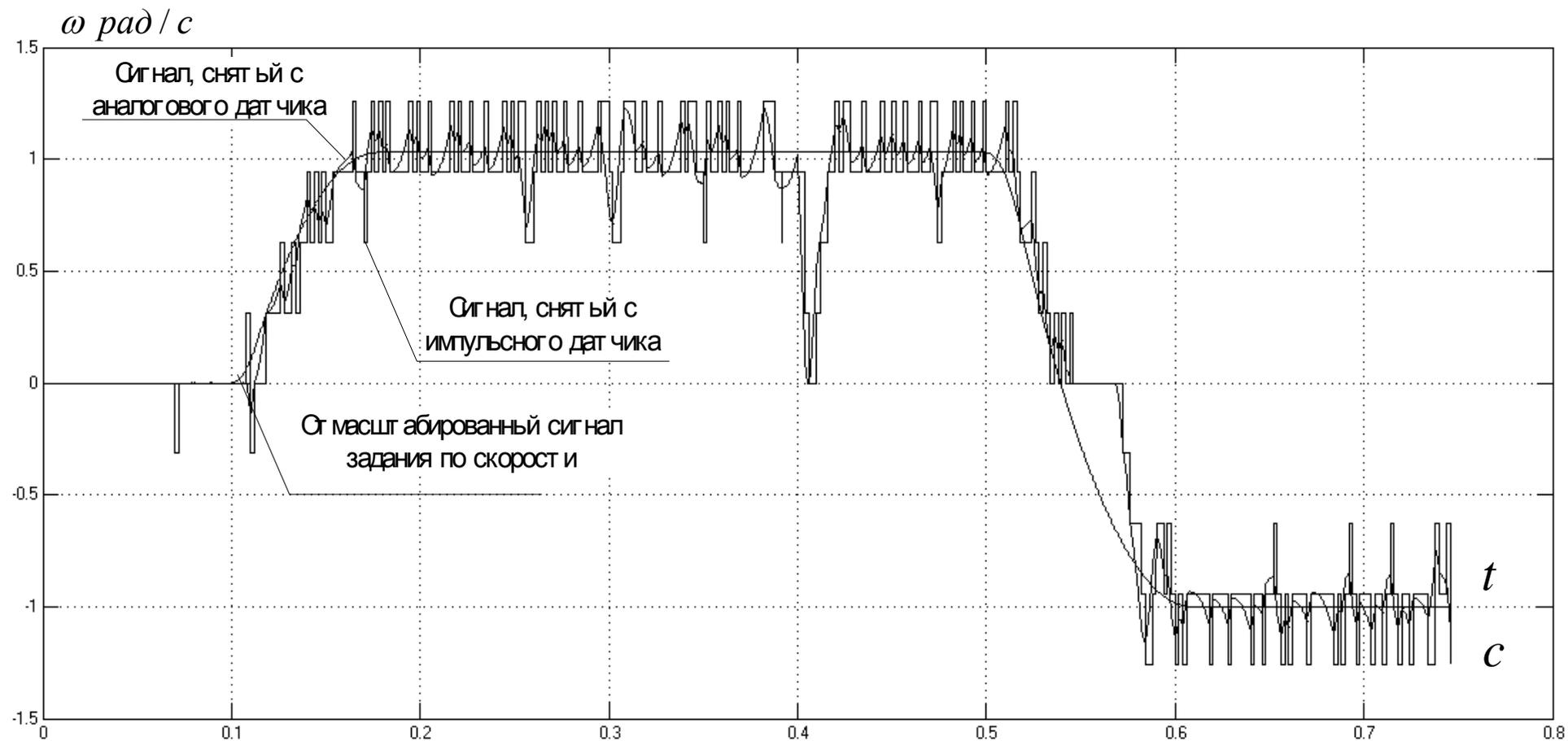


Рисунок 3.17 – Диаграммы сигнала задания и сигналов обратных связей по скорости $\omega(t)$

4. Разработка имитационной модели ТАД подвижного состава рудничного электровоза для решения проблем буксования и юза

4.1 Разработка имитационной модели электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза

Компьютерная имитационная модель электромеханической системы электровоза с питанием инверторов от сети постоянного тока разработана в соответствии с математической моделью (30).

Модель имеет иерархическую структуру: на верхнем уровне (электрическом) расположены блоки, отвечающие за работу электроприводов КП; источник трехфазного тока; задатчики скорости электроприводов КП.

На нижнем уровне (механическом) находятся блоки, моделирующие динамику состава с учетом эффекта буксования и «люфта» в сцепках между вагонами.

На Рисунке 4.1 представлено изображение модели электрической части электровоза

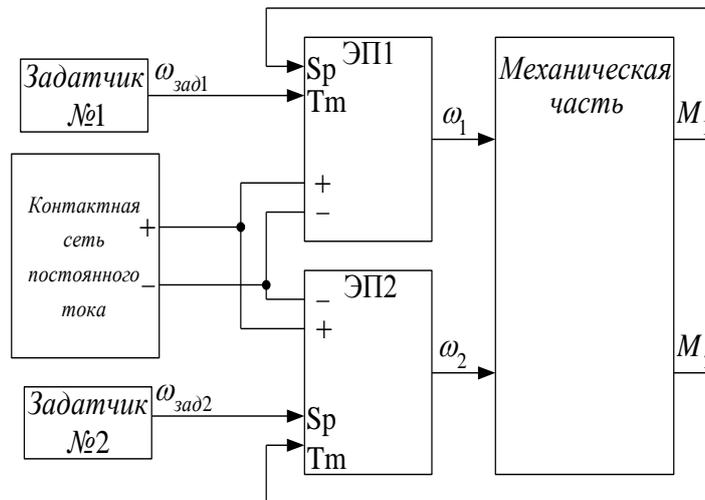


Рисунок 4.1 Модель электрической части-электровоза

На рисунке приняты следующие обозначения:

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – угловые скорости первой и второй колесных пар;

S_p – вход блока для задания скорости;

T_m – вход блока для задания величины моменты нагрузки.

Вид смоделированной в Simulink механической части представлен на Рисунок 4.2.

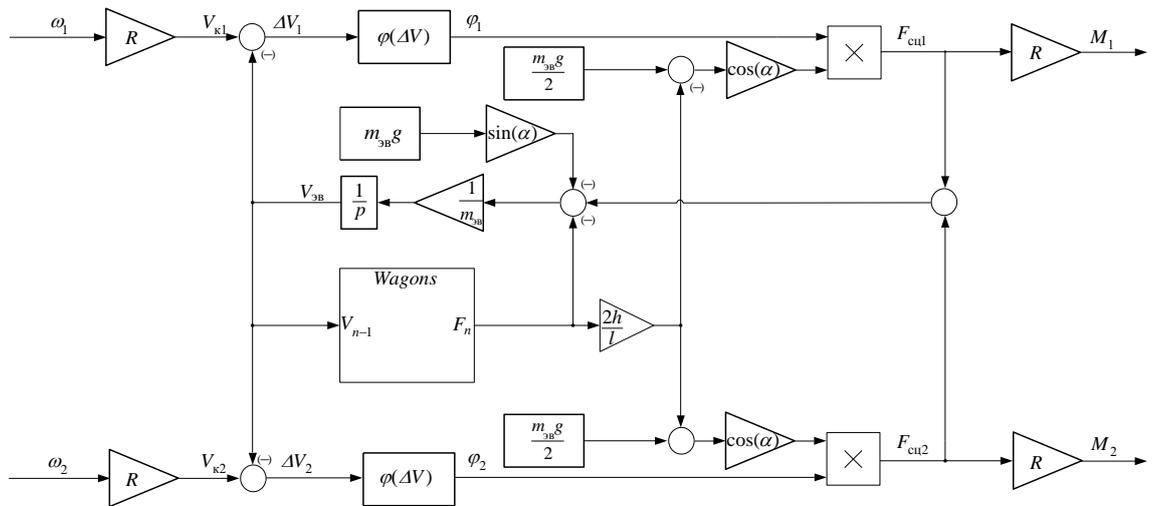


Рисунок 4.2. Механическая часть электромеханической системы подвижного рудничного состава

Далее, подробно рассмотрим блок, моделирующий динамику вагона и его связь с локомотивом. Внутренний вид блока представлен на рисунке Рисунок 4.3

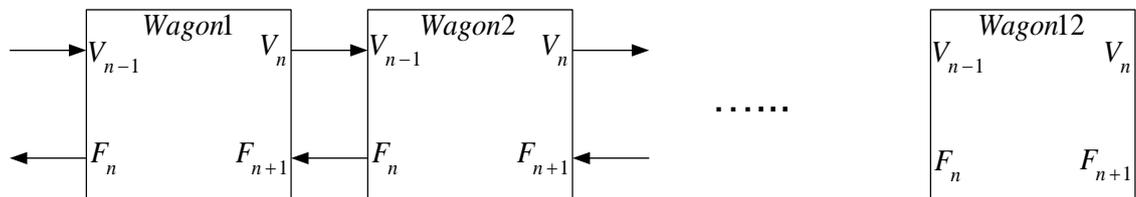


Рисунок 4.3 Блок сцепки вагонов откатки

Входными величинами для этого блока являются:

V_{n-1} - линейная скорость предыдущего объекта (локомотива/вагона);

V_n - линейная скорость n -го вагона;

F_n - сила, действующая со стороны n -го вагона на предыдущий объект;

F_{n+1} - сила, действующая со стороны следующего вагона.

Выходной величиной является V_n - линейная скорость текущего вагона.

Моделирование эффекта «люфт» в сцепке вагонов реализовано с помощью звена «Dead Zone», после которого происходит вычисление силы, под воздействием которой движется вагон. Влияние силы трения, а также силы со стороны других вагонов реализовано с помощью элементов сравнения. На основании всех учтенных сил происходит вычисление фактической скорости движения вагона, которая в дальнейшем передается на вход блока следующего вагона.

Смоделированные аналитические соотношения составляют систему уравнений [(4.1)]:

$$\begin{cases} V_n = \frac{1}{m} \int (F_n - F_d - F_{n+1}) dt; \\ F_d = |F_d| \text{sign}(V_n); \\ F_n = kD(\int \varepsilon dt) + bF_v D(\int \varepsilon dt), \end{cases} \quad (4.1)$$

где:

$\varepsilon = (V_{n-1} - V_n)$ - разность скоростей вагонов;

F_d - величина силы сухого трения;

bF_v - коэффициент вязкого трения;

k - коэффициент жесткости пружины;

m - масса вагона с грузом;

$D(x)$ - оператор люфта.

Внутренний вид структуры звена Wagon1 представлен на Рисунок 4.4

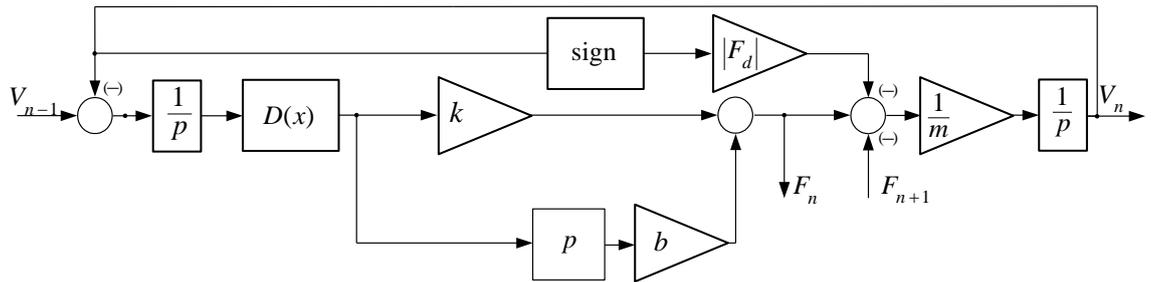


Рисунок 4.4 – внутренняя структура вагона

В результате проведенной работы была разработана компьютерная модель электромеханической системы электровоза с подвижным составом, структура которой позволяет учитывать все основные нелинейные эффекты типа «люфт» в сцепных устройствах и буксование колёсных пар, а также сухое и вязкое трение в них.

4.2 Исследование процессов буксования колесной пары рудничного электровоза в переходных режимах

4.2.1 Постановка задачи

Используем математическую модель тягового электропривода, представленную в работах [30,31]. На основе второго закона Ньютона для вращательного движения [32], определим момент сопротивления одной из колесных пар (КП)

$$M_1(t) = M_3(t) - J\varepsilon(t), \quad (4.2)$$

где $M_3(t)$ - задающий момент, J - момент инерции КП, $\varepsilon(t)$ - угловое ускорение колеса.

Эта величина и будет нами использоваться в дальнейшем для определения эффекта буксования. В основе предложенного метода используются два вида фильтров: полосовой фильтр и фильтр низких частот, каждый из которых выполняет функцию «наблюдателя» избыточной

скорости скольжения [33], отсевающего всю ненужную информацию и выдающего только необходимую. Математически метод можно описать следующим образом: пусть при $M_3 \neq 0$ добавим к нему испытательный сигнал вида

$$f(t) = A \sin(\omega t), \quad (4.3)$$

где амплитуду A можно принять равной единице, после этого функция избыточной скорости скольжения для первой колесной пары будет иметь вид

$$U_1(t) = \left(\int_0^t M_3(t) + A \sin(\omega t) - M_1(t) dt \right) \frac{R}{J} - V_{эв}(t), \quad (4.4)$$

где R - радиус колеса, $V_{эв}(t)$ - линейная скорость электровоза.

Момент же первой КП, записанный в зависимости от скольжения [32, 34], имеет вид

$$M_1(t) = M_3(t) - J\varepsilon(t) = \left(\Phi_0 \left(1 - \exp\left(\frac{-2U_1(t)}{U_0}\right) \right) \right) \frac{mR}{k_{п}}, \quad 4.5$$

где Φ_0 - коэффициент сцепления, m - масса электровоза, $k_{п}$ - передаточный коэффициент механической передачи (редуктора).

Данная величина является входным сигналом для полосового фильтра, имеющего передаточную функцию

$$W_{\text{пф}}(p) = \frac{kp}{p^2 + ap + b}, \quad (4.6)$$

где p - комплексная переменная. То реакция фильтра приближенно будет описываться функцией вида

$$\begin{aligned} h(t) &= \int_0^t M_1(t - \tau) w(\tau) d\tau = \int_0^t \left(\frac{2\Phi_0 m R}{kU_0} \frac{dU_1(t - \tau)}{dt} \exp\left(\frac{-2U_1(t - \tau)}{U_0}\right) \right) = \\ &= \left(\frac{k \exp(-p_1 \tau)}{2p_1 + a} + \frac{k \exp(-p_2 \tau)}{2p_2 + a} \right) d\tau, \end{aligned} \quad (4.7)$$

где p_1, p_2 - корни характеристического полинома ПФ, a, b - параметры фильтра.

Данное выражение показывает явную зависимость между выходом фильтра и величиной скольжения, при повышении скольжения значение выходного сигнала стремится к нулю, в противном случае выходной сигнал увеличивается. Т.к. полосовой фильтр пропускает сигналы определенной частоты, а нам необходимо выделение собственно частоты испытательного сигнала $f(t)$, то для выявления лучшей качественной картины мы использовали ФНЧ (фильтр низких частот). Его передаточная функция имеет вид:

$$W_{\text{фнч}}(p) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_c} p + 1}, \quad 4.8$$

где ω_c - частота среза фильтра.

4.2.2 Исследования зависимостей линейных скоростей обода колесной пары относительно ее оси вращения к оси колесной пары относительно рельсового полотна

Основным доказательством работы метода, если аналитические зависимости в явном виде получить невозможно или достаточно тяжело, является результаты анализа модели процесса, представленные в графической форме.

Ниже на рисунке представлен график косвенно измеренного момента сопротивления первой колесной пары $M_1(t)$:

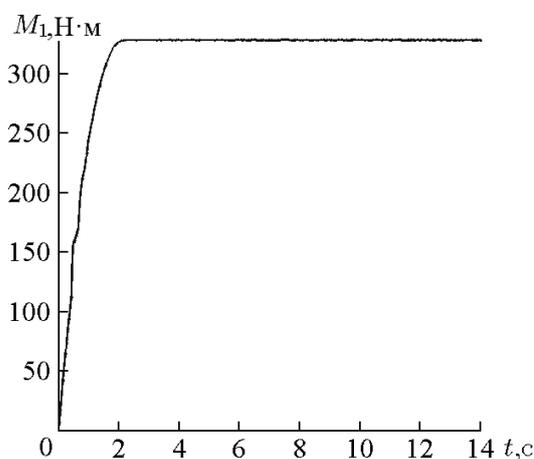


Рисунок 4.5 Зависимость момента сопротивления $M_1(t)$ от времени

Колебания относительно среднего значения момента обусловлены процедурой дифференцирования.

Изображения зависимостей линейных скоростей колесной пары $V_1(t)$ и электровоза $V_{et}(t)$ в функции времени представлены ниже:

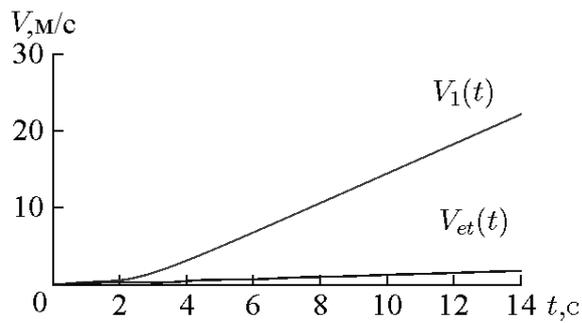


Рисунок 4. 6 - Графики линейных скоростей $V_1(t)$ и $V_{et}(t)$ при наличии буксования колесной пары

Как видно из графиков, существует расхождение в значениях линейных скорости обода колесной пары относительно ее оси вращения и скорости оси колесной пары относительно неподвижной системы координат (рельсового пути), обусловленное эффектом буксования. Эффект буксования связан с величиной скорости скольжения $U_1(t)$, которая получается на основе выражения:

$$U_1(t) = V_1(t) - V_{et}(t). \quad 4.9$$

Величина скольжения растет, а одновременно с нею растет количество энергии, которое тратится впустую. Эту проблему можно решить, используя некоторый тип наблюдателей, позволяющий определить качественное поведение величины скольжения и уже на основе этой информации необходимо провести синтез закона управления на регулируемый электропривод для устранения буксования.

Для этого используется алгоритм наблюдения, основанный на применении особой схемы фильтрации, состоящей из полосового фильтра и фильтра низких частот. Далее происходит уменьшение буксования при помощи ограничения задающего момента. Ниже представлены графики

линейных скоростей, а также график величины скольжения $U_1(t)$ при использовании управляющего алгоритма.

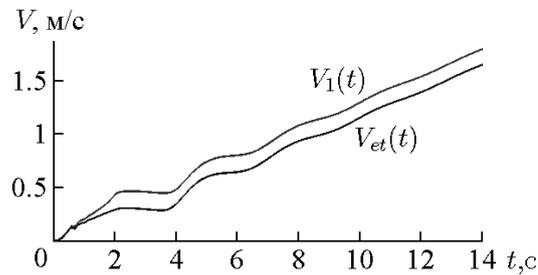


Рисунок 4. 7 - Линейные скорости $V_1(t)$ и $V_{et}(t)$ при использовании алгоритма компенсации буксования

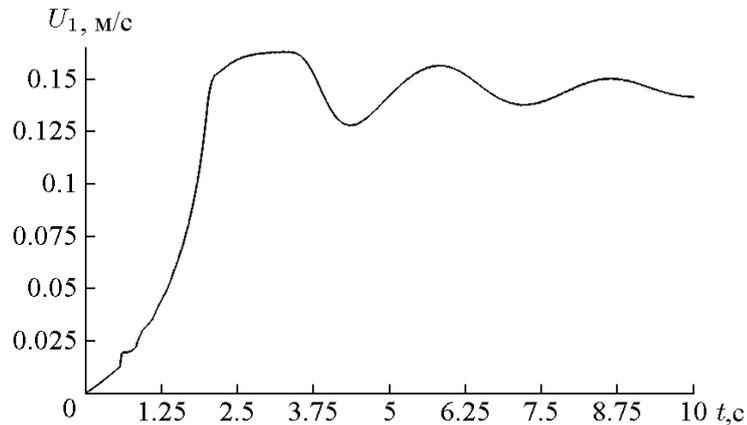


Рисунок 4. 8 - Зависимость скорости скольжения от времени $U_1(t)$

Анализ зависимости скорости скольжения от времени показывает, что данный метод позволяет эффективно компенсировать явление буксования колесной пары путем управления ее разгона и торможения с помощью регулируемого электропривода. Время работы алгоритма компенсации буксования в имитационной модели соотносится со временем переходного процесса разгона или торможения колесной пары подвижного состава рудничного электровоза.

