

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Вильнин Александр Даниилович

ДВУХДВИГАТЕЛЬНЫЙ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЯГОВЫЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОДЗЕМНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА
С ЭФФЕКТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
к.т.н., доцент Кладиев С.Н.

Томск - 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Краткий анализ состояния рудничной электровозной тяги	14
1.1. Общая характеристика условий работы тяговых электроприводов рудничных электровозов.....	14
1.2. Особенности применения асинхронного привода	20
2. Разработка математической и имитационной модели тягового асинхронного двигателя для частотно-регулируемого электропривода.....	30
2.1. Принципы построения асинхронного тягового электропривода шахтного рудничного электровоза.....	30
2.1.1 Режимы работы тягового электропривода	30
2.1.2. Обоснование выбора мощности тягового асинхронного привода ...	32
2.2. Обоснование выбора и проверка адекватности расчетных параметров двигателя	36
2.3. Анализ свойств электродвигателей для подземной тяги	38
2.4. Теоретическое обоснование обеспечения предельно достижимого момента ТАД	43
2.5. Разработка имитационной модели ТАД	46
2.6. Исследования свойств ТАД на имитационной модели	50
2.7. Результаты исследований.....	55
3. Математическая модель электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза.....	60
3.1. Принцип формирования тягового усилия частотно-регулируемым асинхронным электроприводом рудничного электровоза	60
3.1.1. Взаимодействие ведущей колесной пары электровоза с рельсами..	60
3.1.2. Метод определения явления буксования подземного электровоза .	63

3.1.3. Результаты моделирования.....	65
3.1.4. Коэффициент сцепления колёс с рельсами рудничных электровозов	72
3.1.5. Разработка способа управления тяговым электроприводом рудничных электровозов	81
3.2. Модель электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза.....	84
3.3. Разработка структуры системы управления двухдвигательным тяговым электроприводом	91
3.4. Имитационная модель электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза	96
4. Исследование режимов работы тягового электропривода рудничного электровоза и экспериментальная проверка алгоритма управления	107
4.1. Моделирование работы алгоритма управления тяговым электроприводом постоянного и переменного тока для предотвращения буксования и юза электровоза	107
4.1.1. Тяговый электропривод постоянного тока	107
4.1.2. Тяговый электропривод переменного тока.....	120
4.1.3. Имитационная модель подвижного состава с реализацией первой колесной пары на постоянном токе и второй колесной пары на переменном токе	124
4.2. Моделирование работы алгоритма управления тяговым электроприводом переменного тока для предотвращения буксования и юза электровоза с составом.....	128
4.2.1. Движение состава на подъем.....	128
4.2.2. Движение на спуск	135
4.3. Опытная экспериментальная установка.....	140

4.3.1. Описание экспериментального стенда	140
4.3.2. Система управления.....	143
4.3.3. Экспериментальные исследования.....	144
Заключение.....	151
Список использованной литературы.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ А	164
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	166

Введение

Актуальность темы

Использование электрифицированного транспорта при добыче полезных ископаемых в условиях подземных шахтных разработок всегда имело важное технологическое значение. Наряду с использованием различных транспортеров, подъемных устройств широкое применение в шахтах и рудниках находит рельсовый подземный транспорт. Главное преимущество рельсового подземного электротранспорта является высокая эффективность транспортировки полезных ископаемых на большие расстояния, что особенно актуально для рудных и угольных месторождений, добыча в которых невозможна открытым способом из-за большой глубины залегания.

Производительность откатки грузов, безопасность эксплуатации, надежность оборудования определяется, прежде всего, свойствами подвижного состава, состоящего из локомотива и вагонеток различных конструкций с донной выгрузкой и выгрузкой методом опрокидывания.

Электрическими приводами оснащены электровозы с питанием от аккумуляторных батарей или подземной контактной сети. В угольных шахтах из-за угрозы взрыва метана используются аккумуляторные электровозы, а в рудных шахтах используются электровозы с контактной тягой.

Подвижной состав из локомотива и грузовых тележек подвержен неуправляемому буксованию при разгоне и юзу при торможении из-за случайного характера изменения коэффициента сцепления ведущих колес локомотива с рельсами, что приводит к неэффективному использованию энергии при движении состава, снижает среднюю скорость откатки грузов, значительному износу контактирующих поверхностей обечайки колес и рельсов. Электроприводом, который обеспечивает управляемый режим разгона и торможения состава, оснащен только электровоз. Тележки, в отличие от вагонов наземного рельсового транспорта, не имеют тормозных устройств.

Поэтому дальнейшее развитие систем управления тяговых электроприводов подземных электровозов и достижение энергоэффективных режимов работы, является актуальной технической задачей.

Степень разработанности проблемы

Исследования принципов работы различных типов тягового электропривода, методов управления скоростью двухдвигательных электроприводов колесных пар, режимов работы подвижного состава в зависимости от сложных горно-геологических условий и изменения нагрузки, нашли отражение во многих научных трудах. Значительный вклад в данную область исследований внесли известные российские и зарубежные ученые Власьевский С.В., Волотовский С.А., Волков Д.В., Жеребкин Б.В., Кордаков В.Н., Куто-вой Ю.Н., Оатт Г.П., Пивняк Г.Г., Рапопорт О.Л., Ренгевич А.А., Рысьев А.В., Спиваковский А.О., В.Д. Тулупов, Цукублин А.Б., В.Г. Шорин, П.С. Шахтарь и др. Работы в области тягового электропривода выполнялись и продолжают вестись в Южно-Российском государственном техническом университете (ЮРГТУ (НПИ)), Всероссийском научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте электровозостроения (ОАО «ВЭЛНИИ» г. Новочеркасск), ООО «Производственной компании «Новочеркасский электровозостроительный завод»» (НЭВЗ), Московском государственном университете путей сообщения (МИИТ), Национальном минерально-сырьевом университете «Горный» (Горный университет г. Санкт-Петербург), Пермском национальном исследовательском политехническом университете (ПНИПУ), Омском государственном университете путей сообщения (ОмГУПС), Донецком национальном техническом университете, ПАО «Электромашина» (г. Харьков), ООО «ПАПАЛЕО» (г. Санкт-Петербург), ЧАО ПКФ «Амплитуда» (г. Донецк), концерне «Титан» (г. Самара), ООО «Шахтные электрические системы» (г. Пермь) и в других организациях.

Однако к настоящему времени не решен ряд вопросов, связанных с применением двухдвигательного частотно-регулируемого тягового электропривода подземного рудничного электровоза, позволяющего обеспечить эффективный расход энергии для создания необходимых тяговых усилий в динамических режимах разгона и торможения подвижного состава (электро-воза и груженых вагонов) с большой механической инерционностью, а также с поддержание постоянства скорости движения состава при внешних возмущениях (изменении профиля пути и коэффициента сцепления контактных поверхностей «колесо - рельс»). Решению задач разработки эффективного управления движением электровоза, инвариантного к внешним возмущениям с учётом большой механической инерции подвижного состава и поддержания необходимого уровня тяги при откатке грузов в руднике, посвящена эта работа.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является двухдвигательный тяговый асинхронный электропривод подземного рельсового транспорта.

Предмет исследования – структура, элементы силовой цепи и алгоритмы эффективного управления двухдвигательным ТАЭП.

Цель и задачи диссертационного исследования

Цель диссертационной работы является повышение тяговых характеристик двухдвигательного электропривода путём формирования и распределения тяговых усилий его колёсных пар в динамических и статических режимах работы по величине скорости скольжения контактной поверхности ведущего колеса относительно рельсового пути.

Идея работы заключается в разработке алгоритма управления двухдвигательным частотно-регулируемым тяговым электроприводом подземного электровоза, позволяющего автоматически перераспределять и выравнивать усилия между приводами передней и задней колёсных пар, что практически

исключает буксование и юз ведущих колёс относительно рельсового пути и повышает энергоэффективность тяговых электроприводов.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить литературно-патентный обзор тягового электропривода в области современного подземного рельсового электротранспорта для анализа наиболее прогрессивных технических достижений, основных проблем функционирования и способов их решения.

2. Обосновать теоретически применение для частотно-регулируемого тягового электропривода специального асинхронного двигателя с повышенным моментом и обмоткой статора по схеме треугольник, рассчитанной на пониженное фазное напряжение питания 178 В.

3. Разработать имитационную модель расчёта параметров схемы замещения тягового асинхронного двигателя на пониженное напряжение питания.

4. Разработать обобщённую математическую модель электромеханической системы подвижного состава с подземным электровозом и принцип формирования тягового усилия двухдвигательного частотно-регулируемого асинхронного электропривода.

5. Провести синтез алгоритма управления двухдвигательным тяговым электроприводом подземного электровоза, реализующего перераспределение тяговых усилий колёсных пар в зависимости от режима движения подвижного состава по критерию постоянства скорости скольжения.

6. Провести исследования режимов работы двухдвигательного тягового частотно-регулируемого асинхронного электропривода и регулируемого электропривода постоянного тока на имитационной модели в программной среде *Sim Power Systems* и *Simulink MatLab* в различных режимах работы.

Научная новизна работы

1. Разработана уточнённая имитационная модель двухдвигательного тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза, отличающаяся от известных тем, что в ней учтены: способ управления его движением на основе контроля скорости скольжения обода ведущего колеса относительно рельсового пути.

2. Верифицированы аналитические зависимости коэффициента сцепления от скорости скольжения, влияющие на общее тяговое усилие; реализованы пересчет параметров схемы замещения тягового частотно-управляемого асинхронного электродвигателя на пониженное напряжение питания и оригинальный блок реактивной и активной нагрузки, как элемент общей системы.

3. Разработана имитационная модель механической системы подвижного состава, отличающаяся от известных тем, что в ней учтены распределение масс локомотива и вагонов по длине состава и параметры сцепных устройств локомотива и вагонов, которая позволяет исследовать воздействия этих распределённых масс на формирование тяговых моментов.

4. Предложен алгоритм управления на базе прямого и косвенного вычисления скорости скольжения, позволяющий формировать тяговые моменты электроприводов обеих колесных пар в зависимости от скорости скольжения.

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы заключается в том, что автором:

1. Предложены технические решения, позволяющие применить специальный тяговый асинхронный двигатель рудничного электровоза, рассчитанной на пониженное напряжение питания и обеспечения при этом величины электромагнитного момента как у двигателя со стандартным напряжением статорных обмоток.

2. Разработаны программные продукты для исследования тягового электропривода постоянного и переменного тока рудничного электровоза,

учитывающие наличие ограничений по коэффициенту сцепления, динамического перераспределения нагрузки между передней и задней осями при реализации тяги, люфты и упругости сцепок состава в системе *Simulink MatLab*.

3. Предложено для осуществления компенсации отклонения напряжения до 30% в троллейной линии постоянного тока 250В техническое решение по использованию устройства последовательной вольтодобавки.

4. Проведены практические исследования условий возникновения буксования и юза колес относительно рельсового пути и распределения тяговых моментов ведущих колёсных пар за счёт действия усилий в сцепке в зависимости от разгона, торможения состава и от профиля пути.

Практическая ценность подтверждена патентом на полезную модель №141267 РФ.

Методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы математического моделирования, системного анализа, структурного анализа и синтеза систем автоматического управления, исследования на уточнённой имитационной модели.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Основные научные результаты, полученные соискателем, соответствуют пункту 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления» паспорта специальности 05.03.03 – Электротехнические комплексы и системы.

На защиту выносятся

1. Техническое обоснование применения специального тягового асинхронного двигателя с пониженным напряжением питания статорной обмотки и необходимой величиной электромагнитного момента.

2. Обобщенная математическая модель подвижного состава с двухдвигательным тяговым асинхронным электроприводом с регулятором скорости скольжения, учитывающая режимы работы подвижного состава.

3. Алгоритм определения скорости скольжения ведущих колес электровоза относительно рельсового пути за счет использования цифровой фильтрации сигналов тока статора тяговых асинхронных двигателей ведущих колесных пар, и способ активного обнаружения и компенсации эффекта буксования при ускорении и замедлении состава.

4. Способ управления двухдвигательным тяговым асинхронным электроприводом рудничного электровоза и структура системы управления для его реализации при различных режимах работы подвижного состава.

Достоверность результатов

Подтверждается корректностью применяемого математического аппарата, сходимостью результатов вычислительных экспериментов и теоретического анализа и апробацией разработанных алгоритмов на основе установленных функциональных зависимостей в виде полезных моделей, зарегистрированных в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: III Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы атомной энергетики и промышленности» (ФТПАЭП-2005), Томск, 2005 г.; XIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ-2007), Томск, 2007 г.; III Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (ЭПЭ-2007), Томск, 2007 г.; XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (СТТ-2008), Томск, 2008 г.; XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и

технологии» (СТТ-2009), Томск, 2009 г.; Юбилейной научно-технической конференции «Автоматизация и управление в промышленности, науке и образовании», Томск, 2009 г.; XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ–2011), Томск, 2011 г.; Международной научно-практической конференции «Современные проблемы и их пути решения в науке, транспорте, производстве образовании 2011», Украина, Одесса, 2011 г.; VI Международной научно-технической конференция «Электромеханические преобразователи энергии», Томск, 2013 г.; Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири», Иркутск, 2013 г.; VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014, Саранск, 2014 г.; The 2nd IEEE International Youth Forum «Smart Grids» МАТЕС Web of Conferences (МАТЕС-2014), Россия, Томск, 2014 г.; научном семинаре кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения, Россия, Хабаровск, 27.10.2017.

Публикации

Основное содержание работы опубликовано в 19 печатных трудах в том числе: 4 статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК России, 2 статьи индексируемая в международных системах цитирования Scopus и 3 патентах РФ на полезную модель.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты экспериментальных исследований и теоретического анализа использованы при проектировании системы управления движением на подземном рельсовом транспорте ООО ПКФ «Мехатроника-Про» и учебном процессе Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики ТПУ.

Личный вклад автора

В научных работах, написанных лично и в соавторстве, автору принадлежат основные идеи и разработка вопросов по математической модели тягового асинхронного электропривода подземного электровоза; предложена идея способа обнаружения режимов колесных пар подземного электровоза, предложена структура цифровой системы управления двухдвигательных тяговым электроприводом, проведение и анализ экспериментов на лабораторном стенде.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы из 85 наименований. Работа изложена на 171 страницах машинописного текста и содержит 78 рисунков и 4 таблицы.

1. Краткий анализ состояния рудничной электровозной тяги

1.1. Общая характеристика условий работы тяговых электроприводов рудничных электровозов

Исторически сложилось так, что электрический привод на рельсовом подземном транспорте появился только в начале XX века. Если ранее для движения подземных вагонеток использовалась исключительно сила человека и животных, с успехами электротехники стало возможным применять электрический привод. Со временем происходило совершенствование конструкции грузовых тележек и локомотива, но основной принцип управления движения оставался практически неизменным до 70–90 годов XX века.

Электротехнический комплекс подземного рельсового транспорта использовал, в основном реостатно-регулируемый привод постоянного тока на базе тягового двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением. Мягкие механические характеристики такого двигателя обеспечивали уверенный пуск электровоза при достаточно большом пусковом моменте и токе якоря двигателя. За счет насыщения магнитной системы тягового двигателя, магнитный поток в воздушном зазоре при больших величинах тока якоря практически не менялся, и механическая характеристика при нагрузках значительно превышающих номинальную нагрузку имела характер близкий к линейному. Величина пускового тока и момента не превышала номинальные значения более чем в 3–3,5 раза. Мягкие механические характеристики ДПТ последовательного возбуждения хорошо сочетались с характеристиками приводного механизма и облегчали настройку двухдвигательных электроприводов ведущих колесных пар электровоза.

Основными причинами повсеместного использования привода постоянного тока на базе ДПТ постоянного тока на подземном транспорте были следующие:

- теоретические предпосылки использования данного вида тягового электропривода и опыт его применения в городском электротранспорте, железнодорожном междугороднем сообщении основаны на едином принципе его конструкции, что способствовало чрезвычайно широкому его распространению;

- система электроснабжения постоянного тока, основанная на применении тяговых выпрямительных подстанций, оказалась наиболее пригодной в эксплуатации для приводов рельсового транспорта [1];

- в качестве источника электроэнергии для подземного транспорта использовались либо троллейные линии постоянного тока с подвижным контактом для съема энергии, когда требования к искробезопасности в шахтах были невысоки или, при наличии взрывоопасных газов в подземных выработках, использовались аккумуляторные батареи большой емкости, что предопределило использование двигателей постоянного тока последовательного возбуждения и ограничило использование других видов электродвигателей.

Недостатки релейно-контакторного тягового привода постоянного тока состоят из недостатков самого двигателя и его системы управления:

- низкая стабильность скорости за счет малой жесткости характеристик;
- потери электроэнергии на пускорегулирующих реостатах и контакторных элементах;

- низкая надежность и сложность технического обслуживания щеточно-коллекторного узла;

- морально устаревшая реостатно-контакторная система управления с ограниченным количеством позиций контроллера управления при пуске и движении, приводит к тому, что в моменты начала движения при достаточно хорошем сцеплении колеса с рельсами происходят значительные рывки тягового усилия, что приводит к ударам в сцепных устройствах состава, а при недостаточном сцеплении колес с рельсами приводит к явлению эффекта буксования, что приводит к неполному использованию сцепной массы локомотива [2] и неэффективному использованию электроэнергии.

Следует отметить, недостатки механического контроллера управления движением:

- сложность реализации предупреждения о наступлении возможных аварийных режимов работы системы, вследствие некорректных действий машиниста (резкое переключение позиций контроллера на участке разгона, резкое торможение противовключением) [3];

- сложность определения текущего состояния системы при управлении движением с точки зрения появления режимов буксования при разгоне и юза при торможении;

- сложность настройки системы управления движения при стыковке 2-х и более электровозов.

- обеспечение стабильности малой скорости движения тягового привода затруднено из-за большого шага позиций контроллера движения, фактически контроллер работает в режиме релейного регулятора между позициями минимального хода и останова, что особенно ярко проявляется при движении пустого состава, либо груженого при большом уклоне пути.

- большие физические усилия на рукоятке управления при манипуляциях, что является фактором повышения риска нарушения правил техники безопасности (ТБ), по причине высокой утомляемости машиниста.

В настоящее время совершенствование конструкции подземных электровозов идет по направлению исключения перечисленных технических недостатков

В электровозах угольных шахт АРВ7, АРВ8 [4] используется безреостатная система управления тяговым двигателем с разделением аккумуляторной батареи на модули в сочетании с ослаблением магнитного потока двигателя. Применение такого подхода позволяет сократить потери энергии в добавочных сопротивлениях обмотки якоря тягового двигателя (пусковой реостат используется на первой ступени управления для ограничения рывка в момент трогания состава. При переключении позиций силового контроллера возможны рывки и толчки момента и тока. При регулировании скорости тягового

двигателя вверх от основной ослаблением магнитного потока наблюдается снижение КПД.

В локомотивах последнего поколения для повышения безопасности электрооборудования при эксплуатации используется ряд дополнительных блокировок исключающих пуск двигателя, например в электровозе К14 [4]. Нулевая защита с автоматическим включением механического тормоза осуществляется при потере питающего напряжения, отсутствия машиниста на рабочем месте, открытых дверях при помощи установки дополнительных силовых контакторов в цепях электропитания.

Известно применение микропроцессорных блоков управления движением тягового привода постоянного тока. Для реализации ограничений в контурах управления скоростью и током может использоваться силовой контроллер движения с сервоприводом с заданным алгоритмом для ограничения свободы действия машиниста и блокировки ряда некорректных команд. Однако проблемы буксования и юза в данном решении не рассматриваются.

Известна системе ТЭРА-1М разработанная в 80-х годах XX века, где использовано импульсное управление тяговыми двигателями постоянного тока на тиристорных ключах с искусственной коммутацией, что позволило устранить большую часть перечисленных недостатков. В данной системе реализованы простейшие законы управления, способные обеспечить плавный пуск и регулирование скорости движения, оптимальные по энергоэффективности, по сравнению с реостатно-контакторным способом управления.

Электропривод постоянного тока с импульсным регулированием напряжения ТЭРА-1М также имеет недостатки:

- основным недостатком тиристорно-импульсного управления двигателя постоянного тока сложность и громоздкость выполнения узлов искусственной коммутации и, как следствие, - низкая надежность и ограниченный частотный диапазон.
- использование зарубежной элементной базы сделало невозможным массовое применение данной системы.

Микроконтроллерная система управления на основе цифрового сигнального процессора (*DSP*) может реализовывать различные алгоритмы управления для исключения аварийных режимов работы, блокировок и автоматических переключений для облегчения работы машиниста-оператора, без изменения аппаратной части [5].

Сегодня имеются разработки, выполненные на отечественной и зарубежной элементной базе реализующие импульсное управление ДПТ [6–10] на базе *IGBT* транзисторов. Такие системы электропривода на полностью управляемых ключах реализуют значительно больший спектр задач управления в динамических и статических режимах работы с ограничением регулируемых координат, дополнительных защит двигателя тем самым минимизируя воздействие человека-оператора на процесс управление движением.

Особенностью современных микропроцессорных систем управления тяговым приводом постоянного тока подземного рельсового транспорта является то, что исполнительным двигателем остается ДПТ последовательного возбуждения с присущими ему достоинствами и недостатками, главным из которых является наличие коллекторно-щеточного узла.

С целью улучшения эксплуатационных свойств и повышения надежности подземного транспорта для шахтной откатки грузов ведутся работы по замене двигателей постоянного тока на другие типы тяговых электрических машин [11].

Простой и надежный асинхронный двигатель с фазным ротором с питанием от тяговой трехфазной сети переменного тока пытались применять с самого первого появления электровозной тяги на магистральных железных дорогах. Скорость такого электровоза регулировалась за счет введения в цепь фазного ротора жидкостного реостата. Широкое применение данного двигателя на электровозах не случилось из-за больших технологических проблем изготовления такой конструкции.

Отсутствие элементной базы для регулирования скорости тяговых асинхронных двигателей, позволяющей использовать присущие им технологические преимущества по сравнению с двигателями постоянного тока последовательного возбуждения, объясняет ограниченное применения тяговых асинхронных двигателей на железнодорожном транспорте, особенно подземном.

Именно поэтому, с 70-х годов XX века развитие тягового асинхронного двигателя для железнодорожного транспорта доходило до экспериментальных конструкций, но дальше стендовых не шло. При этом рассматривалась возможность применения трехфазных и двухфазных тяговых асинхронных двигателей с питанием от тяговой сети однофазного переменного тока посредством промежуточного силового электромеханического преобразователя. Естественно такие конструкции привода были достаточно сложны для производства.

В середине 70-х годов XX века осуществлены первые попытки внедрения силовой электроники на базе не полностью управляемых тиристорных ключей. В нашей стране велись разработки магистральных электровозов с асинхронным тяговым двигателем и статическим полупроводниковым преобразователем. В этот период были созданы опытные образцы электровозов ВЛ80А и ВЛ86Ф [12].

Сложное и громоздкое исполнение силовой части преобразователей частоты на полууправляемых тиристорах с аналоговыми системами управления, не позволили широко использовать частотно-регулируемый асинхронный электропривод на электротранспорте. Основными недостатками таких систем являлись низкая частота переключения тиристоров из-за необходимости использования схем с искусственной коммутацией и большого времени на восстановление запирающих свойств. Даже появление цифровых микропроцессорных систем управления не позволяло реализовать управление преобразователям частоты для питания асинхронных двигателей из-за их низкого быстродействия.

Только в 90-х годах XX века появились интеллектуальные силовые модули на *IGBT*, *MOSFET*, *GTO* ключах со встроенными драйверами управления и защиты, а качестве систем цифрового управления – использовались одноплатные контроллеры на базе высокопроизводительных *DSP* процессоров позволяющие управлять двигателями в режиме реального времени. Это привело к повышению КПД и массогабаритных показателей частотных преобразователей.

Все это открыло перспективы использования асинхронных двигателей на магистральном, городском и подземном электротранспорте [13–15].

Одновременно с началом применения тяговых асинхронных двигателей на магистральных железных дорогах, шла его доработка для использования в подземных горных выработках. Разработка конструкции тягового асинхронного двигателя для аккумуляторного электровоза описана в [16, 17].

1.2. Особенности применения асинхронного привода

Большое количество публикаций, описывающих возможность внедрения в шахтных электровозах асинхронного электрического привода говорит об актуальности данной проблемы. Достаточно интенсивный физический износ техники подземного транспорта одновременно с моральным устареванием систем управления движения, требует постоянного совершенствования систем тягового электропривода. Основными недостатками присущими существующим системам электропривода постоянного тока являются:

- низкая надежность и, как следствие, достаточно высокие эксплуатационные расходы;
- сложившаяся практика реализации систем управления тяговыми двигателями, приводит к повышенным потерям энергии в динамических режимах работы и требует применения алгоритма отработки возмущающих воздействий при изменении режимов движения;

- технологическое отставание отечественного подземного рельсового транспорта от уровня зарубежных компаний-производителей оборудования для подземных работ.

Новые подходы к проектированию систем управления подземного рельсового транспорта на основе современной элементной базы позволяют в настоящее время создать новый отечественный тяговый привод, соответствующий современным требованиям.

Проблемы, которые характерны для подземного рельсового транспорта, в основном уже практически полностью решены на магистральных железных дорогах. Основными причинами, сдерживающими применения технических решений, достигнутых на магистральном железнодорожном транспорте, являются:

- невозможность использования общепромышленного электрооборудования для подземных работ, связанная со специфическими требованиями механической прочности корпусов двигателей и преобразователей, а также с агрессивной внешней средой (запыленность, влажность, взрывоопасная окружающая среда, большие ударные вибрационные воздействия);

- ограниченные габариты в сочетании с требованиями высокой удельной мощности тяговых двигателей для подземного транспорта

- дополнительные ограничения, связанные с использованием специального преобразователя частоты переменного тока, в связи с особенностью системы электроснабжения подземных выработок, а именно использовании постоянного напряжения питания до 250 В.

Перечисленные проблемы затрудняют применение регулируемого асинхронного привода в шахтном электротранспорте

Остаются не решенными и малоисследованными задачи:

1. Согласование характеристик двухдвигательного асинхронного тягового электропривода в динамических режимах работы.

2. Выбор тяговой характеристики асинхронных двигателей обеспечивающей энергоэффективные режимы работы в составе двухдвигательного электропривода.
3. Исключение неэффективных режимов буксования и юза средствами электропривода при отработке переходных процессов, вызванных внешними возмущающими факторами (изменение режимов тяги, изменение сцепных свойств колес и рельсами, изменение рельефа).

Современные микропроцессорные системы управления частотно-регулируемых электроприводов способны сформировать тяговые характеристики с требуемыми параметрами преимущественно программными средствами. В рассматриваемом случае вид тяговой характеристики зависит от режимов работы электромеханической системы, определяющиеся степенью нагруженной подвижного состава, рельефом пути, загазованности и запыленности в подземных выработках, а также возможное изменение коэффициента трения качения.

Задача выравнивания нагрузок двухдвигательного тягового электропривода актуальна и для частотного управления подземным электровозом.

1. Индивидуальный электропривод для каждой колесной пары.

При этом получается независимое регулирование скорости каждой из двух осей подземного электровоза с индивидуальным заданием закона движения. Реализуется замкнутая система управления каждым электроприводом с обратными связями по току, скорости и положению. Применение энергоэффективных алгоритмов управления способствует снижению энергопотребления в динамических переходных режимах, вызванных внешними возмущающими воздействиями на технологический процесс подземной откатки грузов.

Вместе с тем имеет место усложнение системы управления двухдвигательным тяговым электроприводом. Но при использовании мехатронного тягового модуля с интегрированным инвертором этот недостаток становится менее существенным.

В магистральных электровозах [18] также рассматривались решения задачи выравнивания нагрузок между индивидуальными электроприводами колесных пар. Поэтому известны системы автоматического выравнивания нагрузок приводов постоянного и переменного тока колесных пар с индивидуальными векторными системами управления.

2. Групповое управление предусматривает использование общего преобразователя частоты (инвертора) на оба ведущих тяговых двигателя при возможной реализации только скалярного управления. Это позволит улучшить массогабаритные показатели системы за счет общего преобразователя и упростит систему управления.

Такая система будет эффективно работать только при адаптивной настройке гибких перекрестных обратных связей. Но такая настройка трудно реализуема. Недостатками такого подхода являются:

- последовательное управление двухдвигательным приводом от одного преобразователя частоты;
- увеличение пульсаций тока из-за нерационального использования возможностей асинхронных двигателей;
- усложнение как конструкции преобразователя частоты (потребуется дополнительный мост инвертора), так и увеличение нагрузки на микропроцессорную систему управления;
- невозможность реализовать способ индивидуального управления напряжением двух двигателей, которые получают электроэнергию от одного источника;
- ухудшается теплоотвод с повышением мощности преобразователя.

3. Применение специальных двигателей для выравнивания нагрузки между тяговыми асинхронными двигателями [19–21]. Для сложения механических характеристик используются специальные соединения обмоток, имеющих дополнительные выводы средних точек фазных обмоток, как например, в схеме двойная звезда.

Недостатком подобного подхода является увеличение габаритных размеров двигателя как у и двух-трех скоростных асинхронных двигателей с регулированием переключением количества пар полюсов.

Технические проблемы применения асинхронных двигателей для подземной электровозной тяги:

1. Размещение тягового асинхронного двигателя в габаритах тягового ДПТ последовательного возбуждения и сопряжение с редуктором колесной пары.

2. Увеличение частоты вращения тягового двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при работе на холостом ходу происходит естественным образом за счет уменьшения тока нагрузки. При частотном векторном управлении тяговым асинхронным двигателем работу во второй зоне управления с ослаблением поля необходимо реализовать программно с помощью микропроцессорной системы управления.

3. Необходимость специального тягового асинхронного двигателя, что было подробно рассмотрено выше.

Перечисленные проблемы применения тягового асинхронного электропривода подземного транспорта для наземного электрического и магистрального транспорта в основном решены.

В настоящее время активно ведутся работы по созданию тяговых асинхронных двигателей для трамваев и троллейбусов. В литературе [22] представлена вся номенклатура тяговых двигателей переменного тока разработанных для городского электротранспорта взамен коллекторных двигателей постоянного тока. Главным отличием этих двигателей от общепромышленных двигателей является вибро-ударопрочный корпус с дополнительными опорами для удобства крепления. Возможность установки на этих двигателях датчиков углового положения ротора и других датчиков обратной связи, необходимых для реализации режимов плавного трогания, разгона и торможения в замкнутых системах управления.

Анализ литературных источников о состоянии электроприводов на подземном и наземном электротранспорте показывает, что для подземных электровозов необходимо применять двигатель специального исполнения.

Структура электропривода шахтного асинхронного тягового электропривода выглядит следующим образом: контактная сеть постоянного тока 250 В – автономный инвертор напряжения – тяговый АД.

Фактором, который ограничивает применение асинхронного электропривода на подземном транспорте, является источник питания на постоянном токе. Контактная сеть с троллейным токосъемом имеет стандартное напряжение 250 В постоянного тока и как исключение для специальных электровозов с повышенной сцепной массой [4], применяют напряжение 550 В, величина которого превышает максимально допустимое значение 250 В из условия обеспечения электробезопасности на подавляющем большинстве действующих шахт. Основными недостатками контактной сети помимо опасности взрыва из-за искрообразования являются скачки напряжения сети вплоть до полного исчезновения при отрыве токосъемника от контактного провода. Данный факт объясняется износом контактной поверхности токосъемника, а также и невозможностью обеспечить высокую надежность контактного устройства, особенно в тяжелых условиях подземных выработок.

Кроме того, из-за падения напряжения на проводах контактной сети в конце длинной линии напряжение сети может быть значительно ниже.

При работе на линии нескольких электровозов, а также в режиме трогания тяжелогруженого состава на подъем имеют место провалы напряжения сети из-за бросков пускового тока.

С учетом вышесказанных причин напряжение контактной сети может снижаться до 30% от номинального значения до 175 В постоянного тока.

Технически реализуемая величина напряжения для составных аккумуляторных батарей не превышает в идеале 185 В [4], что еще ниже напряжения контактной сети 250 В. Основными недостатками такого способа питания яв-

ляются: низкое напряжение; большой вес и габариты аккумуляторных батарей, которые электровоз возит на себе; сложность и дороговизна технического обслуживания во время эксплуатации; небольшой срок службы, определяемый режимом работы и уровнем саморазряда.