4.2.3 Построение структуры устройства обнаружения буксования

Техническим результатом предлагаемого способа и устройства является прогнозирование начала буксования колесной пары электровоза и обеспечение минимального значения величины скорости скольжения как разности линейных скоростей электровоза и оси колесной пары. Выходными сигналами исполнительного тягового электропривода рудничного

электровоза являются частота вращения тягового двигателя и его электромагнитный момент. Для возникновения процесса буксования первичное значение имеет характер колебаний выходного сигнала в виде электромагнитного момента, а не в виде сигнала частоты вращения тягового двигателя колесной пары. Поскольку колебания выходного сигнала угловой частоты вращения вызываются колебаниями механической системы колесной пары, по сути, имеют вторичный характер.

Колебательная составляющая сигнала задания электромагнитного момента тягового электропривода при её отработке исполнительным тяговым электроприводом провоцирует начало процесса буксования колесной пары, а колебания угловой частоты вращения колесной пары являются следствием процесса буксования.

На Рисунк 4.9 представлена схема устройства. Устройство состоит из блока задания электромагнитного момента частотно-регулируемого электропривода переменного тока 1 (ЗУ), способного также генерировать аддитивную гармоническую составляющую $h(t)$ к основному задающему сигналу M_3 . Данный блок последовательно соединен с управляющим устройством анализа 2 (УУА). УУА соединено с частотно-регулируемым электроприводом 3 (ЧРЭП), который соединен последовательно с полосовым фильтром 4 (ПФ), выход которого подключен к входу фильтра низких частот 5 (ФНЧ). Выход ФНЧ соединен с входом согласующего устройства 6 (СУ), выход же СУ соединен с входом УУА.

Устройство работает следующим образом. При первом цикле, в задающем устройстве задается необходимая величина момента M_3 , а также генерируется аддитивная гармоническая составляющая $h(t)$ к основному задающему сигналу M_3 . Далее сигнал $M_3 + h(t)$ идет на устройство анализа и управления 2, которое его пропускает без изменений или масштабирует, если необходимо, и сигнал идет на задатчик момента частотно-регулируемый электропривод 3. Отработывая сигнал задания момента, частотно-регулируемый электропривод 3 приводит в движение колесную пару. Выходная координата частотно-регулируемого электропривода косвенным способом вычисляется с достаточно большой точностью средствами его цифровой системы управления и проходит через полосовой фильтр 4, который выделяет необходимую гармоническую составляющую. После полосового фильтра 4 выходной сигнал электромагнитного момента проходит через фильтр низких частот 5, который отсекает все высокочастотные составляющие сигнала, что позволяет выделить сигнал рассогласования линейных скоростей колёсной пары и электровоза. В дальнейшем сигнал идет через согласующее устройство 6, которое проводит операцию преобразования и масштабирования. И в конце сигнал снова приходит на устройство анализа и управления, которое проводит сравнение фактического и желаемого моментов и на основе их разницы формирует управляющий сигнал для компенсации расхождения между ними. [35]

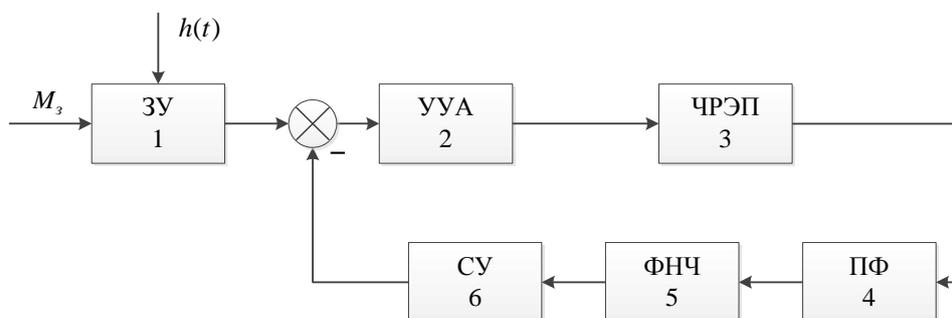


Рисунок 4.9. Функциональная схема устройства обнаружения буксования

4.2.4 Исследование процессов буксования колесной пары рудничного электровоза в режимах разгона и торможения

Результаты компьютерного моделирования устройства обнаружения буксования.

В основу модели были положены данные об электровозе (марка, название), параметры которого имели следующие значения

Таблица. 2. Параметры тягового электровоза

Момент инерции привода, приведенный к ротору, кг · м ²	0,89
Радиус колеса по кругу катания, м	0,34
Передаточное отношение редуктора	14,2
Масса электровоза, кг	14000
Масса вагона с грузом, кг	10000
Длина вагона, м	4

Далее представлены графики величин, имеющих большое значение для исследования, в условиях компенсации буксования.

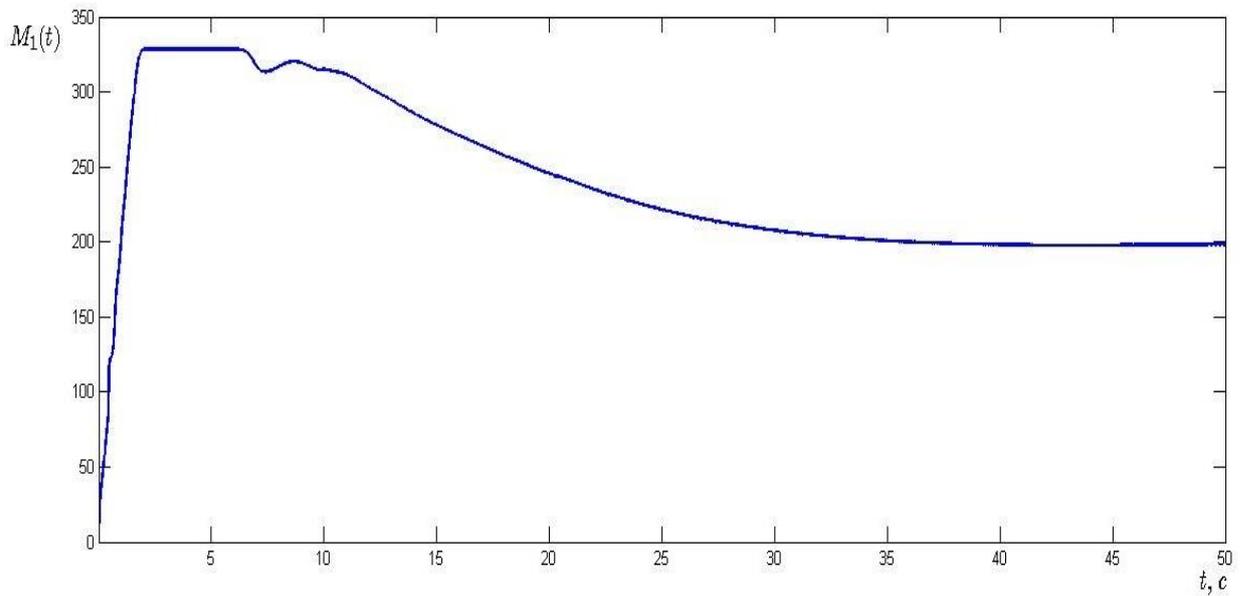


Рисунок 4.10. Момент сопротивления колесной пары

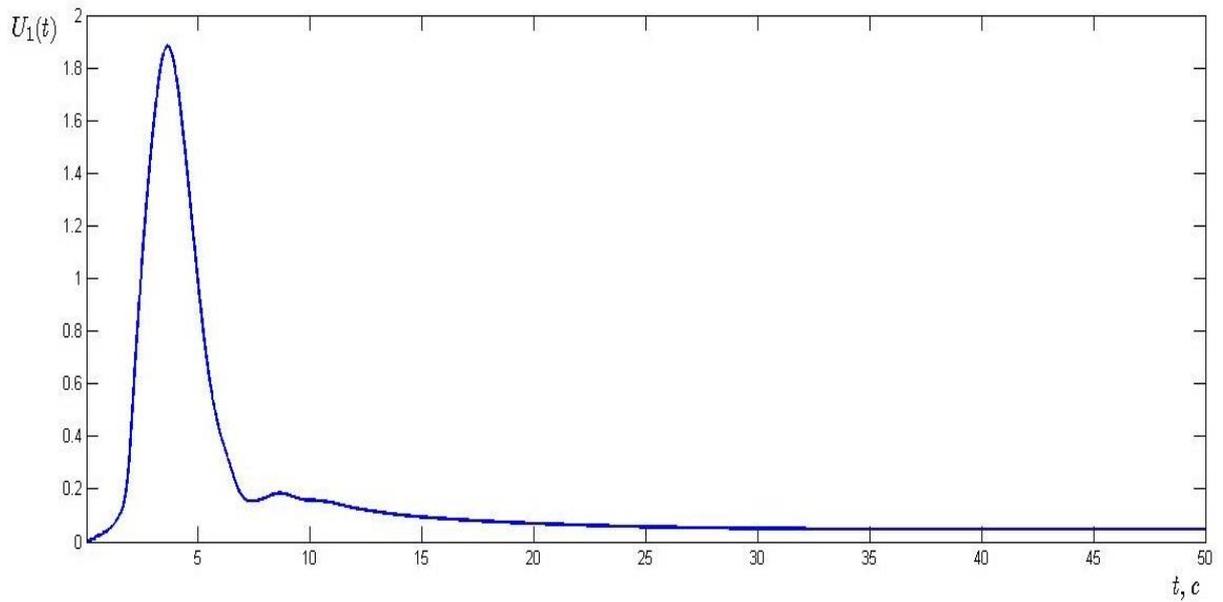


Рисунок 4. 11 Величина скорости скольжения первой колесной пары

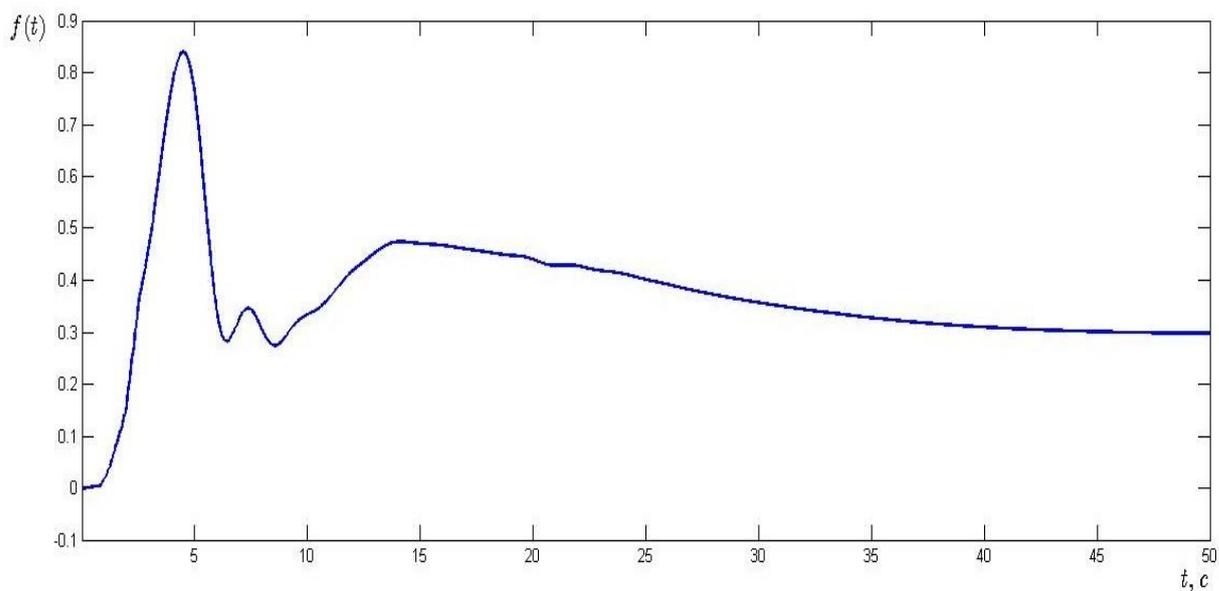


Рисунок 4.12 Выход фильтра

Как видно из рисунков, эффект буксования удовлетворительно компенсируется предложенным алгоритмом. Выход фильтра же не выходит за предельную величину f_3 .

Далее, на всех рисунках присутствуют графики $h_1(t)$, как реакций ФНЧ на входное воздействие $g_1(t)$.

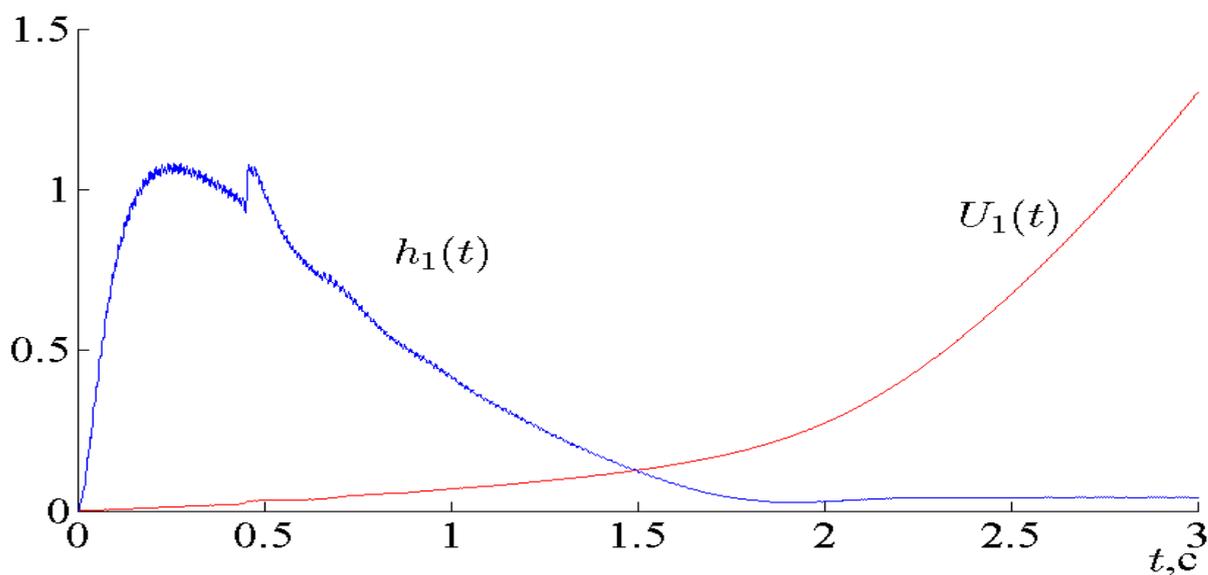


Рисунок 4.13 - Графики $U_1(t), h_1(t)$.

Также представлены графики $U(t), h_1(t)$ при наличии на входе сначала возрастающего (режим разгона), а затем убывающего задающего момента (режим торможения).

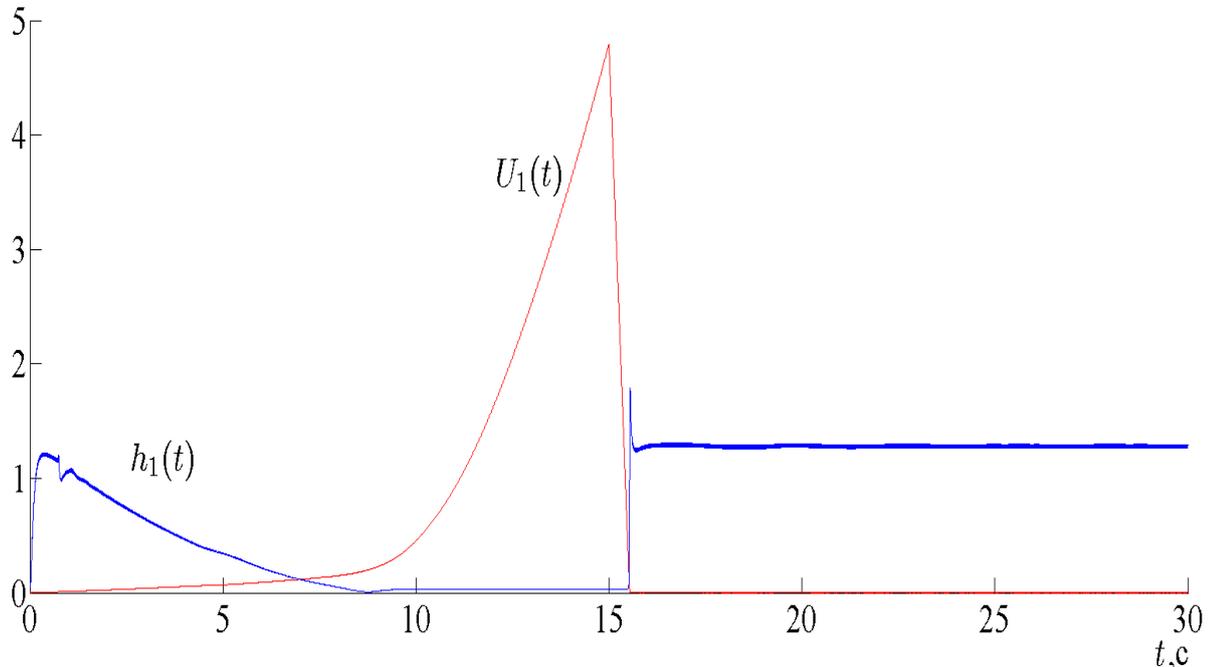


Рисунок 4.14 - Графики $U_1(t), h_1(t)$.

Так как форму задающего воздействия (момента) можно приблизительно описать как

$$M_z(t) = M_{\max} - M_{\max} \exp(-kt), \quad 4.10$$

где k – есть коэффициент, отвечающий за скорость возрастания функции; M_{\max} – максимально возможное значение задающего сигнала; t – время, то есть возможность проверить поведение скольжения при различных параметрах входного сигнала. Представленные ниже зависимости, в особенности на рисунках Рисунок 4.15 и Рисунок 4.17 показывают прямо пропорциональную зависимость между скоростью роста задающего сигнала $\frac{dM_z(t)}{dt}$ и величиной скольжения $U_1(t)$ [36].

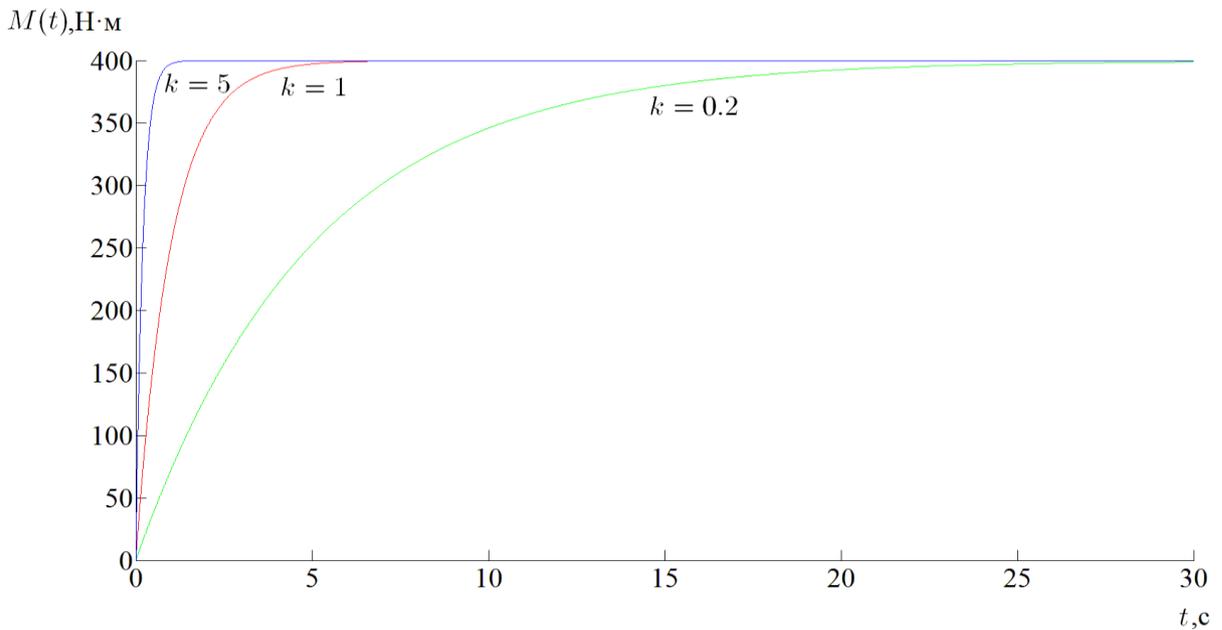


Рисунок 4.15 Вид задающего сигнала при различных значениях k .