При этом главным достоинством аккумуляторных систем является искробезопасность и возможность повсеместного применения даже в шахтах с взрывоопасной атмосферой совместно с двигателями взрывобезопасного исполнения.

Анализ особенностей источников питания подземного рельсового транспорта показывает, что основным фактором, сдерживающим применение асинхронного тягового электропривода – это пониженное напряжение первичного источника питания постоянного тока. Это делает невозможным применение частотно-управляемых общепромышленных двигателей для электрической тяги.

Выходом из сложившейся ситуации может быть применение:

- тягового асинхронного двигателя на стандартное напряжение переменного тока с инвертором напряжения при источнике питания постоянного тока на напряжение 550 В;
- специального тягового асинхронного двигателя с повышенным электромагнитным моментом и обмоткой статора, соединенной по схеме Δ на пониженное напряжение переменного тока с инвертором напряжения при существующем источнике питания постоянного тока на напряжение 250 В с возможностью снижения его напряжения до 175 В и обеспечением вольтодобавки до 75 В.

В первом случае необходимо техническими средствами увеличить напряжение питания сети постоянного тока после токосъема с 250 до 550 В.

Теоретически решить эту проблему можно, используя импульсный преобразователь постоянного тока с вольтодобавкой. Однако в этом случае канал вольтодобавки нужно рассчитывать на напряжение в 300 В, что составляет

120 % от номинала. В результате преобразуемая мощность канала вольтодобавки будет настолько большой, что на практике реализация такого способа трудновыполнима. Технически предел такой вольтодобавки ограничен 30...40 % от номинального значения напряжения [23].

Во втором случае канал вольтодобавки будет преобразовывать мощность максимум 30...40 % от номинального значения, а остальная мощность будет поступать напрямую к нагрузке без всякого преобразования.

Автономный инвертор (АИ) вместе с управляемым выпрямителем (УВ) выполняет роль вольтодобавочного устройства, которое регулирует напряжение на нагрузке. Достоинством этой схемы является то, что АИ и УВ рассчитываются не на полную мощность нагрузки, а только на ее часть $P_{\text{доб}}$:

$$P_{\text{доб}} = I_{\text{н}} \cdot U_{\text{в}},$$

где $U_{\text{в}}$ – напряжение на выходе управляемого выпрямителя (УВ).

Совершенно очевидно, что АИ здесь целесообразно выполнять на высокую частоту 10...20 кГц, которая ограничивается только коммутационными возможностями силовых ключей инвертора и выпрямителя. Это приведет к существенному улучшению массогабаритных показателей трансформатора Тр.

Специальный тяговый двигатель для подземного рельсового транспорта. Тяговые электродвигатели (ТЭД), в общем случае, предназначены для приведения в движение транспортных средств. Основное отличие ТЭД от общепромышленных электродвигателей заключается в условиях их монтажа, в жестких ограничениях габаритов двигателей, в повышенных механических воздействиях на элементы конструкции ТЭД [24]. При эксплуатации тяговых двигателей наблюдаются частые механические, тепловые и электрические перегрузки, вибрация и толчки. Поэтому при разработке их конструкции предусматривают повышенную электрическую и механическую прочность деталей и узлов, теплостойкую и влагостойкую изоляцию токоведущих частей и обмоток, монолитность обмоток. Такие двигатели обладают большой постоянной времени нагрева.

ТЭД работают в самых разнообразных режимах (кратковременных, повторно-кратковременных с частыми пусками), сопровождающихся широким изменением частоты вращения ротора и нагрузки по току, а при трогании с места может более чем в 2 раза превышать номинальное значение момента. Из-за тяжелых условий работы и габаритных ограничений тяговые электродвигатели можно отнести к электрическим машинам предельной эксплуатации [24].

Развитие полупроводниковой техники и компьютерной технологии открывает новые возможности электрических машин: переход от двигателей с электромеханической коммутацией (двигатели постоянного тока) к двигателям переменного тока с коммутацией при помощи полупроводниковых преобразователей. Наиболее перспективным типом двигателя переменного тока является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, который обладает важным преимуществом – простотой конструкции, надежностью, компактностью и относительно невысокой стоимостью [24].

При сохранении конструктивной схемы рудничного электровоза необходимо разработать двухдвигательный асинхронный электропривод на базе конструкции известных и серийно производимых электродвигателей. Такой подход позволит осуществить типизацию технологического процесса, значительно снизить затраты на ОКР, на изготовление и испытание опытных образцов и капитальных затрат на оборудование (штампы, оснастка, материалы и т. п.) при освоении серийного производства тягового асинхронного двигателя (ТАД). Необходимо также разработать и систему управления ТАД, позволяющую повысить уровень основных эксплуатационных характеристик рудничного электровоза, таких как безопасность, надежность, энергоэффективность и функциональность [24].

Выводы по первой главе

Анализ информации литературно-патентный обзора систем тягового электропривода подземного электротранспорта показал:

1. Имеется взаимное влияние электроприводов колесных пар в составе общей механической системы.
2. Необходимо разработать алгоритм управления двухдвигательным ТАЭП, работающим на общий технологический процесс откатки грузов подземным рельсовым транспортом, в зависимости от режимов работы в статике и динамике.
3. Необходимо использование специального тягового частотно-управляемого асинхронного двигателя на пониженное напряжение питания статорной обмотки с обеспечением необходимых тяговых характеристик.
4. В качестве системы управления низковольтным ТАД возможно использование частотного векторного регулирования с датчиком линейной скорости относительно неподвижной системы координат (рельсового пути).

2. Разработка математической и имитационной модели тягового асинхронного двигателя для частотно-регулируемого электропривода

2.1. Принципы построения асинхронного тягового электропривода шахтного рудничного электровоза

2.1.1 Режимы работы тягового электропривода

Анализ публикаций, посвященных исследованию производственного процесса транспортирования сыпучих грузов в условиях шахт с помощью электровозной тяги [25, 26] показывает, что основными факторами, от которых зависят условия работы технологического оборудования, являются: расстояния откатки грузов; транспортная логистика, формирующая грузопотоки; а также состояние и профиль рельсовых путей.

Оценивание характеристик грузопотоков на участках подземной откатки на примере шахт Донецкого бассейна показывает, что наиболее распространёнными являются небольшие грузопотоки до 700 тонн в сутки – 93,6 % с длиной транспортировки (откатки) до двух километров. При этом, грузопотоки более тысячи тонн в сутки составляют не более 3 %, а расстояния транспортировки (откатки) более трёх километров – не более 1,5 % [25, 26].

Технологический цикл работы подземного электровоза состоит из следующих этапов [25]:

- работа на перегонах, что составляет примерно 28 % продолжительности рабочего времени смены;
- вспомогательные и маневровые работы (формирование состава на маневровых участках; погрузочно-разгрузочные работы на вагонетках; постановка сошедших с рельсов вагонеток и т. п.) занимают около 19,2 % времени смены;
- простой подвижного состава (проведение оргтехмероприятий, таких как техосмотр силовых агрегатов электровоза, грузовых вагонных тележек, заготовка и подготовка песка) – оставшееся время рабочей смены (более 50 %).

Следует упомянуть, что из общей продолжительности работы тяговых электродвигателей 33,6 % приходится на различные маневры, за один час работы осуществляется более 700 переключений контроллера скорости тяговых электродвигателей. Всё это свидетельствует о значительном влиянии динамических режимов работы тягового электропривода на электромеханическую систему подвижного состава.

Скоростной режим движения подвижного состава при осуществлении подземной откатки грузов регламентирован на основе действующих норм и правил для отечественных шахт. Скорость движения состава регламентируется следующим образом: для открытых перегонов она составляет до 9 км/час; для участков манёвра, например, при заталкивании состава до 3,6 км/час, при других маневровых мероприятиях до 5,4 км/час. Следует учитывать и нормативные документы, которые определяют допустимые уклоны продольного рельефа рельсового пути. Средний уклон рельсового пути должен находиться в пределах 3...7 промилле (то есть 3...7 метров на километр пути).

Для учёта буксования и юза колёс относительно рельсового пути, следует учитывать износ бандажа колес и состояние поверхности рельса. Данный показатель в процентном выражении составляет:

для сухих рельсов	– 2,5 %;
для чистых рельсов	– 0,7 %;
если рельсы, покрыты водой	– 1,3 %;
если рельсы погружены в грязь до головки	– 9 %;
рельсы покрыты пылью или засохшей грязью	– 23,5 %;
затянутые пленкой жидкой грязи	– 24,7 % [27].

Возможность появления избыточного скольжения колес обусловлена тем, что коэффициент трения качения или сцепления колеса с ребордой рельса находится в диапазоне 0,07...0,1. Реальные условия эксплуатации подвижного состава рельсового транспорта, а именно его загруженность, коэффициенты трения качения (сцепления) необходимо учитывать при исследовании динамических режимов работы. Эффективным способом увеличить коэффициент

сцепления пары колесо-рельс является подсыпка песка под ведущие оси колёсных пар. При этом коэффициент сцепления ведущих колёс увеличивается до значения 0,4. Таким образом, песок, раздавленный ведущими колёсами в результате предыдущей поездки, даёт увеличение скорости до $V = 0,15 \dots 0,18$ м/с [27].

Существует большая вероятность изменения характеристики сцепления, что неизбежно ведет к разносному буксованию колес из-за возможного уменьшения коэффициента трения качения или коэффициента сцепления колеса с рельсом.

Анализ переходных процессов при возникновении буксования и юза колес подземного электровоза с учетом ограничений, и требований правилами эксплуатации и технологии подземной откатки, позволяет сделать вывод, что для повышения тяги рудничных электровозов необходимо использовать автоматизированные частотно-регулируемые электроприводы.

Для решения этой задачи необходимо разработать математическую модель механической системы подвижного состава, которая учитывает степень его загруженности, коэффициент трения качения колеса относительно рельса, уровень уклона пути и другие факторы.

2.1.2. Обоснование выбора мощности тягового асинхронного привода

Предварительный выбор мощности тягового асинхронного двигателя (ТАД) с учетом средних нагрузок по эквивалентному току статорной обмотки производится так, чтобы двигатель при продолжительном режиме работы был оптимально загружен, при этом температура нагрева обмотки должна быть максимально приближена к предельной температуре нагрева для данного класса изоляции обмоток двигателя, но не превышать ее.

С учетом того, что тепловая постоянная времени ТАД значительно больше, чем у обычных асинхронных двигателей, то за час работы температура обмоток ТАД может не достигнуть установившегося значения. Поэтому

для продолжительного режима работы ТАД в качестве основного классификационного параметра выбирают часовую мощность, которая примерно на 20 % выше, мощность при длительной работе.

В случае нереверсивного электропривода область работы находится в первом (двигательный режим работы) и втором (тормозной генераторный режим работы) квадрантах координатной плоскости. Если привод реверсивный, то область возможной работы находится в четырех квадрантах плоскости координат, где угловая частота вращения – ω , рад/с, – вращающий момент M , Н·м.

На рисунке 2.1, а в первом и третьем квадрантах находятся заштрихованные области для двигательного режима работы, которые ограничены по оси ординат максимальной скоростью электропривода – $\omega_{\text{эл max}}$, рад/с и по оси абсцисс, приведенным к валу двигателя, изменением момента полезной нагрузки в длительном режиме работы $M_{c \text{ min}} \dots M_{c \text{ max}}$ Н·м.

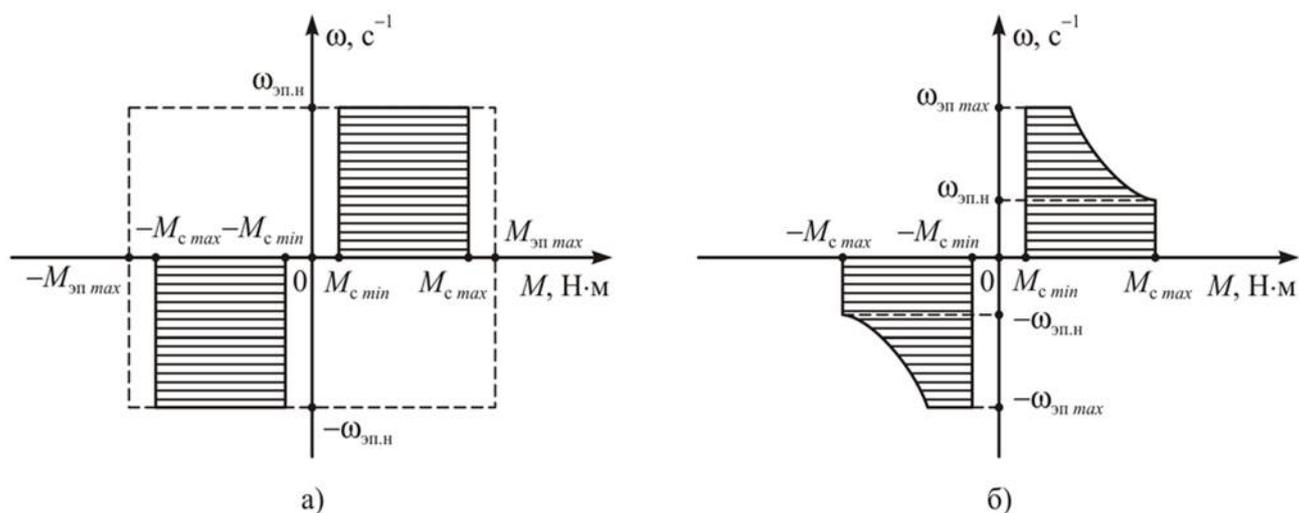


Рисунок 2.1. Область существования характеристик электропривода:

а – однозонного электропривода; б – двухзонного электропривода

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

Момент сопротивления на валу двигателя M_c , в общем случае, может быть постоянным по значению при изменении скорости, а может представлять собой линейно возрастающую или нелинейно возрастающую параболическую зависимость от скорости $M_c(\omega)$, например, для механизмов с генераторной и вентиляторной нагрузкой, или для механизмов с постоянной мощностью на валу. Кроме того, момент сопротивления может иметь нелинейно спадающую зависимость в диапазоне частот вращения $\omega_{\text{ЭП ном}} \dots \omega_{\text{ЭП max}}$ (рисунок 2.1, б).

Во втором случае регулирование скорости выше значения $\omega_{\text{ЭП ном}}$ осуществляется за счет ослабления потока возбуждения двигателя, и система управления электропривода реализуется как двухзонная [28].

Момент сопротивления на валу двигателя M_c помимо реактивной составляющей может иметь и активную составляющую, если подвижной состав с электровозом находится на участке рельсового пути с уклоном. Уравнение движения электропривода для этого случая имеет вид

$$M - M_c = M - (\pm M_{\text{ср}} \pm M_{\text{са}}) = J_s \frac{d\omega}{dt},$$

где M – момент двигателя; $M_c = (\pm M_{\text{ср}} \pm M_{\text{са}})$ – момент сопротивления на валу двигателя на участке рельсового пути с уклоном; $J_s \frac{d\omega}{dt}$ – динамический момент тягового электропривода; J_s – суммарный эквивалентный момент инерции подвижного состава.

Если знак реактивной составляющей момента сопротивления $\pm M_{\text{ср}}$ зависит от направления движения и всегда направлен противоположно движению состава, в то время как знак активной составляющей момента сопротивления $\pm M_{\text{са}}$ определяется тем, что движение состава по уклону может происходить как со спуском ($M_{\text{са}} < 0$), так и на подъем ($M_{\text{са}} > 0$). Знак результирующего момента сопротивления $M_c = (\pm M_{\text{ср}} \pm M_{\text{са}})$ зависит от того, какая его составляющая активная или реактивная будет больше.

Если $|\pm M_{ca}| \leq |\pm M_{cp}|$, то максимальное и минимальное значение результирующего момента сопротивления определяются как: $M_{cmax} = M_{cp} + M_{ca}$, и $M_{cmin} = M_{cp} - M_{ca}$. Такой режим нагрузки характерен для установившегося движения состава, когда тяговый момент уравновешен указанными результирующими моментами сопротивления.

Тогда область существования моментов сопротивления для длительного режима работы состава на подъем полностью находится в первом квадранте (рисунок 2.2, б) или полностью в третьем квадранте (рисунок 2.2, а). Соответственно, при движении на спуск область существования моментов сопротивления состава для длительного режима работы из первого квадранта частично переходит во второй (рисунок 2.2, а), или из третьего квадранта частично переходит в четвертый квадрант (рисунок 2.2, б).

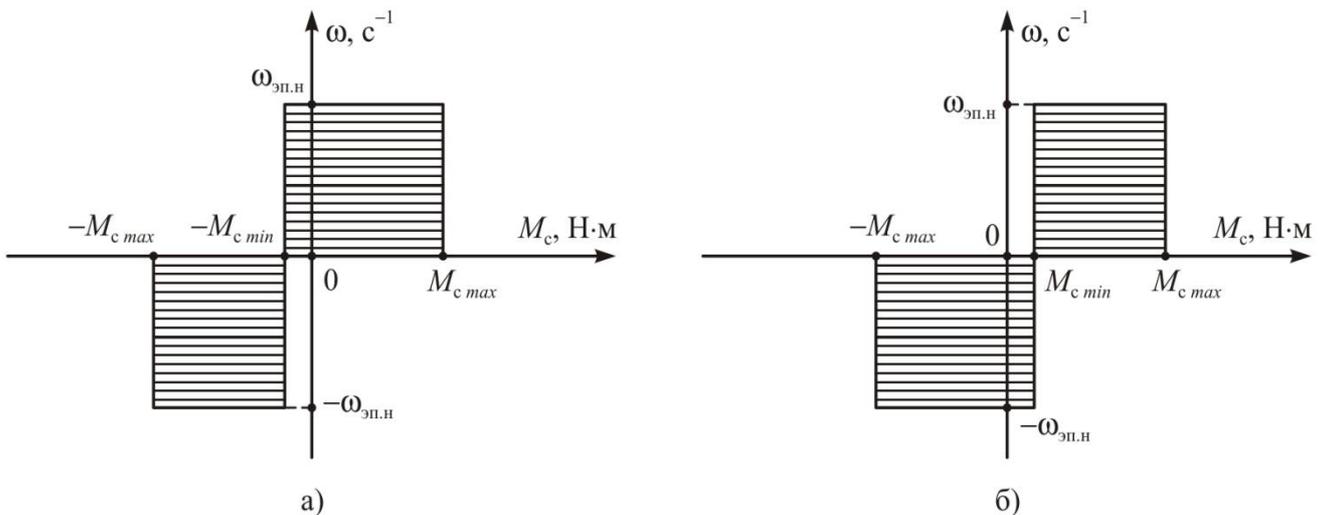


Рисунок 2.2. Область изменения статических нагрузок:

а – положительная скорость – движение состава на спуск, отрицательная скорость – движение состава на подъем; б – положительная скорость – движение состава на подъем, отрицательная скорость – движение состава на спуск

Таким образом, при движении состава по участку пути с изменяемым профилем, необходимо учитывать переменный характер нагрузки на тяговый электропривод.

2.2. Обоснование выбора и проверка адекватности расчетных параметров двигателя

Методика выбора исполнительного асинхронного двигателя для подземного рельсового транспорта научно требует: обоснования и формулирования современных требований к тяговым асинхронным двигателям (ТАД; *ITM – induction traction motor*) рудничных электровозов; проведения анализа и выбора перспективных электродвигателей переменного тока, предназначенных для работы с частотными преобразователями с современной микропроцессорной системой управления; обеспечения предельных тяговых характеристик частотно-регулируемых асинхронных двигателей в условиях ограничения величины питающего напряжения контактной сети постоянного тока подземного транспорта по соображениям электробезопасности. Для этого необходимо: исследовать возможности использования асинхронных двигателей с пониженным напряжением питания для тягового электропривода подземного рудничного электровоза; определить условия соответствия механических характеристик ТАД с пониженным напряжением питания относительно характеристик такого двигателя на стандартное напряжение.

ТАД предназначены для приведения в движение электрических транспортных средств, поэтому основное отличие их от общепромышленных асинхронных электродвигателей заключается: в условиях их эксплуатации; требованиях к монтажу; ограничениях массы и габаритов; повышенных ударно-вибрационных механических воздействиях на корпус и электромеханическую систему [29]. Эксплуатация ТАД для рельсового транспорта происходит в тяжелых условиях. Корпуса таких машин подвержены воздействию вибрационных и ударных нагрузок; активная часть машин, особенно обмотки статора и ротора так же находятся под действием тепловых электрических перегрузок. Поэтому при проектировании конструкции ТАД крайне важно обеспечить достаточно высокую прочность узлов и отдельных деталей, более высокий класс изоляции и влагостойкость токоведущих частей и обмоток, монолитность обмоток.

Рабочие режимы ТАД отличаются значительной разнообразностью. Основные режимы работы кроме длительных режимов с переменной нагрузкой, это перемежающиеся, кратковременные, повторно кратковременные с частыми пусками. В процессе работы часто требуется изменять скорость движения в широких пределах. При трогании груженого состава с места, требуемый пусковой момент превышает номинальное значение в два и более раза. Из-за тяжелых условий работы и ограничений по массе и габаритам, тяговые электродвигатели можно отнести к электрическим машинам предельной эксплуатации [29].

При сохранении конструктивной схемы рудничного электровоза К-14 (рисунок 2.3) необходимо разработать двухдвигательный асинхронный электропривод на базе конструкции известных и серийно производимых электродвигателей.

Такой подход позволит осуществить типизацию технологического процесса, значительно снизить затраты на опытно-конструкторские работы, на изготовление и испытание опытных образцов и капитальных затрат на оборудование (штампы, оснастка, материалы и т. п.) при освоении серийного производства ТАД.

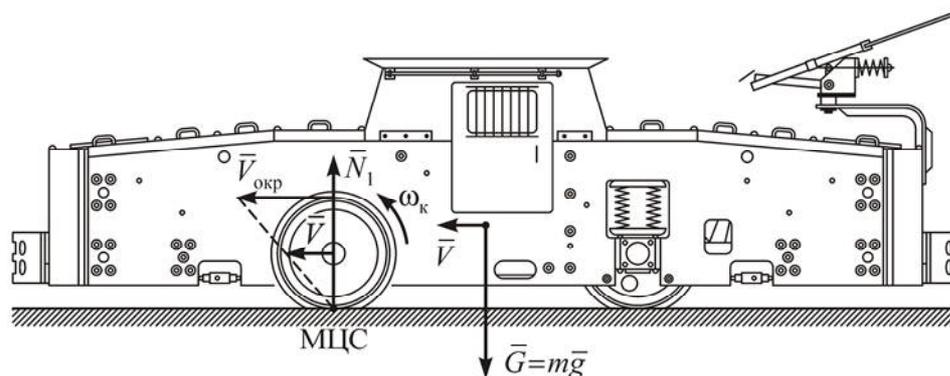


Рисунок 2.3. Рудничный электровоз К14

Необходимо также разработать и систему управления ТАД, позволяющую повысить уровень основных эксплуатационных характеристик рудничного электровоза, таких как безопасность, надежность, энергоэффективность и функциональность [30–34].

При выборе тягового двигателя не учитывалось возможное падение напряжения постоянного тока в длинных троллейных линиях до 30 % от номинала.

Для выбора базовой серии ТАД разработаны критерии оценки, которые также учитывают требования ГОСТа [35, 36]: унификация конструкции рудничного электровоза; стойкость к внешним механическим воздействиям: вибрации, одиночных ударов; жесткость механической характеристики электродвигателя; высокая перегрузочная способность; высокая кратность пускового момента по отношению к номинальному моменту; высокая теплостойкость к длительным перегрузкам; компактность и относительно невысокая масса; минимальная стоимость в процессе разработки и серийном производстве.

2.3. Анализ свойств электродвигателей для подземной тяги

При выборе перспективной конструкции проведен анализ технических, массогабаритных и эксплуатационных показателей тягового двигателя прототипа. В качестве такого прототипа выбран тяговый двигатель постоянного тока (ДПТ) ДК-812 с последовательным возбуждением, который устанавливается на 14-тонные рудничные контактные электровозы типа К14, К14М, 14КР [4, 37].

Двигатель ДК-812 имеет два номинальных режима работы: S2 (часовой) и S1 (продолжительный). Основные номинальные показатели представлены в таблице 1 [38].

На рисунке 2.4 приведен общий вид тягового двигателя постоянного тока (ДПТ), установленного на электровозе К-14 рудничного контактного электровоза.

Эксплуатационные характеристики тягового ДПТ ДК-812 представлены ниже: двигатель выдерживает пуски током 270А при номинальном напряжении и перегрузку двойным часовым током в течение 1 мин; класс вибрации – 4,5 по ГОСТ 16921-83; степень защиты – IP54 по ГОСТ 14254-80 с учетом встраивания в электровоз; способ охлаждения – 1С01 (самовентиляция) по

ГОСТ 20459-87, при этом исключается прямое попадание воды в двигатель вместе с вентилируемым воздухом; гарантийный срок эксплуатации – 2 года со дня ввода; способ монтажа – М9403 по ГОСТ 2479-87; группа условий эксплуатации М27 по ГОСТ 17516.1-90.



Рисунок 2.4. Общий вид двигателя постоянного тока последовательного возбуждения ДК-812

Таблица 1. Характеристики ДПТ ДК-812

Режим работы	S2 (часовой)	S1 (длительный)
Напряжение, В	=250	
Мощность, кВт	45	35
Частота вращения номинальная в режиме, (мин ⁻¹):	1300	1480
Максимальная	4000	
Момент вращения, Н·м	333	225
Ток якоря, А	=210	=162
КПД, %	86	87,5
Масса, кг	460	

Стальной корпус и монтаж с опорно-осевой подвеской, возможность крепления фланцем к корпусу редуктора обеспечивают жесткость конструкции тягового двигателя постоянного тока в составе электровоза и, несомненно, удовлетворяют требованиям экстремально высоких внешних механических

воздействий. Щеточно-коллекторный узел двигателя является наиболее уязвимой частью конструкции. При высоком уровне вибрации и одиночных ударов его работа будет характеризоваться повышенным износом щеток, высоким уровнем искрения, частыми профилактическими работами при обслуживании коллектора. Поэтому, в настоящее время данный тип тяговых двигателей не является конкурентно способным в части надежности, по уровню безаварийности, по затратам при эксплуатации. Не отвечает современным требованиям и контактно-реостатная система управления.

При выборе перспективных двигателей отметим, что асинхронные двигатели общепромышленной серии в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам относятся к группе условий эксплуатации М1 ГОСТ 17516.1-90 и не выдержат величину однократных ударов и периодических механических воздействий при движении по рельсам как регламентирует стандарт для группы эксплуатации М27 [39, 40].

Наиболее близкими по условиям эксплуатации к тяговым двигателям являются серийные крановые асинхронные двигатели [41–43]. Они также предназначены для движения по рельсам, имеют стойкость к однократным ударам и более прочный корпус по сравнению с общепромышленными двигателями. Следует отметить, что в зависимости от фирмы производителя конструкции двигателей существенно разнятся.

Крановые электродвигатели [43] отличаются от других серийных аналогов наличием коробки выводов, которая прикреплена винтами к станине по аналогии с общепромышленными двигателями. Такая конструкция явно не выдержит механических воздействий при относительно высокой скорости движения электровоза по рельсам. Класс изоляции обмотки статора –F (155 °С).

Двигатели производителей [41, 42] обладают более предпочтительной конструкцией: корпус коробки выводов отлит заодно с прочной чугунной станиной, изоляция обмотки статора обладает классом нагревостойкости Н

(180 °С). Обращают на себя внимание двигатели производителя [42]. Во-первых, в каталоге фирмы имеются двигатели близкой мощности с прототипом (ДК-812), мощностью 55кВт, шести полюсные; во-вторых, на данном предприятии производят серию специальных крановых двигателей, которые предназначены для работы только в составе частотно-регулируемого электропривода. Эта модификация в своем обозначении имеет шифр «2П». Обозначение двигателя –4МТКМ2П225L6У1. Данный двигатель может выпускаться с самовентиляцией – IC411 по ГОСТ Р МЭК60034-6-2012, с независимой вентиляцией (с центробежным (рисунок 2.5) или осевым электровентилятором); со встроенными датчиками температурной защиты (терморезисторами или термоограничителями); с пристроенным датчиком скорости. Тип охлаждения и датчика скорости указывается при заказе [42]. Степень защиты двигателя от внешнего воздействия – IP54, кожуха вентилятора IP20, двигателя независимой вентиляции – не ниже IP44 по ГОСТ IEC 60034 -5-2011.

У всех двигателей подшипник со стороны противоположной приводу зафиксирован от осевых смещений: по наружному кольцу – с помощью крышек подшипниковых и подшипникового щита; по внутреннему кольцу–с помощью пружинного упорного кольца на валу.



Рисунок 2.5. Общий вид кранового асинхронного двигателя 4МТКМ2П225L6

Основные номинальные показатели кранового двигателя 4МТКМ2П225L6 представлены в таблице 2 [42]. Масса двигателя приведена

для монтажного исполнения IM2003: фланцевый крепеж с наличием лап и коническим рабочим концом вала. Обращает на себя внимание высокая величина крутящего момента кранового двигателя, его величина превосходит прототип более чем в 1,6 раза. Поэтому при векторном регулировании частоты вращения вверх от номинальной частоты, величина крутящего момента при 1500 об/мин будет выше, чем у прототипа. Высока и перегрузочная способность электрической машины. То есть, по пусковым свойствам (скорости и времени разгона) крановый двигатель будет превосходить двигатель постоянного тока ДК-812.

Недостатком выбранного кранового двигателя является монтажное исполнение IM2003, которое не позволит обеспечить надежную эксплуатацию в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам для группы эксплуатации M27 по ГОСТ 17516.1-90.

Таблица 2. Характеристики кранового частотно-регулируемого асинхронного двигателя 4МТКМ2П225L6

Режим работы	S2 (часовой)	S1 (длительный)
Напряжение, В	~380	
Мощность, кВт	55	43
Частота вращения номинальная в режиме, (мин ⁻¹):	985	990
Максимальная	3800	
Момент вращения, Н·м	533	318
Ток фазы статора, А	~114	~83,4
КПД, %	90	88,5
Cos φ	0,81	0,67
Масса, кг	464	

*Указана масса при наличии лап (IM2003).

Для решения данной проблемы можно воспользоваться опытом специалистов фирмы «СЭТК» [44]. Эта фирма выпускает крановые двигатели повышенной надежности при вибрационных нагрузках и ударах для вибростендов монтажного исполнения IM2003. Станина и подшипниковые щиты и лапы в этих двигателях выполнены сварные из стальных листов. Цилиндрическая форма станины выполняется с помощью валков либо изготавливается из толстостенных труб определенного диаметра. Высокая надежность двигателей исполнения «ПНД» подтверждена многолетней эксплуатацией. Для тягового двигателя электровозов на базе крановой серии целесообразно также изготавливать стальную станину. Способ монтажа на электровоз также необходимо унифицировать с прототипом, кроме того, с опорно-осевой подвеской IM9403 без лап, двигатель будет легче, а конструкция – более жесткая. Технологически это не вызовет больших трудностей.

При выборе электродвигателя для тягового подземного транспорта следует учитывать особенности электроснабжения горного шахтного оборудования. Система электроснабжения для контактного электровоза типа К14, КТ14 выполнена традиционно, по системе контактный провод-рельс. Напряжение постоянного тока величиной 250В ($\pm 30\%$) подается в троллейную сеть от блока выпрямителей [29, 30]. Указанный диапазон изменения напряжения на токоопередающей системе оказывает существенное влияние на работу тягового электродвигателя. Для ТАД особенно критичным является возможное понижение напряжения на 30 %, что может уменьшить вращающий момент двигателя ниже допустимого по условиям тяги пределов.