На рисунке Рисунок 4.15 изображены графики задающих воздействий при различном показателе экспоненты, скорость возрастания данных сигналов напрямую определяет поведение функции скольжения. Также изменение поведения входных сигналов оказывает влияние на реакцию полосового фильтра, а именно небольшое значение показателя экспоненты в задающем сигнале уменьшает абсолютную величину $\frac{dh(t)}{dt}$.

Это в свою очередь прямо пропорционально влияет на функцию скольжения, уменьшая её $\frac{dU_1(t)}{dt}$. Для большего показателя экспоненты все наоборот – происходит увеличение $\frac{dU_1(t)}{dt}$ и $\frac{dh(t)}{dt}$.

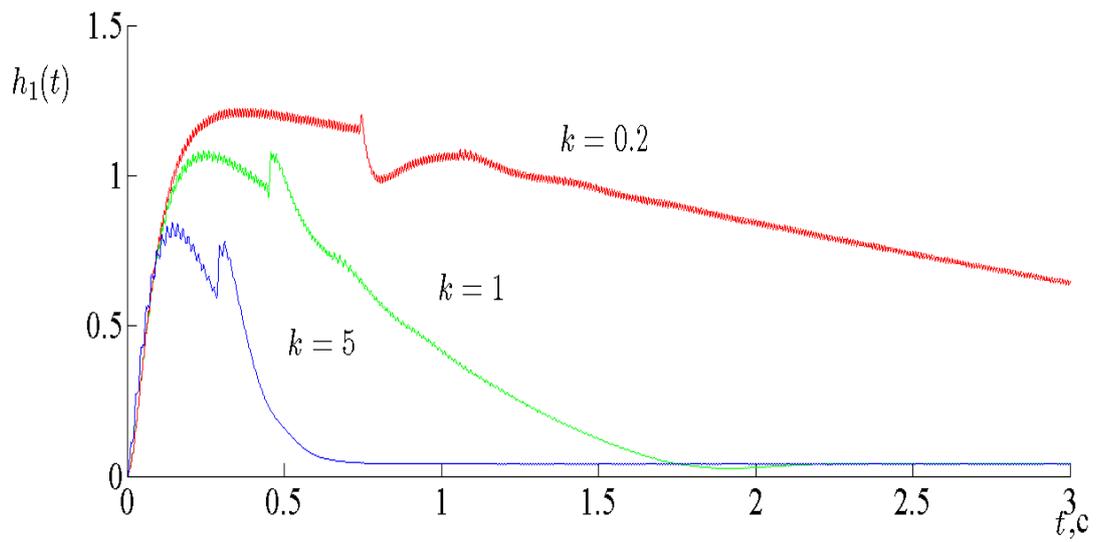


Рисунок 4.16. Выход фильтра $h_1(t)$ при различных значениях k .

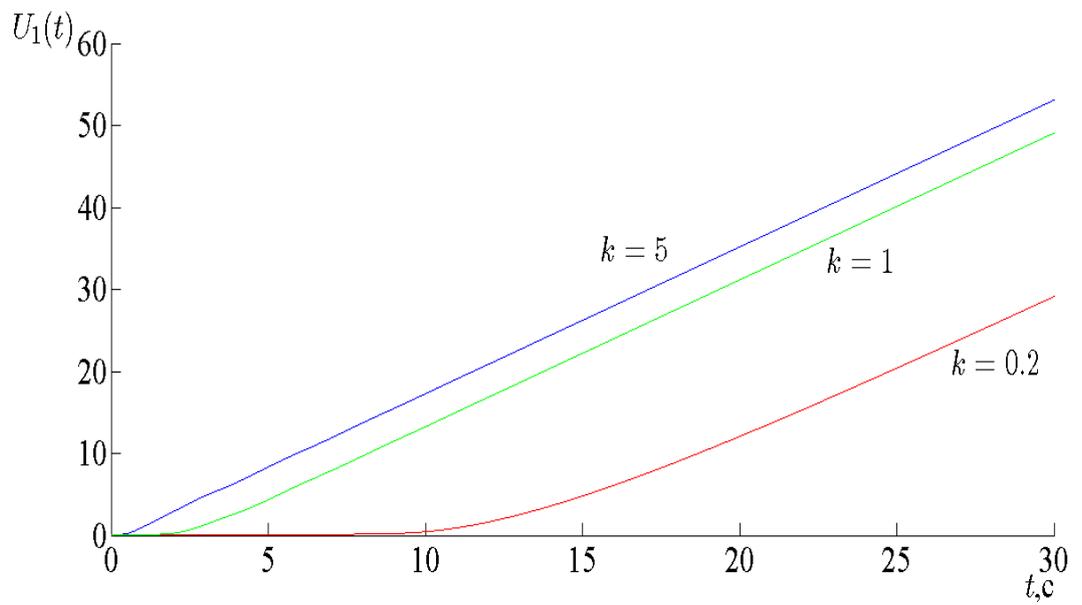


Рисунок 4. 17 - Величина скольжения $U_1(t)$ при различных значениях k .

4.3 Вывод по разделу

В результате, разработана компьютерная модель электромеханической системы электровоза с подвижным составом, структура которой позволяет учитывать все основные нелинейные эффекты типа «люфт» в сцепных устройствах и буксование колёсных пар, а также сухое и вязкое трение в них.

Модель позволяет синтезировать алгоритмы оптимального управления тяговыми электроприводами передней и задней колёсных пар рудничного электровоза, реализующие такие возможности как:

- оптимальное управление тягой электровоза, с точки зрения реализации максимальной тяги и исключения режимов буксования колёс в условиях плоского движения подвижного состава на подъёмах и спусках при изменяемом профиле пути;
- автоматическое ограничение скорости состава при поворотах для исключения возможности схода колёсных пар с рельсового пути при учёте неровностей и отклонения от идеального расположения;
- компенсация механических колебаний вызванных наличием упругих связей в сцепных устройствах между вагонами подвижного состава, за счёт электромеханического их демпфирования средствами частотно-регулируемых электроприводов.

5. Экономический расчет создания испытательного Стенда

5.1 Введение

Рельсовый подземный транспорт широко применяется в горной промышленности ввиду своей высокой эффективности для перевозки грузов на большие расстояния. Новые технологические решения, модернизация шахтных транспортных линий выставляет новые требования, как к конструкции электровозов, так и к силовым агрегатам. Тенденция последних десятилетий по замене двигателей постоянного тока асинхронными машинами присутствует и в рассматриваемой отрасли, однако, сложности связанные с технологическими особенностями процесса эксплуатации ограничивает прямое использование существующих технологий, наработанных в других направлениях рельсового транспорта[2]. Ввиду наличия ряда научных и технических проблем, решение которых требует системного подхода и решению как математических, так и технологических задач. Ввиду этого возникает необходимость проведения имитационных и экспериментальных исследований. В связи с этим возникает задача построения испытательных стендов и разработки автоматизированных систем управления технологическим процессом. Полученный результат и синтезированный закон управления с устранением проблем буксования тяговых асинхронных двигателей может быть использован помимо рельсового подземного транспорта, специфика которого непосредственно учитывается в данной работе, но так же на городском и магистральном рельсовом сообщении

5.2 Анализ технологического процесса и технологического оборудования

В данной работе технологическим процессом будет являться стендовые и имитационные испытания с применением моделирования технологической среды эксплуатации для решения проблем буксования

и юза колесной пары подвижного состава. Дополнительным условием выступает необходимость предварительного построения имитационной модели и синтезу законов управления для испытательного стенда.

Данный процесс реализуется на специальном экспериментальном оборудовании. Для обеспечения условий проведения эксперимента необходима следующая функциональная схема установки:

Также неотъемлемой составляющей проведения эксперимента является наличие измерительных датчиков в системе, к этим датчикам должны предъявляться высокие требования по точности, минимальному влиянию на работу оборудования.

Структурная схема испытательного стенда представлена на Рисунок 5.1.

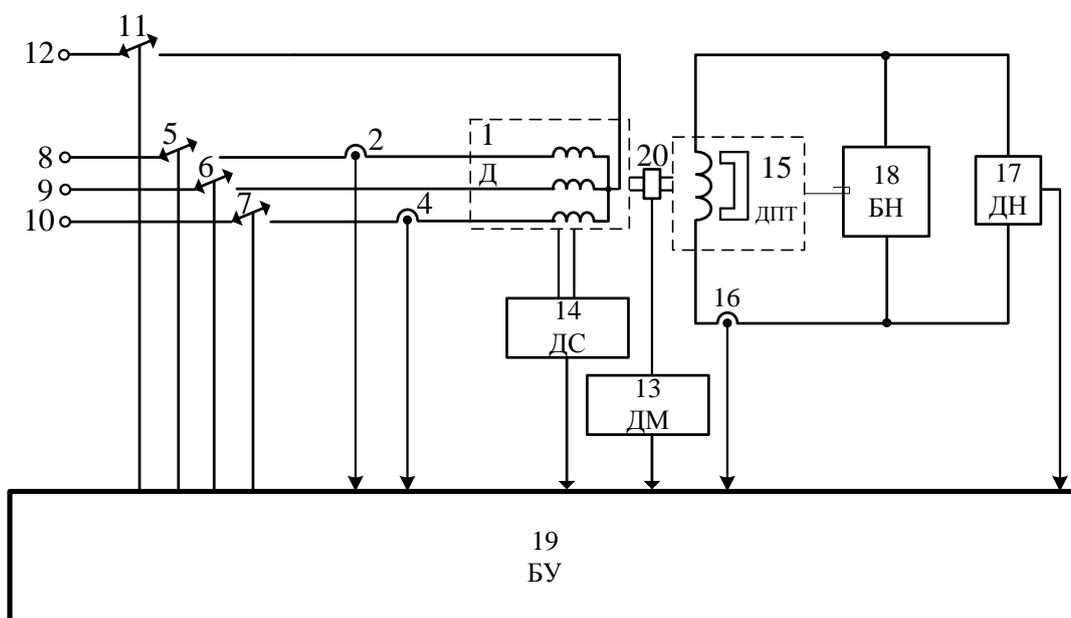


Рисунок 5.1 Структурная схема испытательного стенда: 1 - двигатель переменного тока 1 (АД); 2, 4 – датчики токов статора; 5, 6, 7, 11 – управляемые ключи с двухсторонней проводимостью; 8, 9, 10 – выходы источника питания переменного тока; 11 – датчик тока нулевого провода; 12 - вывод нейтрали источника питания 13 – датчик момента переменного тока. 14 - датчик скорости; 15 – двигатель

постоянного тока; 16 - датчик тока якоря; 17 – датчик напряжения 18 - датчик напряжения; 19 - блок управления; 20 соединительная муфта.

Базовая схема станда выглядит следующим образом:

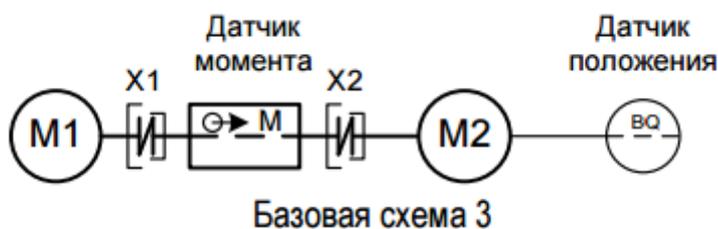


Рисунок 5.2 – Базовая схема испытательного станда

Установка для проведения эксперимента по исследованию процессов буксования и юза имеет три уровня три уровня, обеспечивающие функции оперативного контроля и управления – нижний, средний и верхний (Рисунок 5.3).

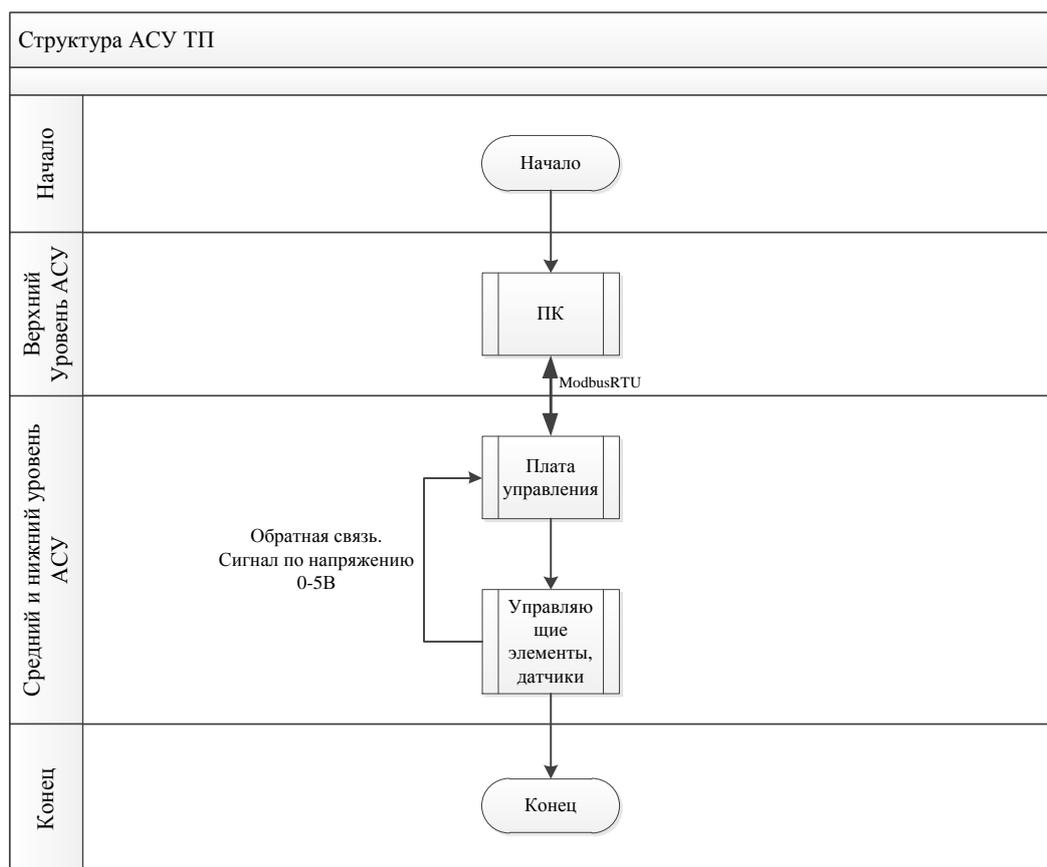


Рисунок 5.3 Структура Автоматической системы управления испытательного станда

Основными компонентами нижнего уровня являются

- Блок звена постоянного тока PFC-2PhIL с ШИМ инвертором
- - Плата Микроконтроллера F28035 Piccolo:
- - 32 разрядный микропроцессор TMS320F2808;
- - порт ввода вывода данных по каналам I2C, UART, CAN;
- - 16 канальный 12 разрядный АЦП ;
- - модуль обработки сигнала квадратурного энкодера QEP;
- - модуль формирования ШИМ сигналов. PWM-1, PWM-2, PWM-3, PWM-4, PWM5.
- нагрузочная машина постоянного тока;
- объект управления (асинхронный электродвигатель).

Основные компоненты верхнего уровня:

- Измерительно-вычислительный комплекс на основе платы **mZdsp2812**
- -Протокол связи блока управления с персональным компьютером

5.3 Экономический расчет создания имитационной модели

В данном разделе выпускной квалификационной работы производится расчет затрат на создание установки для проведения эксперимента по исследованию режимов буксования и юза подземного троллейного электровоза .

Экспериментальная установка позволяет проводить экспериментальные исследования разрабатываемых электроприводов, буксования и юза.

5.3.1 Организация и планирование работ

Планирование проекта – непрерывный процесс, направленный на определение и согласование наилучшего способа действий для достижения поставленных целей проекта с учетом всех факторов его реализации. Составим перечень проводимых работ, определив их исполнителей, а также

определим количество дней, потраченных на выполнение этих работ согласно календарному плану магистра.

Для выполнения перечисленных работ требуются следующие специалисты:

- студент (С);
- научный руководитель (НР).

Таблица 5.1 - Перечень работ по реализации проекта

№	Наименование работы
1	Постановка целей и задач
2	Знакомство с литературой по теме, обзор схмотехники существующих испытательных стендов
3	Составление технического задания
4	Изучение технологического процесса
5	Изучение оборудования, методов расчета, программного обеспечения
6	Разработка схемы и алгоритма работы испытательного стенда, патентование разработанной схемы
7	Настройка системы управления, проведение экспериментов
8	Оформление пояснительной записки
9	Проверка готовой пояснительной записки руководителем

5.3.2 Продолжительность этапов работ

Трудоемкость выполняемых при разработке проекта работ определяется по сумме трудоемкостей этапов и видов работ, оцениваемых экспертным путем в человеко-днях, и носит вероятностный характер. Ожидаемое значение трудоемкости $t_{ож}$ рассчитывается по формуле:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5},$$

где t_{\min} — минимально возможное время, за которое может быть выполнена работа, измеряется в чел.-дн.;

t_{\max} — максимальное время, за которое работа может быть выполнена, измеряется в чел.-дн.

В таблице 5.2 представлен план проекта, в котором приведена длительность работ и число исполнителей этих работ.

Таблица 5.2 - Календарный план проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, чел/дн.			Дата начала работ	Дата окончания работ
		t_{\min}	t_{\max}	$t_{\text{ож}}$		
1	НР, С	3	7	5	15 сен. 2015	19 сен. 2015
2	С	12	21	22	27 сен. 2015	4 окт. 2015
3	НР	14	21	17	18 окт. 2015	4 нояб. 2015
4	С	30	16	34	5 нояб. 2015	18 дек. 2015
5	С	20	30	24	22 дек. 2015	20 янв. 2016
6	С	35	45	39	18 фев. 2016	22 мар. 2016
7	С	14	21	17	21 мар. 2016	13 апр. 2016
8	НР, С	21	30	25	19 апр. 2016	12 мая. 2016
Итого				183		

Ожидаемое время работы $T_{\text{ож}} = 183$ дней.

Результаты планирования показали, что время, затраченное на проектирование для: студента (С) – 166 дня, научного руководителя проекта НР - 47 дней.

5.3.3 Календарный план

Календарное планирование в управлении проектами – это ключевой и важный процесс, результатом которого является утвержденный руководством компании календарный план проекта (часто его называют еще планом-графиком, календарным графиком, планом управления проектом).

Цель календарного планирования – получить точное и полное расписание проекта с учетом работ, их длительностей, необходимых ресурсов, которое служит основой для исполнения проекта.

Календарное планирование включает в себя:

- определение последовательности работ и построение сетевого графика;
- планирование сроков, длительностей и логических связей работ и
- построение диаграммы Ганта;
- определение потребности в ресурсах (люди, машины и механизмы, материалы и т.д.) и составление ресурсного плана проекта;
- расчет затрат и трудозатрат по проекту.

Ниже приведем перечень работ, представленных в таблице № 3

Календарный план на 2015-2016 годы										
№ п/п	Вид работы	2015 год				2016 год				
		сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель	май
1	Постановка целей и задач									
2	Знакомство с литературой по теме, обзор схмотехники существующих испытательных стендов									
3	Составление технического задания									
4	Изучение технологического процесса									
5	Изучение оборудования, методов расчета, программного обеспечения									
6	Настройка системы управления, проведение экспериментов									
7	Оформление пояснительной записки									
8	Проверка готовой пояснительной записки руководителем									

Таблица № 5.3 - Список работ на 2015-2016

5.3.4 Расчет сметы затрат на проектирование

Произведем расчет основной заработной платы.