2.4. Теоретическое обоснование обеспечения предельно достижимого момента ТАД

Рассмотрим выражения для определения момента ТАД с питанием обмотки статора на пониженное напряжение. Для определения момента двигателя можно использовать выражение (1), известное из [45]:

$$M = 3 \frac{p U_H^2}{\omega_{0 \text{эл.н}}} \cdot \frac{\bar{\omega}_p x_m^2 R_2}{(R_1 R_2 - \sigma \bar{\omega}_0 \bar{\omega}_p x_1 x_2)^2 + (R_2 \bar{\omega}_0 x_1 + R_1 \bar{\omega}_p x_2)^2}, \quad (1)$$

где R_1, R_2, x_m, x_1, x_2 – параметры схемы замещения асинхронного двигателя; U_H – номинальное фазное напряжение; $\bar{\omega}_0, \bar{\omega}_p$ – относительное значение номинальной частоты переменного тока на обмотке статора и текущее значение частоты ЭДС ротора.

Анализ выражения (1) показывает, что момент пропорционален квадрату приложенного напряжения. Снижение величины напряжения питания обмотки статора резко уменьшит вращающий момент, что в большинстве случаев недопустимо по условиям работы асинхронного двигателя. Для поддержания момента неизменным требуется пересчет параметров схемы замещения. Частота вращения ротора останется неизменной при условии сохранения прежней величины момента нагрузки на валу двигателя. Для этого случая можно записать условие постоянства вращающегося момента при изменении величины питающего напряжения.

$$M = U^2 \cdot H = const,$$

$$\text{где } H = \frac{3p \cdot \bar{\omega}_p x_m^2 R_2}{\omega_{0 \text{эл.н}} \left[(R_1 R_2 - \sigma \bar{\omega}_0 \bar{\omega}_p x_1 x_2)^2 + (R_2 \bar{\omega}_0 x_1 + R_1 \bar{\omega}_p x_2)^2 \right]}.$$

Очевидно, что при снижении напряжения питания статорной обмотки следует повышать величину H , т.е. изменить параметры схемы замещения. Определим возможность перехода на другое напряжение питания, отличное от номинального напряжения обмотки статора при условии сохранения неизменной величины вращающегося момента. Для этого необходимо пересчитать параметры схемы замещения двигателя, умножив их на коэффициент пересчета (коэффициент трансформации) получим:

$$k = U/U_H,$$

$$M = k^2 U^2 H_1,$$

$$\text{где } H_1 = \frac{3p \cdot \bar{\omega}_p k^4 x_m^2 k^2 R_2}{\omega_{0\text{эл.н}} \left[(k^2 R_1 k^2 R_2 - \sigma \bar{\omega}_0 \bar{\omega}_p k^2 x_1 k^2 x_2)^2 + (k^2 R_2 \bar{\omega}_0 k^2 x_1 + k^2 R_1 \bar{\omega}_p k^2 x_2)^2 \right]} = \frac{H}{k^2}.$$

После преобразования это выражение можно записать в виде

$$M = k^2 U^2 \frac{H}{k^2} \text{ или } M = U^2 \cdot H. \quad (2)$$

Полученное выражение (2) указывает о возможности преобразования параметров схемы замещения с сохранением количественной неизменности механической характеристики асинхронного двигателя при работе на другом напряжении обмотки статора.

Подходы к определению параметров схемы замещения асинхронного двигателя указаны в работах [46, 47]. Для определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя в *Simulink MatLab2017a* разработана имитационная модель по методике, опубликованной в [48]. На рисунке 2.6 представлена схема ввода паспортных параметров асинхронного двигателя (см. таблицу 2).

Результаты расчёта параметров схемы замещения по паспортным данным сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Параметры схемы замещения ТАД 4МТКМ1Ф2П225L6 55 кВт

Наименование параметра	Значение
Сопротивление обмотки статора R_s , Ом	0,05759
Сопротивление обмотки ротора R_r , Ом	0,03559
Индуктивность рассеяния статора L_s , Гн	0,0004188
Индуктивность рассеяния ротора L_r , Гн	0,0005719
Сопротивление обмотки статора R_s , Ом	0,05759

2.5. Разработка имитационной модели ТАД

Существуют различные подходы к построению имитационных моделей рельсовых транспортных средств [49, 50]. Для оценки статических и динамических свойств ТАД предлагается использовать имитационную модель, схема которой показана на рисунке 2.7. Структура асинхронного двигателя соответствует системе дифференциальных уравнений в абсолютных единицах [51].

$$i_{sx} = (u_{sx} + L'_s \omega_k i_{sy} + \frac{k_r}{T_r} \Psi_{rx} + p \omega_m k_r \Psi_{ry}) \frac{1}{(1 + T'_s s) R},$$

$$i_{sy} = (u_{sy} - L'_s \omega_k i_{sx} + \frac{k_r}{T_r} \Psi_{ry} - p \omega_m k_r \Psi_{rx}) \frac{1}{(1 + T'_s s) R},$$

$$\Psi_{rx} = [k_r R_r i_{sx} + (\omega_k - p \omega_m) \Psi_{ry}] \frac{T_r}{(1 + T_r s)},$$

$$\Psi_{ry} = [k_r R_r i_{sy} - (\omega_k - p \omega_m) \Psi_{rx}] \frac{T_r}{(1 + T_r s)},$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot k_r (\Psi_{rx} i_{sy} - \Psi_{ry} i_{sx}),$$

$$\omega_m = \frac{1}{s} \left(\frac{1}{J} \right) (T_e - T_a - T_L),$$

$$\gamma = \frac{1}{s} (\omega_k).$$

где i_{sx} , i_{sy} , u_{sx} , u_{sy} – токи и напряжения статора в осях x и y ;

Ψ_{rx} , Ψ_{ry} – потокосцепление ротора в осях подвижной системы координат x и y ;

R , R_r , $k_r = L_m / L_r$ – полное сопротивление фазы АД, сопротивление ротора, отношение взаимной индукции статора и ротора к индуктивности ротора;

T_r , T'_s – постоянные времени ротора и приведенная постоянная статора;

ω_m , ω_k , p , γ – частота вращения ротора и подвижной системы координат, число пар полюсов двигателя, угол поворота ротора; L'_s – приведенная индуктивность статора; T_e , T_a , T_L – электромагнитный момент двигателя, момент сопротивления активный и реактивный.

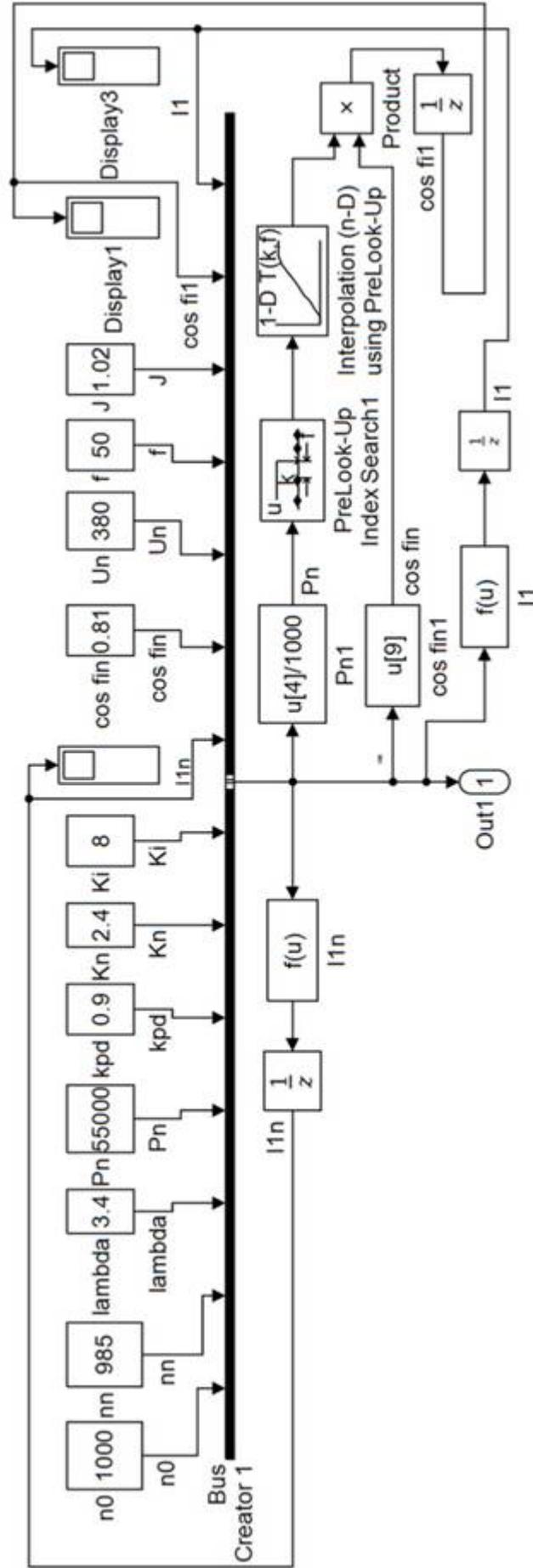


Рисунок 2.6. Имитационная модель расчёта параметров замещения асинхронного двигателя
(блок ввода параметров двигателя)

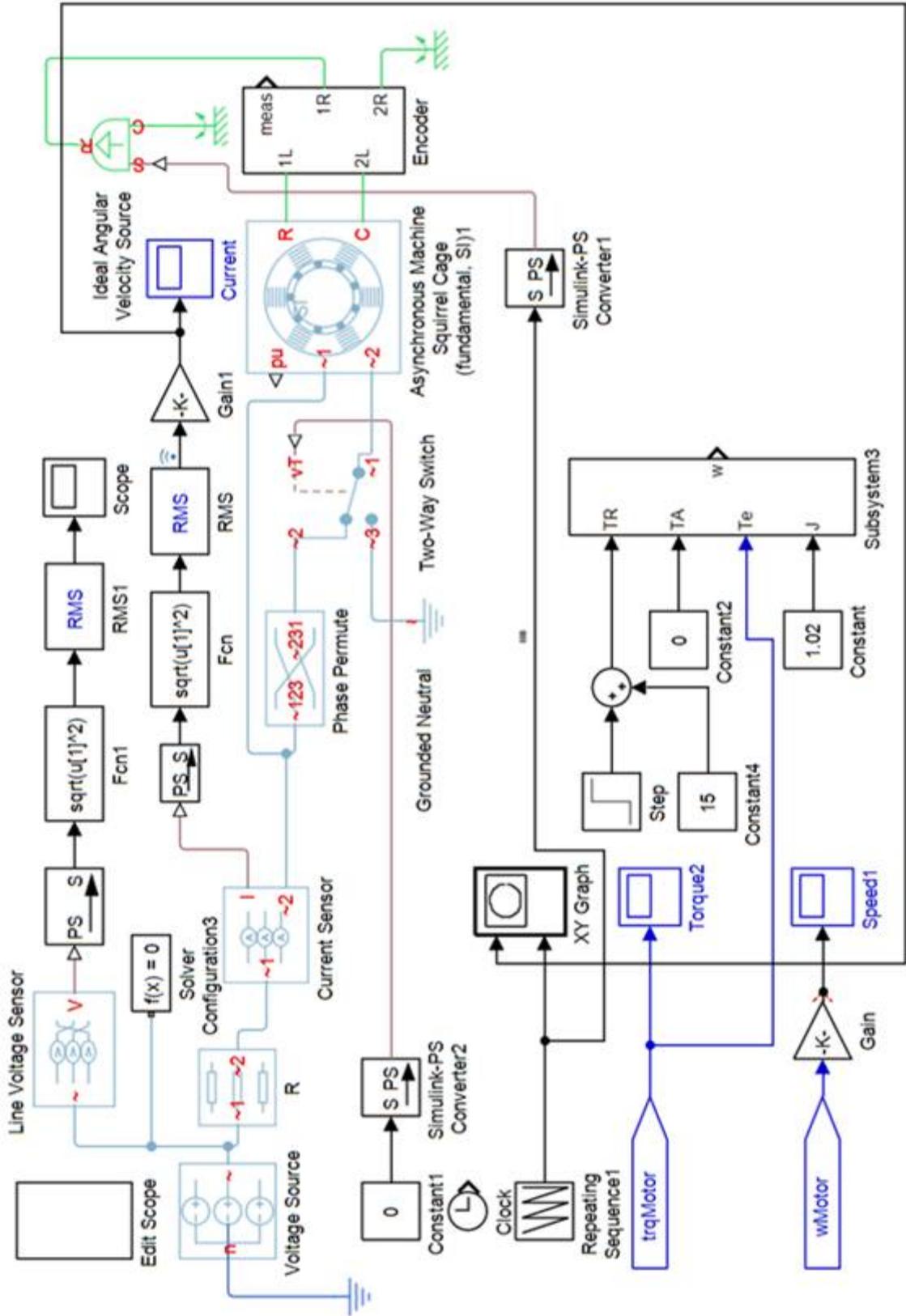


Рисунок 2.7. Имитационная модель для анализа статических и динамических характеристик ТАД

В последней версии *MatLab* 2017a модель асинхронного двигателя допускает включение обмотки статора, как в звезду, так и в треугольник. Этот фактор расширяет возможности исследований, что и использовано в настоящем исследовании. Вид включения обмотки статора определяет переключатель *Two-Way Switch*. При подаче на его вход управления сигнала амплитудой 1 В обеспечивается соединение звездой, при нулевом сигнале управления – треугольник. Источник питающего трёхфазного напряжения *Voltage Source* обеспечивает установку любого значения частоты и напряжения. Для измерения действующего значения линейного трехфазного напряжения используется датчик *Line Voltage Sensor*. Последовательно включенные элементы формируют действующее значение установленного напряжения. Измерение линейного тока осуществляет датчик *Current Sensor* при единичном значении коэффициента усиления блока *Gain1*. Формирование действующего значения обеспечивается последовательным включением указанных в схеме элементов с выходом датчика. Измерение тока статорной обмотки, включенной в треугольник, производится при коэффициенте усиления блока *Gain1*, равном $1/1,73$. Измерение частоты вращения и момента двигателя производится блоком *Encoder*. По линии *trqMotor* передается значение измеряемого момента, по линии *wMotor* – частота вращения в угловых единицах. Пересчет частоты вращения в об/мин ведётся блоком *Gain*.

Формирование статических характеристик производит графопостроитель *XY Graph*. На источнике питания устанавливаются параметры частоты и напряжения, при которых рассчитываются характеристики. На входе *Y* графопостроителя блок *Repeating Sequence1* формирует линейно спадающий сигнал частоты вращения, который подается также на двигатель. Двигатель работает в режиме дискретного момента, и его электромагнитная часть обеспечивает формирование момента и тока, подключаемые к входу *X* графопостроителя.

Следует отметить, что моделирование статических механических характеристик ТАД идет не на основании теоретической зависимости (1), а на ос-

нове системы уравнений математического описания электромагнитных процессов асинхронного двигателя. Достоверность и точность полученных результатов зависит, прежде всего, от качества используемой модели ТАД в *Simulink MatLab*.

Интенсивность снижения угловой частоты вращения выбирается незначительной, чтобы исключить влияние динамических процессов. Выбирается максимальная частота вращения, с которой начинается построение статических характеристик, и время спада до нулевого значения. Например, частота вращения 120 % от частоты вращения идеального холостого хода и время 10 с, которые заносятся в блок *Repeating Sequence*¹. Верхняя часть полученной статической характеристики удаляется при редактировании, а в нижней части колебания момента или действующего тока отсутствуют.

2.6. Исследования свойств ТАД на имитационной модели

Исследованию свойств тягового электропривода и его систем управления посвящены работы [52–57].

Наше исследование ограничено анализом предельных статических и динамических свойств перспективного ТАД. На рисунке 2.8 представлены результаты расчета механических характеристик черного и красного цвета по параметрам схемы замещения, полученных от завода изготовителя крановых частотно-регулируемых двигателей (ОАО Сибэлектромотор) и синего и зеленого цвета по параметрам схемы замещения, полученным в результате использования программы «Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя по паспортным данным».

В свою очередь, механические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225L6 с часовой мощностью 55 кВт, показанные на рисунке 2.8 в черном и синем цвете, рассчитаны для температуры обмоток статора и ротора 20 °С, что соответствует температуре окружающей среды. А механические характеристики ТАД в красном и зеленом цвете, соответствуют нагре-

тому состоянию двигателя при рабочей температуре обмоток 115 °С, что соответствует предельной температуре нагрева обмоток для данного класса изоляции. Расчет характеристик произведен при включении обмоток статора в треугольник на переменное линейное трехфазное напряжение 220 В.

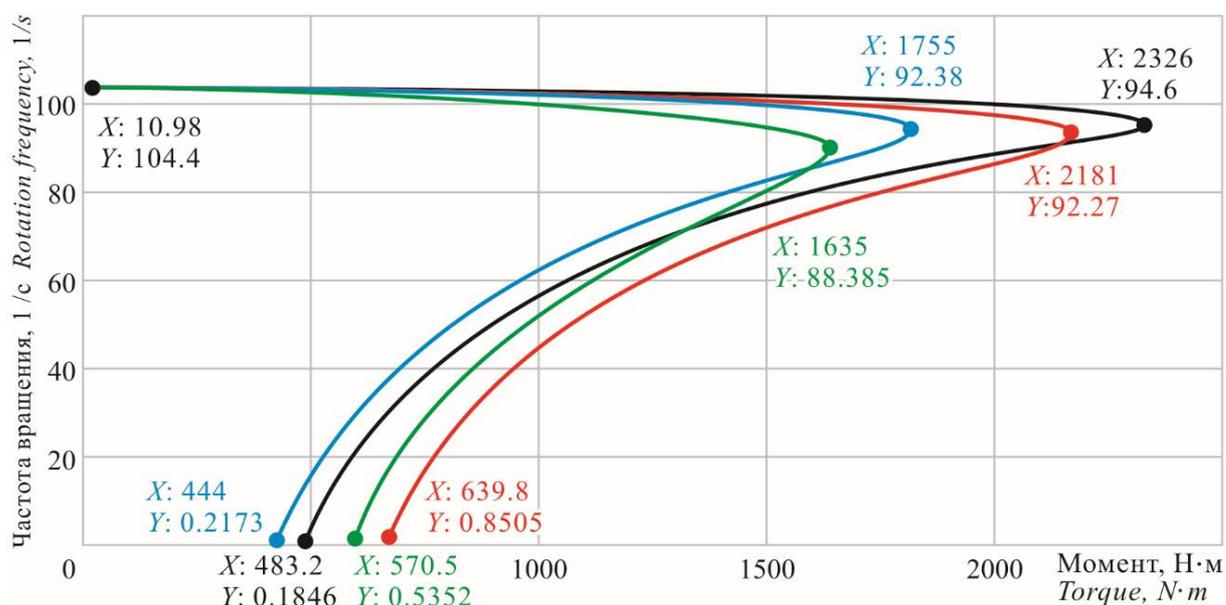


Рисунок 2.8. Механические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225L6 со схемой обмотки статора – «Δ» на напряжение 220 В:

- и — с параметрами схемы замещения по обмоточным данным;
- и — с параметрами схемы замещения по расчетным данным;
- и — для температуры обмоток 20 °С;
- и — для температуры обмоток 115 °С.

На рисунке 2.9 представлены электромеханические характеристики этого ТАД. По цвету характеристики полностью соответствует условиям моделирования механических характеристик, приведенных на рисунке 2.8.

На рисунке 2.10, а представлены пусковые статические механические характеристики ТАД модели 4МТКМ1Ф2П225L6 на 220 В и схемой обмоток статора «Δ» с учетом насыщения магнитной цепи машины и вытеснения тока в обмотке ротора. Характеристика синего цвета приведена для температуры обмоток 20 °С, а зеленого цвета для нагретого двигателя – 115 °С.

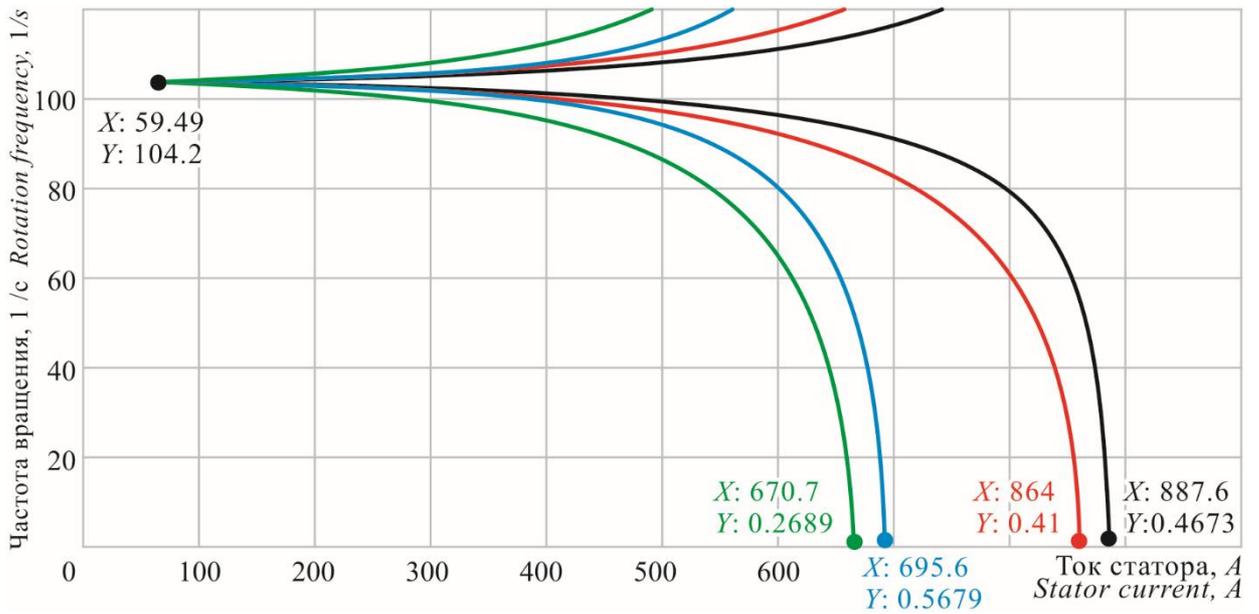


Рисунок 2.9. Электромеханические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225L6 со схемой обмотки статора – «Δ» на напряжение 220 В

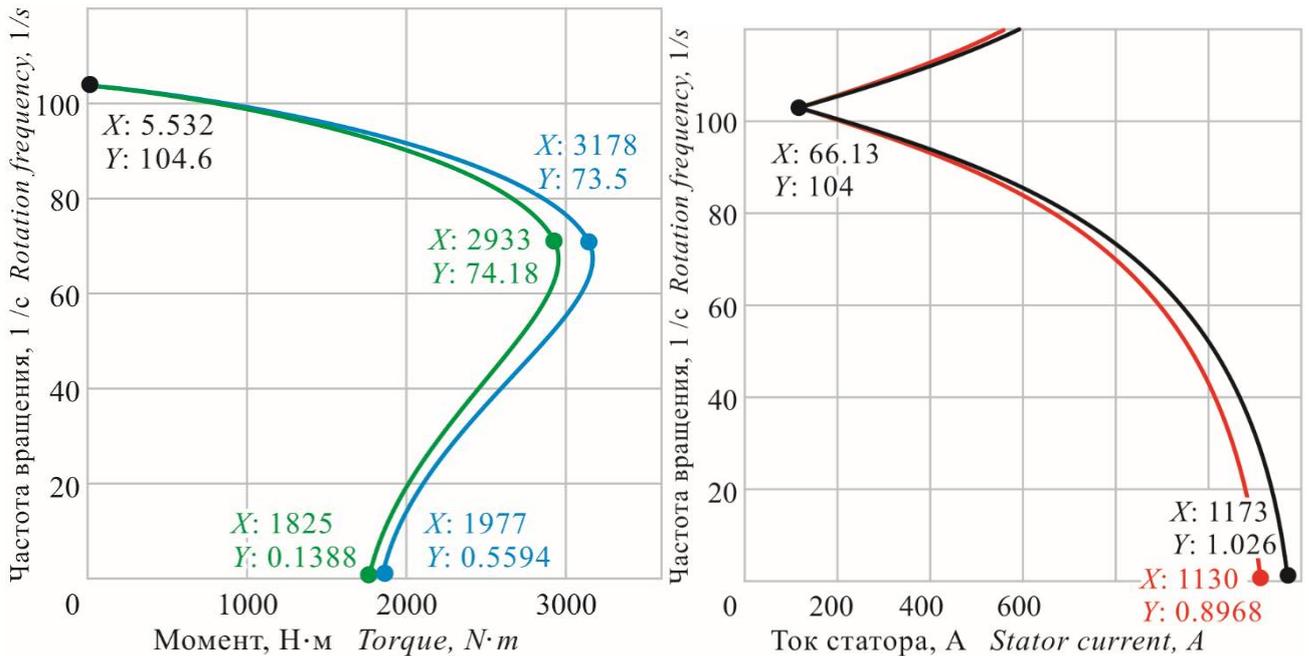


Рисунок 2.10. Статические пусковые характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225L6 на 220 В с учетом насыщения магнитной цепи машины и вытеснения тока в обмотке ротора:

a – механические, *б* – электромеханические

На рисунке 2.10, б представлены пусковые статические электромеханические характеристики этого же двигателя с учетом насыщения магнитной цепи машины и вытеснения тока в обмотке ротора. Характеристика черного цвета представлена для температуры обмоток 20 °С, а красного цвета – 115 °С.

На рисунках 2.11, а и 2.11, б изображены статические механические и электромеханические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225L6 с часовой мощностью 55 кВт на пониженное напряжение питания 178 В.

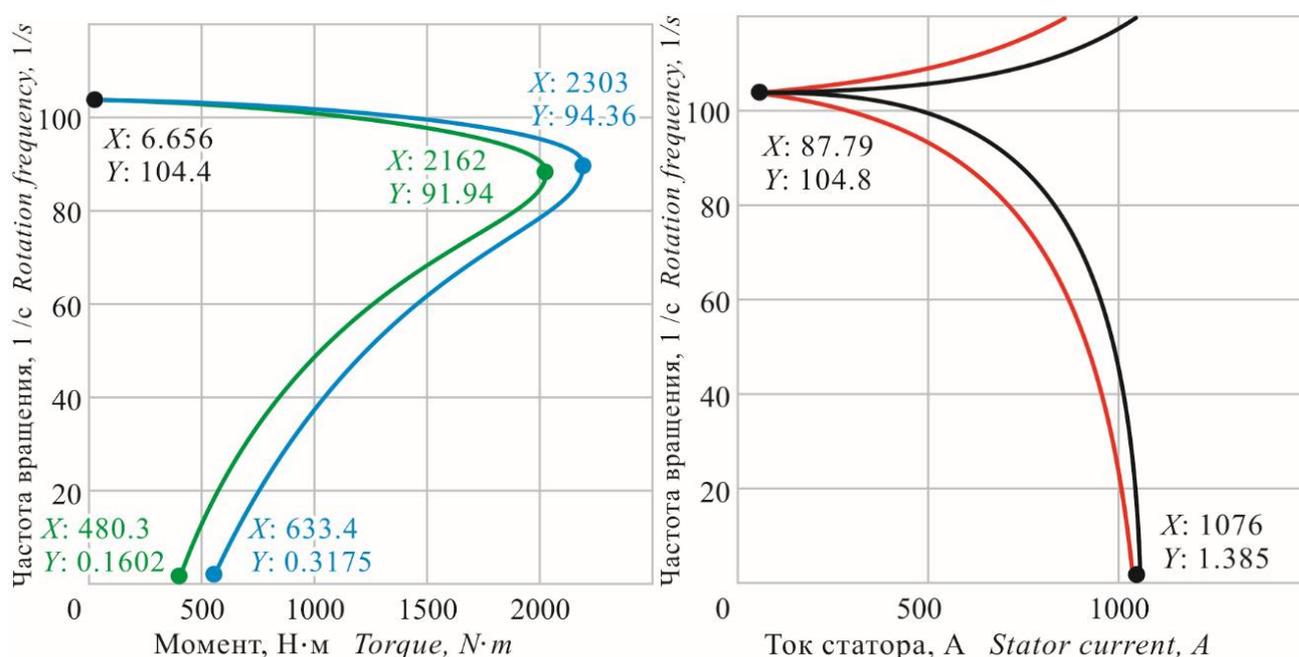


Рисунок 2.11. Статические механические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225L6 с часовой мощностью 55 кВт на пониженное напряжение питания 178 В при температуре обмотки 115 °С:

а – механические, б – электромеханические

Динамические характеристики асинхронного двигателя снимаются при прямом включении на номинальное напряжение. Для этого выполняется следующее изменение схемы модели (рисунок 2.7): выход блока *Subsystem3 W* соединяется с входом блока *Simulink-PS Converter1*; выход блока *Clock* подключается с входом *X* графопостроителя *XYGraph*; на вход *Y* графопостроителя

подаются исследуемые сигналы (частота вращения, момент или ток двигателя). Графопостроитель работает в режиме осциллографа.

На рисунках 2.12 и 2.13 представлены результаты имитационного моделирования прямого пуска двигателя с заводскими параметрами схемы замещения, схемой обмотки статора «Δ» на стандартное напряжение статора 220 В и пониженное напряжение 178 В. Черным цветом выделена зависимость от времени угловой скорости вала двигателя (n , об/мин); зеленым цветом – вращающего момента на валу (M , Н·м); и красным цветом – модуля результирующего вектора тока статора.

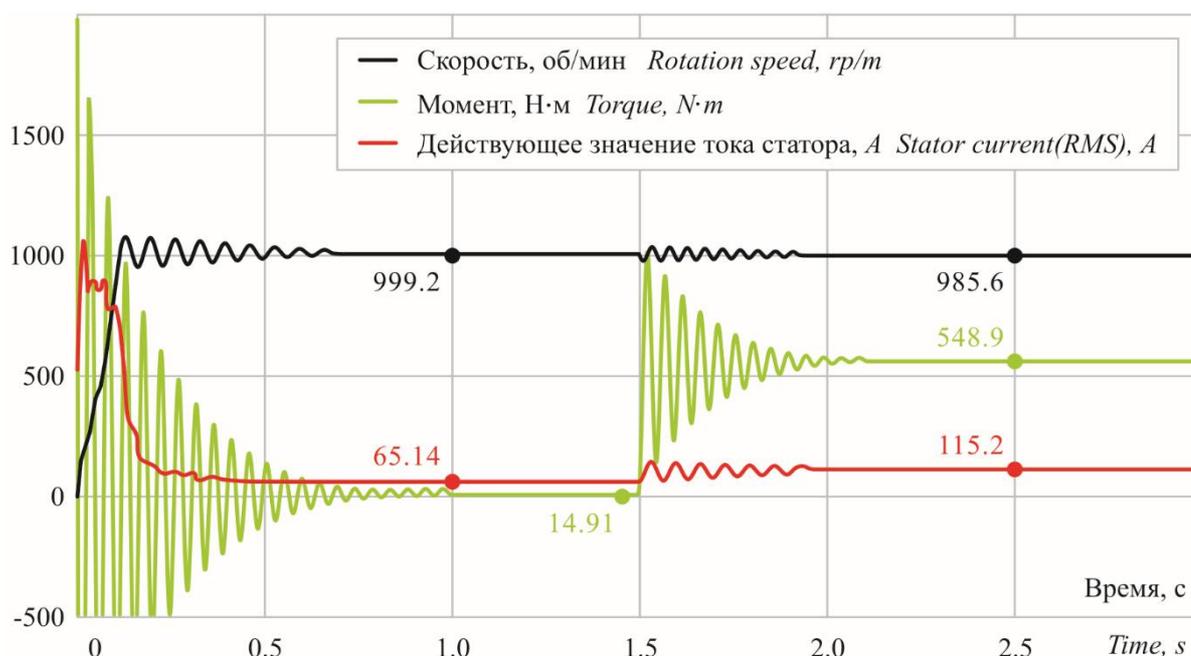


Рисунок 2.12. Динамические характеристики прямого пуска ТАД с заводскими параметрами схемы замещения на стандартное напряжение 220 В и схемой соединения обмоток статора «Δ»



Рисунок 2.13. Динамические характеристики прямого пуска ТАД с заводскими параметрами на пониженное напряжение 178 В и схемой соединения обмоток статора «Δ»

2.7. Результаты исследований

Анализ приведенных зависимостей на рисунках 2.8 и 2.9 показывает, что максимальный статический момент ТАД напряжением 220 В с параметрами схемы замещения, полученными на основе обмоточных данных завода изготовителя кранового двигателя примерно на 32...34 % больше момента двигателя с расчетными параметрами по паспортным данным. Максимальный пусковой ток фазы статора также больше соответственно на 27,5...30 %.

При этом, максимальный момент ТАД при изменении температуры обмоток с 20 до 115 °С уменьшается незначительно на 6,5...7,5 %.

Следовательно, предельные характеристики, полученные для двигателя с рассчитанными параметрами схемы замещения по паспортным данным, более характерны для общепромышленных асинхронных двигателей. Предельные характеристики ТАД, разработанного на основе специального кранового двигателя с частотным управлением показывают, что обмотки этого двигателя

спроектированы оптимальным образом не только для крановых механизмов, но и проявляют отличные тяговые свойства. Изменение тяговых свойств ТАД от температуры – незначительно.

Ток холостого хода ТАД (см. рисунок 2.9) составляет 52 % от номинального тока. Это хорошо согласуется с режимами работы ТАД подземного электровоза. Грузеный состав дает нагрузку ТАД в пределах 100 %, а порожний состав грузит двигатели примерно наполовину.

Пусковые свойства ТАД представлены на рисунке 2.10 с учетом насыщения магнитной цепи машины и вытеснения тока в обмотке ротора. Отношение пускового тока к номинальному току ТАД лежит в пределах 10:1. Отношение максимального момента к пусковому моменту ТАД составляет 1,6:1.

Статические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225L6 с часовой мощностью 55 кВт с обмоткой статора и ротора, пересчитанной на пониженное напряжение питания 178В представлены на рисунке 2.11. Максимальный момент ТАД с пониженным напряжением обмотки статора 178 В не отличается от момента ТАД на стандартное напряжение 220 В. При этом ток фазы статора вырос на 24,5 %.

Динамические характеристики прямого пуска ТАД с последующим «набросом» нагрузки приведены на рисунках 2.12 и 2.13. Характер переходных процессов и установившихся значений моментов, токов и скорости находится в пределах выявленных зависимостей.

Аналогом рассматриваемого в работе отечественного рудничного контактного электровоза К-14 является контактный подземный локомотив TLP90F фирмы «*Ferrit*», Чешская республика, который предназначен для перевозки материала или работников в горизонтальных горных выработках, безопасных по взрыву угольной пыли и газа. Локомотив предназначен для передвижения по рельсовому пути с макс. углом наклона до 5 промилле [58].

Его основные технические характеристики, приведенные в таблице 4, полностью соответствуют данным рассматриваемого в работе электровоза К-14.

Таблица 4. Основные технические характеристики контактного подземного локомотива TLP90F фирмы «*Ferrit*» (Чехия)

Мощность:	110 kW (2 x 55kW)
Макс. тяговое усилие:	40 кН
Скорость:	0...20 км/ч
Ширина колеи:	750...900 мм (29,5...35,4дюймов)
Общая масса:	14,5 т
Макс. угол наклона пути:	50 ‰



Рисунок 2.14. Контактный подземный локомотив TLP90F фирмы «*Ferrit*»

(Республика Чехия)

Выводы по второй главе

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие основные выводы:

1. В качестве прототипа тягового асинхронного двигателя для подземных электровозов, рекомендуется использовать специальный крановый частотно-регулируемый двигатель производства ОАО Сибэлектромотор. Выработаны рекомендации по усилению механической конструкции двигателя, изменению способа крепления двигателя к механическому редуктору с учетом требований, предъявляемым к тяговым двигателям рудничного электровоза.

2. Предложенный способ расчета параметров схемы замещения позволяет осуществлять пересчет обмоточных данных асинхронного двигателя без изменения основных размеров магнитной системы на пониженное напряжение питания обмотки статора. При этом вращающий момент остается неизменным.

3. Проведены модельные исследования, которые подтвердили основные расчетные методики по проектированию двигателей с пониженным напряжением питания обмотки статора. Показано, что асинхронные двигатели со схожей магнитной системой, работающие на напряжения 220 В и 178 В имеют практически одинаковые механические характеристики.

4. Доказано, что рекомендуемые асинхронные крановые двигатели, соответствуют основным требованиям, предъявляемым к тяговым двигателям рудничного электровоза. Предельные механические, электромеханические, пусковые характеристики ТАД на основе специального кранового двигателя с частотным управлением показывают, что обмотки этого двигателя спроектированы оптимальным образом и проявляют отличные тяговые свойства.

Результаты анализа позволяют утверждать, что для обеспечения необходимых тяговых свойств частотно-регулируемого асинхронного двигателя необходимо решить комплекс задач в условиях ограничения величины напряжения в питающей троллейной линии:

- необходимо применять устройства компенсации падения напряжения на 30 % в длинной линии путем использования последовательной вольтодобавки постоянного тока для двухдвигательного частотно-регулируемого тягового электропривода. В этом случае для обеспечения требуемой тяги нужно использовать специально спроектированный тяговый асинхронный двигатель с пониженным напряжением питания;
- в случае использования последовательной вольтодобавки, компенсирующей не только падения напряжения, но и его увеличение на 70 %, возможно использовать тяговые асинхронные двигатели со стандартным напряжением статора;
- в случае использования в качестве источника питания аккумуляторных батарей, при использовании герметичных вводов, можно получить взрывозащищенное исполнение данного электрооборудования.

3. Математическая модель электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза

3.1. Принцип формирования тягового усилия частотно-регулируемым асинхронным электроприводом рудничного электровоза

3.1.1. Взаимодействие ведущей колесной пары электровоза с рельсами

Процесс транспортировки руды цветных и черных металлов в рудничных условиях с помощью электровозной тяги, судя по анализу публикаций [25, 26], показывает, что условия работы технологического оборудования определяются в основном следующими факторами: транспортной логистикой формирования потоков грузов; состоянием и профилем рельсовых путей, а также расстоянием откатки грузов.

На примере шахт Донецкого бассейна на участках подземной откатки наиболее распространёнными являются небольшие грузопотоки до 700 тонн в сутки с длиной транспортировки (откатки) до двух километров (93,6 %). Грузопотоки более 1000 тонн в сутки составляют не более 3 %, а расстояния транспортировки (откатки) более трёх километров – не более 1,5 % [25].

Технологический цикл работы подземного электровоза при подземной откатке грузов состоит из следующих этапов [25]:

- 28 % продолжительности рабочего времени смены – работа на перегонах;
- 19,2 % рабочего времени смены – вспомогательные и маневровые работы (формирование состава на маневровых участках; погрузочно-разгрузочные работы на вагонетках; постановка сошедших с рельсов вагонеток и т. п.);
- более 50 % (оставшееся время рабочей смены) – простой подвижного состава (проведение организационно-технических мероприятий, таких как осмотр силовых агрегатов электровоза, грузовых вагонных тележек, заготовка и подготовка песка).

Известно, что 33,6 % из общей продолжительности работы тяговых электродвигателей приходится на различные маневры. Более 700 переключений контроллера скорости тяговых электродвигателей осуществляется машинистом только за один час работы электровоза. Следовательно, на электромеханическую систему рельсового подвижного состава значительно влияют динамические режимы работы тягового электропривода.

Регламентация скоростных режимов движения подвижного состава в технологии подземной откатки грузов осуществляется на основе действующих норм и правил для отечественных шахт и рудников. Для открытых перегонов скорость движения гружёного состава не превышает 9 км/час; для участков маневрирования, например, при заталкивании состава, она не превышает величины 3,6 км/час, при других маневровых мероприятиях – 5,4 км/час. В процессе движения и маневрирования учитываются и нормативные документы, которые определяют допустимые уклоны продольного рельефа рельсового пути. Средний уклон рельсового пути должен находиться в пределах 3...7 промилле (то есть 3...7 метров на километр пути).

Для учёта процессов буксования и юза ведущих колёс электровоза относительно рельсового пути в переходных и установившихся режимах работы следует учитывать износ бандажа колес и состояние поверхности рельсов. В процентном выражении данный показатель составляет следующие величины:

для чистых рельсов	– 0,7 %;
для сухих рельсов	– 2,5 %;
если рельсы, покрыты водой	– 1,3 %;
если рельсы погружены в грязь до головки	– 9 %;
рельсы покрыты засохшей грязью или пылью	– 23,5 %;
рельсы покрыты жидкой грязью	– 24,7 % [27].

Избыточная величина скольжения колес при разгоне или трогании электровоза возможна за счет изменения коэффициента трения скольжения или коэффициента сцепления колеса с головкой рельса. Сила трения возникает в

контакте колесо–рельс только тогда, когда скорость скольжения колеса относительно рельса больше нуля. И если сила трения мала, колеса ведущих пар электровоза под действием тягового момента начнут вращаться с большой скоростью относительно рельсов, а сам состав останется без движения. Коэффициент сцепления колес с рельсовыми путями подземного электровоза находится в диапазоне $0,07...0,1$ хотя известно, что коэффициент тяги рудничного электровоза К14 при чистых и сухих рельсовых путях имеет величину $0,175$. Реальные условия эксплуатации подвижного состава рельсового транспорта, а именно его загруженность, коэффициенты трения (сцепления), необходимо учитывать при исследовании динамических режимов работы. Эффективным способом увеличить коэффициент сцепления пары колесо–рельс является подсыпка песка под ведущие оси колёсных пар. При этом коэффициент сцепления ведущих колёс увеличивается до значения $0,4$. Таким образом, песок, раздавленный ведущими колёсами в результате предыдущей поездки, даёт увеличение скорости скольжения до величины $0,15...0,18$ м/с [27].

Большая вероятность изменения характеристик сцепления из-за возможного уменьшения коэффициента трения скольжения или коэффициента сцепления колеса с рельсом неизбежно приведёт к неуправляемому буксованию колес и фактической остановке состава.

Анализ переходных процессов, при возникновении буксования и юза колес подземного электровоза с учетом ограничений и требований правил его эксплуатации и технологии подземной откатки, позволяет сделать вывод о том, что для повышения тяги рудничных электровозов необходимо использовать специальные алгоритмы управления автоматизированными частотно-регулируемыми электроприводами.

Для решения этой задачи необходимо разработать математическую модель механической системы подвижного состава, которая будет учитывать степень его загруженности, коэффициенты сцепления и трения качения колеса относительно рельса, уровень уклона пути и другие факторы.

3.1.2. Метод определения явления буксования подземного электровоза

При движении подземного электровоза на подъем, особенно при трогании гружёного состава с места, возникает эффект буксования т. е. увеличение скорости скольжения, которая представляет собой разность между линейной скоростью колеса ведущей пары в точке контакта с рельсом и скоростью оси колёсной пары и вызвана потерей сцепления колёс с рельсами. Данная ситуация сопровождается нестационарным неуправляемым режимом движения, повышенными затратами электроэнергии и увеличением общего времени движения поезда. Также ситуация осложняется тем, что для восстановления управления приводом тяги электровоза при наличии буксования необходимо обнаружить и количественно измерить данный эффект, что не всегда возможно осуществить на практике. После чего необходимо остановить вращение колёсной пары и осуществить её повторный пуск с ограничениями, исключающими режим пробуксовки.

Математическое описание метода косвенного обнаружения буксования колесной пары на основе использования предложенной авторами фильтрующей схемы, позволяет оценивать временные характеристики электровоза, связанные с буксованием [59].

Для вращательного движения определяем момент сопротивления, например, первой колесной пары (КП), используя второй закон Ньютона для вращательного движения:

$$M_1 = M_3 - J\varepsilon,$$

где J – момент инерции КП; ε – угловое ускорение КП; M_3 – момент задания.

Эффект буксования будем определять на основе полученного значения момента сопротивления КП. Рассматриваемое устройство [59] помимо полосового фильтра содержит и фильтр низких частот. Именно на этой основе построен «наблюдатель» для вычисления избыточной скорости скольжения.

Математически метод можно описать следующим образом: в системе автоматического управления тяговым электроприводом при сигнале задания момента от времени $M_3(t) \neq 0$ к нему добавляется сигнал, изменяющийся по гармоническому закону с малой амплитудой и круговой частотой ω , который система управления способна эффективно обработать:

$$f(t) = A \sin(\omega t).$$

Если амплитуду добавочного сигнала A принять равной единице, тогда функция избыточной скорости скольжения выбранной нами КП будет иметь вид

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

где $v_{эв}$ – линейная скорость электровоза, а R – радиус колеса. Момент первой КП в функции скольжения, в соответствии с [60], имеет вид

$$M_1(t) = M_3 - J\varepsilon = \left(\psi_0 \left(1 - \exp\left(\frac{-2U_1(t)}{U_0} \right) \right) \right) \frac{m_{эв} R}{k_{п}},$$

где $k_{п}$ – коэффициент механической передачи (редуктора); $m_{эв}$ – масса электровоза; ψ_0 – коэффициент сцепления.

На рисунке 3.1 представлена функциональная схема фильтрации сигнала $M_1(t)$.

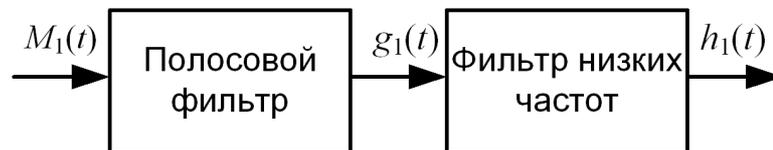


Рисунок 3.1. Схема фильтрации момента первой колёсной пары

Полученное значение момента $M_1(t)$ поступает на вход полосового фильтра (ПФ), который имеет передаточную функцию:

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

где p – оператор Лапласа.

Величина на выходе ПФ приближённо описывается функцией вида

$$g(t) = \int_0^t M_1(t-\tau)w(\tau)d\tau = \int_0^t \left(\frac{2\psi_0 m_{эв} R}{kU_0} \frac{dU_1(t-\tau)}{dt} \exp\left(\frac{-2U_1(t-\tau)}{U_0}\right) \right) \cdot \left(\frac{k \exp(-p_1\tau)}{2p_1+a} + \frac{k \exp(-p_2\tau)}{2p_2+a} \right) d\tau, \quad (*)$$

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

Анализ выражения (*) показывает, что наблюдается явная зависимость между выходной переменной ПФ и величиной скорости скольжения. Повышение скорости скольжения приводит к тому, что значение выходного сигнала $g_1(t)$ стремится к нулю, а при уменьшении скорости скольжения – выходной сигнал $g_1(t)$ увеличивается. Поскольку ПФ выдает сигнал $g_1(t)$ сложной колебательной формы из-за выделения собственно частоты $f(t)$, то для получения более качественного выходного сигнала реакции ПФ нужно использовать фильтр низких частот (ФНЧ) с передаточной функцией:

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

где ω_c – частота среза фильтра.

3.1.3. Результаты моделирования

Основным доказательством работоспособности метода косвенного обнаружения буксования и юза колесной пары тягового рудничного электровоза, если явные аналитические зависимости получить достаточно тяжело или невозможно, является анализ графических зависимостей, полученных в результате моделирования переходных режимов работы тяговых электроприводов колёсных пар подземного электровоза. Ниже, на рисунке 3.2, представлен график зависимости выходного сигнала ПФ $g_1(t)$.

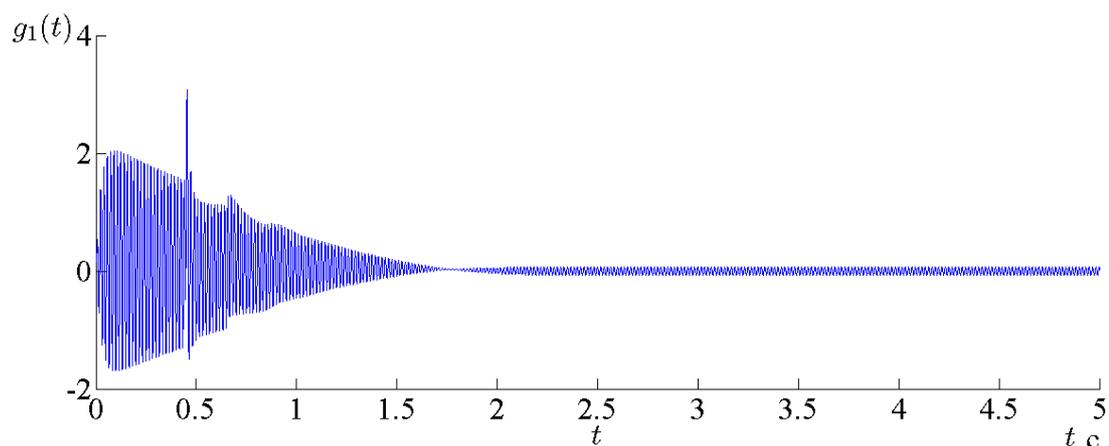


Рисунок 3.2. График $g_1(t)$ выходного сигнала ПФ

На рисунках 3.3 и 3.4 присутствуют зависимости $h_1(t)$, представляющие собой реакцию ФНЧ на входное воздействие $g_1(t)$.

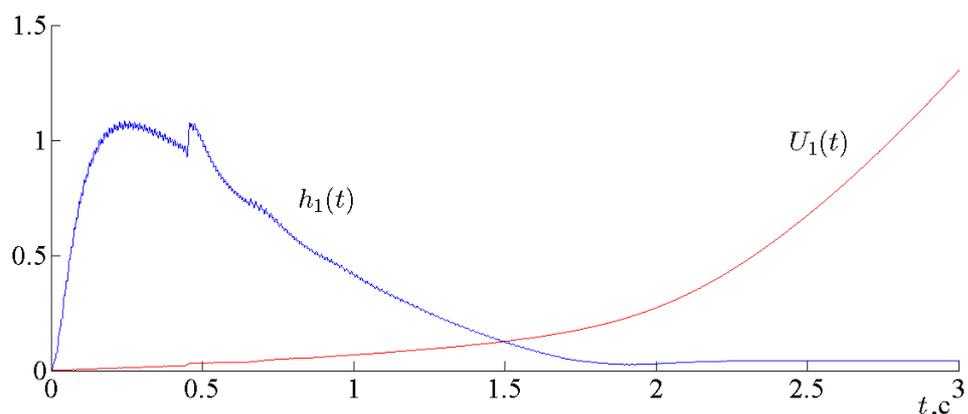


Рисунок 3.3. Графики $U_1(t)$, $h_1(t)$

На рисунке 3.4 представлены графики $U_1(t)$, $h_1(t)$ в режиме разгона, когда на входе момент задания растёт, а затем в режиме торможения, когда момент задания уменьшается.

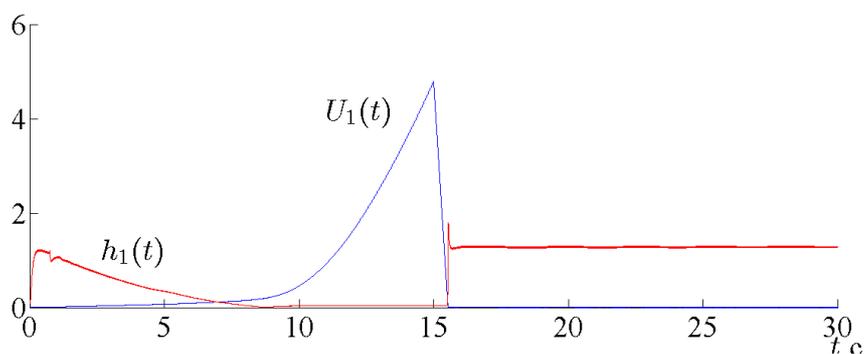


Рисунок 3.4. Графики $U_1(t)$, $h_1(t)$

Сигнал задания момента на входе системы можно приблизительно описать в виде

$$M_3(t) = M_{\max} - M_{\max} \exp(-kt),$$

где t – время; M_{\max} – максимально возможное значение задающего сигнала; k – коэффициент, определяющий скорость возрастания функции.

Тогда поведение функции скорости скольжения $U_1(t)$ возможно определить в зависимости от параметров входного сигнала $M_3(t)$. Представленные зависимости на рисунках 3.3 и 3.5 показывают прямо пропорциональный характер зависимости между скоростью роста задающего сигнала $\frac{dM_3(t)}{dt}$ и величиной скорости скольжения $U_1(t)$.

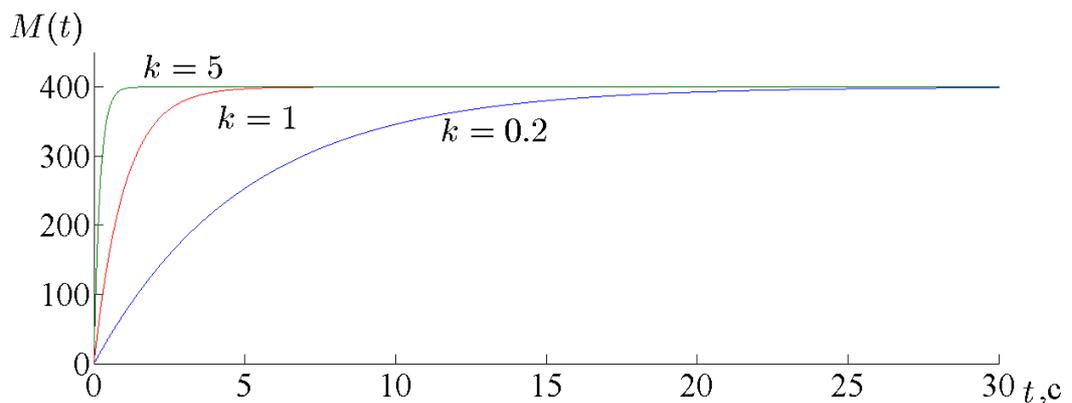


Рисунок 3.5. Вид задающего сигнала при различных значениях k

Анализ зависимостей, задающих воздействий при различном показателе роста экспоненты на рисунке 3.5, показывает, что скорость роста данных сигналов задающего момента напрямую определяет характер функции скорости скольжения. Скорость изменения входного сигнала управления оказывает влияние на реакцию ПФ и ФНЧ. Абсолютная величина $\frac{dh_1(t)}{dt}$ растет медленнее при наименьшем значении степенного показателя экспоненты: $k = 0,2$.

При этом величина скорости изменения $h_1(t)$ прямо пропорциональна изменению скорости скольжения. Малая величина $\frac{dh_1(t)}{dt}$ соответствует меньшему значению $\frac{dU_1(t)}{dt}$. С большим показателем степени экспоненты ($k = 1$ и $k = 5$) происходит увеличение сигнала $\frac{dh_1(t)}{dt}$ и рост производной по времени скорости скольжения $\frac{dU_1(t)}{dt}$ [50, 61].

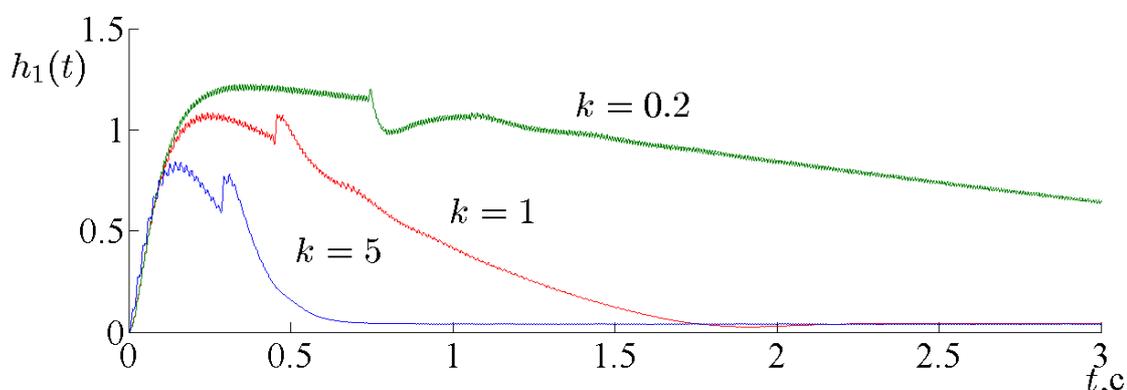


Рисунок 3.6. Выход схемы фильтрации $h_1(t)$ при различных значениях k

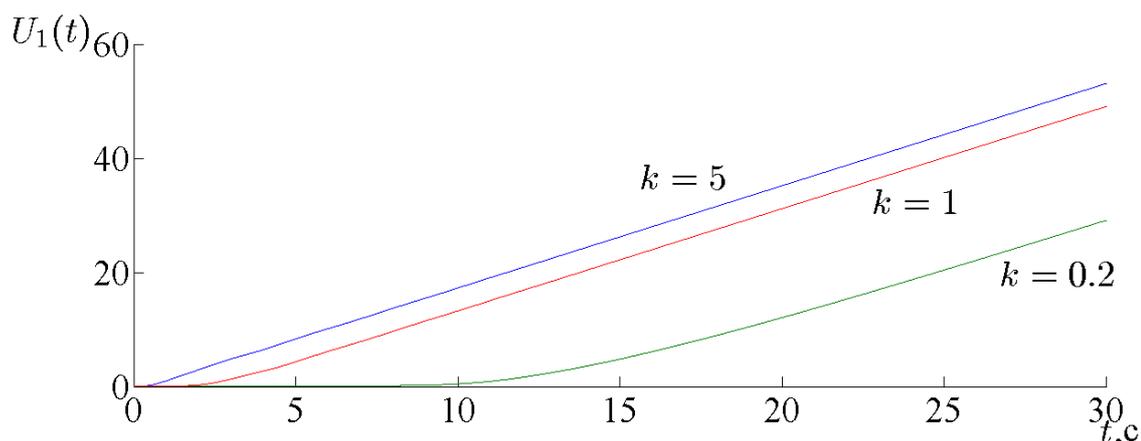


Рисунок 3.7. Скорость скольжения $U_1(t)$ при разных значениях k

Практическую ценность данного подхода к обнаружению эффекта буксования и юза колесной пары рудничного электровоза подтверждает полученный авторами патент на полезную модель RU 141267 U1 (рис. 3.8).

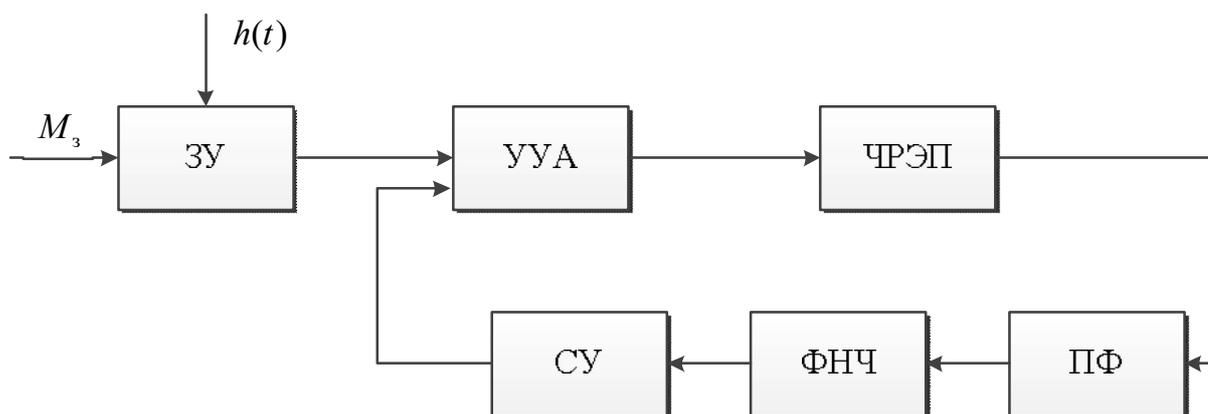


Рисунок 3.8. Функциональная схема устройства обнаружения буксования и юза колесной пары тягового рудничного электровоза

Устройство обнаружения буксования и юза колесной пары тягового рудничного электровоза отличается от известных тем, что к блоку задания электромагнитного момента частотно-регулируемого электропривода переменного тока последовательно подключены устройство управления и анализа, частотно-регулируемый электропривод, полосовой фильтр, фильтр низких частот и согласующее устройство, выход которого соединен с входом устройства управления и анализа [59].

Таким образом, на основе предложенного устройства можно осуществлять автоматическое обнаружение начала буксования и юза КП рудничного электровоза в реальном времени.

Процесс буксования колёсной пары рудничного электровоза в переходных режимах исследован в программном пакете *MatLab Simulink* фирмы *Mathworks*.

На рисунке 3.9 приведён график измеренного косвенным способом момента сопротивления первой колесной пары $M_1(t)$.

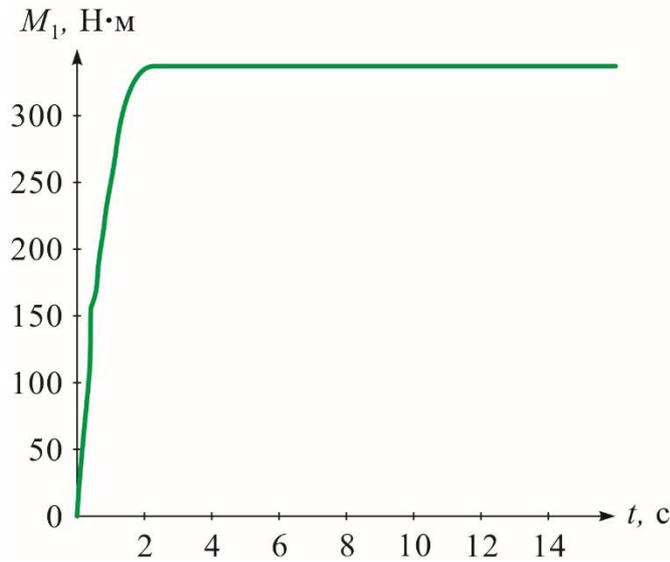


Рисунок 3.9. Зависимость момента сопротивления $M_1(t)$ от времени

Колебания момента относительно среднего его значения объясняются процедурой дифференцирования.

На рисунке 3.10 показаны зависимости линейной скорости первой КП $v_1(t)$ и скорости самого электровоза $v_{\text{эв}}(t)$ от времени.

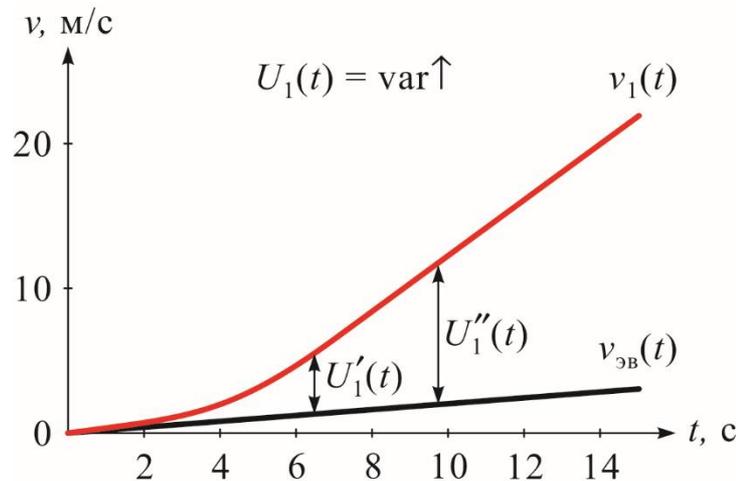


Рисунок 3.10. Графики линейных скоростей $v_1(t)$ и $v_{\text{эв}}(t)$ при наличии режима буксования первой колёсной пары

Существует расхождение в значениях линейных скоростей в точке на ободе колесной пары и скорости оси колесной пары относительно рельсов из-за эффекта буксования. Буксование ведущих колёс вызвано увеличением скорости скольжения $U_1(t)$, которая определяется по выражению

$$U_1(t) = v_1(t) - v_{\text{эв}}(t).$$

Рост скорости скольжения, а одновременно с нею буксование ведущих колёс КП относительно рельсового пути, увеличивает количество энергии, потраченной впустую. Проблему буксования и юза можно решить, имея априорную информацию о величине скорости скольжения, используя косвенный способ её определения, и уже на основе этой информации синтезировать закон управления регулируемым электроприводом для устранения неэффективных режимов разгона и торможения состава.

Для решения этой задачи применимо устройство обнаружения буксования и юза КП [59]. Далее показаны результаты моделирования процесса предотвращения пробуксовки и юза КП путём ограничения момента задания с использованием специального алгоритма управления [62].

На рисунке 3.11 представлены графики скорости первой КП и электровоза. Скорость скольжения $U_1(t)$ показана как разность линейных скоростей $v_1(t)$ и $v_{\text{эв}}(t)$. На рисунке 3.11 видно, что при использовании алгоритма компенсации буксования и юза скорость скольжения $U_1(t) \approx \text{const}$. Величина скорости скольжения должна быть ограничена в интервале $0,1 \dots 0,16$ м/с.