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя проекта и студента. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя:

$$C_{осн} = \sum_{i=1}^n T_i \cdot C_{зпi}$$

где n - количество участников проекта; T_i - затраты труда работника, (дни);
 $C_{зпi}$ - среднедневная заработная плата работника (руб/день).

Среднедневная заработная плата определяется по формуле:

$$C_{зп} = \frac{D \cdot (1 + k_1) \cdot (1 + k_2)}{F_0}$$

Определим месячный оклад (D) руководителя проекта (доцента, ктн) в 23264,86 рублей [1], а месячный оклад студента (на должности инженера-программиста в лаборатории кафедры Электропривода и электрооборудования автоматизации проведения эксперимента НИ ТПУ) в 10 000 рублей.

K_1 – коэффициент, учитывающий районный коэффициент $K_{рк}=30\%$;

k_2 – коэффициент дополнительной заработной платы, равный 10%;

F_0 – количество рабочих дней в месяце (в среднем 21 день).

Учитывая то, что научный руководитель был занят при разработке 43 дней, а студент-проектировщик - 177, найдем основную заработную плату и сведем в таблицу 5.4.

Таблица 5. 4 - Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневна я ставка, руб./день	Затраты времени, дни	Фонд з/платы, руб.
НР	23264,86	1584,23	47	74458,81
С	10 000	476,19	166	79047,54
Итого:				153506.35

Таким образом, затраты на основную заработную плату, которая включает в себя и дополнительную заработную плату, составили $C_{осн} = 153506,35$ руб.

Расчет отчислений от заработной платы

Затраты по этой статье составляют отчисления по единому социальному налогу (ЕСН).

Отчисления по заработной плате определяются по следующей формуле:

$$C_{соц} = K_{соц} \cdot C_{осн},$$

где $K_{соц}$ – коэффициент, учитывающий размер отчислений из заработной платы. Данный коэффициент составляет 27,1 % от затрат на заработную плату.

Итак, отчисления из заработной платы составили:

$$C_{соц} = 0,271 \cdot 153506,35 = 41600,22 \text{ руб.}$$

Рассчитаем материальные затраты. Сюда включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Таблица 5.5 - Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Преобразователь частоты	МСВ - 04	2	82000	164000
Плата	mZdsp2812	2	14600	29200
Стенд	Тип 3 (АД-ДПТ)	1	30000	70000
Среда разработки	MexBIOS Development Studio	1	1	46000
Всего за материалы				939200
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				28176
Итого по статье C_m				967376

Расчет прочих расходов.

Прочие расходы составляют 50% от суммы затрат на заработную плату и её отчислений, рассчитывается по формуле:

$$C_{пр} = (C_{осн} + C_{соц}) \cdot 0,5 = (153506,35 + 41600,22) \cdot 0,5 = 97553,28 \text{ руб.}$$

Расчет цены проектирования.

Таблица 5.6 - Затраты на проектирование

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Затраты по основной заработной плате исполнителей проекта	153506,35	
2. Отчисления от заработной платы	41600,22	
3. Материальные затраты	967376,00	
4. Прочие расходы	97553,28	
5. Себестоимость проекта	1260035,85	Сумма ст. 1 - 4
6. Прибыль	63001,79	20% от ст. 5
7. НДС	226806,45	18% от суммы ст. 5
8. Цена разработки проекта	1486842,30	Сумма ст. 5 - 7

По данным таблицы 5.6 строим круговую диаграмму сметы затрат на создание дипломного проекта. Круговая диаграмма представлена на Рисунок 5.4.

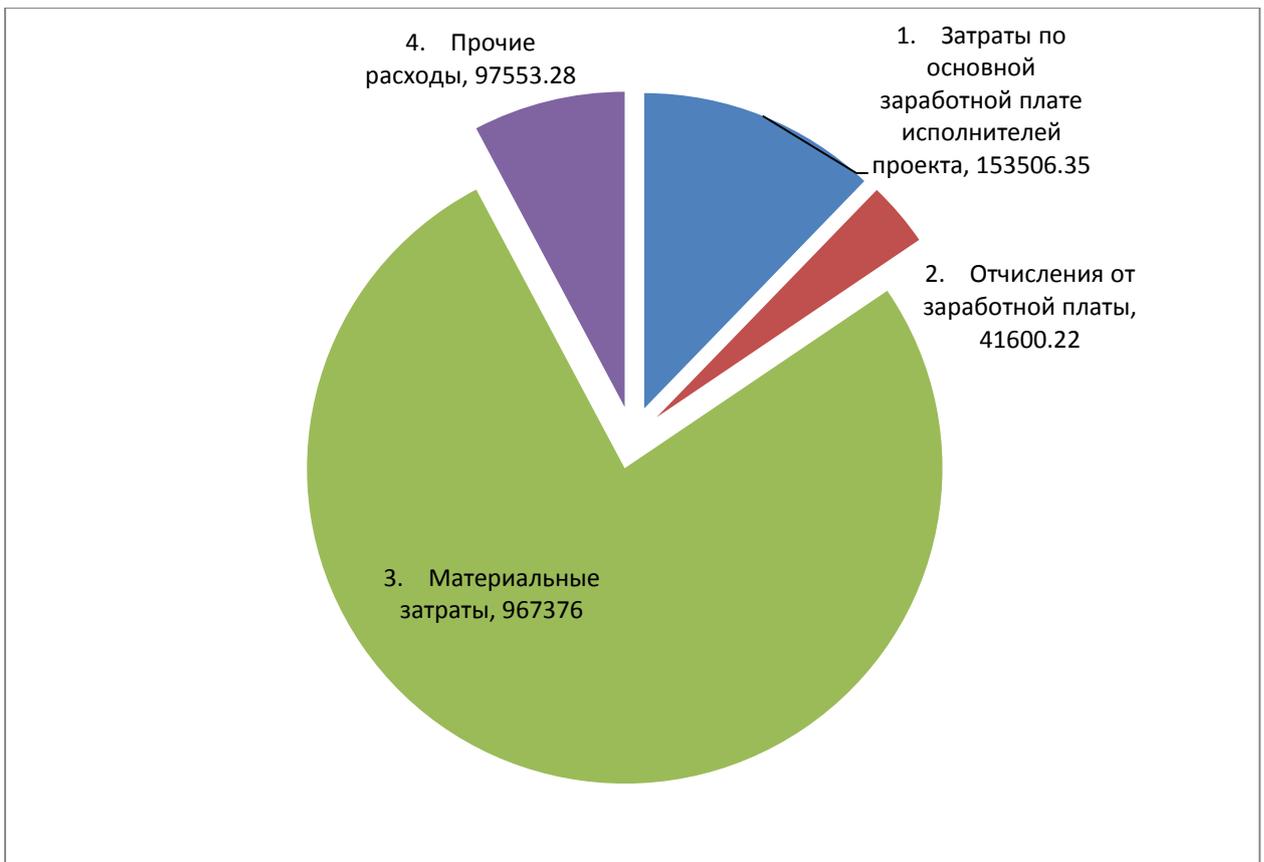


Рисунок 5.4 – Круговая диаграмма сметы затрат на создание дипломного проекта

В результате выполнения работы была разработана модель и синтезирован закон управления. Сформирован план испытаний, приложение к имитационному стенду, а так же приведен в соответствие макет установки для проведения эксперимента по исследованию режимов буксования и юза. Техническое решение позволяет проводить испытания при различных параметрах пути подземной откатки [31,30]. Моделирование контакта рельсового полотна осуществляется путем имитации параметра сцепления колеса о реборду рельса. В используемом стенде использует нагрузочный двигатель в качестве нагрузки для формирования момента сцепления.. Фотография испытательного стенда представлена на рисунке 5.5



Рисунок 5.5 - Автоматизированный испытательный стенд для исследования аварийных режимов буксования и юза

5.4 Выводы по разделу

В данной работе описана автоматизация системы управления технологическим процессом проведения эксперимента по исследованию буксования и юза подвижного состава.

Далее были выбраны аппаратные средства на всех уровнях управления и программное обеспечение, а также составлен общий алгоритм функционирования АСУ ТП.

Разработанный стенд позволяет:

- исследовать комплекс ПЧ-АД при различных динамических нагрузках, Гибкость программного обеспечения позволяет формировать нагрузочную характеристику для широкого спектра задач;
- имитировать режим буксования и юза подвижного состава с возможностью введения нелинейностей характера.

6 Социальная ответственность

6.1 Введение

Основной целью работы является разработка и исследование рудничного тягового асинхронного электропривода и решению проблем буксования и юза. Под этими понятиями понимается изучение теоретических аспектов дисциплин электрические машины и электропривод, разработка математических моделей, описывающих механические процессы, протекающие в месте контакта реборды рельса и колеса электровоза, и влияние данных эффектов на параметры электропривода, обработка и анализ результатов моделирования. Процесс практического применения полученных результатов связан с эксплуатацией горного оборудования в условиях шахтной выработки. Исходя из этого, можно сделать вывод, что основная работа оператора электровоза, в котором будут реализованы новые алгоритмы управления связаны непосредственно с шахтным производством, которому сопутствует соответствующий список вредных и опасных производственных факторов.

6.2 Описание технологического процесса и рабочего места

Транспортировка грузов самоходным транспортом находит широкое применение в горнорудной шахтной промышленности, благодаря отличительным качествам: высокой маневренности, повышенной производительностью, по сравнению с конвейерными линиями, способностью производить откатку больших грузов, высокий запас прочности, а так же способность преодолевать большие разно уровневые перепады высот.

При всех положительных качествах мобильной подземной откатки, недостатки данного вида транспорта отличительны. Это : сложность конструкции, повышенные затраты на эксплуатацию, ввиду большого наличия подвижных частей, стоимость сопоставимая с другими видами

подземного транспорта, теми же конвейерными линиями. Так же для прокладки подземных путей сообщений приходится увеличивать ширину прохода выработок для перемещения транспортных машин большого тоннажа.

В диссертационной работе рассматривается подземный шахтный электровоз с подвижным составом, питающийся от сети постоянного тока 250В. Данный вид транспорта применяется на невзрывоопасных рудничных выработках, в частности: урановые, калиевые, никелевые шахты.

Опасности, относящиеся к применению подземных шахтных электровозов в подземных условиях. Заключаются в. Работе при стесненном пространстве, в условиях низкой видимости, неровности путевых линий откатки, большой обводненности, а так же. В частности применение машин с электровозной тягой влечет за собой возникновения рисков поражения электрическим током.

6.3 Вредные производственные факторы

Согласно правил безопасности и §193 данного документа в угольных и горнорудных шахтах вредными профессиональными факторами влияющими на жизнедеятельность человека являются:

- 1) Рудничная атмосфера;
- 2) Производственная вибрация и шум;
- 3) Малая искусственная освещенность рабочего пространства машиниста электровоза;
- 4) Ограниченное пространство;
- 5) Обводненность

6.3.1 Рудничная атмосфера

Рудничная атмосфера имеет свой специфический состав, отличный от атмосферы поверхности земли. Характерными особенностями воздушной

смеси горно-рудных шахт является, уменьшенное содержание кислорода, повышенное содержание азота и углекислого газа. В зависимости от типа шахты, присутствуют и иные примеси в составе воздуха, в виде угарного газа, оксидов азота и иных органических летучих соединений

В соответствии с ПБ в горнорудных шахтах должны обеспечиваться нормы чистоты атмосферы, по нормативным документам процентное содержание кислорода должно быть не менее 20%, оксида углерода не более 0.0017%, оксидов азота не более 0.00025%. Водород (H_2) - горит и взрывается при концентрации 4-96%.

В качестве инструмента поддержания необходимого процентного соотношения воздуха используются сложные вентиляционные системы, с поддержанием постоянного потока воздуха в разветвленной системе тоннелей. В качестве исполнительных механизмов для вентиляторов главного проветривания ствола используются синхронный двигатели высокой мощности.

6.3.2 Запылённость воздуха

Мелкодисперсный состав воздуха, наличие примесей разрабатываемой руды. а так же атмосфера замкнутого пространства могут вызывать заболевания легких – пневмокониоз. При естественном состоянии дыхательных путей, процент задерживаемой пыли на легких может достигать до 90%, крупные частицы воздушной смеси могут вызывать раздражение слизистой оболочки и могут привести к травме дыхательных путей. Под действием пыли идет процесс нарушения легочной ткани. При этом рассматривая горно-рудные шахты в качестве основного источника мелкодисперсной пыли является SiO_2 , в результате контакта со слизистой оболочкой образуется кремниевая кислота H_2SiO_3 , ускоряющая разрушение дыхательных путей. Пневмокониоз относится к разряду профессиональных заболеваний и развивается достаточно медленно, в зависимости от степени

тяжести работ на шахте. (до 10-15 лет). Стоит отметить, что наиболее опасный размер пылевых фракций составит 0,1-0,2 мкм.

В соответствии с нормативными документами ТБ ПДК для пыли, при содержании в ней SiO₂:

- SiO₂ – 1 мг / м³; - 70 %
- SiO₂ - 2 мг / м³; - (10 – 70) %
- SiO₂ - 4 мг/м³; = (5 – 10) %
- SiO₂ до 5% - 10 мг/м³ (6 мг/м³ - антрацитовая пыль)

Лечение пневмокониоза в процессе развития болезни малоэффективно, ввиду большого периода времени развития заболевания оно чаще всего переходит в форму хронического. Работа по лечению и профилактики данного заболевания в основном ведется в профильных медицинских учреждениях.

Меры профилактики пневмокониоза: мероприятия лечебно-профилактического характера, снижение показателей пылеобразования, путем внедрения новых инженерно-технических мероприятий, использование респираторов.

Согласно ПБ, обеспечение безопасности по состоянию воздушной атмосферы шахты должен соответствовать проекту комплексного обеспыливания, утвержденный директором по технической части.

6.3.3 Производственный шум и вибрационное воздействие

Согласно ПБ §629: Допустимые уровни шумового воздействия на рабочих местах не должны превышать показатели предельно допустимых значений (табл. 6.1)

Таблица 6.1 Предельно допустимые значения шума

Места работы	ПДУ шум, дБ
Помещения под производство, горные выработки, ствол шахты	80
Дистанционные пульта управления, места машиниста оператора: - отсутствие резервирования связи - наличие резервирования связи	80 65
Работы, требующие высокой концентрации, важные участки, требующие высокой квалификации выполнения работ	60

Оборудование превышающее значения ПДУ необходимо устанавливать в отдельном помещении:

$$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 20 \log\left(\frac{P}{P_0}\right), \text{дБ}.$$

где: I - интенсивность шумового воздействия, I_0 - интенсивность звукового сигнала на пределе слышимости (10^{-12}), Вт/м² При болевом пороге в $L_6 = 140$ дБ

Вибрация

$$L = 20 \log\left(\frac{V}{V_0}\right), \text{дБ}, V_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м/с} \quad - \quad \text{виброскорость, соответствующая}$$

давлению $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па

$$L_2 = 20 \log(a / a_0), \text{дБ}, a_0 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ - виброускорение}$$

Допустимые уровни вибрации установлены: ПБ §630 табл. 8.2

6.3.4 Рудничное освещение

Для освещения применяют:

- сетевое освещение:
 - стационарное действует в течении всего срока службы выработки;
 - полустационарное переносится по мере продвижения забоя;
 - местное освещение применяется на передвижных машинах.
- аккумуляторные переносные светильники:
 - ручные - аккумулятор составляет единое целое с лампой;
 - головные (СГГ1К, "Кузбасс", СГВ-2, "Украина").

В шахтах применяются светильники РН, РП и РВ исполнения. Для питания электросветильников, применяемых в очистных забоях и ламп, встроенных в машины используется напряжение не более 127В, остальных выработок-220В.

ПБ §531 Светильниками, питаемыми от электросети в подземных условиях должны освещаться:

- электромашинные, лебёдочные и диспетчерские камеры, ЦПП, локомотивные гаражи, здравпункты, раздаточные камеры ВМ, подземные ремонтные мастерские;
- транспортные выработки в пределах ОД.;
- приёмные площадки уклонов и бремсбергов, разминовки в околоствольных и участковых откаточных выработках, участки выработок, где производится перегрузка угля, пункты посадки людей в транспортные средства и подходы к ним;
- призабойное пространство стволов, сопряжений и камер при проходке и проходческие подвесные балки;

- очистные выработки на пологих и наклонных пластах, оборудованные механизированными комплексами и струговыми установками;
- постоянно обслуживаемые электромашинные установки, передвижные подстанции и распределители, вне пределов спец. камер;
- выработки оборудованные ленточными конвейерами и подвесными канатно-кресельными дорогами, предназначенные для перевозки людей;
- людские ходки, оборудованные механизированной перевозкой людей;
- призабойное пространство подготовительных выработок, проводимых с применением проходческих комплексов или комбайнов, должно освещаться встроенными в комплекс или комбайн светильниками.

Освещение способствует снижению травматизма и повышению производительности труда (до 25%).

Нормы освещённости в основных горных выработках:

- очистной комплексно-механизированный забой, $E = 5$ лк;
- проходческий забой, $E = 10$ лк;
- откаточные и вентиляционные штреки, $E = 1$ лк;
- стрелочные переводы, $E = 2-5$ лк;
- машинные камеры (ЦПП, РПП, водоотлив), $E = 10$ лк.

6.3.5 Освещенность

Освещенность – поверхностная плотность светового потока; единица освещенности – люкс (лк). Это освещенность одного квадратного метра поверхности при падении на него светового потока в один люмен.

Рабочее освещение следует предусматривать для всех помещений зданий, а также участков открытых пространств, предназначенных для работы, прохода людей и движения транспорта. Для помещений, имеющих зоны с разными условиями естественного освещения и различными

режимами работы, необходимо раздельное управление освещением таких зон.

Оценка освещенности рабочей зоны необходима для обеспечения нормативных условий работы в помещениях и проводится в соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03

Таблица 6.1 – Характеристики помещения

Размеры помещения, м	24x8x6
Кол. x Площадь окна, м ²	8 x 2,8
По количеству пыли	Малое
Характеристика помещения по пожароопасности	Непожароопасное

Выбираем светильники типа ОДОР т.к. они для нормальных помещений с хорошим отражением потолка и стен, допускаются при умеренной влажности и запылённости, $\lambda = 1,1$.

Инженер механик рудничного подземного электровоза в основном, но не в целом, проводит мероприятия по техническому осмотру тяговой машины, проверки узлов, производит подготовку всех систем электровоза, а так же вносит изменения в техническую документацию в связи с заменой оборудования. Рабочая поза – стоя (в основном).

Высота рабочей поверхности $h_p = 1,1$ м.

Отделка стен: оклеенные светлыми обоями

Отделка потолка: светлый деревянный (окрашенный)

Коэффициент отражения стен $R_c = 30\%$, потолка $R_n = 50\%$.

Коэффициент запаса $k = 1,5$; коэффициент неравномерности $Z = 1,1$.

Рассчитываем систему общего люминесцентного освещения.

Приняв $h_c = 0,3$ м, получаем

$$h = H - h_c - h_p = 6 - 0,6 - 1,1 = 4,3 \text{ м};$$

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 4,3 = 4,73 \text{ м};$$

$$L/3 = 1,57 \text{ м}.$$

Размещаем светильники в два ряда. В каждом ряду можно установить 13 светильников типа ОДОР мощностью 40 Вт (с длиной 1,227 м, шириной 0,265 м), при этом разрывы между светильниками в ряду составят 40 см. Изображаем в масштабе план помещения и размещения на нем светильников (рис. 1). Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении $n = 52$.

Разряд зрительных работ – средней точности, согласно СНиП - $E_n=300$.