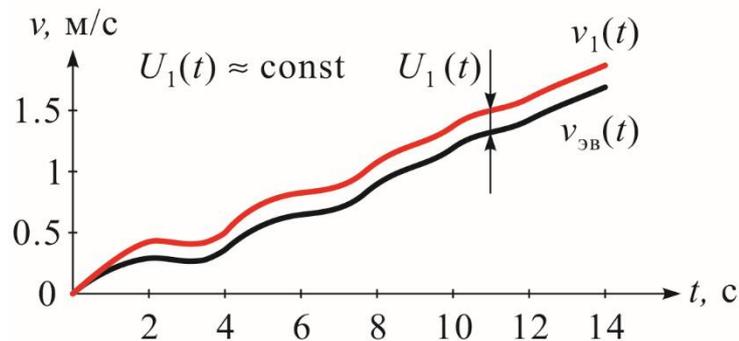


Рисунок 3.11. Линейные скорости $v_1(t)$ и $v_{\text{эв}}(t)$ при использовании алгоритма компенсации буксования первой КП

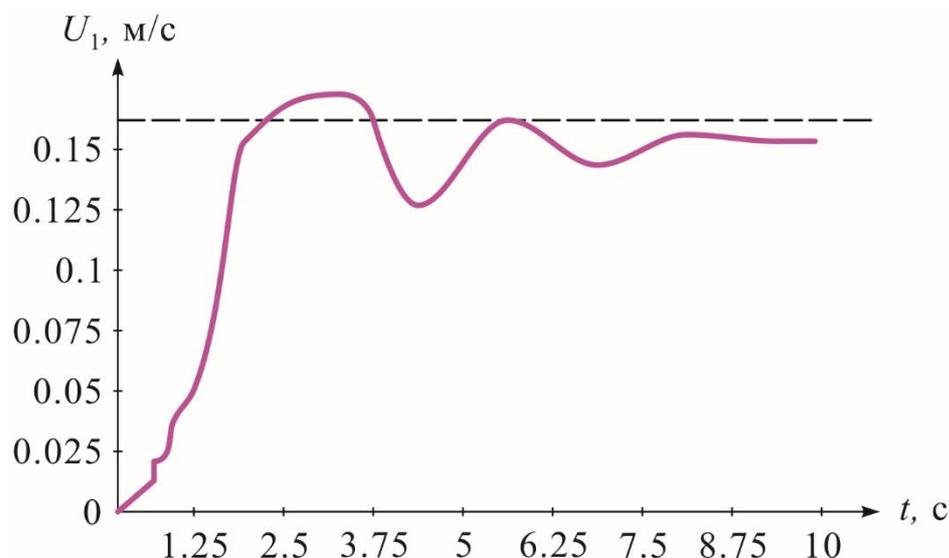


Рисунок 3.12. Зависимость скорости скольжения от времени $U_1(t)$

На рисунке 3.12 показана работоспособность предложенного метода компенсации буксования и юза КП путем управления разгоном и торможением электровоза с помощью алгоритма управления ТАЭП. Время переходного процесса разгона подвижного состава с рудничным электровозом на имитационной модели из состояния покоя до скорости 2,5 м/с соотносится со временем вычисления величины скорости скольжения и временем её ограничения на допустимом уровне $|0,1 \dots 0,16|$ м/с для предотвращения эффекта буксования. Таким образом, теоретически доказана работоспособность метода обнаружения и предотвращения эффекта буксования КП при разгоне и торможении состава на имитационной модели [63].

В итоге созданы предпосылки для разработки алгоритма управления движением рудничного электровоза, позволяющего формировать управляющие воздействия на электропривод колесной пары для обеспечения оптимального разгона-торможения по критерию максимальной тяги.

3.1.4. Коэффициент сцепления колёс с рельсами рудничных электровозов

Рассмотрим действие сил трения качения и скольжения колёс рудничного электровоза и вагонеток по рельсовому пути в технологии откатки грузов. Две колёсные пары электровоза являются ведущими, а две колёсные пары

каждой вагонетки являются ведомыми, так как тяговое усилие передаётся от электровоза к вагонеткам через сцепное устройство.

Очевидно, что при равномерном движении состава из вагонеток по горизонтальному участку рельсового пути без уклона сопротивление движению (качению) колёс оказывает момент сил трения качения.

Практические приложения теории трения качения рассмотрены в монографии академика Александра Юльевича Ишлинского [64], где он отметил, что вопросы трения качения изучались А. Кулоном, А. Мореном, Ж. Дюпюи, О. Рейнольдсом и Г. Фроммом. И если А. Кулон, А. Морен и Ж. Дюпюи экспериментально исследовали зависимость силы трения качения от силы давления катка на твёрдое основание, то О. Рейнольдс «объяснил возникновение силы трения качения при перекатывании абсолютно упругого катка по абсолютно упругому основанию относительным скольжением соприкасающихся поверхностей вследствие их деформации. Г. Фромм на основании теории Рейнольдса, сводившей изучение трения качения к изучению трения скольжения в соприкасающихся поверхностях, решил задачу о подсчёте силы трения при фрикционной передаче» [64].

А.Ю. Ишлинский рассмотрел качение абсолютно жесткого катка (колеса) по не абсолютно упругому основанию. В данном случае нами рассматривается рельсовый путь на шпалах, уложенных на подложку из щебня.

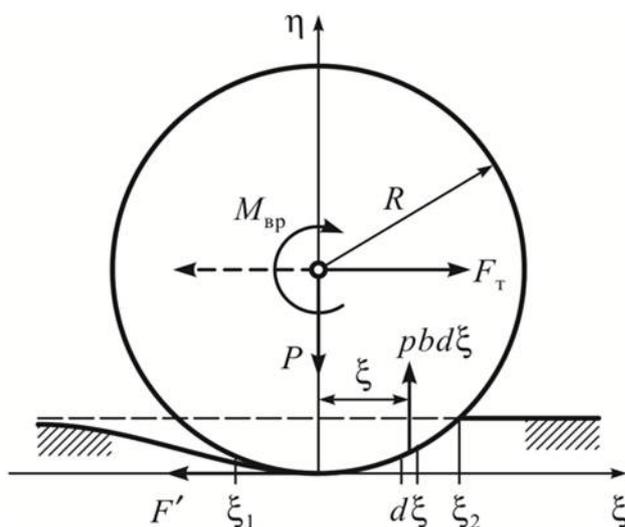


Рисунок 3.13. Трение качения в ведомых и ведущих колёсах

Если стальное колесо с радиусом R и шириной b катится без скольжения с постоянной скоростью $v_{эв}$ по не абсолютно твёрдому основанию (рисунок 3.13), тогда, по условию равновесия, сумма всех сил, действующих на колесо, будет равна нулю. Уравнения равновесия сил по осям ξ и η , а также моментов относительно нижней точки колеса описывают поведение системы с малой погрешностью, происходящей за счёт искривления поверхности соприкосновения.

$$\left\{ \begin{array}{l} F_T - F' = 0; \\ P - \int_{\xi_1}^{\xi_2} bp(\xi)d\xi = 0; \\ M_{вр} + F_T R - \int_{\xi_1}^{\xi_2} bp(\xi)\xi d\xi = 0, \end{array} \right.$$

где:

- «внешние силы, приложенные к колесу, в том числе сила тяжести, приведённые к его геометрическому центру, образуют пару сил с моментом $M_{вр}$, горизонтальную силу F_T и вертикальную силу давления колеса на рельс \vec{P} ;
- сила сцепления колеса с рельсом \vec{F}' , удерживающая его от скольжения, обусловлена в основном трением первого рода поверхностей колеса и рельса;
- распределённые по поверхности соприкосновения колеса с рельсом вертикальные силы $p(\xi)$ – реакции рельса на колесо;
- удельное давление p , производимое этими силами, принимается постоянным вдоль образующих цилиндрической поверхности колеса и зависит лишь от расстояния ξ до вертикальной плоскости, проходящей через ось колеса;
- поверхность соприкосновения колеса с рельсом представляет часть цилиндрической поверхности, передний край которой удалён от вертикальной

плоскости, проходящей через ось колеса, на некоторое расстояние $\xi_2 > 0$ (начало соприкосновения рельса с колесом), а задний край – на расстояние $\xi_1 < 0$ (конец соприкосновения)» [64].

Следует рассмотреть случай приложения сил трения качения к ведущему и ведомому колёсам.

Для *ведомого* колеса момент $M_{вр} = 0$ и уравнение равновесия моментов определяет силу тяги \vec{F}_T , необходимую для поддержания постоянной скорости $v_{эв}$ движения оси колеса:

$$F_T = \frac{1}{R} \int_{\xi_1}^{\xi_2} bp(\xi) \xi d\xi.$$

Сила F_T в этом случае является силой трения качения $F_{тр}$, а произведение $F_{тр} R = M_{тр}$ – момент трения качения, поэтому $M_{тр} = \int_{\xi_1}^{\xi_2} bp(\xi) \xi d\xi$.

Сила трения качения возникает из-за некоторого смещения $\xi = f_T$ равнодействующей сил давления рельса на колесо в сторону движения благодаря несимметрии поверхности соприкосновения $\xi_2 > |\xi_1|$ и неравномерного распределения сил давления по этой поверхности. Это смещение может быть найдено из соотношения $F_T R = f_T P$ и представляет собой плечо силы трения качения или коэффициент трения качения, который имеет в отличие от безразмерного коэффициента трения скольжения ψ размерность в единицах длины [м].

Если же **колесо**, равномерно катящееся по рельсу, *ведущее*, то к нему приложен движущий момент со стороны тягового электропривода $M_{вр} > 0$, а сила трения качения, направленная в сторону, противоположную движению колеса (см. рисунок 3.13, пунктир), представляет собой сопротивление электроваза, приводимого в движение ведущими колёсами.

$$y = y_0 - \frac{1}{2R} \xi^2, \text{ так как } y = y_0 - \eta \text{ и } \eta = R - \sqrt{R^2 - \xi^2} \approx \frac{1}{2R} \xi^2,$$

где ξ и η – координаты точки B относительно подвижной системы координат $\xi\eta$, начало которой находится в нижней точке колеса A , а ось η вертикальна.

При качении абсолютно твердого колеса по упругому основанию А.Ю. Ишлинским было выявлено, что в случае достаточно малой скорости движения центра колеса $v_{эв}$ относительно опорной поверхности, формулы момента и силы трения качения имеют вид:

$$M_{\text{тр}} = \frac{\mu \cdot v_{эв}}{K} P, \quad F_{\text{тр}} = \frac{\mu \cdot v_{эв}}{KR} P,$$

где μ [Н/м³] – коэффициент внутреннего трения; K [кг/м³] – модуль жесткости упругого основания (рельса). Сила трения качения при малых скоростях движения (режим трогания из состояния покоя) пропорциональна скорости движения и обратно пропорциональна радиусу колеса, поэтому происходит её рост от нулевого значения в состоянии покоя до некоторого максимального значения при движении.

При большой скорости движения колеса (ускоренное или поступательное движение) выражение силы трения качения $F_{\text{тр}} = \frac{4}{3\sqrt{2}} \frac{P^{3/2}}{\sqrt{\mu v_{эв} b R}}$ показывает её уменьшение при увеличении скорости центра колеса и его ширины [64]. Полученные выражения необходимо использовать для определения усилия нагрузки от вагонеток в сцепном устройстве подземного локомотива. Для ведущих колес подземного локомотива усилие трения качения является составляющей момента нагрузки, незначительно уменьшая тяговый момент и усилие тяги в сцепном устройстве. Для того чтобы тяговый момент двух ведущих колёсных пар локомотива полностью передавался на сцепное устройство, необходимо рассмотреть поведение коэффициента трения скольжения в контакте ведущее колесо – рельс. С одной стороны, именно величина этого коэффициента и вес локомотива определяют тяговое усилие грузового состава, с другой стороны, неконтролируемое увеличение тягового момента электропривода

при возможном уменьшении коэффициента трения скольжения ведущих колёс относительно рельсовых путей неизбежно вызовет режим буксования [64]. Коэффициент трения скольжения в контакте колесо-рельс рудничных электровозов определяет способность электровоза, при неизменном его весе, отталкиваться колёсами ведущих пар от опорной поверхности для реализации максимально возможной тяги в сцепном устройстве. Практические исследования зависимости коэффициента трения скольжения проведены в 60-х годах 20 века профессором А.А. Ренгевичем. Он экспериментально установил [65], что при используемых материалах колес и рельсов, состоянии контактных поверхностей, постоянной нагрузке на оси колесных пар и постоянной линейной скорости движения электровоза, коэффициент трения скольжения зависит лишь от скорости скольжения колёсной пары U_1 . Полученные зависимости в абсолютных величинах приведены на рисунке 3.15.

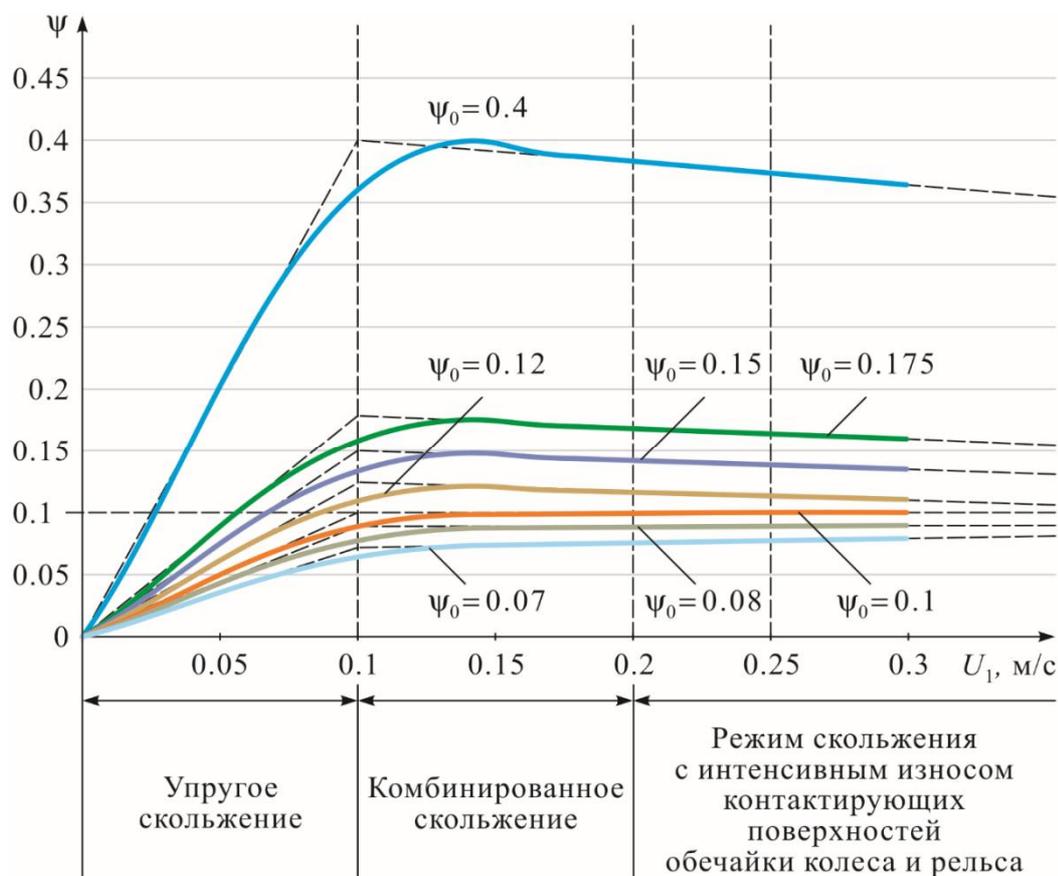


Рисунок 3.15. Экспериментальная зависимость коэффициента сцепления ψ от скорости скольжения U_1 , где ψ_0 – теоретический или потенциальный коэффициент трения скольжения; $U_0 = 0,1$ (м/с) – максимальная скорость упругого скольжения

Зависимость $\psi(U_1)$ можно условно разделить на 3 зоны: упругого скольжения; комбинированного скольжения; скольжения с интенсивным износом контактирующих поверхностей.

Приведенная на рисунке 3.15 зависимость коэффициента сцепления от скорости скольжения аппроксимируется двумя линейными участками [65], показанными штриховыми линиями.

Для описания полученных участков характеристики А.А. Ренгевичем были получены следующие эмпирические зависимости:

$$\psi(U_1) = \psi_0 \frac{U}{U_0} \text{ при } |U| < U_0;$$

$$\psi(U_1) = \psi_0 + (U - U_0) \operatorname{tg} \alpha \text{ при } |U| \geq U_0,$$

где $\operatorname{tg} \alpha = 0,016 - 0,03\sqrt{10\psi_0 - 0,7}$.

Эти зависимости показывают, что на первом участке упругого скольжения коэффициент трения линейно изменяется от нуля до максимального значения $\psi = 0 \dots \psi_0$, а на втором участке и далее при нормальном значении коэффициента $\psi_0 > 0,1$ (чистые и сухие рельсы) – медленно уменьшается.

При низком значении потенциального коэффициента трения скольжения $\psi_0 < 0,1$ (загрязненные рельсы) на участке комбинированного скольжения и далее реальный коэффициент трения скольжения (сцепления) $\psi = f(U_1)$ не падает, а медленно растёт, асимптотически приближаясь к горизонтальному участку при $\psi_0 = 0,1$.

Коэффициент сцепления для чистых и сухих рельсов и ведущих колёс электровоза равен по величине паспортному значению коэффициента тяги электровоза К-14 $k_t = 0,175$ и при неблагоприятных факторах, связанных с загрязнением пути, уменьшается.

Диапазон изменения коэффициента сцепления ведущих колёс подземного электровоза относительно рельсов находится в пределах $\psi = 0,07 \dots 0,175$.

Так как тяговое усилие локомотива пропорционально его весу и коэффициенту сцепления, то увеличение веса электровоза не может эффективно компенсировать снижение тягового усилия при соответствующем уменьшении коэффициента сцепления колёс рельсами, поэтому основным способом увеличения коэффициента сцепления вплоть до величины $\psi_0 = 0,4$ (см. рис. 3.15) является подсыпка песка на рельсы под колёса ведущих пар. Однако после двух-трёх проходов подвижного состава по рельсам песок раздавливается и трение скольжения при этом уменьшается в 2...2,5 раза. Эксплуатация загрязнённых рельсовых путей при постоянной подсыпке песка значительно осложняется из-за необходимости регулярного его удаления и утилизации.

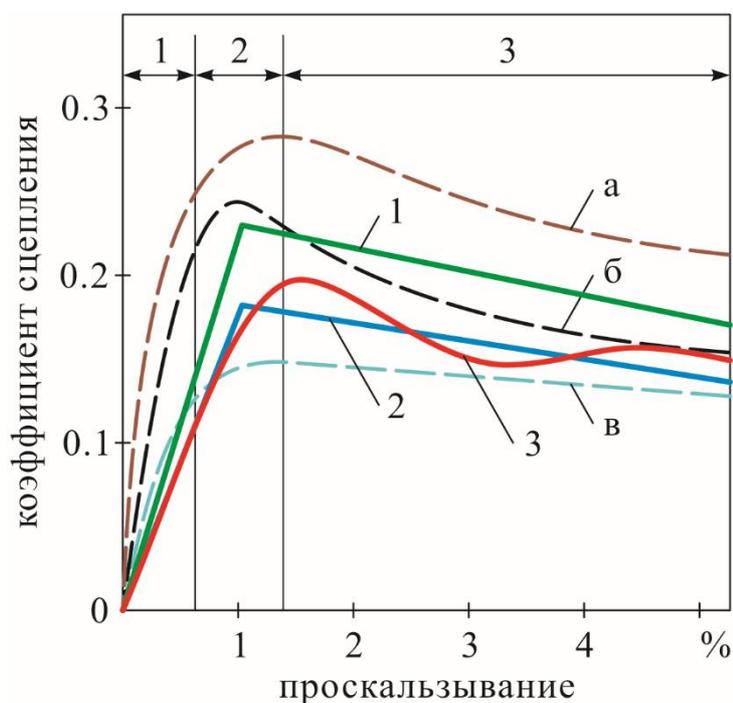


Рисунок 3.16. Экспериментальные зависимости коэффициента сцепления

$$\psi = f(U_1^*)$$

Экспериментальные исследования взаимосвязи между коэффициентом сцепления (трения скольжения) движущегося колеса и относительной скоростью скольжения в разные годы были проведены также коллективами под руководством профессоров В.В. Процива, А.А. Сердюка из Национального горного университета Украины и др. На рисунке 3.16 приведены идеализированные зависимости коэффициента трения скольжения шахтного электровоза от

относительной скорости скольжения U_1^* % для различных состояний рельсового пути:

- а) сухие рельсы;
- б) рельсы с твердыми загрязнителями;
- в) влажные рельсы.

Также здесь обозначены цифрами характеристики изменения коэффициента трения скольжения, экспериментально полученные разными авторами [66–68] для рудничных электровозов:

- 1) профессором А.А. Ренгевичем в 1962 году;
- 2) профессором В.В. Процивим в 1990 году;
- 3) профессором А.А. Сердюком, к.т.н. К.А. Зиборовым и к.т.н. О.В. Дерюгиным в 2000 году.

Полученные опытные данные подтверждают совпадение результатов аналитических исследований поведения сил трения скольжения и сил трения качения [64] в случае движения рельсового транспорта при изменяющихся внешних факторах. Анализ аналитических и экспериментальных данных зарубежных и отечественных ученых [52, 69–73] показывает, что в условиях подземной откатки грузов коэффициент трения скольжения может значительно менять свое значение в сторону уменьшения, что приводит к появлению нежелательных режимов: буксования при разгоне состава и юза при его торможении.

3.1.5. Разработка способа управления тяговым электроприводом рудничных электровозов

Задача разработки эффективной системы управления регулируемым тяговым электроприводом подземного рельсового транспорта не утратила актуальности. В своей диссертации «Повышение тяговых свойств рудничного электровоза средствами электропривода» [60] Ю.Н. Кутовой исследовал динамические свойства замкнутой системы автоматического регулирования (САР)

скорости избыточного скольжения по расчетам переходных процессов в тяговом электроприводе постоянного тока рудничного аккумуляторного электровоза АРП14-900, возникающих в режимах наиболее опасных с позиции появления буксования. К таким режимам он отнес: пуск электровоза с непосредственным приложением напряжения задания скорости, резкое изменение коэффициента сцепления, пуск на участке пути с положительным уклоном (на подъём) и т. д. На рисунке 3.17 приведен сопоставительный анализ динамики пуска тягового электропривода рудничного электровоза с разработанным устройством противобуксовочной защиты и без него на участке подъёма 5 м на 1 км пути (5 ‰) для ведущей колёсной пары, наиболее склонной к буксованию при значении коэффициента сцепления $\psi_0 = 0,1$.

Задание на скорость колёсной пары в виде напряжения управления $U_y(t)$ подается через задатчик интенсивности (ЗИ) с линейной характеристикой, настроенный на время нарастания сигнала до заданного значения скорости – 2 м/с за 10 с и подаваемого на вход тиристорного преобразователя, питающего цепь якоря двигателя постоянного тока.

Обнаружение эффекта буксования, по Ю.Н. Кутовому, осуществляется по измеренному превышению ускорения на ободе колёсной пары зоны нечувствительности $\Delta a = \pm 0,25$ м/с². Включение и отключение обратной связи по избыточному скольжению в САР скорости обусловило колебания в кривой тока якоря тягового двигателя I_1' (сплошная линия). Применение противобуксовочной защиты уменьшает скорость избыточного скольжения в 2,8 раза до уровня 0,6 м/с. Интенсивность и время разгона электровоза до заданной скорости увеличились незначительно ($v'_{эл}(t)$ на рисунке 3.17). Скорость скольжения и в этом случае достаточно велика. Поскольку вычислительный алгоритм устройства защиты от буксования работает по итерационному принципу, то при резком изменении коэффициента сцепления потребуется время для поиска оптимальных параметров устройства, что делает управление в реальном времени неэффективным.

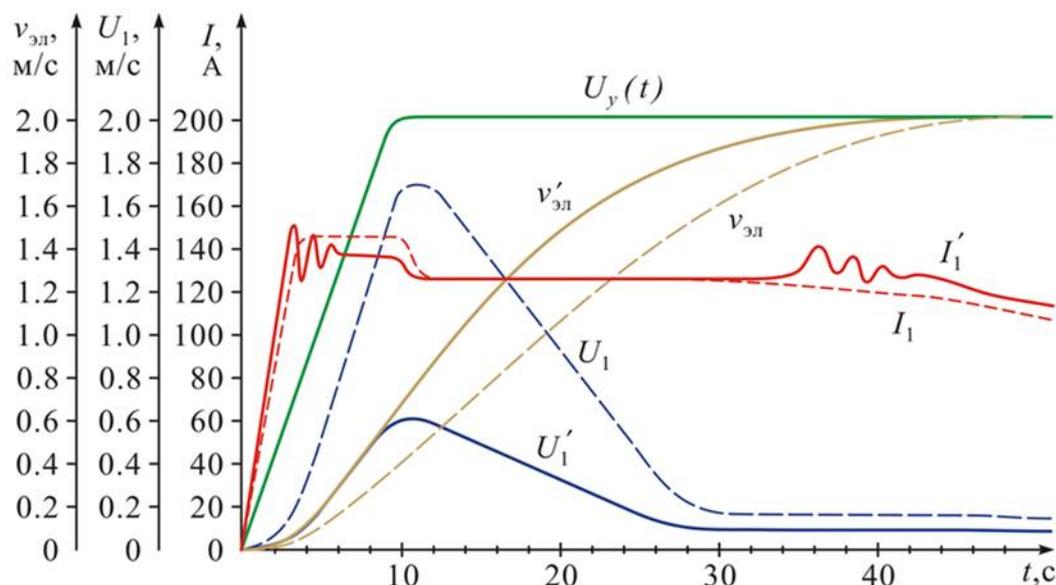


Рисунок 3.17. Диаграмма пуска электропривода электровоза АРП14 на уклон 5 ‰

Так как, по нашему мнению, трудно отследить изменение условий сцепления колёс с рельсами, вследствие случайного характера этих изменений, необходимо решить задачу выбора нового критерия управления, использование которого свело бы к минимуму риск появления буксования при трогании с места полностью груженого состава.

Этим критерием является величина скорости скольжения у ведущих колёс электровоза. Зависимости коэффициента сцепления ψ от скорости скольжения U_1 для реализации способа управления тяговыми электроприводами колёсных пар приведены на рисунке 3.18. Если ψ_0 – теоретический или потенциальный коэффициент трения скольжения – отслеживать достаточно трудно, а в реальном времени невозможно, то технически определить величину скорости скольжения можно через разность скоростей ведущей и ведомой колёсных пар.

Для реализации тяги необходимо, чтобы за начальную величину скорости скольжения принимали $U_0 = 0,1$ (м/с) – максимальную скорость упругого скольжения для работы на втором участке комбинированного скольжения.

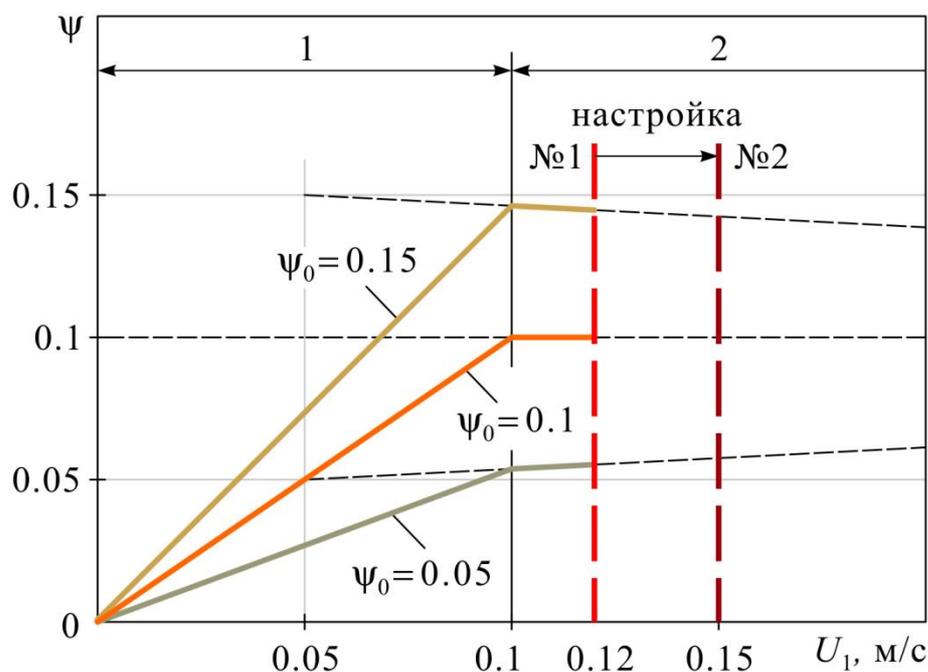


Рисунок 3.18. Характеристики зависимости коэффициента сцепления ψ от скорости скольжения U_1 для реализации способа управления тяговым ЭП

Изменение уставки предельной величины скорости скольжения ведущих колёс подземных электровозов в диапазоне от 0,1 до 0,2 м/с позволяет использовать алгоритм поиска точки максимальной тяги для конкретных условий сцепления колёс с рельсами. Режим разгона и торможения состава с контролем предельной величины скорости скольжения является наиболее предпочтительным.

3.2. Модель электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза

Большинство электровозов с питанием от контактной сети, применяемых в горнодобывающей промышленности, используют в качестве тяговых электрических машин двигатели постоянного тока последовательного возбуждения из-за благоприятных регулировочных характеристик, которые при этом имеют недостатки, обусловленные низкой надежностью конструкции щеточно-коллекторного узла и возможность искрения, что недопустимо по условиям взрывобезопасности. В настоящее время, в области тягового электропри-

вода (ЭП) начался этап массового внедрения асинхронного тягового электропривода с векторным управлением [74]. Этот факт создает предпосылки для создания рудничных электровозов с асинхронным тяговым электроприводом.

Математический аппарат теории асинхронного электропривода предоставляет возможность с достаточно высокой точностью определить параметры тяговых электродвигателей, поэтому для анализа и синтеза системы управления следует провести исследования на имитационной модели. На начальном этапе разработки системы управления ТАЭП подземного рудничного электровоза требуется разработать адекватную математическую и имитационную модели, что позволит минимизировать время проведения натурных исследований режимов работы. В данной математической модели подвижного состава необходимо предусмотреть, какие ограничения нужно учесть для соблюдения принципа адекватности модели текущим условиям и режимам работы.

С учётом изгибающего момента относительно центра массы электровоза при реализации тяги, зазоров в устройствах сцепки вагонеток между собой и тяговым устройством, упругого крепления корпуса электровоза к буксам КП следует рассматривать данную механическую систему как систему с распределёнными параметрами.

При исследовании динамических режимов работы электромеханических систем подземного рельсового транспорта перечисленные факторы рассматривались по отдельности, но без учёта их совокупного влияния на переходные процессы [60, 75, 76].

Подземный электровоз, оснащённый двумя ведущими КП с десятью-двенадцатью двухосными вагонетками для транспортировки руды и других сыпучих грузов, может быть представлен как единая электрическая и механическая система. Её математическое описание представляется системой дифференциальных уравнений, разделённой на электромеханическую и механическую части. Электромеханическая часть состоит из тяговых электроприводов двух ведущих КП рудничного электровоза. Механическая часть представляет собой механическую систему электровоза совместно со сцепкой из двенадцати

вагонеток. Поскольку части единой системы оказывают друг на друга значительное силовое воздействие в переходных режимах работы и участвуют в процессе прямого и обратного преобразования энергии в электромеханическом преобразователе тягового электропривода, это необходимо учесть при исследовании режимов работы на имитационной модели подвижного состава. Основная задача исследований – учёт буксования и юза колёс при разгоне и торможении гружёного и порожнего состава.

Для измерения скорости движения локомотива могут быть применены как прямые методы измерения скорости движения с помощью датчика скорости ведомой оси, а также изложенные в [77], так и косвенные, на основе наблюдателей [78]. Измерение скорости скольжения может быть осуществлено различными косвенными методами [61, 79, 80]

Данные рекомендации были учтены при разработке имитационной модели рассматриваемой системы.

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{s_x} = (U_{s_x} + L'_s \omega_{\kappa} i_{s_y} + \frac{k_r}{T_r} \Psi_{r_x}) \frac{1}{R(1 + T'_s p)}; \\ i_{s_y} = (U_{s_y} - L'_s \omega_{\kappa} i_{s_x} - p_{\Pi} \omega k_r \Psi_{r_x}) \frac{1}{R(1 + T'_s p)}; \\ \Psi_{r_x} = \frac{T_s}{(1 + T_r p)} k_r R_r i_{s_x}; \\ M = \frac{3}{2} p_{\Pi} k_r \Psi_{r_x} i_{s_y}; \\ \omega_{\kappa} = p_{\Pi} \omega + k_r R_r \frac{i_{s_y}}{\Psi_{r_x}}, \end{array} \right. \quad (3.1)$$

где Ψ_{r_x} – проекции вектора потокосцепления ротора на ось;

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

U_{s_x}, U_{s_y} – составляющие напряжения источника тока по осям x и y ;

ω – частота вращения ротора;

ω_{κ} – частота вращения подвижной системы координат x, y ;

P_{Π} – число пар полюсов;

L'_s – индуктивность статора;

T_r, T_s – постоянные времени ротора и статора.

Электрическая часть системы представлена двухдвигательным тяговым асинхронным частотно-управляемым электроприводом с двумя индивидуальными преобразователями частоты с векторным управлением для приведения в движение первой и второй КП. Система дифференциальных уравнений, описывающая поведение переменных математической модели ТАД (3.1), составлена с учётом ориентации вектора потокосцепления ротора на ось x подвижной системы координат x, y : $\Psi_{r_x} = |\overline{\Psi}_{r_{ном}}|, \Psi_{r_y} = 0$ [81,82]:

Механическая часть подвижного состава включает массу электровоза, двенадцать масс вагонеток, связанных двухсоставными упругими связями с демпфированием. Массы первой и второй КП, входящие в механическую часть системы, связаны друг с другом через взаимодействие или сцепление колёс с рельсами. Кроме того, должно быть учтено влияние режимов буксования и юза колесных пар относительно рельсового пути на процессы разгона и торможения. Динамика механической части описывается системой уравнений (3.2) [60]:

$$\begin{cases} U_i = v_{к_i} - v_{эв}; \\ F_{сц_i} = \psi(U)P_i; \\ M_i = RF_{сц_i}; \\ v_{эв} = \frac{1}{m_{эв}} \int ((\sum_{i=1}^m F_{сц_i}) - F_n - m_{эв} g \sin(\alpha)) dt; \\ P_i = (\frac{P}{2} - \frac{2h}{l} F_n) \cos(\alpha); \\ \omega_i = v_{к_i} R, \end{cases} \quad (3.2)$$

где $i = 1 \dots m, n = 1 \dots l$ (m – количество колесных пар, l – количество вагонов);

U_i – избыточная скорость скольжения i -й КП;

$v_{к_i}$ – величина линейной скорости на ободу колеса (i – номер колёсной пары

(КП)); $v_{эв}$ – величина линейной скорости электровоза;

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

$\frac{h}{l}$ – отношение высоты сцепки от головки рельса к расстоянию между осями КП;

$\psi(U)$ – 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.

На основе математической модели, уравнений (3.1) и (3.2) разработана структура имитационной модели тяговых электроприводов с учётом механической системы подвижного состава.

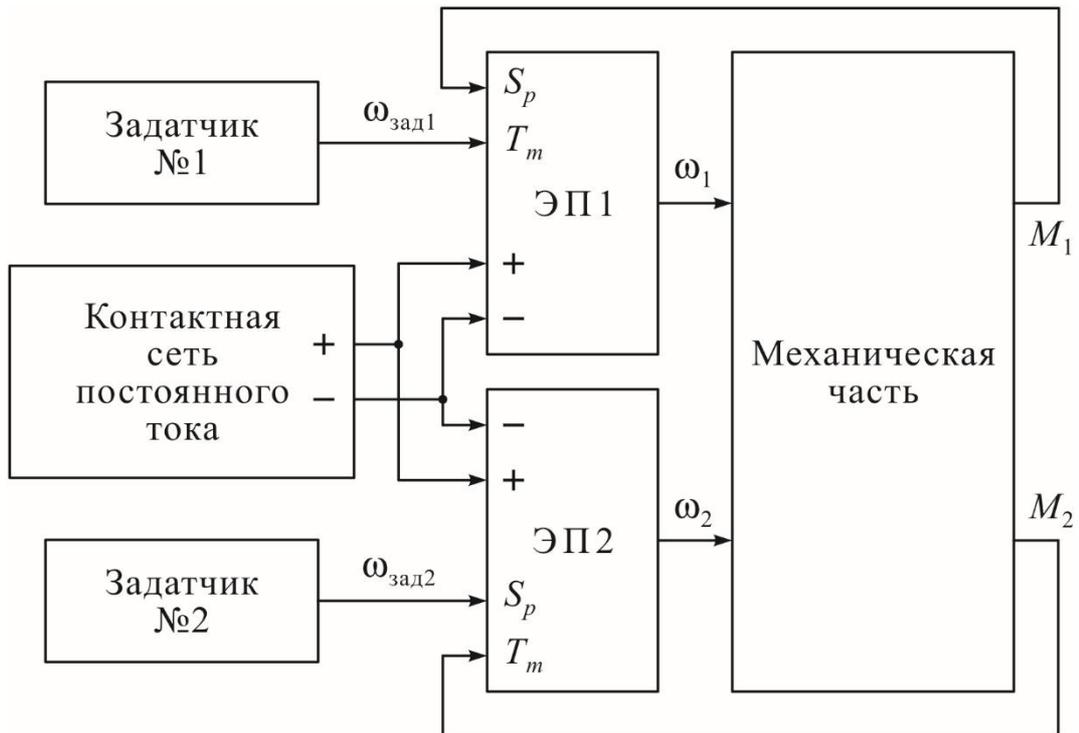


Рисунок 3.19. Структура имитационной модели

где ω_1, ω_2 – угловые скорости первой и второй колесных пар;

S_p – вход блока для задания скорости;

T_m – вход блока для задания величины момента нагрузки.

К верхнему уровню системы автоматического управления относятся: датчики скорости электроприводов КП; силовые блоки электроприводов КП с частотным векторным управлением; источник постоянного тока, подключённый к инверторам преобразователей частоты.

К нижнему механическому уровню системы относятся блоки, отвечающие за режимы работы в статике и динамике подвижного состава с учетом упруго-вязких колебаний масс системы за счёт «люфта» в сцепках между вагонами, также способные моделировать режимы буксования и юза колёс электровоза относительно рельсового пути.

На рисунке 3.19 показана структура модели тягового электропривода электровоза с вагонами [83]. Механическая часть системы представлена на рисунке 3.20.

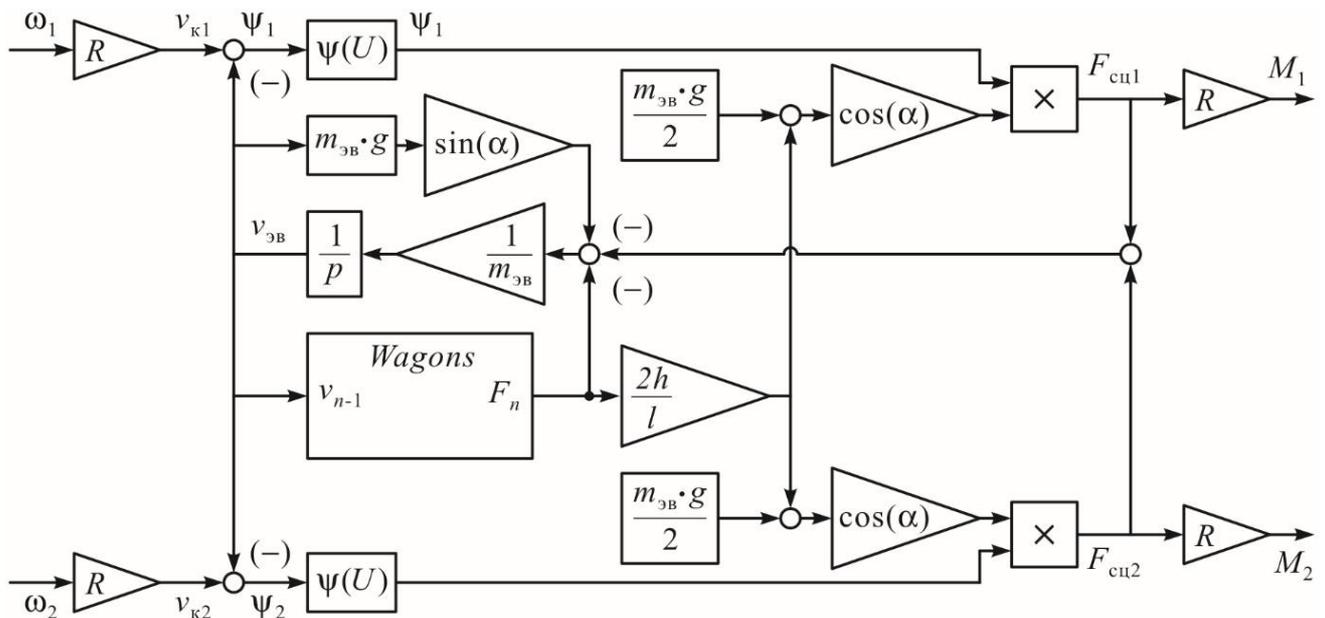


Рисунок 3.20. Блок механической части тягового электропривода

Внутренний вид блока представлен на рисунке 3.21.

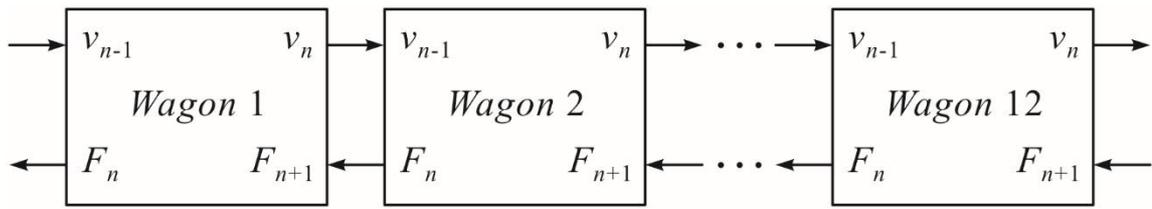


Рисунок 3.21. Структурная схема распределенной модели подвижного состава (блок *Wagons*)

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 зазора в сцепке вагонов реализовано с помощью звена *Dead Zone*. Далее вычисляется сила, вызывающая движение вагона. Учёт и влияние внешних сил трения, а также сил от действия других вагонов осуществлено с помощью элементов сравнения. Вычисление фактической скорости движения вагона, которая в дальнейшем передается на вход блока следующего вагона, происходит на основании всех учтенных сил.

Система уравнений (3.3) описывает движение вагонов [84]:

$$\begin{cases} v_n = \frac{1}{m} \int (F_n - F_d - F_{n+1}) dt; \\ F_d = |F_d| \text{sign}(v_n); \\ F_n = kD(x)(\int \varepsilon dt) + bpD(\int \varepsilon dt), \end{cases} \quad (3.3)$$

где $\varepsilon = (v_{n-1} - v_n)$ – разность скоростей вагонов; F_d – величина силы сухого трения; b – коэффициент вязкого трения; k – коэффициент жесткости пружины; m – масса вагона с грузом; $D(x)$ – оператор люфта.

Структура звена *Wagon1* представлена на рисунке 3.22.

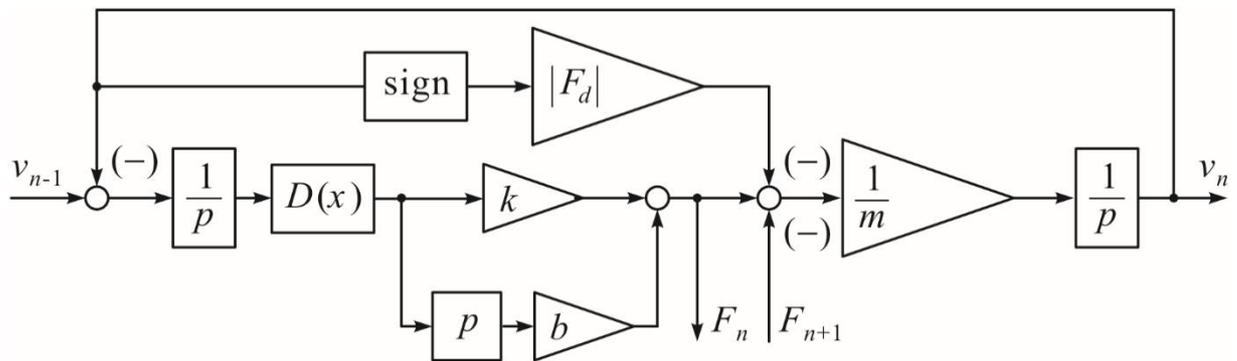


Рисунок 3.22. Структура блока *Wagon1*

3.3. Разработка структуры системы управления двухдвигательным тяговым электроприводом

Принцип управления, сформулированный в предыдущем разделе, применительно к задаче построения алгоритма управления можно представить в виде системы правил, которым должен удовлетворять последний, чтобы обеспечивать высокую эффективность работы.

1. Скоростью скольжения необходимо управлять, так как она имеет случайный характер, зависит от множества факторов и может быть различной для 1-й и 2-й колесных пар. Следовательно, управление скоростью скольжения должно быть индивидуальным для каждой колесной пары.

2. В зоне упругого скольжения, когда скорость скольжения находится в диапазоне $0 \dots 0,1$ м/с, коэффициент сцепления нарастает от нуля до почти максимального значения, поэтому для режимов малой тяги, таких как, например, движение на постоянной скорости, скорость скольжения поддерживается на уровне, меньшем $0,1$ м/с.

3. На участке комбинированного скольжения $u > 0,1$ м/с достигается максимум коэффициента сцепления. Значительное превышение этого порога скорости скольжения приводит лишь к непроизводительным потерям электро-

энергии, износу бандажей колёс и рельсового пути, но не приводит к повышению тягового усилия. Граница перехода упругого скольжения в комбинированное существует, но, в силу вероятностного характера процессов трения, размыта и о ней можно лишь с уверенностью сказать, что она лежит в определенном диапазоне. Исследователи в данной области сходятся во мнении, что при скорости 0,12 м/с вероятность того, что скольжение имеет комбинированный характер, приближается к 100 %. Однако для проведения моделирования примем предельную скорость вращения за 0,1 м/с.

4. Целевым управляемым параметром является линейная скорость движения электровоза. Управление линейной скоростью и скоростью скольжения должно иметь закономерную связь. Критерием эффективности системы управления движением является точность стабилизации скорости скольжения.

5. Разработанная структура системы управления двухдвигательным тяговым электроприводом представлена на рис 3.23.

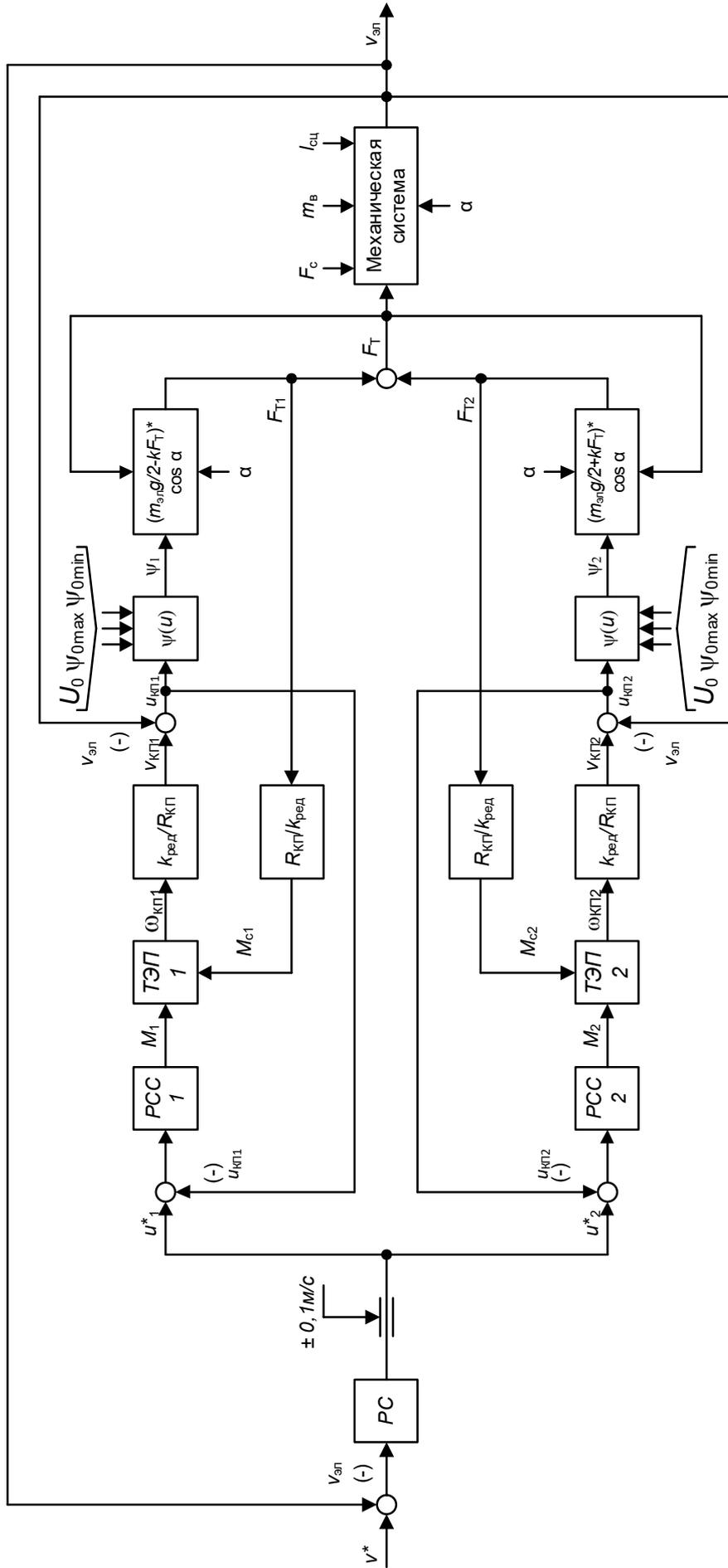


Рисунок 3.23. Структура системы управления двухдвигательным тяговым электроприводом

Система управления имеет структуру подчиненной системы регулирования с внешним контуром регулирования линейной скорости электровоза ($v_{эв}$) и двумя внутренними подчиненными контурами регулирования скорости скольжения 1-й (u_1) и 2-й (u_2) колесных пар. Ключевыми элементами системы управления являются блок ограничения ($\pm 0,1$ м/с) сигнала регулятора линейной скорости локомотива (РС) и регуляторы скорости скольжения 1-й (РСС1) и 2-й (РСС2) колесных пар, которые обеспечивают работу тяговых электроприводов колесных пар (ТЭП1, ТЭП2) в рамках диапазона максимальной тяги, т. е. в режимах упругого или комбинированного скольжения.

Рассмотрим работу алгоритма управления системы более подробно. На первом шаге алгоритма производится вычисление величины рассогласования желаемой скорости v^* и фактической линейной скорости $v_{эв}$, которые поступают на ПИ-регулятор линейной скорости электровоза – РС. При пуске электровоза в первоначальный момент он неподвижен, поэтому вся величина рассогласования, равная v^* , преобразуется РС в сигнал задания скорости скольжения u^*_1, u^*_2 , который ограничен на уровне $\pm 0,1$ м/с.

Рассмотрим дальнейшую работу алгоритма на примере 1-й КП. Подчиненный контур регулирования скорости скольжения получает на входе сигнал рассогласования заданной скорости скольжения u^*_1 , полученной от РС, и преобразуется регулятором РСС1 в задание на формирование тягового момента для ТЭП1. В течение 0,1 с происходит рост реактивной составляющей тока статора, формирующей потокосцепление. Затем в обмотке статора формируется активная составляющая тока статора, появляется вращающий момент и колесная пара приходит в движение, $\omega_{кп1}$ и $v_{кп1}$ начинают расти. Так как локомотив в этот момент времени еще неподвижен и его линейная скорость $v_{эв} = 0$, 1-й КП начинает проскальзывать со скоростью $U_1(t) = v_1(t) - v_{эв}(t)$. Появление скорости скольжения приводит к появлению в точке контакта обода колеса с рельсом тягового усилия $F_{Т1}$, которое определяется коэффициентом сцепления, весом локомотива, действующим на колесную пару, и величиной

уклона. Коэффициент сцепления 1-й КП ψ_1 , в свою очередь, не является константой, зависит от скорости скольжения u_1 . Созданное колесной парой тяговое усилие, в свою очередь, формирует на валу тягового двигателя момент сопротивления M_{c1} , уравнивающий момент сил, действующих на колесную пару, и приведённый к валу тягового электродвигателя.

Аналогичные процессы происходят и в приводе 2-й КП. Тяговые усилия обеих КП суммируются, прикладываются к раме локомотива, начинается разгон, линейная скорость $v_{эв}$ растёт.

Начало движения локомотива и появление $v_{эв}$ приводят к сокращению зазора в первой сцепке (локомотив-вагон № 1). Как только зазор выбран и происходит соединение масс локомотива и вагона № 1, в сцепке рывком появляется тяговое усилие, приложенное к первому вагону, и скорость локомотива резко снижается за счёт инерционности первого вагона. Далее тяговое усилие приводов уже прикладывается к сцепленной массе, образованной локомотивом и вагоном № 1, снова появляется ускорение, но уже меньшей величины. Процесс повторяется, постепенно люфты в сцепках всех вагонов выбираются. Разгон состава продолжается, но с уменьшением ускорения за счёт роста сцепной массы состава. После начала движения всех вагонов, при максимальной сцепной массе, система управления ограничивает ускорение состава на уровне, обеспечивающем стабилизацию скорости скольжения в 0,1 м/с.

При разгоне и торможении состава система управления автоматически перераспределяет (согласовывает) на сцепке локомотива усилия от тяговых электроприводов первой и второй колёсных пар. Момент тяги ЭП 2-й КП можно увеличить относительно момента тяги ЭП 1-й КП за счёт перераспределения веса локомотива на 2-ю КП вследствие действия сил сопротивления тяге на сцепном устройстве от гружёных вагонов. Замедление (торможение) состава вызовет уменьшение веса тормозящего локомотива на 2-й КП за счёт действия на его сцепке усилия от инерции свободно движущихся вагонов. В этом случае тормозной момент 1-й КП автоматически станет больше, чем у 2-й КП.

Когда локомотив достигает заданной скорости v^* , управляющее воздействие РС электровоза уменьшается. Как следствие, задание u^*_1, u^*_2 тоже снижаются ниже максимально допустимого уровня $\pm 0,1$ м/с. Установившиеся значения u^*_1, u^*_2 обеспечивают такую силу тяги локомотива, которая уравновешивает действие сил сопротивления движению на участке движения с постоянной скоростью.

3.4. Имитационная модель электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза

Рассмотрим упрощённую имитационную модель подвижного состава с рудничным электровозом в программе *MatLab 2017b* (приложение *Simscape*), представленную на рисунке 3.24. Упрощение коснулось тяговых электроприводов колёсных пар, роль которых выполняет ПИ-регулятор скорости, входящий в состав блока *Subsystem*.

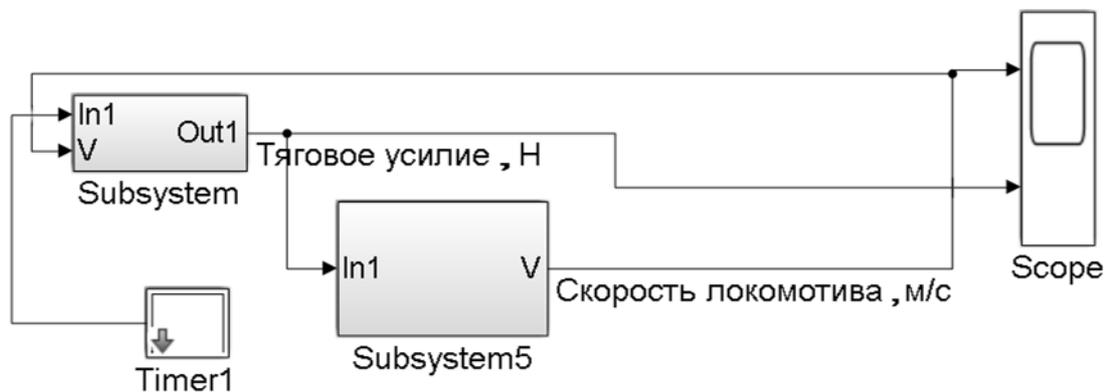


Рисунок 3.24. Структура формирования тягового усилия и скорости

Задание на скорость локомотива $v_{эл}$ и состава в целом формируется блоком *Timer1*, диалоговое окно которого приведено на рис. 3.25.

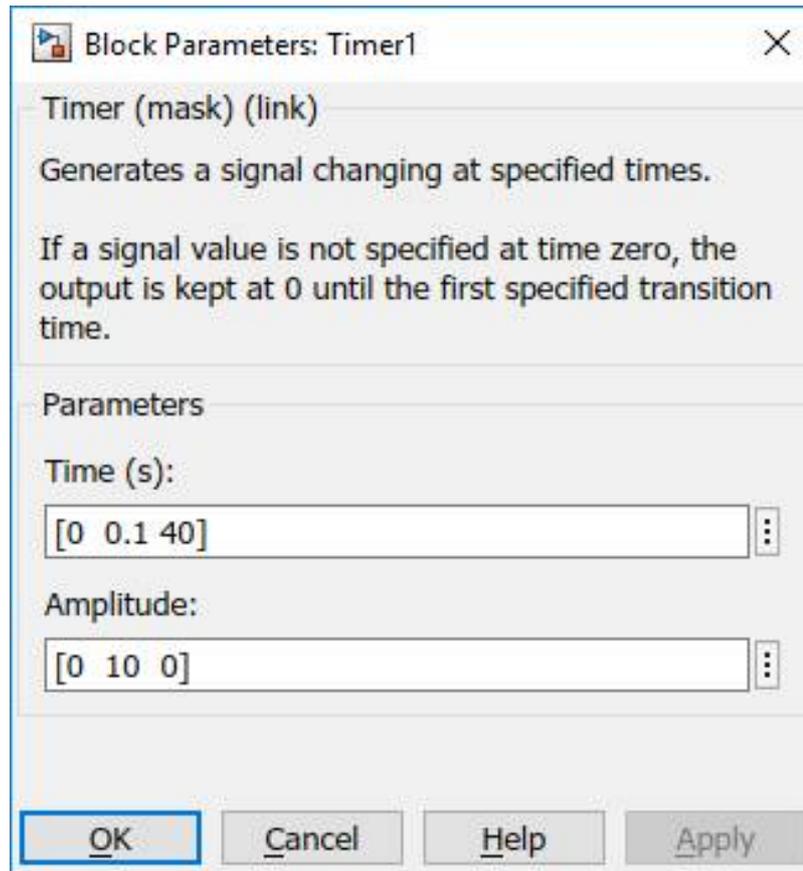


Рисунок 3.25. Блок задания скорости

В начальный момент времени задаётся нулевая скорость локомотива. Через интервал времени 0,1 с на выходе блока *Timer1* появляется сигнал амплитудой 10 машинных единиц (например, 10 В), определяющий разгон состава до скорости $v_{эл} = 3,6$ м/с. Через 40 с наступает этап торможения состава до нулевой скорости.

На рисунке 3.26 показана имитационная модель блока *Subsystem*, центральным элементом которой является регулятор скорости *Speed controller*. Задание на скорость поступает на вход регулятора w^* через фильтр *Discrete Transfer Function*. Сигнал скорости движения локомотива снимается с датчика скорости через нормирующий усилитель, квантователь сигнала по уровню и времени, и поступает на вход $w3$.

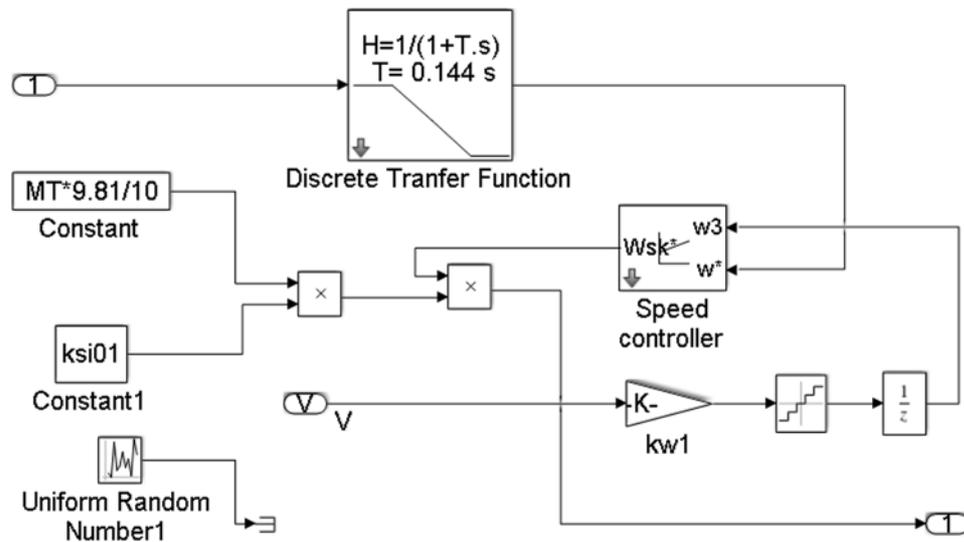


Рисунок 3.26. Имитационная модель формирования тягового усилия

Значение выходного сигнала регулятора в диапазоне $0 \dots 10$ В соответствует тяговому усилию на колёсных парах. При номинальном значении коэффициента сцепления колёс с рельсами $\psi_0 = 0,175$, массе локомотива $14\,000$ кг тяговое усилие при выходном напряжении регулятора 10 В будет равно: $F_T = 9,81 \cdot (MT/10) \cdot \psi_0 \cdot U_{\text{Вых max}} = 9,81 \cdot 14000 / 10 \cdot 0,175 \cdot 10 = 24035,5$ Н.

В блоке *Constant* множитель $1/10$ введён для согласования сигнала тягового усилия с выходным напряжением регулятора. Для исследования влияния изменения коэффициента сцепления по случайному закону на тяговое усилие электровоза в модель введён блок *Uniform Random Number1*.