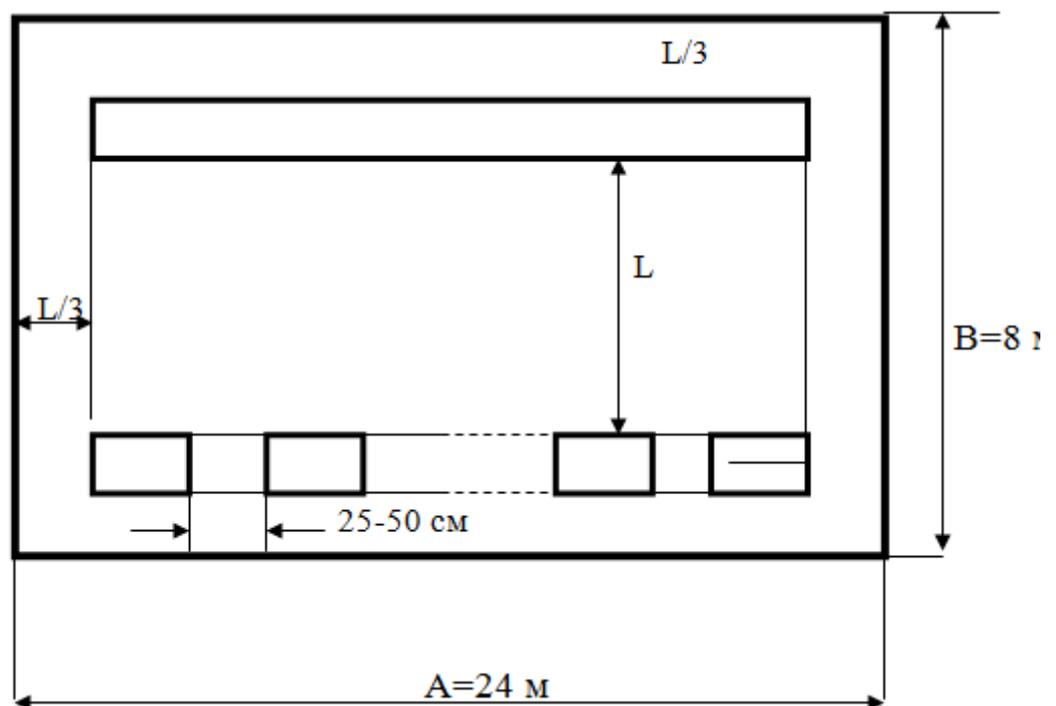


Рисунок * - План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Находим индекс помещения

$$i = S / (h(A+B)) = 192 / (4,3(24 + 8)) = 1,39$$

По таблице 8 определяем коэффициент использования светового потока:

$$\eta = 0,43.$$

Определяем потребный световой поток ламп в каждом из рядов:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot k_3 \cdot Z}{n \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 192 \cdot 1,5 \cdot 1}{52 \cdot 0,43} = 3764 \text{ Лм}$$

По таблице 1 выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛБ 40 Вт с потоком 3200 Лм. Делаем проверку выполнения условия.

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% \leq +20\%$$

Получаем - $0\% \leq 17,62\% \leq +20\%$ - условие выполняется.

6.4 Опасные факторы

- 1) Поражение электрическим током;
- 2) Пожароопасность.
- 3) Механические опасные факторы

6.4.1 Поражение электрическим током

Работа с электрическим током требует особой осторожности: электрический ток поражает внезапно, когда человек оказывается включенным в цепь прохождения тока.

Причины поражения электрическим током:

- прикосновение к токоведущим частям, оголенным проводам, контактам электроприборов, рубильников, ламповых патронов, предохранителей, находящихся под напряжением;
- прикосновение к частям электрооборудования, металлическим конструкциям сооружений и т.п., в обычном состоянии не находящихся, но в результате повреждения (пробоя) изоляции оказавшихся под напряжением:

- нахождение вблизи места соединения с землей оборванного провода электросети;

Действие электрического тока на живую ткань носит разносторонний характер. Проходя через тело человека, электрический ток производит термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие.

Все существующие мероприятия, обеспечивающие безопасность использования электроэнергии, можно условно разделить на три группы.

Организационные мероприятия включают в себя:

- правильный подбор персонала, обслуживающего электроустановки (запрещение использования труда лиц моложе 18 лет, а также не обученных и не прошедших медицинское освидетельствование для работы данного вида);
- обучение правилам безопасности при обслуживании электроустановок, т. е. проведение специального обучения для выполнения работ с повышенной опасностью, аттестации, инструктажей по безопасности труда, разработка и издание инструкций по охране труда, применение средств пропаганды правил электробезопасности (плакатов, видеофильмов и пр.);
- назначение ответственных за электрохозяйство лиц;
- контроль за правильностью устройства электропроводок и установкой электрооборудования в соответствии с ПУЭ;
- защита от поражения электрическим током при переходе напряжения на металлические корпуса электроустановок; устройство защитного заземления; зануление электроустановок в сетях с глухо-заземленной нейтралью; применение защитного отключения;
- изоляция электроустановок и электродвигателей от корпусов рабочих машин; применение диэлектрических настилов и изолирующих площадок.

6.4.2 Пожароопасность

Пожарная безопасность регламентируется ГОСТ 12.1.004-91, ГОСТ 12.1.010-76; ОСТ 29.12.0.004-82, строительными нормами и правилами (СНИП); типовыми правилами пожарной безопасности для промышленных предприятий; правилами пожарной безопасности при эксплуатации зданий и сооружений (ППБ-0-22-83) и инструкциями по пожарной безопасности на отдельных объектах полиграфического производства.

Рудничные пожары - пожары возникающие непосредственно в горных выработках, массиве полезных ископаемых и отработанном пространстве. К рудничным пожарам относятся и пожары в надшахтных зданиях, на складах, которые могут распространиться на выработки, или отравить в них атмосферу газообразными продуктами горения.

По причинам возникновения, рудничные пожары подразделяются:

- эндогенные (самовозгорание);
- экзогенные (от внешнего источника).

В зависимости от места возникновения рудничные пожары бывают:

- поверхностные;
- подземные.

Подземные рудничные пожары являются одной из наиболее опасных аварий в шахте. Их особенностью является плохая доступность для активного тушения непосредственным воздействием. Наличие за очагами пожаров, по ходу вентиляционной струи, высокой температуры, дыма и других продуктов горения не позволяет организовать тушение горячей выработки с двух сторон. Под действием огня выходит из строя и теряет свою несущую способность крепь горной выработки, что приводит к обрушению пород кровли, ещё больше осложняющему аварию. Пожары в шахтах и рудниках, опасных по газу и пыли, могут привести к взрыву газопылевой смеси в ходе ведения аварийно-спасательных работ. Особенной

опасностью рудничных пожаров является распространение по горным выработкам продуктов горения. Наиболее опасны экзогенные пожары. Они быстро активизируются и за короткое время могут отравить атмосферу горных выработок на большом протяжении.

При тушении подземных пожаров применяют следующие вентиляционные режимы:

- сохраняют существующий до возникновения пожара;
- сохраняют существующее направление вентиляционной струи с увеличением или уменьшением расхода воздуха;
- реверсируют (опрокидывают) вентиляционную струю, с сохранением, увеличением, или уменьшения расхода воздуха;
- закорачивание вентиляционной струи, при нормальном, или реверсивном её направлении;
- нулевая вентиляция, путём исключения выработок пожарного участка из вентиляционной сети шахты, или остановки вентилятора главного проветривания.

В начале устанавливают вентиляционный режим, предотвращающий распространение пожарных газов в выработки, в которых находятся люди. Если пожар возник в начале поступающей вентиляционной струи (в надшахтном здании, стволе, ОД, главном квершлагае и т.п.) - осуществляют реверсирование вентиляционной струи. При пожаре в середине пути вентиляционной струи, её закорачивают или реверсируют и даже останавливают вентилятор (если это не вызовет опрокидывания струи под действием тепловой депрессии, или взрыва горючих газов). Вентиляционный режим шахты и аварийного участка, после эвакуации людей, устанавливается оперативным планом ликвидации аварии в зависимости от обстановки и вида выполняемых работ по тушению пожара.

Разработка тонких и средней мощности пластов производится длинными столбами. Мощные пологие и наклонные пласты менее опасны в

пожарном отношении, чем крутые и разрабатываются наклонными слоями с обрушением. Мощные крутые пласты отрабатываются с закладкой.

6.4.3 Опасные механические факторы

Требования к средствам защиты от механических опасностей приведены в нормативных документах. Общие требования к средствам защиты от механических опасностей приведены в ГОСТ 12.4.011-87, а их классификация — в ГОСТ 12.4.125-83.

Наиболее типичным источником механических негативных факторов являются вращающиеся детали, движущиеся механизмы, незащищённые подвижные элементы производственного оборудования, подъёмно-транспортное оборудование, неправильно-выбранные методы обработки, неправильно выбранное техническое обслуживание, непредвиденные нагрузки на оборудование.

К перечисленным источникам можно добавить непрочность конструкции, связанной с коррозией металла, падение на скользком полу, падение с высоты, технологический транспорт, промышленные роботы.

Различные типы механического движения и действий присущи почти всем машинам, и понимание этого – первый шаг к защите от опасностей, которую они могут представлять.

Существует дополнительная опасность, когда на вращающихся частях машин имеются прорезы, выступающие болты, шпонки, установочные винты.

Несчастные случаи могут происходить также из-за неудовлетворительного содержания проезжей части и свободных проходов в выработках, допуска к эксплуатации машин с неисправностями, перевозки людей в непредназначенных для этих целей машинах и выработках.

Применение самоходных транспортных машин разрешается:

- 1) в шахтах, не опасных по газу и пыли - по всем выработкам шахт;

2) в шахтах I и II категории по газу и опасных по пыли - по откаточным выработкам, омываемым свежей с ту ей воздуха;

3) в шахтах III категории и сверхкатегорных - только по главным откаточным выработкам, омываемым свежей струей воздуха.

Зазоры между крепью выработок и наиболее выступающей частью транспортной машины или размещенным в ней оборудованием принимаются равными 1,2 м со стороны прохода людей и 0,5 м с противоположной стороны.

В выработках должны быть установлены типовые дорожные знаки, регулирующие движение. Освещение выработок должно обеспечивать водителю хорошую видимость на пути движения машины для наблюдения за дорогой, осмотра кровли и боков выработок, заблаговременно различать встречные машины и передвигающихся по выработкам людей.

К управлению самоходными транспортными машинами допускаются лица, прошедшие специальное обучение и получившие удостоверение на право управления машинами.

Периодически водители должны проходить переподготовку со сдачей экзаменов по технике безопасности и по уходу за машинами и эксплуатации.

Каждая самоходная транспортная машина должна иметь единый инвентарный номер, за ней прикрепляется постоянная бригада водителей, в течение смены машина обслуживается одним водителем.

При перевозке материалов, в том числе длинномерных, и оборудования на специальных платформах последние к буксируемой машине присоединяют только при помощи жесткой сцепки.

Габариты размещенного на платформах груза не должны превышать габариты подвижного состава.

Груз необходимо надежно закрепить и разместить на транспортных средствах так, чтобы на всем пути его следования обеспечивались требуемые зазоры в сечении выработок.

Машина должна быть загружена таким образом, чтобы исключалось выпадение из кузова транспортируемых материалов.

Загрузка и разгрузка машины должны производиться только в присутствии водителя.

Максимальная скорость движения груженого самоходного вагона с электрическим приводом и кабельной подачей электроэнергии не должна быть более 7 км/ч, а порожнего - 8 км/ч при движении по выработкам шириной по низу от 3 до 3,8 м.

При большей ширине выработок максимальная скорость движения вагона должна соответствовать паспортным данным. На закруглениях выработок скорость ограничивается до 3 км/ч.

Самоходные транспортные машины с электрическим приводом более безопасны по сравнению с машинами с ДВС. Для каждого типа электрических самоходных машин в технической документации указываются: правила технической эксплуатации, правила контроля и регулировки привода, максимальная нагрузка на двигатель.

Производятся ежемесные и периодические осмотры технического состояния транспортных машин.

Машину, не прошедшую профилактический осмотр, эксплуатировать запрещается.

Особое внимание при осмотрах обращают на устройства, обеспечивающие безопасность работы машин. Результаты осмотра заносят в журнал.

6.5 Выводы по разделу

Организация рабочего места играет большую роль на трудовую деятельность научного работника. Соблюдение условий труда позволяют повысить производительность и эффективность выполняемой работ.

В разделе представлены вредные факторы, влияющие на машиниста оператора рудничного подземного электровоза в ходе его работы, основные меры их профилактики и ликвидации.

Заключение

В результате проведенных теоретических исследований привода тягового рудничного электровоза в квалификационной работе решены задачи, позволяющие реализовать построение ТАД рудничного электровоза на базе серийных образцов без изменения конструкции станины двигателя с пересчетом обмоток на пониженное напряжение 250В, создать систему активного обнаружения и компенсации эффекта буксования при динамических режимах работы.

Произведен обзор способов обнаружения и компенсации эффектов буксования и юза. Определены их достоинства и недостатки. Установлено, что наиболее перспективным направлением является использование функциональных и вычислительных средств ПЧ для диагностики, обнаружения и решения проблем буксования.

Определено, что применения серийного тягового асинхронного привода для подземного рудничного электровоза невозможно без внесения конструктивных изменений. В частности, применение двигателей общепромышленного исполнения не возможно для использования на рельсовом транспорте по причине несоответствия по внешним механическим воздействиям. В результате исследований, по динамике разгона, энергетическим показателям, конструктивным особенностям удалось выделить наиболее перспективный двигатель 4МТКМФП225М6.

Разработано математическое описание электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза, учитывающая все основные нелинейные эффекты типа «люфт» в сцепных устройствах и буксование колесных пар, а так же сухое и вязкое трение в них.

На основе математической модели была построена имитационная модель электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза, которая позволяет:

- реализовать оптимальное управление тягой электровоза, с точки зрения реализации максимальной тяги и исключения режимов буксования колес в условиях плоского движения подвижного состава на подъемах и спусках при изменяемом профиле пути;

- ввести автоматическое ограничение скорости состава при поворотах для исключения возможности схода колесных пар с рельсового пути при учете неровностей и отклонения от идеального расположения

- реализовать компенсацию механических колебаний вызванных наличием упругих связей в сцепных устройствах между вагонами подвижного состава. За счет электромеханического их демпфирования средствами частотно-регулируемых электроприводов.

На основе разработанной математической модели, была построена имитационная модель асинхронного электропривода в программе MatlabSimulink, которая позволяет:

Реализовать способ управления процессом автоматического косвенного обнаружения начала буксования колесной пары электровоза в реальном масштабе времени, для реализации которого введена схема фильтрации сигнала пропорционального моменту электропривода колесной пары при отработке гармонической составляющей сигнала задания момента. и переменного тока.

Результатом исследования выступает разработанная имитационная модель вычисления буксования в режиме реального времени, позволяющая формировать управляющие воздействия на электропривод колесной пары для обеспечения оптимального переходного процесса разгона-торможения по критерию максимальной тяги.

Литература

1. Пармас Я. Ю. Судьба асинхронного привода. // Электрическая тепловая тяга. – 1992. - №1 – с 41-45
2. Анализ эксплуатации шахтных электровозов. / В.Г. Щербаков, М. Б. Бондаренко, И.К. Юренко, Ю. А. Самара // Сб. научн. тр. Всерос. науч.-исслед. и проет.-конструкт. ин-т электровозостр. – Новочеркасск, 1997. - №37. – С. 143 – 147.
3. Синчук О. Н, Удовенко О. А., Чумак В. В. Особенности переходных электромагнитных процессов в тяговом электроприводе с импульсным преобразователем напряжения рудничных аккумуляторных электровозов. // Электротехника, 2004, №6. – С.58-60.
4. Волотковский С. А. Рудничная электровозная тяга. - 4-е изд., пе-рераб. и доп. -М.: Недра, 1981. - 389 с.
5. Системы управления рудничным электровозным транспортом. /О. Н. Синчук, Т. М. Беридзе, Э. С. Гузов и др. - М.: Недра, 1993.- 255 с.
6. Ю.АмонСИ. М. Опытный образец аккумуляторного электровозаАРП-8Т-900. // Уголь Украины. - 2003. - № 10. - С. 14 - 15.
7. П.Довженко В. П., Вакульчик В. Г., Дебелый В. Л. Транзисторные модули для управления приводом рудничных электровозов. //Уголь Украины. - 2003. - № Ю. - С. 16 - 18.
8. Проблемы создания электровозов с асинхронными тяговыми двигателями. / О. Н. Жулев, И. К. Иванченко, А. Л. Курочка, В. П. Янов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика.- 1983.-№ 11.- С. 19-27.
9. Моделирование электромеханической системы электровоза сасинхронным тяговым приводом. / Ю. А. Бахвалов,А. А. Зарифьян, В. Н. Кашников и др.; под ред. Е. М. Плохова -М.: Транспорт, 2001. - 286 с.

10. Носков А. Л. Российское электровозостроение на пороге XXI века.// Электровозостроение: Сб. науч. тр. / ОАО «ВЭЛНИИ». -Новочеркасск, 1999. - Т. 41. - С. 3 - 14.
11. Лещев А. И., Солтус К. П., Усвицкий С. А. Промышленный электровоз НПМ2 с асинхронными тяговыми двигателями. // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения: науч. изд. / ОАО «Всерос. н.-и. и проектно-конструкт. ин-т электровозостроения(ОАО «ВЭЛНИИ»)). - № 1. - Новочеркасск, 2004. -С. 118-125
12. Стасюк В. Н. Электровозный рудничный подземный транспорт. М.: Гос. научн.-техн. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1957. - 592 с.
13. Аккумуляторный рудничный электровоз с тяговым приводом трехфазного тока. // Железные дороги мира. 1997. - № 9. - С. 31—35.
14. Промышленные испытания электровозов с асинхронным приводом на Объединенном Кировском руднике ОАО «Апатит». /Пивнев В. А., Герман А. Г., Леонтьев В. М., Чернигов В. М. //Горное оборудование и электромеханика, 2006. - № 3. - С. 37-38.
15. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями./ Н. А. Ротанов, А. С. Курбасов, Ю. Д. Быков, В. В. Литовченко; Под. ред. Н. А. Ротанова. -М.: Транспорт. - 1991. - 336 с.
16. Бочаров В. М., Бочарова Т. В., Волков Д. В. Компьютерное моделирование запуска асинхронного короткозамкнутого каскада. // Совершенствование технологии, механизации и организации строительства и эксплуатации горнодобывающих предприятий и пути повышения качества подготовки специалистов : сб. науч. ст. / Шахтинский ин-т ЮРГТУ (НПИ). - Новочеркасск : ЮРГТУ, 2004. - С. 69 - 75
17. .Пат. RU 2193979 РФ, МПК 7 B60L9/16, H02P7/74. Способ выравнивания нагрузок асинхронных тяговых двигателей

- электроподвижного состава / А. Ю. Конашинский, Л. Н. Сорин, В. П. Янов: ОАО «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт электровозостроения». — №2001106581/28; опубл. 10.12.2002.
18. Сысоева Н. Я. Испытание изоляции тягового асинхронного двигателя НТА-1200 в процессе изготовления. // Электровозостроение: Сб. науч. тр. / ОАО «ВЭЛНИИ». - Новочеркасск, 2002. - Т. 41.-С. 328-335.
 19. Пискунов С. В., Ворошилов В. С, Поляков В. А. Тяговые асинхронные двигатели для приводов подвижного состава городского электротранспорта. // Электротехника, 2005. - № 5. - С. 32 - 34.
 20. Конашинский А. Ю. Влияние электрических видов коррекции электромеханических характеристик асинхронных тяговых двигателей на их энергетические показатели. // Электровозостроение: Сб. науч. тр. ОАО «Всерос. науч.-исслед. и проектно-конструкт. ин-т электровозостроения» (ОАО «ВЭЛНИИ»). - Новочеркасск, 2000. - Т. 42. С. 228-241. •
 21. Конашинский А. Ю. Особенности работы осевых приводов электроподвижного состава с параллельным питанием асинхронных тяговых двигателей. // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения: науч. изд. / ОАО «Всерос. н.-и. и проектно-конструкт. ин-т электровозостроения (ОАО «ВЭЛНИИ»). - № 55. - Новочеркасск, 2008. - С. 24 - 27.
 22. Технический каталог электродвигателей ВЭМЗ (2010 г.) Владимир, 2010. – 117 с.
 23. Каталог продукции ОАО «Сибэлектромотор», Томск, 2007. – 28 с
 24. Pavel R. Baranov, a, Sergey N. Kladiev, Stanislav V. Borisov and Alexander A. Filipas // Studying Characteristics of Traction Induction Motors

for Variable-speed Mine Electric Locomotive // Urgent Problems of Up-to-Date Mechanical Engineering, 2015 –р. 378 - 384