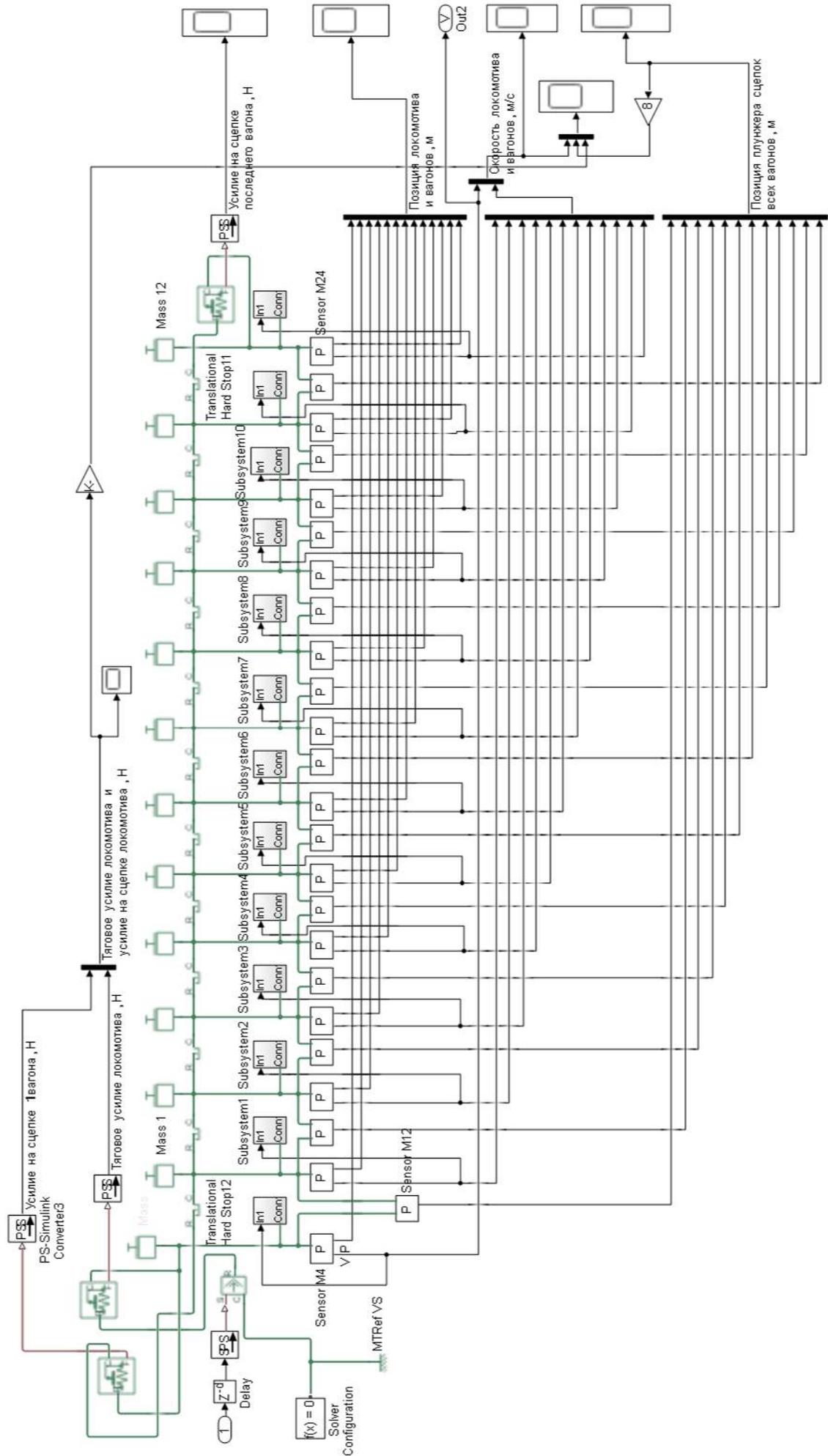


Рисунок 3.27. Структура формирования скорости движения подземного электровоза

Сформированное тяговое усилие с выхода *Out1* блока *Subsystem* (см. рис. 3.24) поступает на вход имитационной модели, представленной на рисунке 3.27.

Основу имитационной модели составляют массы локомотива и двенадцати вагонов. Информация, записанная в блоке *Mass*, относится к локомотиву и имеет вид, показанный на рисунке 3.28. $M_T = 14\,000$ кг и является массой локомотива.

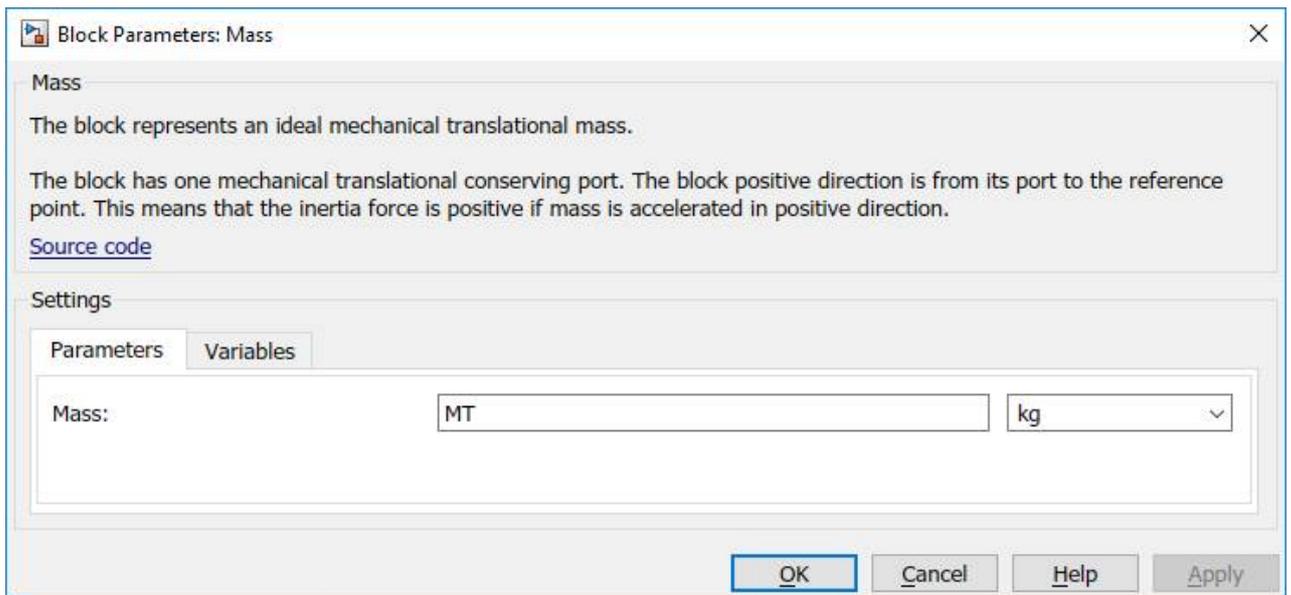


Рисунок 3.28. Диалоговое окно блока локомотива (*Mass*)

Массы вагонов моделируются аналогичными блоками и имеют обозначения *Mass1* – *Mass12*. Диалоговое окно вагона *Mass1* представлено на рисунке 3.29. Масса вагона *m* составляет 10 тонн.

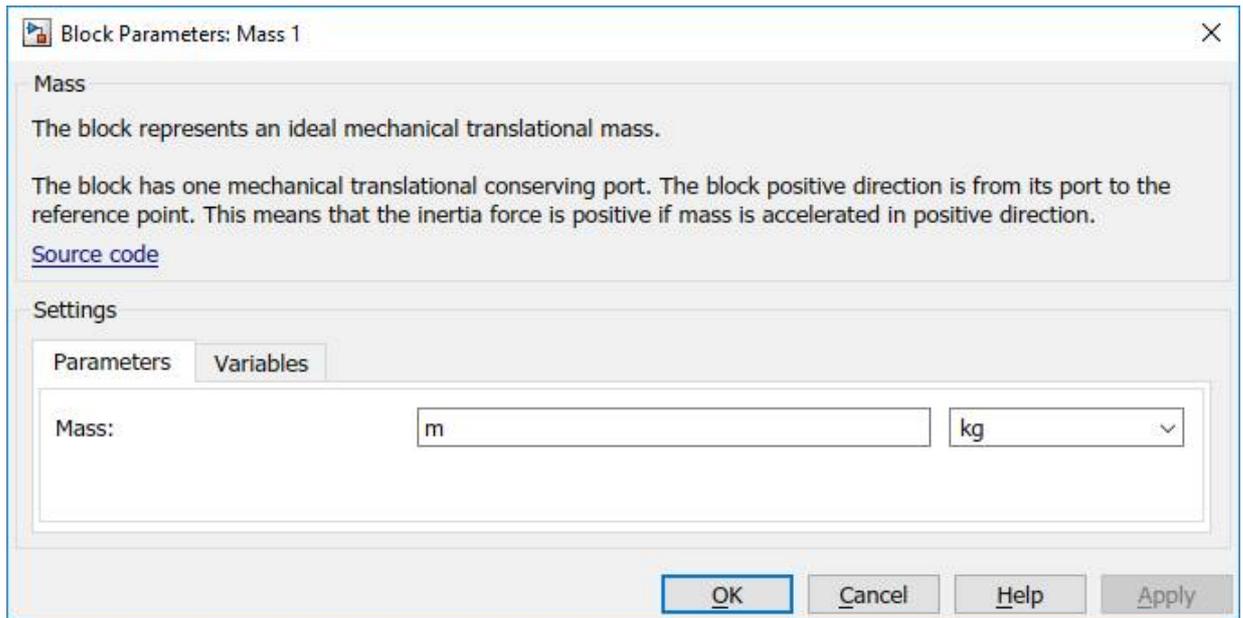


Рисунок 3.29. Диалоговое окно блока первого вагона (*Mass 1*)

Информация блоков остальных вагонов имеет точно такой же вид, как на рисунке 3.29. В модели (рис. 3.27) локомотив и вагоны соединяются сцепным устройством *Translational Hard Stop* в количестве 12 штук. Параметры данных блоков представлены на рисунке 3.30.

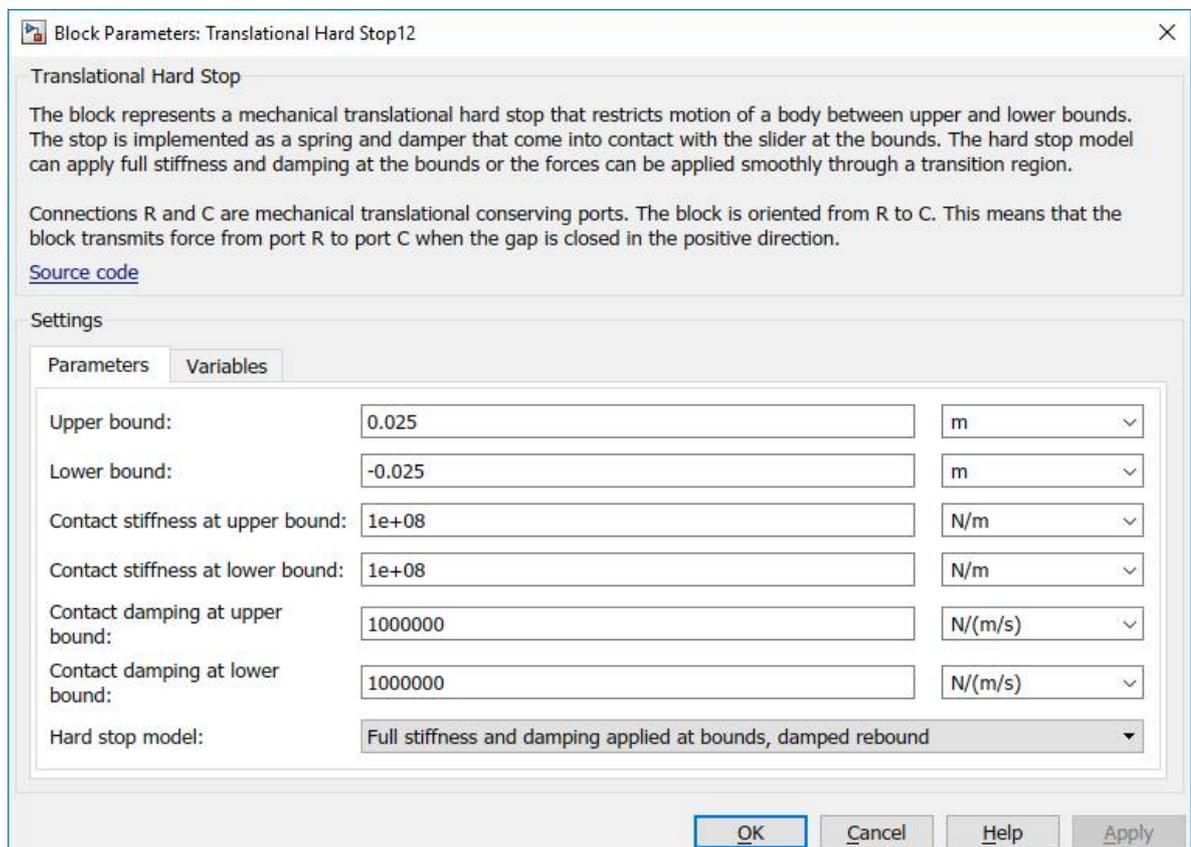


Рисунок 3.30. Диалоговое окно блока *Translational Hard Stop*

Диапазон позиции плунжера сцепки находится в пределах $\pm 0,025$ м; контактная жёсткость в верхнем и нижнем упоре принята 10^8 Н/м; коэффициент демпфирования в верхнем и нижнем упоре также принят 10^6 Н/(м/с).

Реактивные силы сопротивления движению F_p (от трения качения и трения скольжения локомотива и вагонов) и активная сила F_a (от уклона пути) формируются в блоках *Subsystem 0...12*, имитационные модели которых показаны на рисунке 3.31 – *Subsystem0*, 3.32. – *Subsystem1...12*.

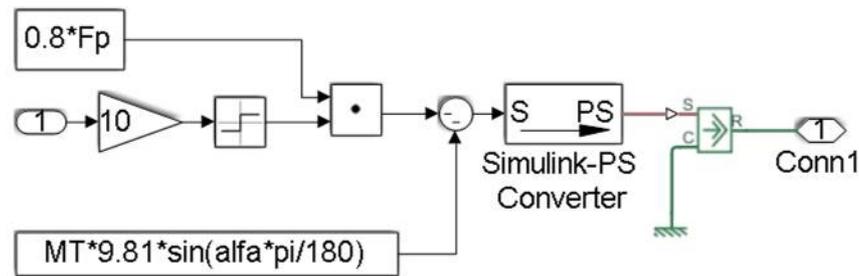


Рисунок 3.31. Имитационная модель нагрузки локомотива *Subsystem0*

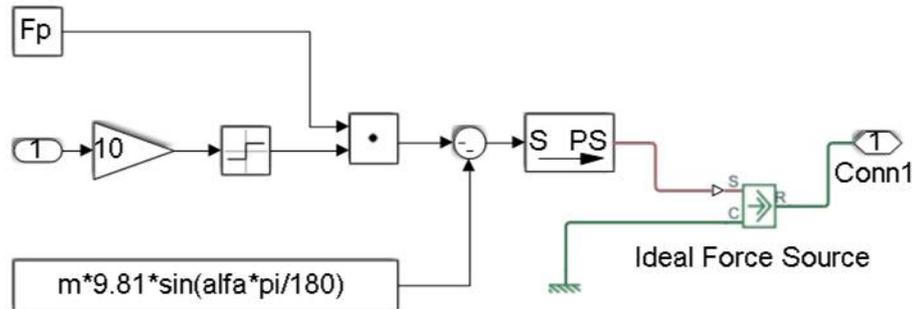


Рисунок 3.32. Имитационная модель нагрузки вагона *Subsystem1...12*

Знак реактивной силы сопротивления определяется знаком скорости, которая поступает на вход 1, усиливается в 10 раз и формируется на блоке *Sign*. Реактивная и активная составляющие нагрузки суммируются, и сумме присваивается знак «-». Знак активной составляющей зависит от знака угла наклона пути α . Блок *Ideal Force Source* библиотеки *Simscape* определяет усилие сопротивления движению на блок *Mass*. Для согласования сигналов библиотеки

Simulink и *Simscape* используется блок *Simulink-PS Converter*. Блок *Mass* локомотива получает тяговое усилие через сцепление колес его ведущих пар с рельсами. Через сцепки *Translational Hard Stop* массы вагонов получают тяговое усилие от локомотива. Причём тяговое усилие на последующий вагон изменяется на величину усилия сопротивления движению вагона (реактивное – сила трения качения и активное – скатывающая сила на участке движения с уклоном).

На основе блоков библиотеки *Simscape* выполнены датчики скорости и перемещения массы (рисунок 3.33) и перемещения плунжера сцепки (рисунок 3.34.).

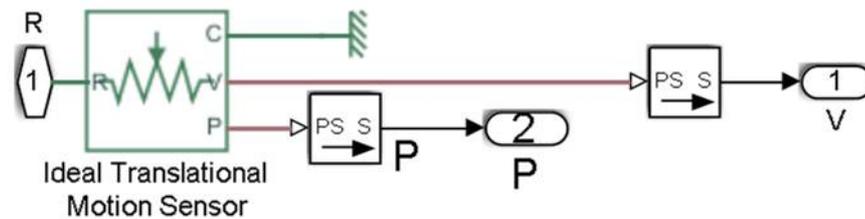


Рисунок 3.33. Имитационная модель датчика скорости и перемещения массы

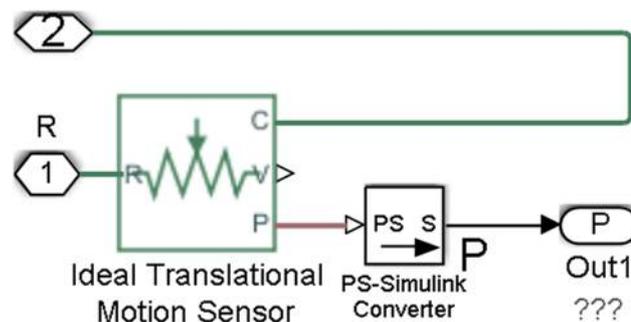


Рисунок 3.34. Имитационная модель датчика перемещения плунжера сцепки

Основу датчиков составляет элемент библиотеки *Simscape* – *Ideal Translational Motion Sensor*, который формирует на выходе сигналы скорости и перемещения массы. Для подачи сигналов датчика на вход элементов библиотеки *Simulink* используется блок *PS-Simulink Converter*. Датчик на рисунке 3.34

имеет два входа и один выход. Так как перемещение, которое регистрируется датчиком, является разностью перемещений, фиксируемых входами R и C , то при подключении входов R и C на соседние массы можно измерять перемещение плунжера.

На вход $In1$ имитационной модели на рисунке 3.27 поступает тяговое усилие, создаваемое ведущими колёсными парами локомотива с выхода $Out1$ от блока *Subsystem* на рисунке 3.24, на вход идеального источника силы *Ideal Force Source* библиотеки *Simscape*. Выход этого блока подключается к массе, на которую эта сила действует. В данном случае это масса локомотива. Для контроля усилия используется датчик силы *Ideal Force Sensor 3*. Порты этого датчика включаются последовательно в цепь действующей силы. Регистрация полученных на имитационной модели результатов отображается на осциллографах (*Scope*): тяговое усилие локомотива и усилие на сцепке; усилие на сцепке последнего вагона; позиция (перемещение) локомотива и вагонов; скорость локомотива и вагонов; позиция плунжера сцепок всех вагонов. Для демонстрации работоспособности выполним моделирование рассматриваемой системы (см. рисунок 3.24). Результаты, полученные на осциллографе *Scope* (см. рисунок 3.24), показаны на рисунке 3.35: для режимов разгона, равномерного движения и торможения.

В отличие от известных имитационных моделей, в полученных диаграммах скорости и тягового усилия отражаются три характерных участка.

В начале процесса трогания локомотива происходит его сцепка со всеми вагонами. Состав массой 134 тонны разгоняется до скорости 3,6 м/с за время примерно 29 секунд, что не противоречит ранее проведённым исследованиям [60]. Далее в течение 11 секунд локомотив движется с заданной скоростью – 3,6 м/с. В момент времени 40 секунд начинается торможение локомотива, что приводит к перемещению плунжеров сцепок в виде колебаний скорости локомотива на участке 40...42 с. Процесс торможения до останова длится примерно 12,5 с.

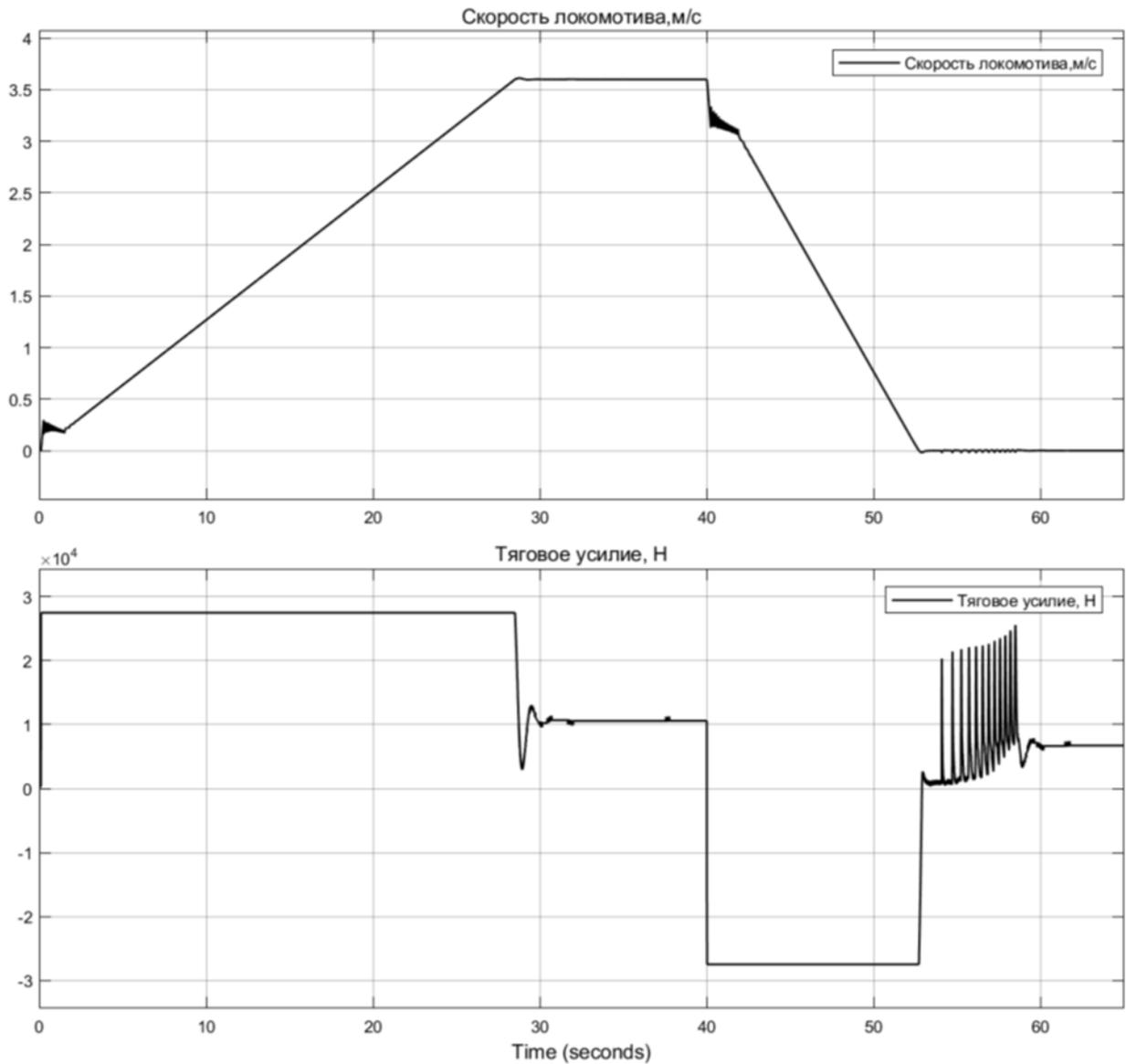


Рисунок 3.35. Диаграммы формирования момента и скорости электровоза

После достижения нулевой скорости за счет действия скатывающей силы, приложенной против направления движения, при движении локомотива на подъём происходит переключение сцепок всех вагонов в интервале времени 53...58 с. На диаграмме скорости наблюдается 12 рывков скорости локомотива, связанных с процессами переключения сцепных устройств всех двенадцати вагонов. Этим возмущениям по времени соответствуют двенадцать импульсов повышения тягового усилия локомотива в переходном процессе удержания состава на нулевой скорости на подъёме за счёт отставания вагонов от локомотива после выбора зазоров в сцепных устройствах всех вагонов в конце

процесса торможения. После ступенчатого увеличения силы тяги локомотива с импульсными выбросами до 18...20 кН в переходном процессе переключения сцепных устройств вагонов в течение 53...58 с установившееся значение силы тяги локомотива для удержания грузового состава в покое составило примерно 6,26 кН.

Эта цифра подтверждается простейшим расчётом.

Выводы по третьей главе

1. Предложен метод косвенного обнаружения буксования и юза колесной пары тягового рудничного электровоза и устройство для вычисления скорости скольжения колёс ведущих пар относительно рельсового пути.

2. Решена задача выбора нового критерия управления, использование которого минимизирует риск появления буксования при трогании с места полностью груженого состава. Этим критерием является величина скорости скольжения ведущих колёс электровоза.

3. Разработан закон управления тяговым регулируемым электроприводом колёсных пар электровоза для устранения неэффективных режимов разгона и торможения состава на основе контроля скорости скольжения.

4. Предложена структура формирования тягового усилия и скорости скольжения имитационной модели подвижного состава подземного рельсового транспорта, отличающаяся от известных моделей наличием разработанной имитационной модели сцепки, позволяющая исследовать различные режимы работы электровоза, прежде всего режимы предотвращения буксования и юза.

5. Разработана имитационная модель движения состава, учитывающая особенности движения локомотива и вагонов на участках пути с переменным профилем и действием сцепных устройств, которые имеют значительное влияние на тяговый электропривод [50].

4. Исследование режимов работы тягового электропривода рудничного электровоза и экспериментальная проверка алгоритма управления

4.1. Моделирование работы алгоритма управления тяговым электроприводом постоянного и переменного тока для предотвращения буксования и юза электровоза

4.1.1. Тяговый электропривод постоянного тока

Универсальность работы алгоритма управления с контролем скорости скольжения ведущих колёсных пар электровоза для формирования тяговых моментов их электроприводов продемонстрируем на имитационной модели, у которой условно регулируемый тяговый электропривод одной колёсной пары выполнен на постоянном токе, а другой – на переменном.

Структура имитационной модели с управлением по скольжению представлена на рисунке 4.1.

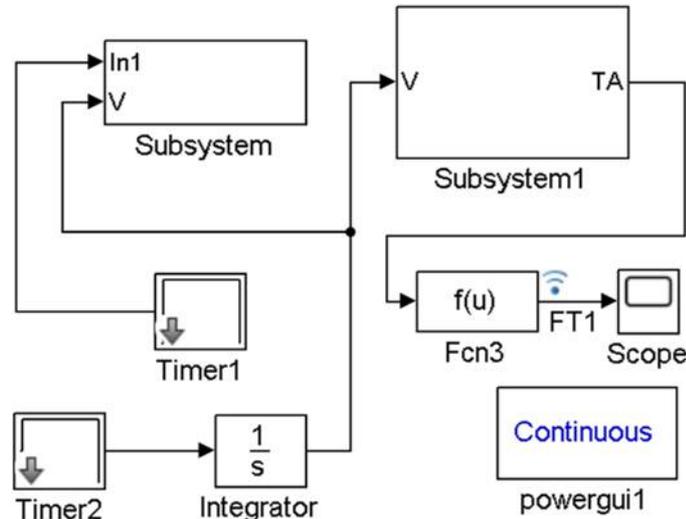


Рисунок 4.1. Блок-схема имитационной модели тягового электропривода постоянного тока с регулятором скорости скольжения

На рисунке 4.2 представлена имитационная модель блока *Subsystem*. Основным элементом этого блока является регулятор скорости локомотива (*Speed Controller*). Задание на скорость локомотива поступает с блока *Timer 1*

на вход In1 через блок фильтра *Discrete Transfer Function*. Текущее значение скорости локомотива вырабатывается блоком *Integrator* и подаётся на вход *V* (In2) блока *Subsystem*. Интенсивность нарастания выходного напряжения интегратора выбираем близкой к реальной интенсивности нарастания скорости локомотива. Сигналы *Uz1* и *Uz2*, формируемые на входе и выходе фильтра *Discrete Transfer Function 1*, передаются в блок *Vector Control* для управления регулятором скорости скольжения (*Uz1*) и в блок *Subsystem* для управления формированием нагрузки на двигатель (*Uz2*) (см. рисунок 4.6). Сигнал обратной связи по скорости локомотива проходит через согласующий усилитель (*kw1*), квантователи по уровню (*Quantizer4*) и времени (*Unit Delay1*).

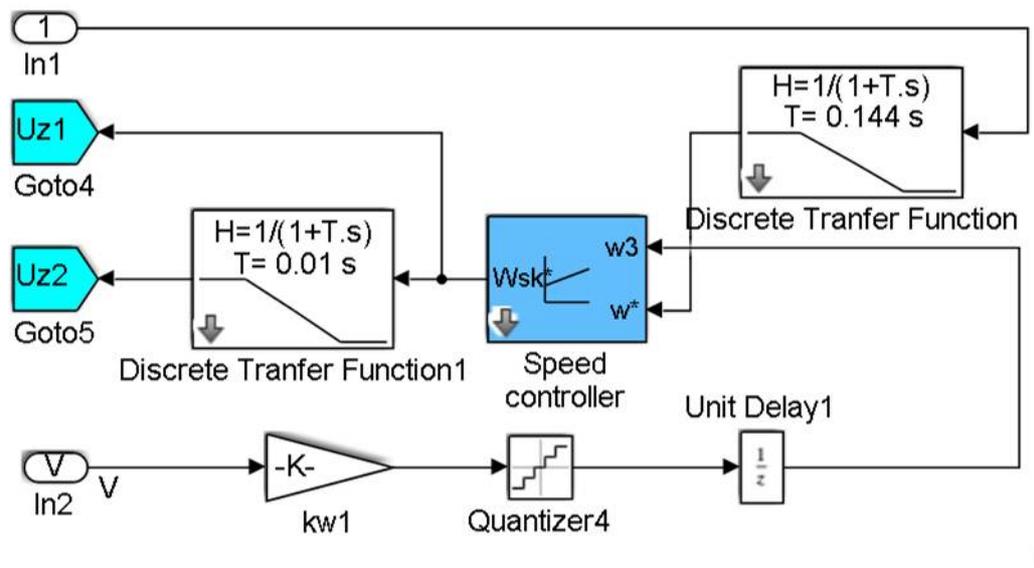


Рисунок 4.2. Имитационная модель регулятора скорости локомотива (*Subsystem*)

На рисунке 4.3 представлено диалоговое окно блока *Timer1*. Пуск привода на скорость 5 м/с начинается с момента времени 0,1 с. В момент времени 5 с формируется команда на торможение.

На рисунке 4.4 представлено диалоговое окно блока *Timer2*, предназначенного для управления интегратором (*Integrator*). В момент времени 0,1 с формируется сигнал интенсивности нарастания выходного напряжения интегратора (0,3 В). В момент времени 5 с интенсивность меняет знак и выходное

напряжение интегратора снижается до 0 В. Интегратор моделирует скорость локомотива.