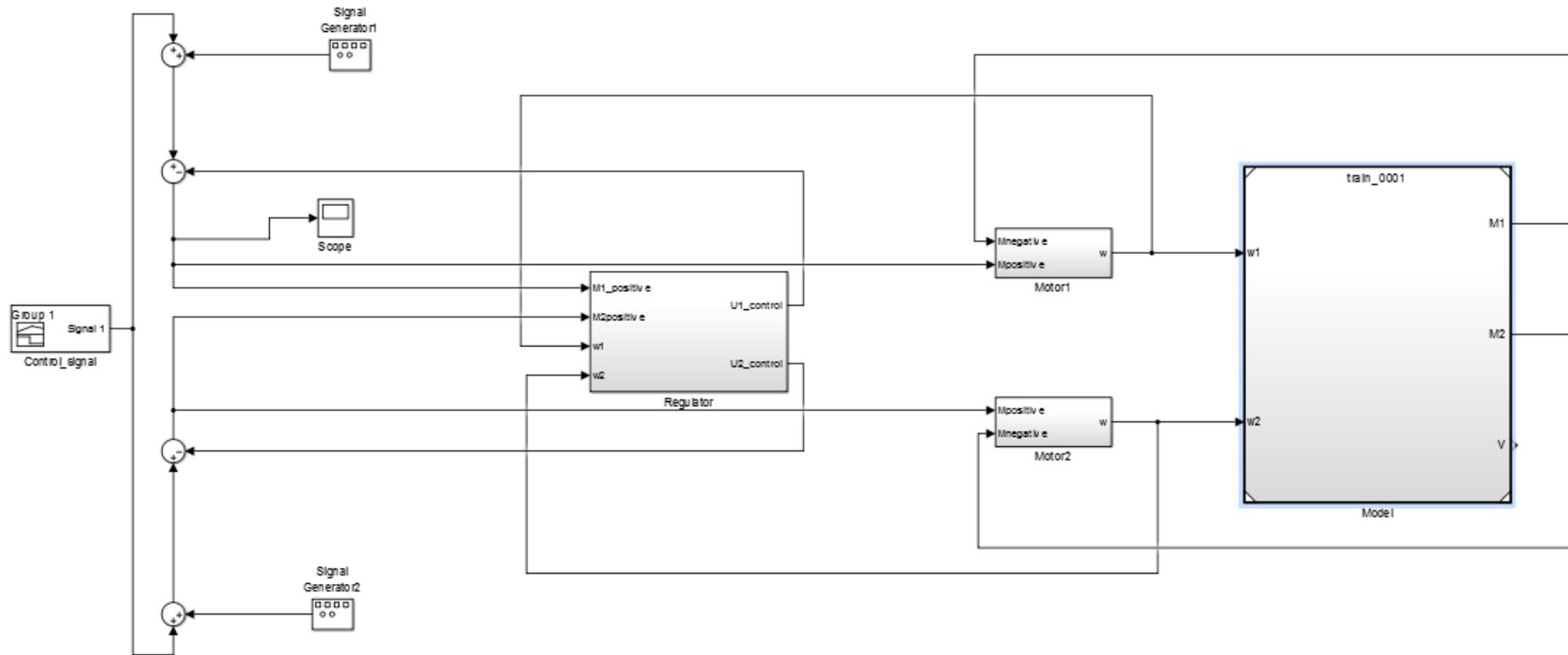
25. Жеребкин Б.В. Система векторного управления тяговым электроприводом рудничного электровоза с использованием аппарата нечеткой логики / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Санкт-Петербург - 2005.
26. Кутовой Ю.Н. Повышение тяговых свойств рудничного электровоза средствами электропривода / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Харьков - 1984.
27. Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Системы управления асинхронных частотно-регулируемых электроприводов. – Томск: Изд. ТПУ, 2011. – 476с.
28. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: Учебное пособие. - СПб.: КОРОНА принт, 2001. - 320 с.
29. Nguyen Phung Quang et al. Vector Control of Three-Phase AC Machines: System development in practice. Berlin: Springer, 2011.
30. Кладиев С. Н., Вильнин А. Д., Пякилля Б. И. Модель электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013 – №. 1(37). – С. 65-68 [2814-2013]
31. Вильнин А.Д., Кладиев С.Н. Структура тягового электропривода рудничного электровоза// Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании: сб. науч. тр. – Одесса, 2011. – Том 2. – С. 80-85.
32. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики: Учебник. В 2-х томах. Т. II: Динамика. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 544 с.

33. А. Оппенгейм, Р. Шафер, Цифровая обработка сигналов. Техносфера, 2006. – 856 с.
34. А.с. 990555 (СССР). Устройство для определения скольжения колесной пары транспортного средства/ В.Б.Клепиков, Ю.Н. Кутовой, Е.С. Гапчинский и др. Оpubл. в Б.И., 1983.
35. Вильнин А. Д., Кладиев С. Н., Пякилля Б. И. Исследование процесса буксирования колёсной пары рудничного электровоза в переходных режимах // Известия Томского политехнического университета. – 2013 – Т. 323 – №. 4. – С. 143-146 [11634-2013]
36. Вильнин А. Д., Кладиев С. Н., Пякилля Б. И. Метод обнаружения явления буксования в тяговом электровозе // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013 – №. 3 (39). – С. 264-266 [9901-2013]
37. Волков, Д. В., Асинхронный частотно-регулируемый привод шахтного электровоза с автоматическим выравниванием нагрузок тяговых двигателей // Новочеркасск - 2010 г.
38. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
39. СНБ 2.04.05-98 Естественное и искусственное освещение. - Минск: Министерство архитектуры и строительства, 1998. - 59 с.
40. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Под ред. Г.М. Кнорринга. Л., "Энергия", 1976.
41. Ус А.Г., Елкин В.Д. Практическое пособие предназначено для курсового и дипломного проектирования для студентов дневной и заочной форм обучения специальностей 1-43 01 03 "Электроснабжение", 1-43 01 07 "Техническая эксплуатация энергооборудования организаций". - Гомель, 2004.
42. ГОСТ 12.2.007.9-93. «БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ. ЧАСТЬ 1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ»;

43. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации (ППБ 01-03), введенные в действие приказом МЧС России от 18.06.2003 № 313.
44. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ "Пожарная безопасность. Общие требования"
45. ГОСТ 12.4.011-87 ССБТ-« Средства защиты работающих. Общие требования»

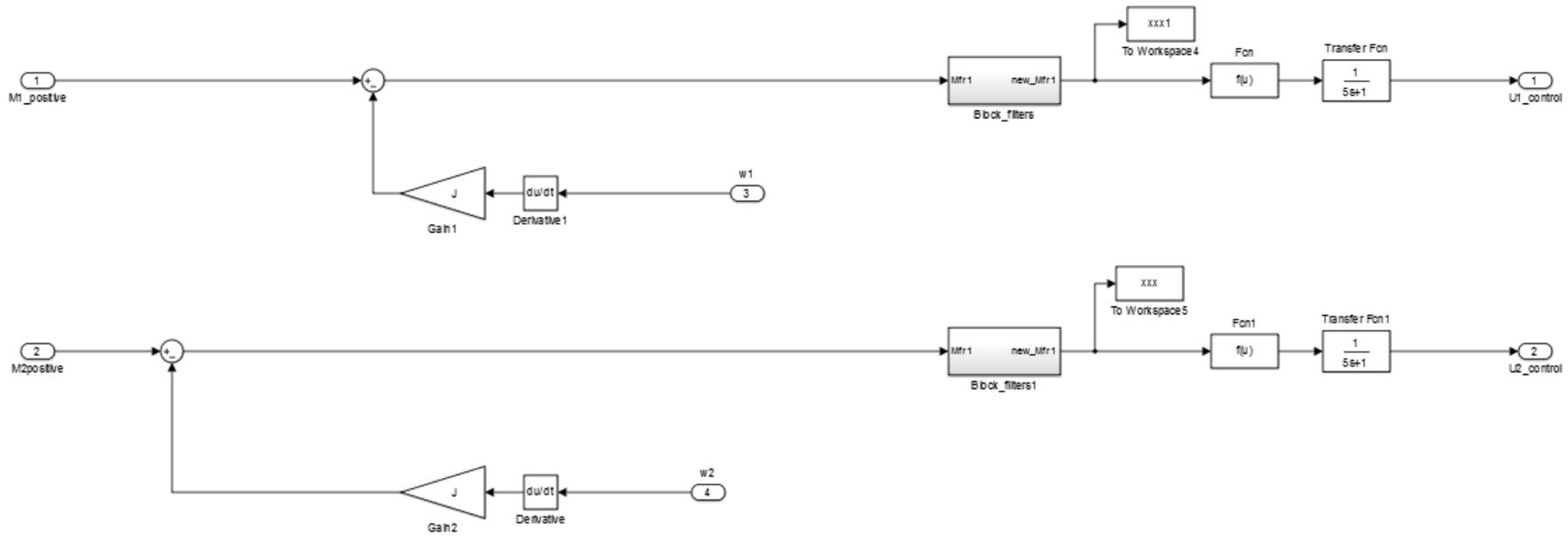
Приложение А.

Структурная схема электромеханической части имитационной модели подвижного состава в Matlab Simulink



Приложение Б

Структурная схема системы модели регулятора по определению эффекта буксования и юза подвижного состава в *Matlab Simulink*



Приложение В

Mathematical model of traction electric drive for mine electric train

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4Б	Изаак Андрей Владимирович		

Консультант кафедры ЭПЭО:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Краснов Иван Юрьевич	Кандидат технических наук		

Консультант – лингвист кафедры ИЯЭИ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Пташкин Александр Сергеевич	Кандидат филологических наук		

Introduction

Underground rail systems play an important role in shaft mining. The rail systems are equipped with DC traction motors which through mechanical transmission drive the wheels of electric locomotives such as the 4KP, 7KPM1, K10, K14M used in the underground mining and transportation of ferrous and nonferrous metals ore. DC electric machines with series excitation are typically the preferred choice as traction motors. The main advantage of this type of motor is that its mechanical characteristics best match the traction characteristics of the locomotive [1]. The locomotive construction industry recognizes the advantages of using such motors and a series of DC traction motors has already been developed for underground mining purposes, for example, the DK-812 , a traction motor which is an analog of the DTH-45 / 27B and the SD-460 series of motors manufactured by «Siemens» [7].

One of the factors hindering the further development of underground rail systems, is the use of DC traction motors with series excitation together with rheostat-contactor control systems which are inherent to known major draw-backs: non-rigid speed-torque characteristics of the motor together with the rheostat-contactor control system complicate the task of maintaining the speed of the locomotive in case that the profile of the track has been changed; brush-collector junction in these traction motors reduces their reliability and complicates the maintenance process during exploitation; there is no effective protection against the slipping of wheels; there is complexity in the implementation of advanced algorithms that control the operating modes of the motor due to the presence of a parametric control system [2].

The application of modern AC electrical drive systems (with induction motor, brushless dc motor, switched inductor motor) as well as digital control of semiconductor power switches in mine locomotives will eliminate the above mentioned drawbacks. However, these AC electric drives have their advantages and disadvantages. One type of AC electric drive that has shown to have more

advantages over others, i.e. simplicity of design, reliability and relatively low cost is electric drive based on an induction motor with squirrel-cage rotor [3].

Problem statement

Purposes of research. We need to develop scientific research based on traction induction motors and select a basic commercialized induction motor with a squirrel-cage rotor to operate in traction drive of the mine electric locomotive.

Problem definition. While maintaining the constructional features of the mine electric locomotive (Fig. 1) the task is to develop a two-motor induction electric drive based on known, commercially manufactured motors.

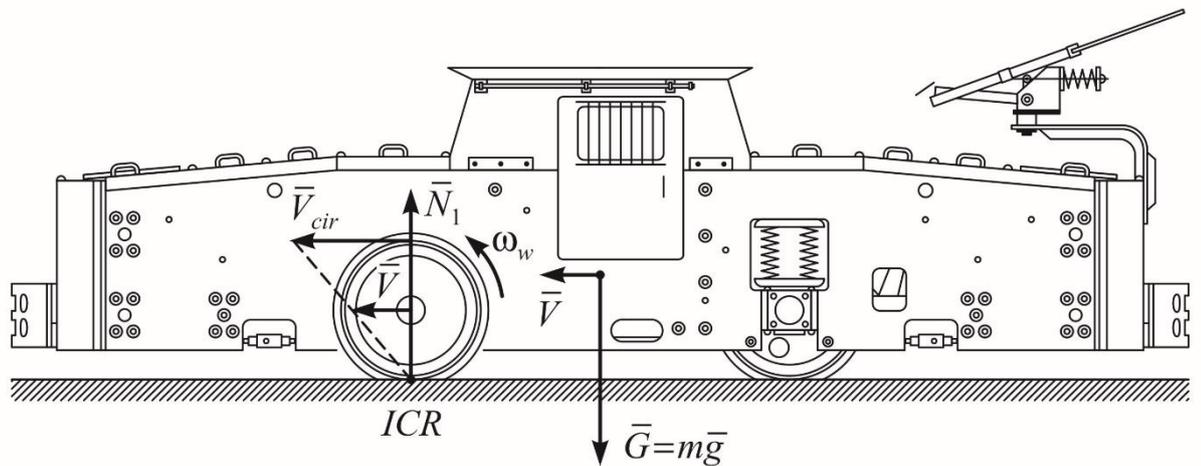


Fig.1. Mine electric locomotive K14

ICR – Instant center of rotation

This approach allows reducing significantly the costs for research and design, prototyping and capital expenditure during mass production of traction induction motors (TIM). It is also necessary to develop a control system for the motors (TIM), one that will raise the performance level of mine locomotives, by increasing safety, reliability, efficiency and functionality.

Initial data for the selection of the motor are large moment of inertia of moving masses and possible short-term overloads taking into account possible changes in the slope of the rail track.

Methods of the problem solution

The major indicators of a traction motor's performance are its starting properties, overload capacity and power indexes. Common industrial general-purpose series motors are the most attractive choice as traction motors in terms of their price and availability. However, the frame design of such motors does not meet the requirements of the track by external mechanical influences. In accordance with Russian regulation GOST 17516.1-90 regulations, general-purpose motors belong to groups M1 and M2 [4], on the other hand the traction motors for locomotives must correspond to groups M26 and M27.

When choosing a motor, in order to make a rational choice it is necessary to determine the modes and conditions in which the electric drive of the locomotive will be operating. The following has been calculated: rated resistance torque on the motor's shaft, total moment of inertia reduced to the rotor of the actuator motor.

An analysis of the available technical references has been carried out. Calculations of rated resistance torque for one motor at maximum load, total moment of inertia of the laden together with the locomotive reduced to the motor shaft, have been carried out. As a result, adequate data for selecting a motor has been acquired. The data characterizes the working environment of the motor i.e. operational conditions and these are: large moment of inertia of the moving masses, possible short-term overloads taking into account possible changes in the slope of the track.

Therefore the most important properties that an electric drive should have are smooth starting and braking characteristics, high overload capacity of the motor, and needless to say, good energy indexes.

In order to compare traction characteristics and applicability of frequency variable control, three induction motors were selected. The motors' technical characteristics are relatively similar to those of the DK-812 traction dc motor, in terms of weight and dimensions. The calculations were based on catalog data for the 5A225M6 general purpose motor, manufactured by Vladimir Electromotor

Plant (JSC VEMP, Vladimir-city, Russia) [5] and crane motors 4MTKM225M6 and 4MTKMF2P 22, manufactured by "Sibelectromotor" , Tomsk, Russia [6].

These motors have three pole pairs and produce maximum torque in this standard dimensions .The motors have good starting properties and they are designed for heavy-duty starting conditions and have a high overloading capacity. The motors are of insulation classes F and H. Moreover, crane motors are suitably designed for movement along a rail track, have a robust housing and a cast terminal box [6].

Difference of crane electric motors 4MTKM225M6 and 4MTKM Φ 2 Π 225M6 is in the following: letter Φ indicates independent ventilation system driven by separate motor; 2 Π specifies use of pure cooper as conducting material for the squirrel-cage rotor winding. Therefore the rotor winding is manufactured by welding. Unlike motor 4MTKM225M6 and general purpose induction motor 5A225M6, whose rotor windings have been produced by molding from an aluminum alloy with various feedings or without them.

Undoubtedly, the development of TIMs based on the motors that are already in commercial production will significantly reduce the time input, financial input and the price of the product during the development of new products.

Results

The calculated parameters of equivalent circuit of the induction motors that were selected for analysis show a relatively good match with the manufacturer's motor winding data

The speed-torque characteristics by direct motor start for the following motors have been obtained: general purpose motor – 5A225M6, crane motor – 4MTKM225M6 (Fig. 2, 3), and operational zone of the speed-torque curve of the variable speed crane motor 4MTKMF2P225M6 (Fig. 4) has been also obtained. Because of the use of the frequency converter, the parameters of the operational zone of these characteristics are considered the most important. According to

figures 2-4, the most rigid natural speed-torque characteristic is that of the variable-speed crane motor 4MTKMFP225M6.

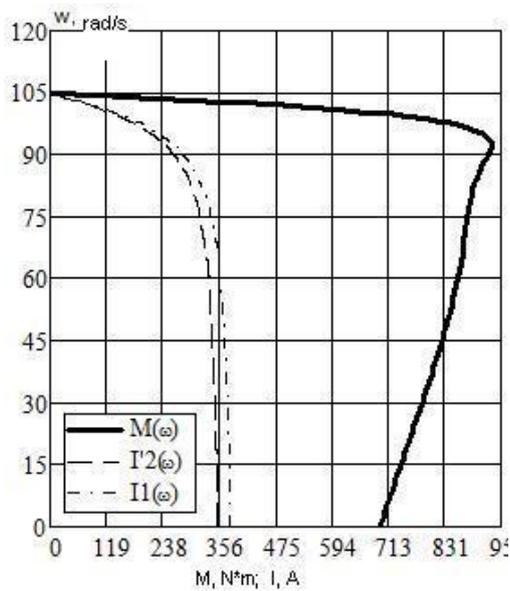


Fig.2. Speed-torque and speed-current curves for the general purpose induction motor – 5A225M6

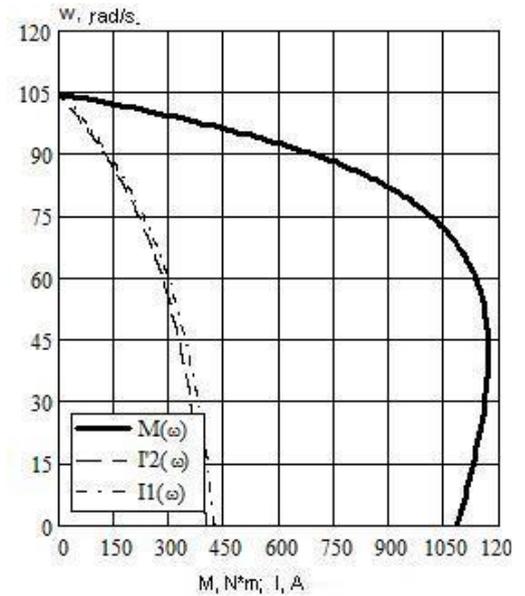


Fig.3. Speed-torque and speed-current curves for the crane induction motor – 4MTKM225M6

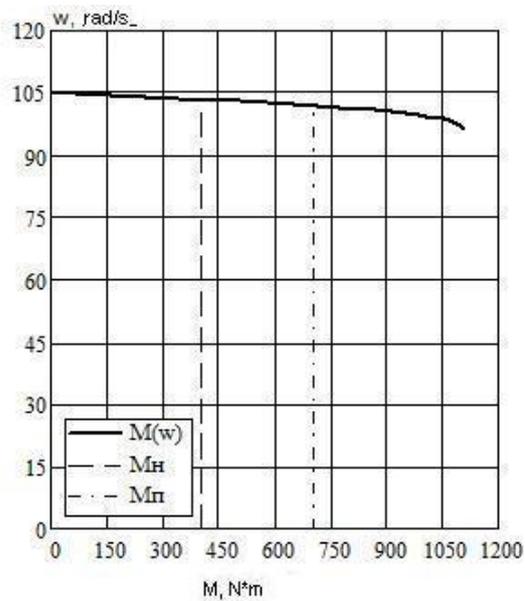


Fig.4. The operational zone of the speed-torque curve of the variable speed crane motor 4MTKMFP225M6

For an analysis of the characteristics of the selected motors a simulation model of the induction motors in rotating reference frame has been developed in Simulink MatLab. The features of this model are: time and level quantization; two current sensors with ADC; speed sensor; vector control of the electric motors.

Speed-torque characteristics of the motors for direct starting and for operation of motor fed by frequency converter have been obtained.

The dynamic characteristics of the three selected motors at starting, when accelerating a loaded locomotive with twelve carts of laden with a total mass of 134 tons to a speed of 4 km/h (shown in Fig. 5-7). As seen from the graphs, the smallest transition time is that of the variable-speed crane motor 4MTKMFP225M6.

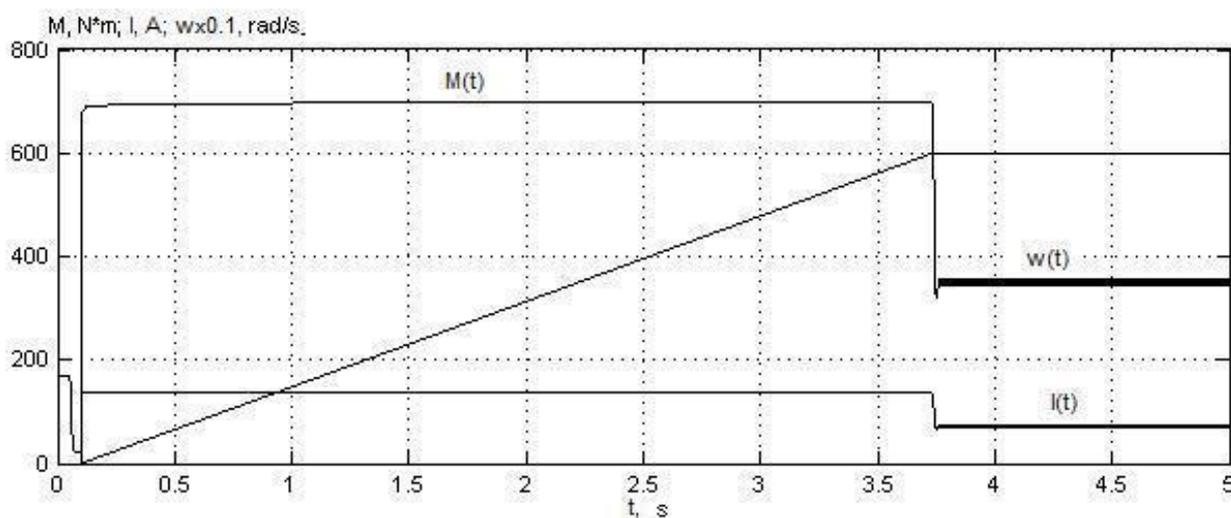


Fig.5. Dynamic characteristics for starting of general-purpose induction motor 5A225M6 fed by frequency converter

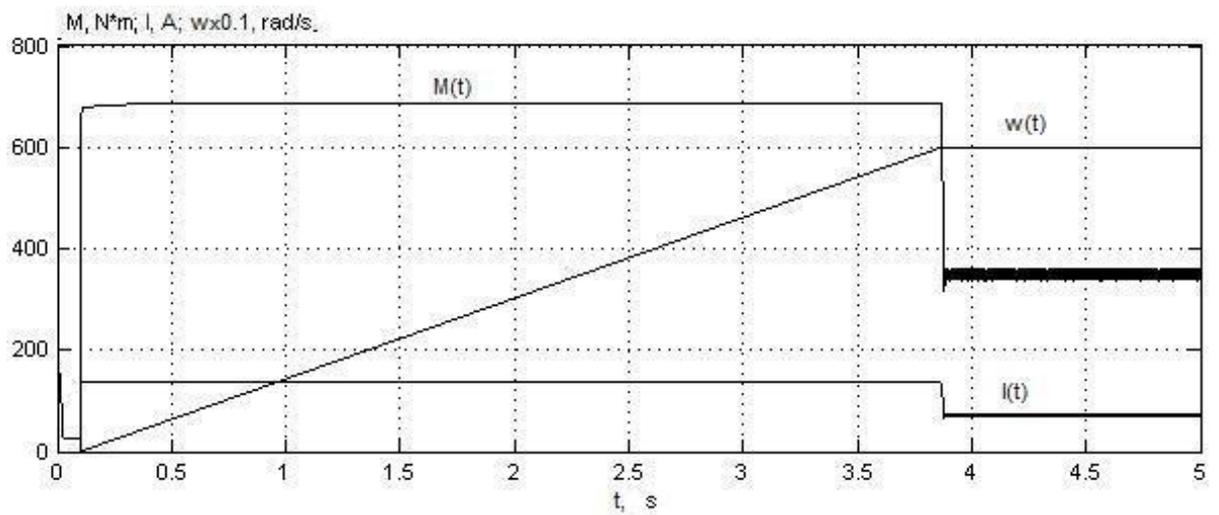


Fig.6. Dynamic characteristics for starting of crane induction motor 4MTKM225M6 fed by frequency converter

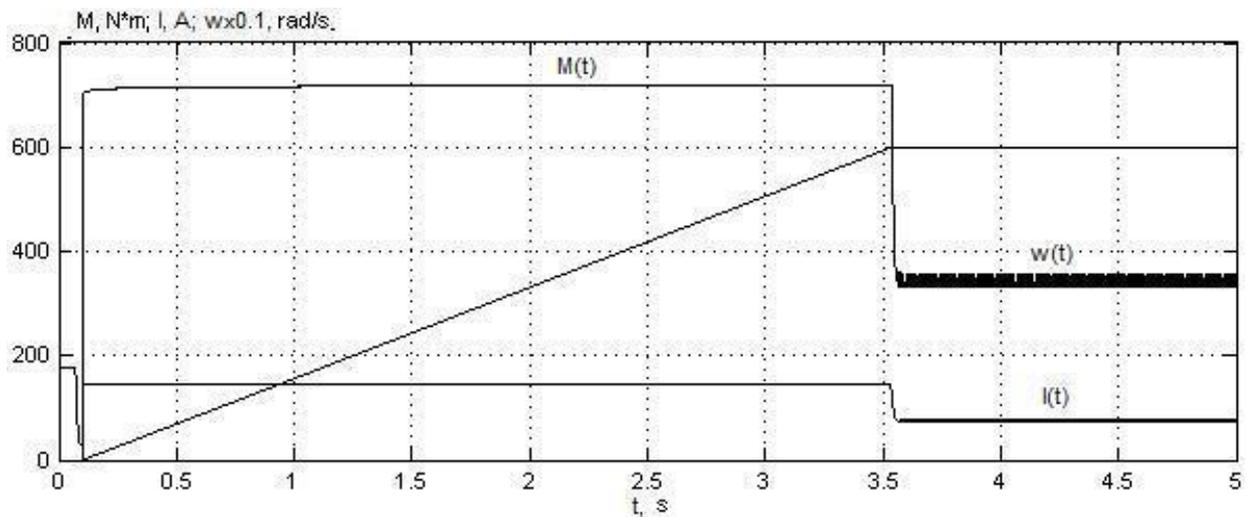


Fig.7. Dynamic characteristics for starting of the variable-speed induction motor 4MTKMFP225M6 fed by frequency converter

Results

An analysis of the designs of the motors has been carried out. In accordance with GOST 17516.1-90 regulations, the level of external mechanical forces during operation on the rail track is quite high and the design of general-purpose motor 5A225M6 does not provide the required level of reliability.

The analysis of the obtained results in dynamics of acceleration, energy performance and design features allowed to identify the 4MTKMFP225M6 as the most promising motor design.

At the second stage of the research the task of adapting the stator windings of the motor to the power line voltage used for mine transport, as well as to developing effective control systems and protection from wheel slippage during acceleration and skidding when braking

Problem of skidding and braking

Introduction

The skidding problem of vehicle motion, in our case this is the problem of mine electric locomotive motion, have a big practical importance. The solution of this problem helps to get optimal energy consumption and reduce the time which locomotive spends in acceleration and braking. First of all, moment of skidding's appearance had to be determined. The skidding is a difference between linear locomotive speed and wheel pair speed. The complexity of this problem is due to inability of direct linear speed measurement because of mine's work conditions. Therefore the possibility of skidding indirect determination was founded with help of special filtration scheme. Further the proposed way of determination will be considered in detail.

Method of slipping speed reduce

In skidding problem solution laid use of computer simulation which is based on the mathematical model which was proposed in work [8]. The main properties of electric locomotive which relates with its dynamics were taken into consideration. In this part and further the skidding compensation method for a first wheel pair will be considered, the second wheel pair is considered only in locomotive linear speed calculation i.e. its influence on the locomotive dynamics is taken into consideration. Because of practical view which is caused by inability of direct torque measurement, the indirect torque measurement unit is introduced into computer model

$$M_1(t) = M_r(t) + A \sin(\omega t) - J_1 \varepsilon(t),$$

where $M_r(t)$ – reference torque, J_1 – first wheel pair moment of inertia, $\varepsilon(t)$ – wheel angular acceleration, A – magnitude of harmonic searching signal, ω – harmonic signal frequency.

The value of friction motor will be used in the future for skidding effect determination. The choice of harmonic signal magnitude and frequency relates to electric machine properties and capabilities which is used in locomotive, also it is relates to load of locomotive composition. The properties of harmonic signal have to be related with passband frequency of electric machine.

On the above, the slipping velocity $U_1(t)$ which causes the skidding effect will have the following mathematical form

$$U_1(t) = \left(\int_0^t M_r(\tau) + A \sin(\omega \tau) - M_1(\tau) d\tau \right) \frac{R}{J_1} - V_{ml}(t),$$

where R – wheel radius, $V_{ml}(t)$ – mine electric locomotive speed.

The first wheel pair torque which relates to slipping velocity [2,6] has the form

$$M_1(t) = M_r(t) - J_1 \varepsilon(t) = \left(\Phi_0 \left(1 - \exp\left(\frac{-2U_1(t)}{U_0}\right) \right) \right) \frac{mR}{k_r},$$

where Φ_0 –clutch coefficient, m – locomotive mass, k_r – reducer gear coefficient.

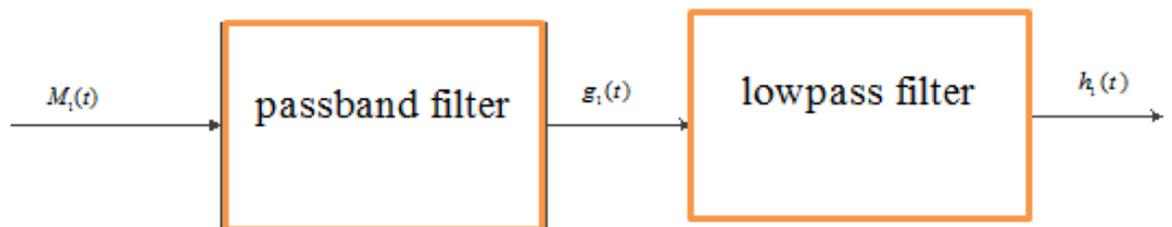


Fig 8 - filter configuration

For slipping value detection uses combination of filters and calculated signal of electromagnetic torque [10]. This combination consists of serial connection between passband filter with transfer function.

$$W_{pf}(p) = \frac{kp}{p^2 + ap + b},$$

and lowpass filter which has transfer function as following

$$W_{lpf}(p) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_c} p + 1},$$

where cutoff frequency ω_c is chosen in such way that all high frequencies which are caused by differentiation operation are gone. In filtration scheme uses absolute value calculation unit which simplifies analysis of obtained signal. This scheme gives the possibility to get the component which is related to skidding effect. This component is used for compensation signal creation which has the form

$$U(t) = k_i \int e(t) dt + k_p e(t),$$

$$h(t) = \int_0^t M_1(t-\tau) w(\tau) d\tau = \int_0^t \left(\frac{2\Phi_0 m R}{kU_0} \frac{dU_1(t-\tau)}{dt} \exp\left(\frac{-2U_1(t-\tau)}{U_0}\right) \right) \left(\frac{k \exp(-p_1 \tau)}{2p_1 + a} + \frac{k \exp(-p_2 \tau)}{2p_2 + a} \right) d\tau,$$

where k_i – integral coefficient, k_p – proportional coefficient, $e = f(t) - f_d$, where $f(t)$ – output signal of filtration scheme, f_d – desired value of $f(t)$.

The coefficients k_i , k_p are chosen from standard methods for PI regulators. The desired value of filter's scheme output was chosen from computer simulation and equal to 0,4. When value of filter's scheme output is bigger than f_d , it says that skidding began otherwise it says that skidding doesn't exist.

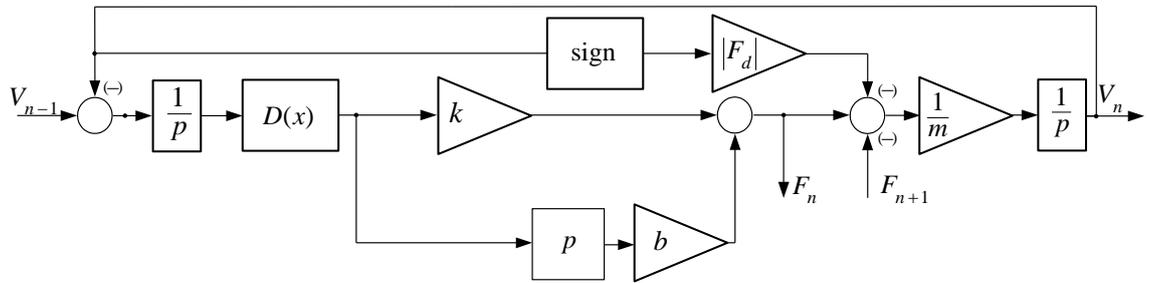


Fig 9 internal circuit of Wagon

The obtained control signal goes to compensate dynamic torque of electric machine [11],

$$M_e = M_d(t) + A \sin(\omega t) - U(t),$$

which helps to decrease electric machine dynamic torque and reduce the slipping speed.

Computer simulation results

The computer model is based on the data about mine electric locomotive which parameters are introduced further.

TABLE I. Mine electric locomotive parameters

Moment of inertia of motor, kg·m	0,89
Wheel radius, m	0,34
Reducer number	14,2
Locomotive mass, kg	14000
Locomotive mass with composition, kg	10000
Wagon length, m	4

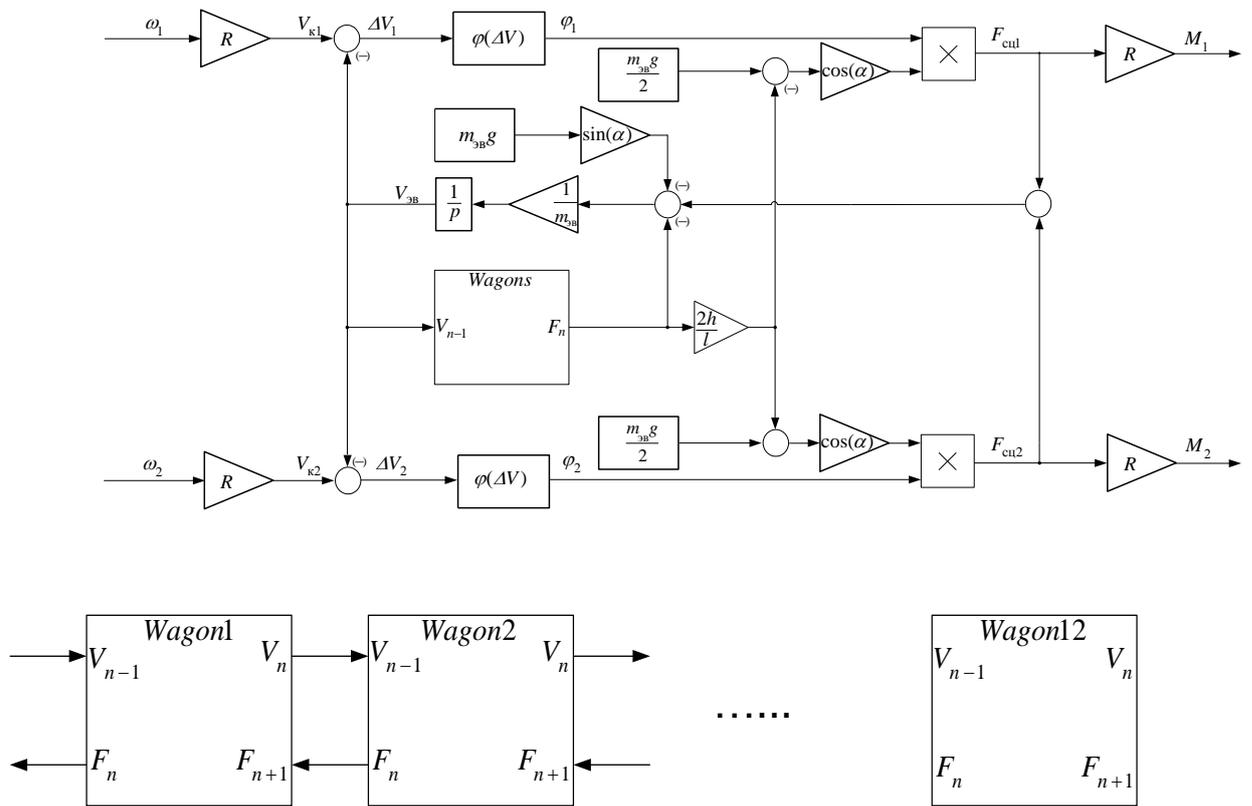


Fig 9 block scheme of mechanical model

Further the plots of values which have a big importance for research are introduced. All plots show the behavior of the system when skidding effect presents.

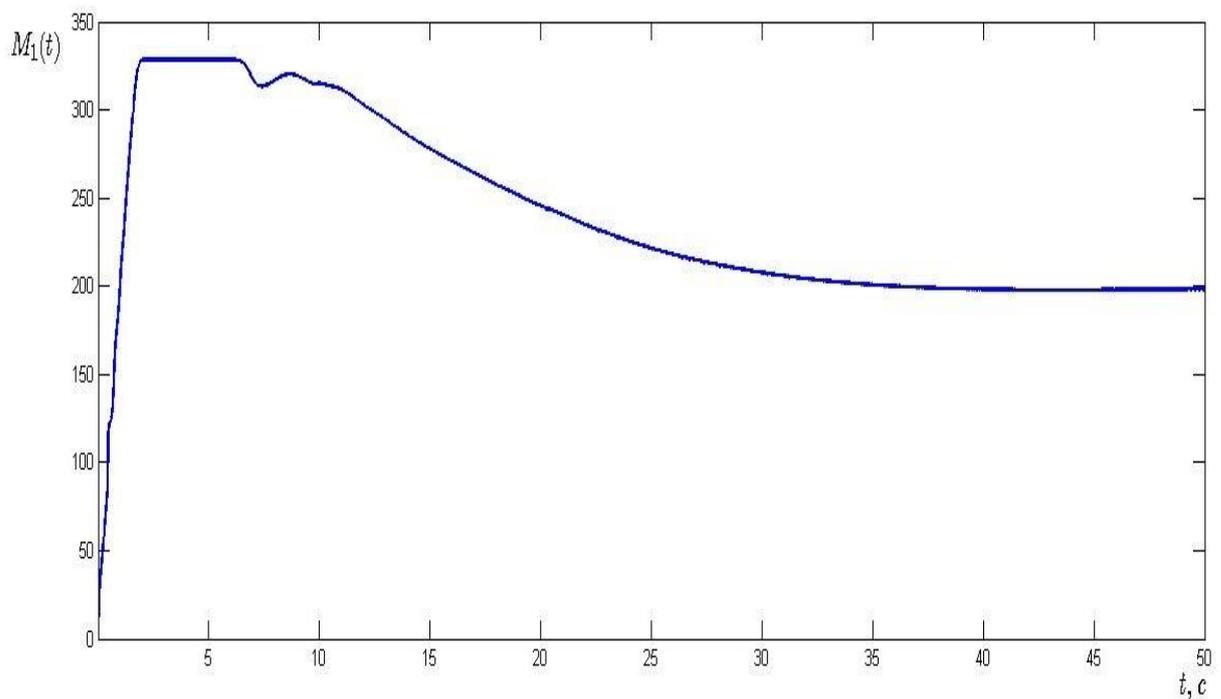


Fig 8 Friction torque of wheel pair

From the above plots may be seen that skidding effect is compensated by proposed method. The filtration scheme output doesn't go from desired value f_d .

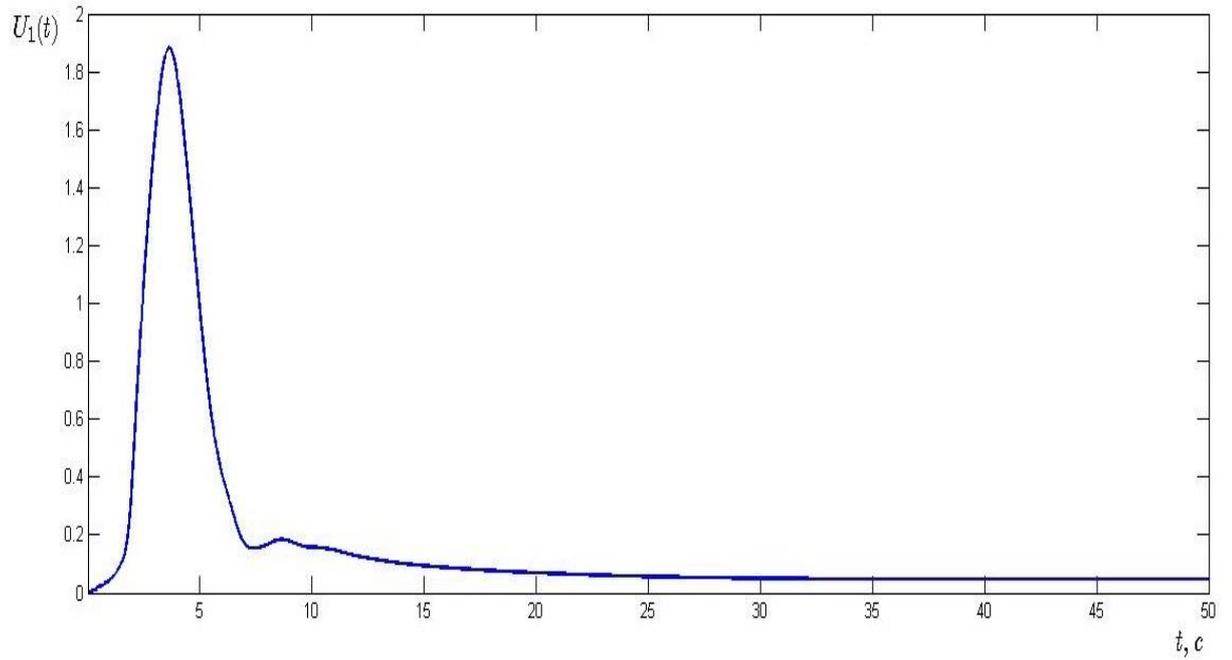


Fig 9 Slipping speed value for first wheel pair

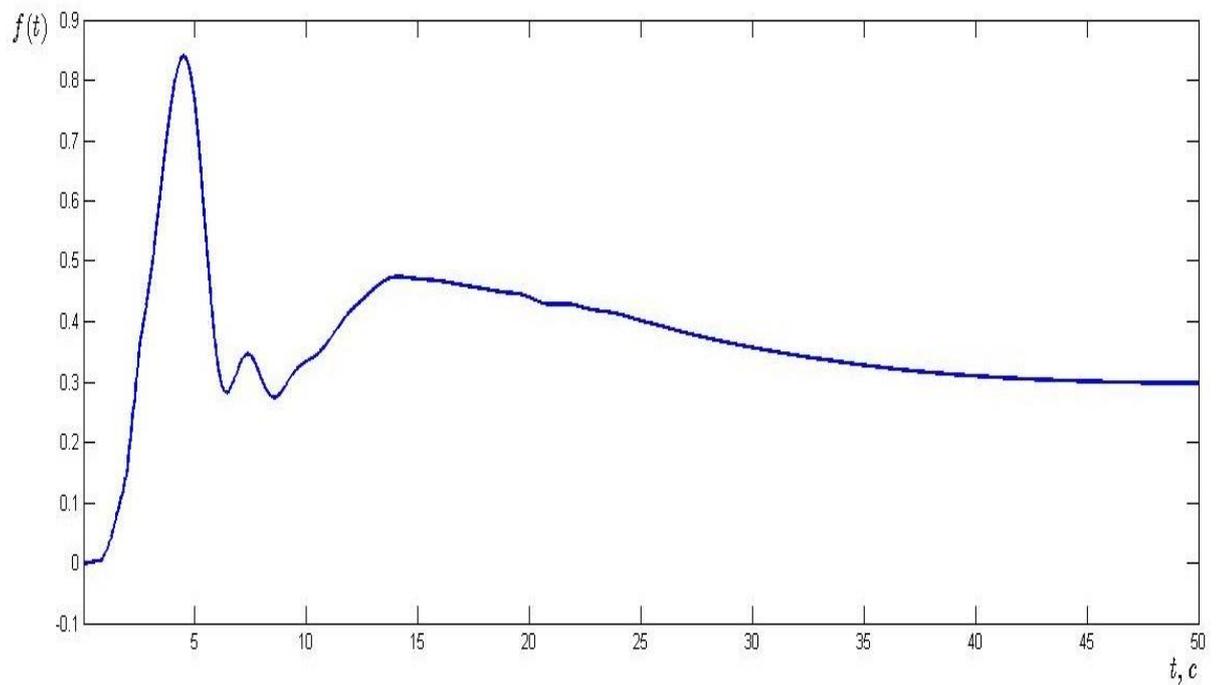


Fig 10 - Filtration scheme output

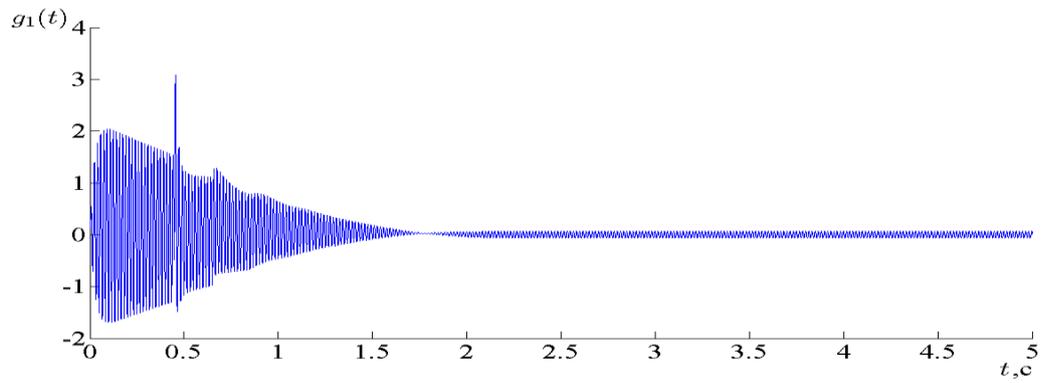


Fig 11. Lowpas filter out - $g_1(t)$.

further as the text goes, The graph shows the output of the passband filter $h_1(t)$, and job response $g_1(t)$.

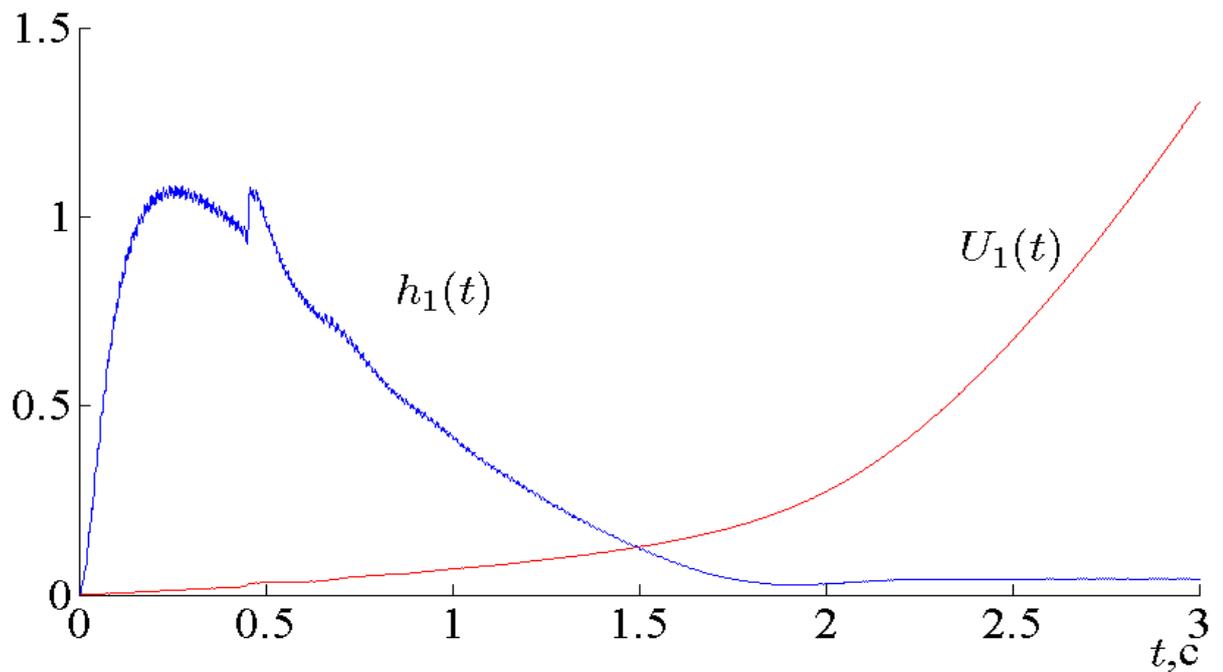


Fig 12. graph $U_1(t), h_1(t)$.

Also, there are graphs at the entrance at first increases (acceleration mode), and then decreases the driving torque (braking mode).

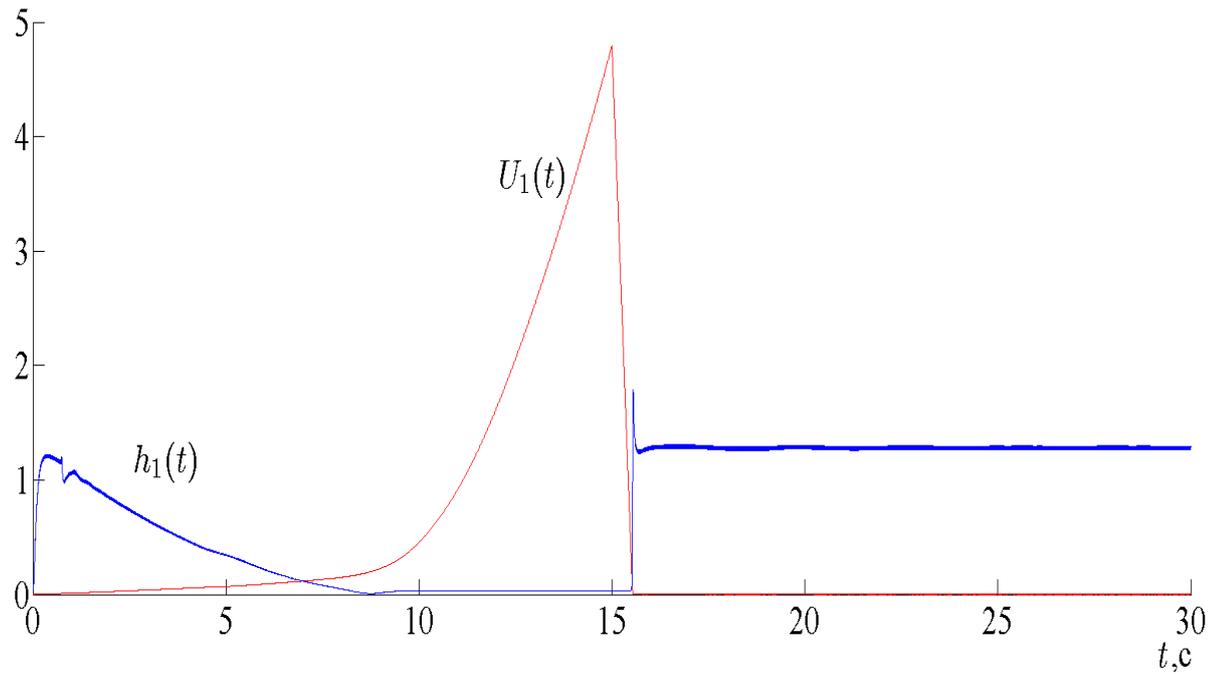


Fig. 15 - graph $U_1(t), h_1(t)$.

torque can be expressed as:

$$M_s(t) = M_{\max} - M_{\max} \exp(-kt),$$

where k – is coefficient responsible for the rate of increase of the function;

M_{\max} – torque rating; t – duration of the experiment

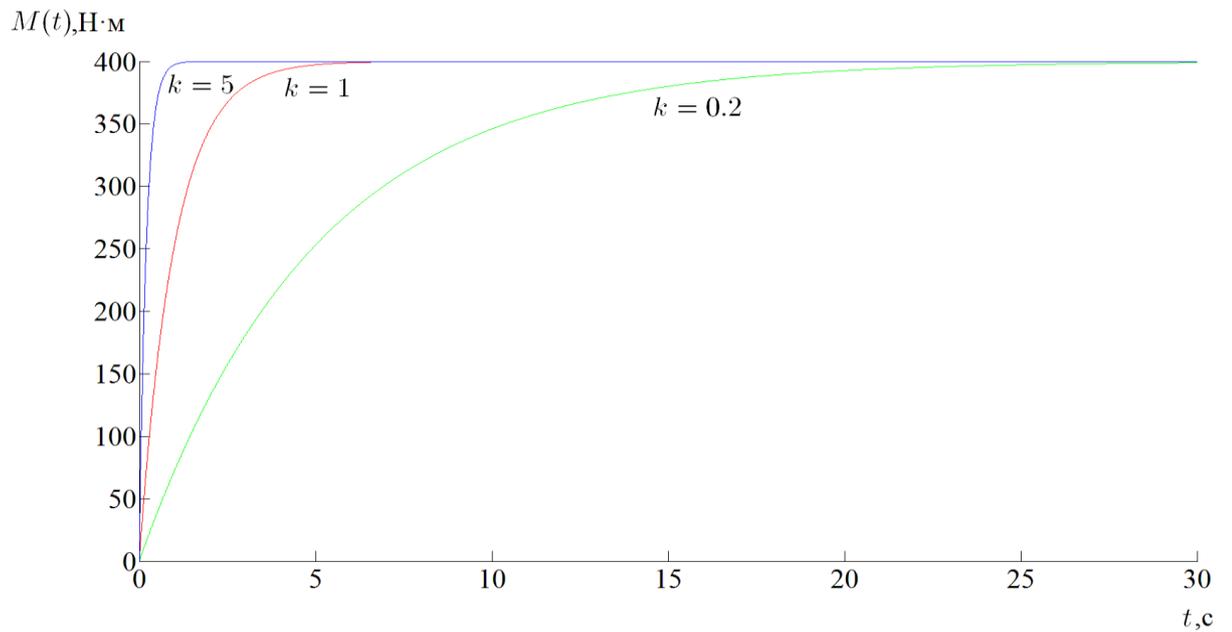


Fig 16 -. signal kind of various tasks (k).

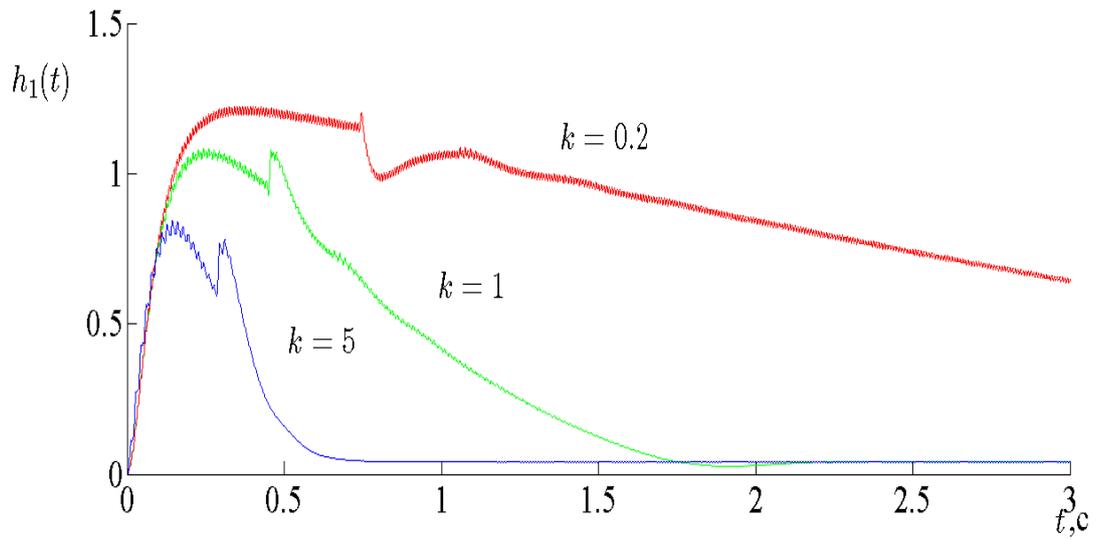


Fig 17. Lowpas filter output of various tasks (k).

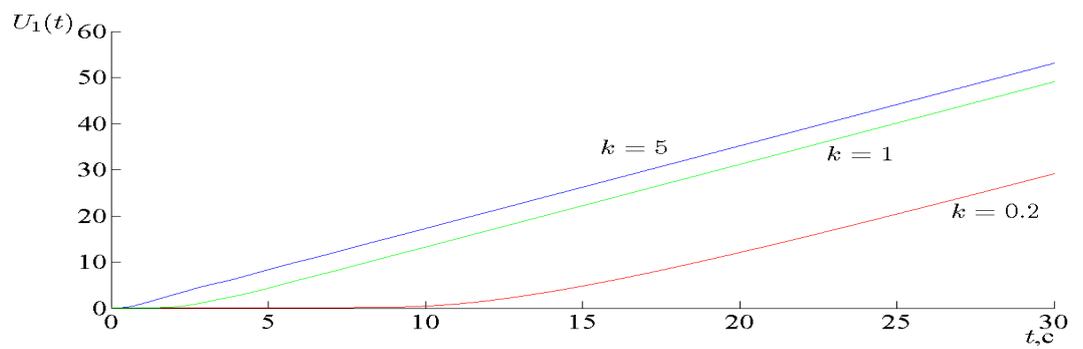


Fig 18. Filtration scheme output of various tasks (k).

Conclusions

The method for skidding effect compensation based on indirect skidding effect determination with help of special filtration scheme was presented in this final degree work.

The analysis of torque-speed characteristics of induction motors has been carried out in order to choose the base design for variable speed traction electric drives of underground mine electric locomotives. For constant dimensions of active part of series-produced electric motors the influence of the diverse conductivity's materials for manufacturing the squirrel-cage rotor on speed-torque and speed-current characteristics. The designs are compared according to speed-up dynamics, power indexes and key design features of the studied electric motors

The analysis of the motor designs has been carried out. In accordance with GOST 17516.1-90 regulations, the level of external mechanical forces during operation on the rail track is quite high and the design of general-purpose motor 5A225M6 does not provide the required level of reliability.

The analysis of the obtained results in dynamics of acceleration, energy performance and design features allowed to identify the 4MTKMFP225M6 as the most promising motor design.

Upon the obtained data the control scheme with PI regulator was created. The conducted computer experiments confirm the efficiency of the method mentioned above. The solution of this problem helped to get optimal energy consumption and time reduction spent by a locomotive for acceleration and braking. The synthesized algorithms have been tested on a test bench. As a result a patent for utility model was received.