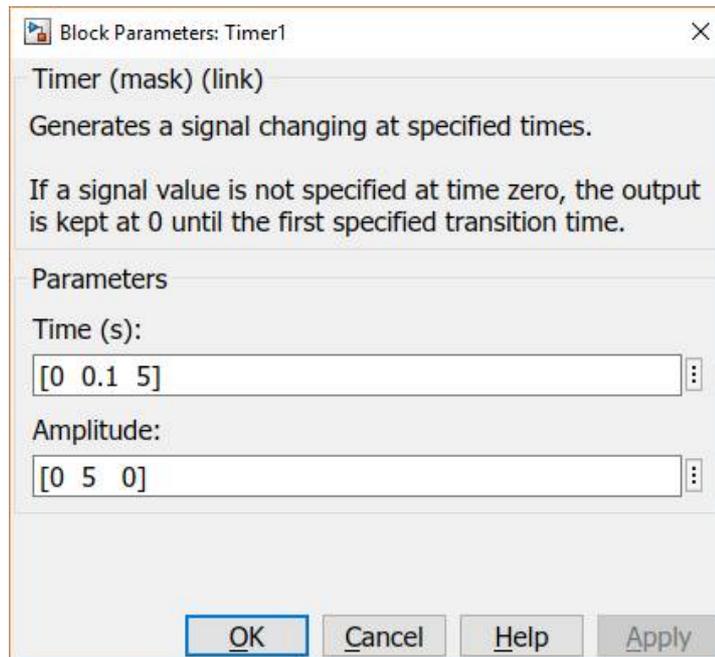


Рисунок 4.3. Диалоговое окно Таймера 1 имитационной модели тягового электропривода постоянного тока

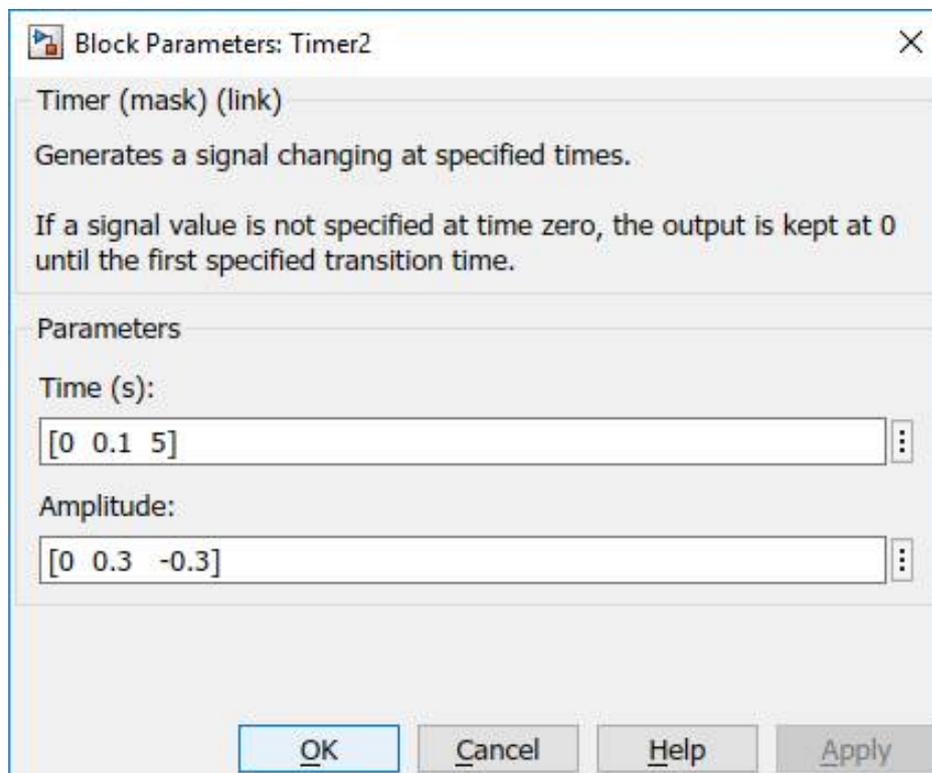


Рисунок 4.4. Диалоговое окно Таймера 2 имитационной модели тягового электропривода постоянного тока

Интегратор, диалоговое окно которого показано на рисунке 4.5, формирует процесс нарастания скорости локомотива на временном участке $[0, 1 \dots 5]$ с и процесс её спада на интервале времени $[5 \dots 10]$ с.

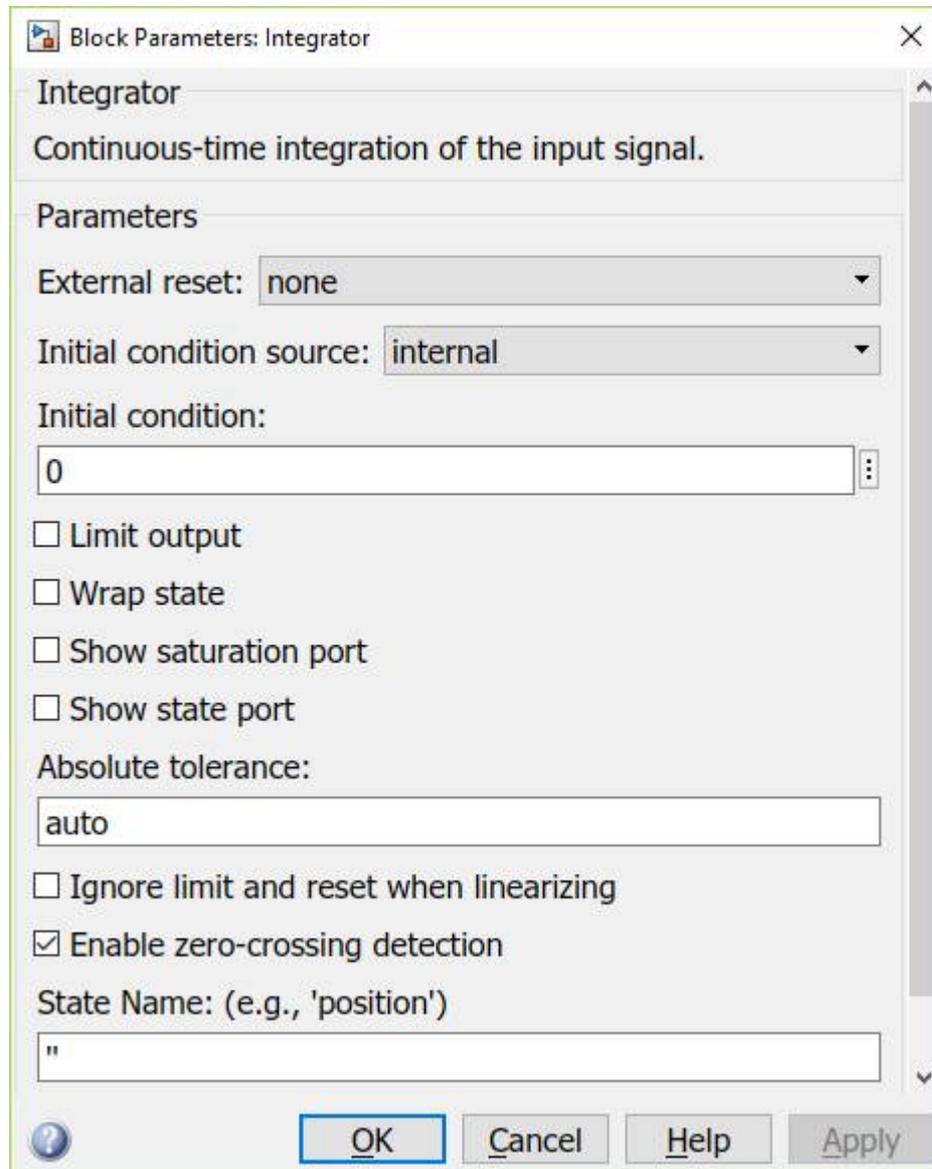


Рисунок 4.5. Диалоговое окно *Integrator*

На рисунке 4.6 показана имитационная модель тягового ЭП постоянного тока последовательного возбуждения с регулятором скольжения и двигателем ДК-812. Имитационная модель блока *Vector Control* представлена на рисунке 4.7. На этом же рисунке также показан регулятор скольжения – *Speed Controller*. На вход ω^* поступает сигнал задания, формируемый в блоке *Subsystem*.

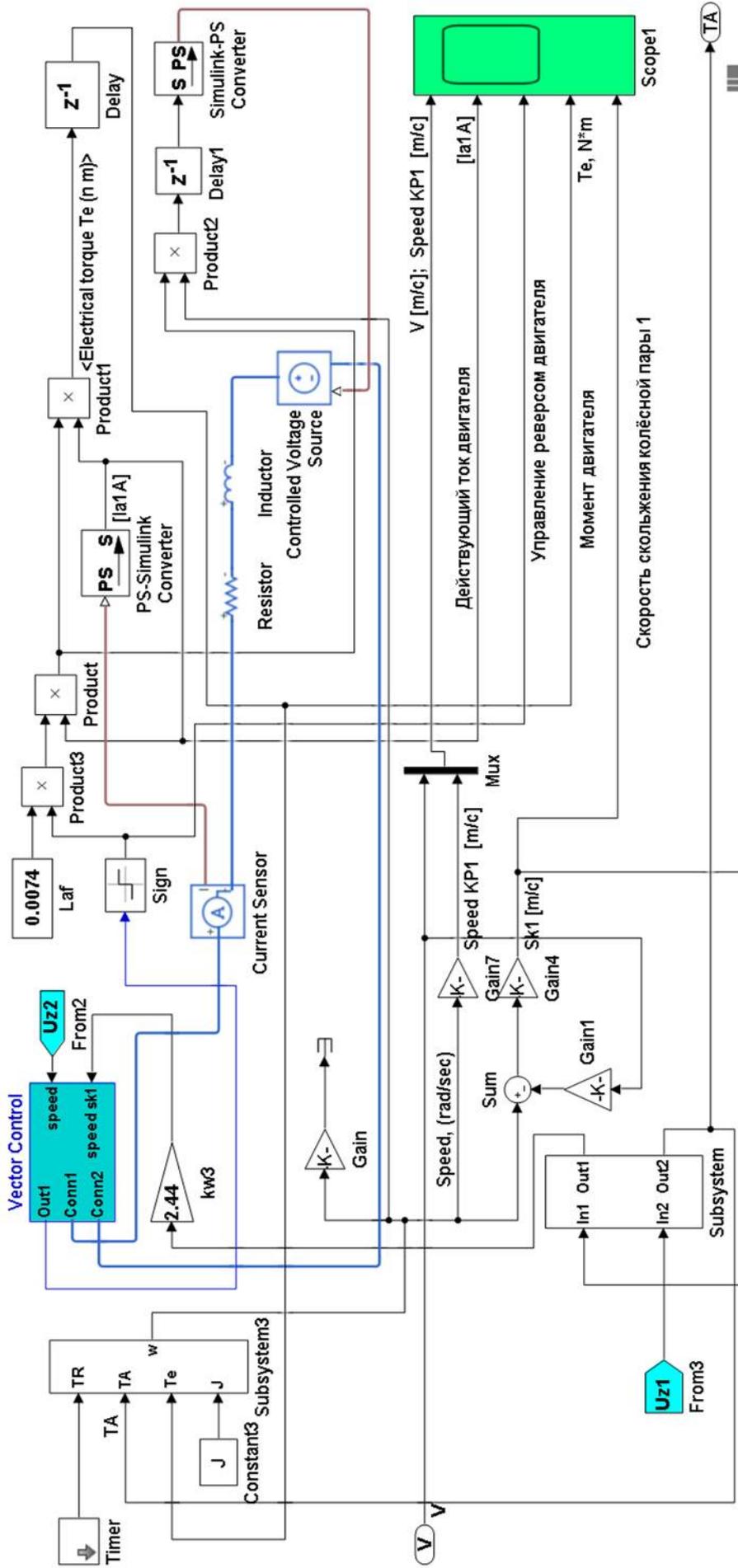


Рисунок 4.6. Имитационная модель тягового ЭП постоянного тока с регулятором скольжения

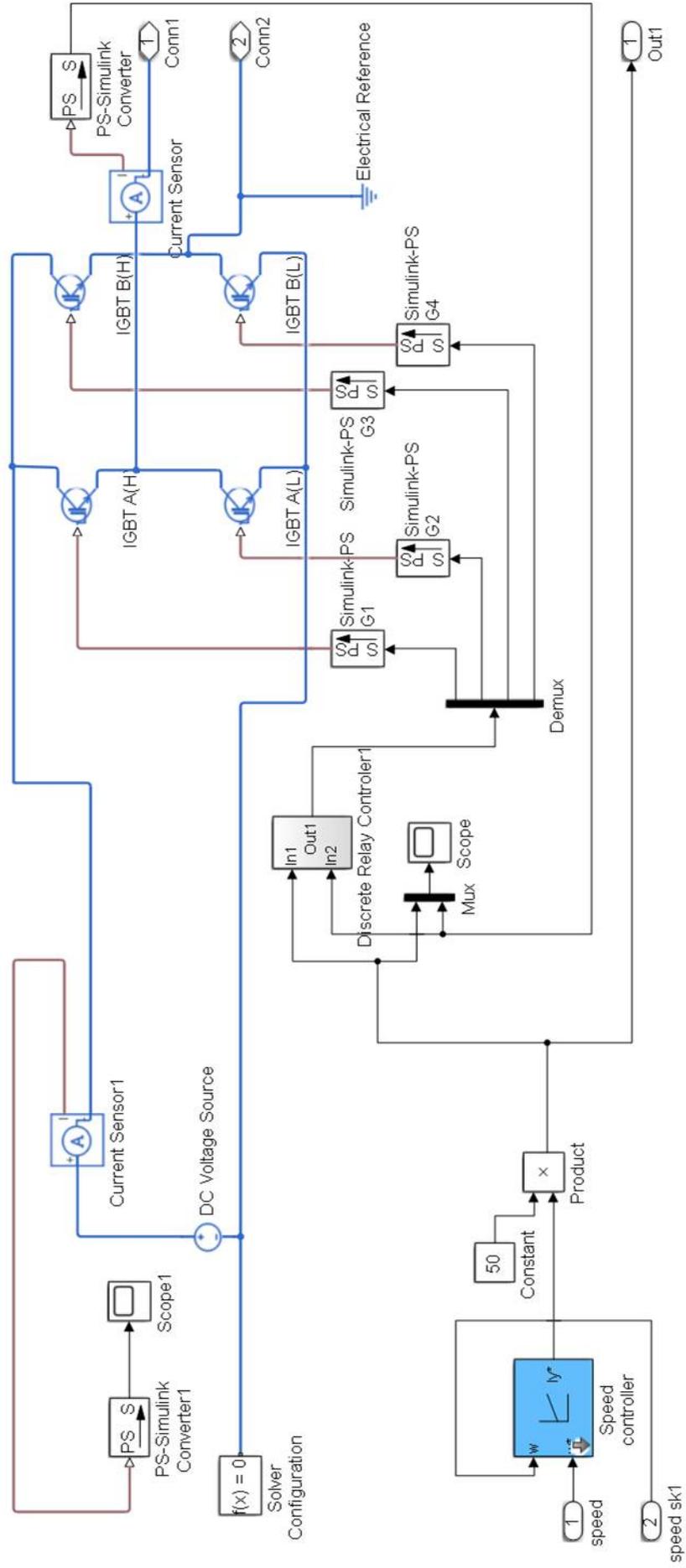


Рисунок 4.7. Имитационная модель блока *Vector Control*

В качестве электропривода 1-й колёсной пары рассматривается регулируемый электропривод постоянного тока с тяговым ДПТ последовательного возбуждения ДК-812 (далее тяговый ДПТ). Так как в библиотеке *SimPowerSystems* программного продукта *MatLab* модели ДПТ последовательного возбуждения нет, то произведем разработку имитационной модели указанного двигателя. Запишем уравнения состояний цепей якоря и обмотки возбуждения машины в следующем виде:

$$\begin{cases} U = i_a R_{\Sigma a} + c \cdot \omega_{\text{дв}}; \\ e_{\text{дв}} = c \cdot \omega_{\text{дв}}; \\ T_e = c \cdot i_a; \\ \Phi = L_{af} \cdot i_a, \end{cases}$$

где $R_{\Sigma a} = R_a + R_f$ – суммарное сопротивление цепи якоря и обмотки возбуждения, $i_a = i_f$, $c = L_{af}$.

По номинальным параметрам ДПТ определяем L_{af} – взаимную индуктивность обмоток якоря и возбуждения:

$$L_{af} = \frac{c}{I_{aH}}, \text{ где } c = \frac{U_H - I_{aH} R_{\Sigma a}}{\omega_{\text{двH}}}.$$

Суммарная индуктивность обмоток якоря и возбуждения равна сумме индуктивностей обмоток $L_{\Sigma a} = L_a + L_f$.

Управление ДПТ осуществляется изменением тока якорной цепи. Силовая цепь ДПТ последовательного возбуждения показана на рисунке 4.6 голубым цветом. Датчик тока *Current Sensor*, ЭДС двигателя формируется стандартным блоком *Controlled Voltage Source* (источником регулируемого напряжения). Источник питания силовой цепи ДПТ выполнен в виде инвертора с релейным управлением, который расположен в блоке *Vector Control* (см. рисунок 4.7). Напряжение контактной сети постоянного тока в виде источника *DC Voltage Source* и инвертор, выполненный по однофазной мостовой схемы на

IGBT-транзисторах, обеспечивает формирование в силовой цепи ДПТ регулируемого тока. Измерение тока осуществляется датчиком постоянного тока *Current Sensor*, который включен на выходе инвертора в силовой цепи ДПТ. Измеренный ток включается в цепь обратной связи релейного регулятора тока *Discrete Relay Controller 1*. Регулятор тока одновременно формирует импульсы управления *IGBT*-ключами. Входное напряжение регулятора скорости скольжения, изменяющееся в пределах от -10 до $+10$ В, задаёт начальный ток двигателя. Принимаем значение максимального тока 500 А, которое соответствует примерно 2,5-кратному номинальному току ДПТ ДК-812. Поэтому первый сомножитель блока умножения (см. рисунок 4.7) принят равным 50 , второй сомножитель (выход регулятора скорости скольжения) изменяется от 0 до 10 . Знак выходного напряжения регулятора скорости скольжения определяет знак направления тока силовой цепи ДПТ. После формирования тока силовой цепи ДПТ выполняется моделирование электромагнитного момента по уравнению:

$$T_e = c \cdot i_a \rightarrow T_e = L_{af} \cdot i_a^2, \text{ где } \Phi = L_{af} \cdot i_a.$$

Формирование момента выполняется на блоках: *L_{af}*, *Product3*, *Product* и *Product1*. ПротивоЭДС ДПТ формируется на блоках: *L_{af}*, *Product* и *Product3*. На выходе *Product* получается магнитный поток Φ , а частота вращения ДПТ моделируется блоком *Subsystem3* [85]. Блок *Subsystem3* позволяет нагружать ДПТ реактивным (вход *TR*) и активным (вход *TA*) моментами сопротивления. Момент T_e вырабатывается блоком *Product1*. Для решения уравнения движения электропривода необходимо ввести приведённый к валу ДПТ момент инерции J (блок *Constant3*). Текущее значение скорости поступает на второй вход множителя *Product2*, и после умножения на магнитный поток Φ получаем ЭДС ДПТ.

ЭДС поступает на управляющий вход источника *Controlled Voltage Source*. Приложение *Simulink* реализует формирование тока, момента, магнитного потока и частоты вращения ДПТ.

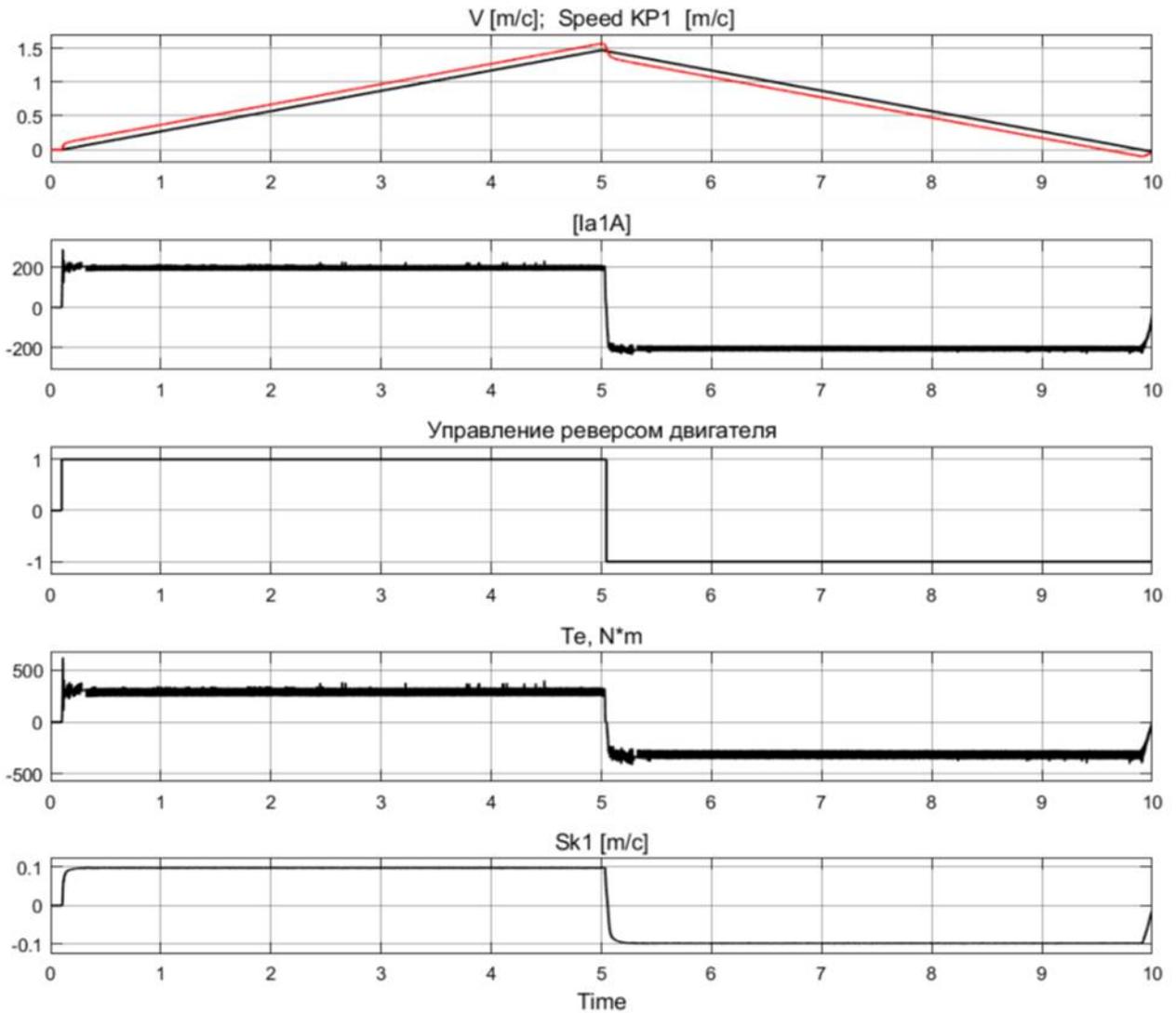


Рисунок 4.8. Диаграммы скорости, тока якоря, момента и скорости скольжения тягового электропривода постоянного тока с коэффициентом сцепления $\psi_0 = 0,175$

Диаграммы движения тягового электропривода постоянного тока с двигателем последовательного возбуждения ДК-812 показаны на рисунке 4.8. На верхней диаграмме показан процесс изменения скорости локомотива (черная линия) с постоянным ускорением $0,3 \text{ м/с}^2$, формируемый интегратором (см. рисунок 4.1). На этой же диаграмме красным цветом представлен характер изменения линейной скорости на ободу колеса первой колёсной пары, формируемый тяговым электроприводом постоянного тока с двигателем последова-

тельного возбуждения, управляемого регулятором скольжения *Speed Controller* (см. рисунок 4.7). Регулятор скорости скольжения настроен на величину разности линейных скоростей ведущей колёсной пары и самого локомотива, равную 0,1 м/с. При этой разности должно формироваться максимальное тяговое усилие на сцепном устройстве, определяемое весом локомотива и текущим значением коэффициента сцепления ($\psi_0 = 0,175$).

Паспортному значению коэффициента сцепления $\psi_0 = 0,175$ соответствует сила тяги от одной колёсной пары на сцепном устройстве локомотива F_T , равная 12500 Н при разгоне и 13700 Н при торможении (рисунок 4.9).

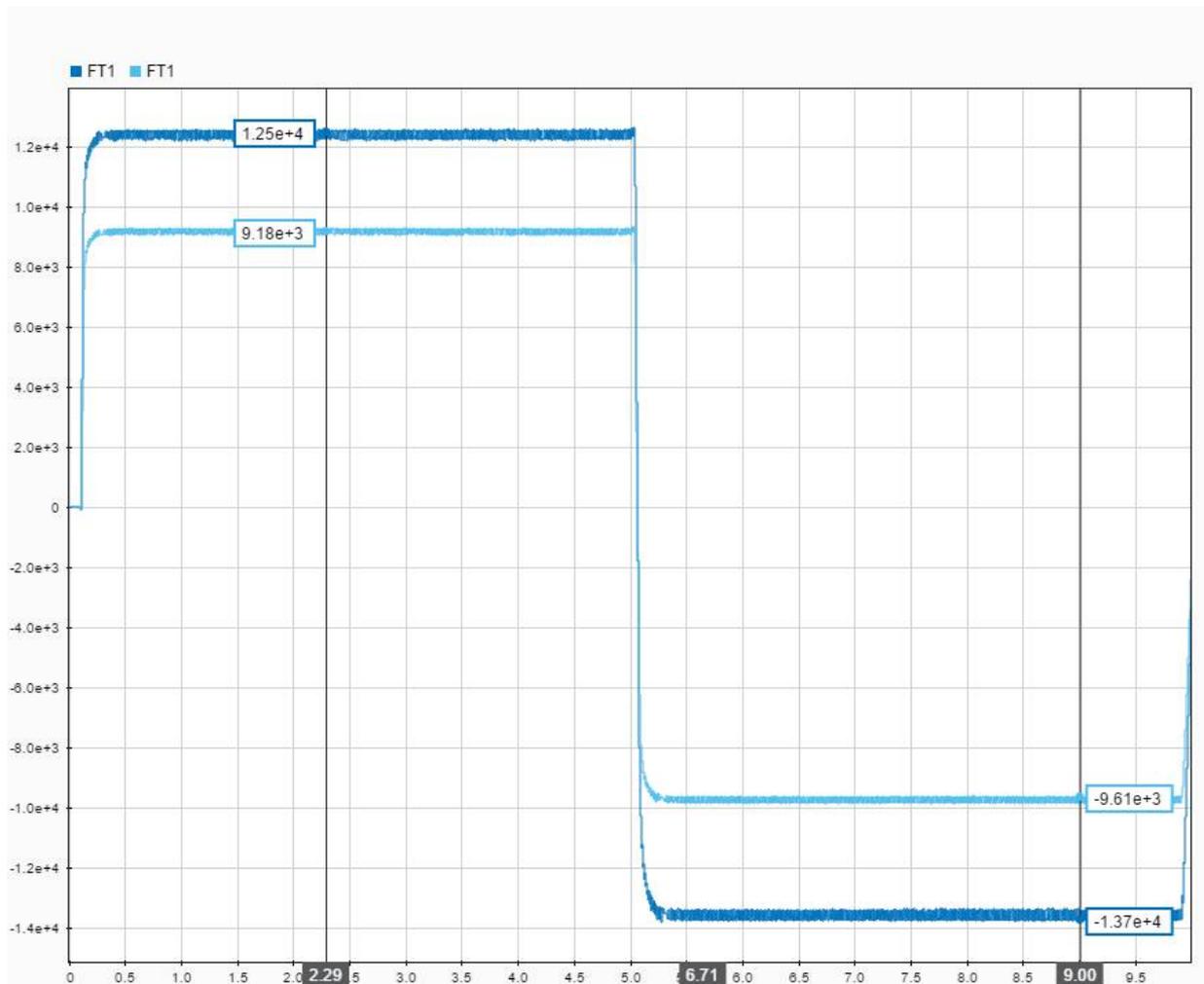


Рисунок 4.9. Диаграмма тягового усилия электропривода постоянного тока с коэффициентом сцепления:

$\psi_0 = 0,175$ – синий цвет; $\psi_0 = 0,12$ – голубой цвет

При более низком коэффициенте сцепления ($\psi_0 = 0,12$) сила тяги от одной колёсной пары на сцепном устройстве локомотива F_T равна 9180 Н при разгоне и 9610 Н при торможении. Движение с разрешенной скоростью скольжения $u = 0,1$ м/с при подсыпке песка под колёса с увеличением коэффициента сцепления приводит к росту тягового усилия локомотива для обеспечения надежного трогания с места и разгона гружёного состава на подъёме.

Сигнал с выхода регулятора скольжения задаёт ток и момент двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Из анализа полученных зависимостей на рисунке 4.8 видно, что линейная скорость колёсной пары $Speed_{KP1}$ на 0,1 м/с превышает линейную скорость движения локомотива V (см. последнюю диаграмму на рисунке 4.8). Таким образом, можно утверждать, что регулятор скорости скольжения выполнил свою задачу. При необходимости можно исследовать работоспособность регулятора скорости скольжения при различных ускорениях, в том числе и для предельных значений ускорения данного типа электровоза. Теоретически вычисленное ускорение для движения гружёного состава с коэффициентом сцепления 0,3 (с подсыпкой песка) под уклон 5 промилле соответствует величине $0,3275$ м/с², а на участке без уклона – $0,28$ м/с². Выбранное ускорение $0,3$ м/с² соответствует реальным условиям движения гружёного состава с максимальным ускорением. На второй и четвертой диаграммах на рисунке 4.8 изображены зависимости тока якоря и электромагнитного момента тягового двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением. Тормозной режим обеспечивается реверсированием тока обмотки якоря относительно тока обмотки возбуждения. Поскольку скорость скольжения на исследуемых участках имеет одинаковое значение 0,1 м/с, то величины тока якоря и момента двигателя остаются постоянными. Так как при моделировании учтено перераспределение нагрузок на оси колёсных пар при изменении направления скорости, то токи и моменты двигателя на участках ускорения и торможения различаются по величине. Рассмотрим реализацию тягового частотно-управляемого ЭП.

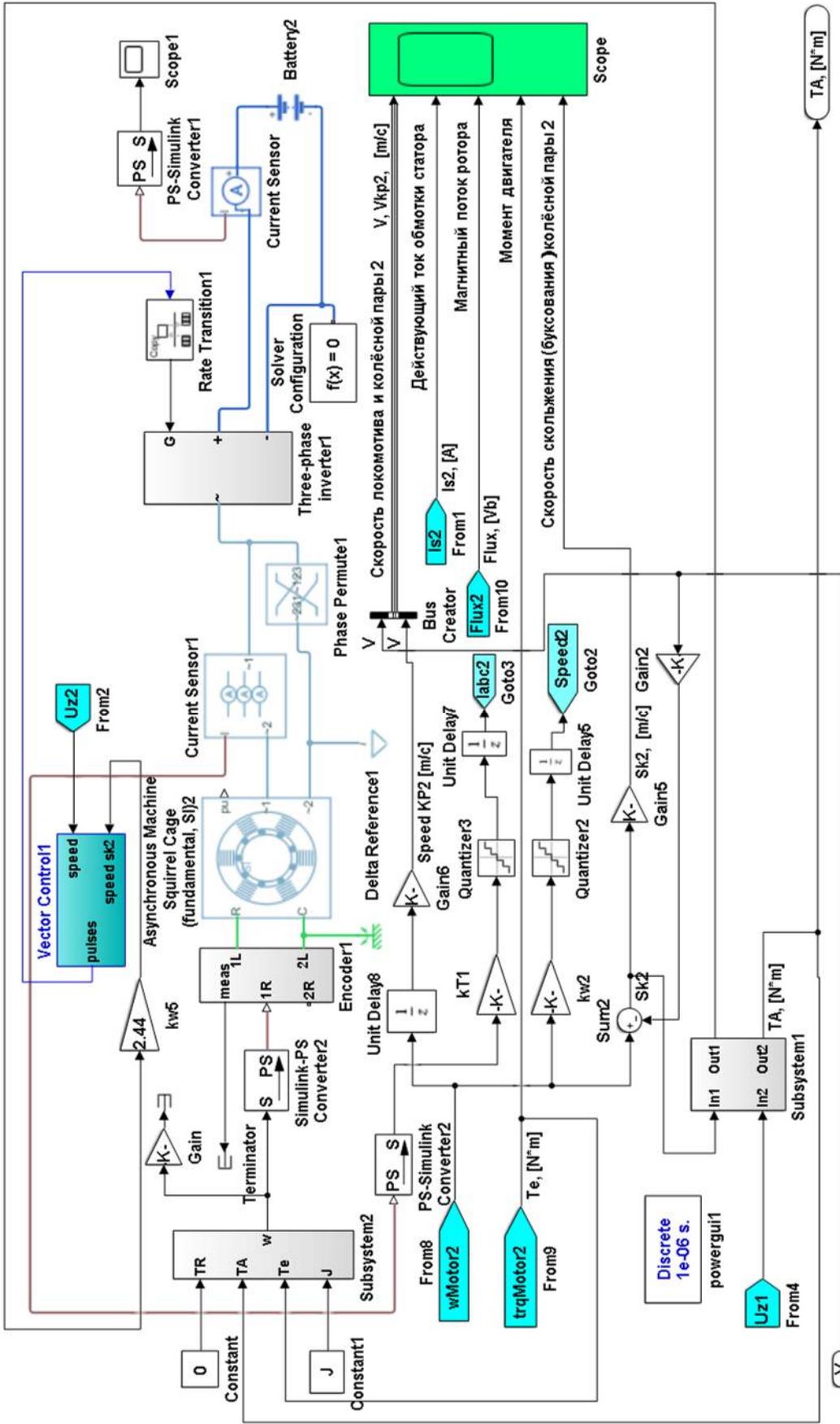


Рисунок 4.10. Имитационная модель тягового частотно-регулируемого асинхронного ЭП с регулятором скольжения

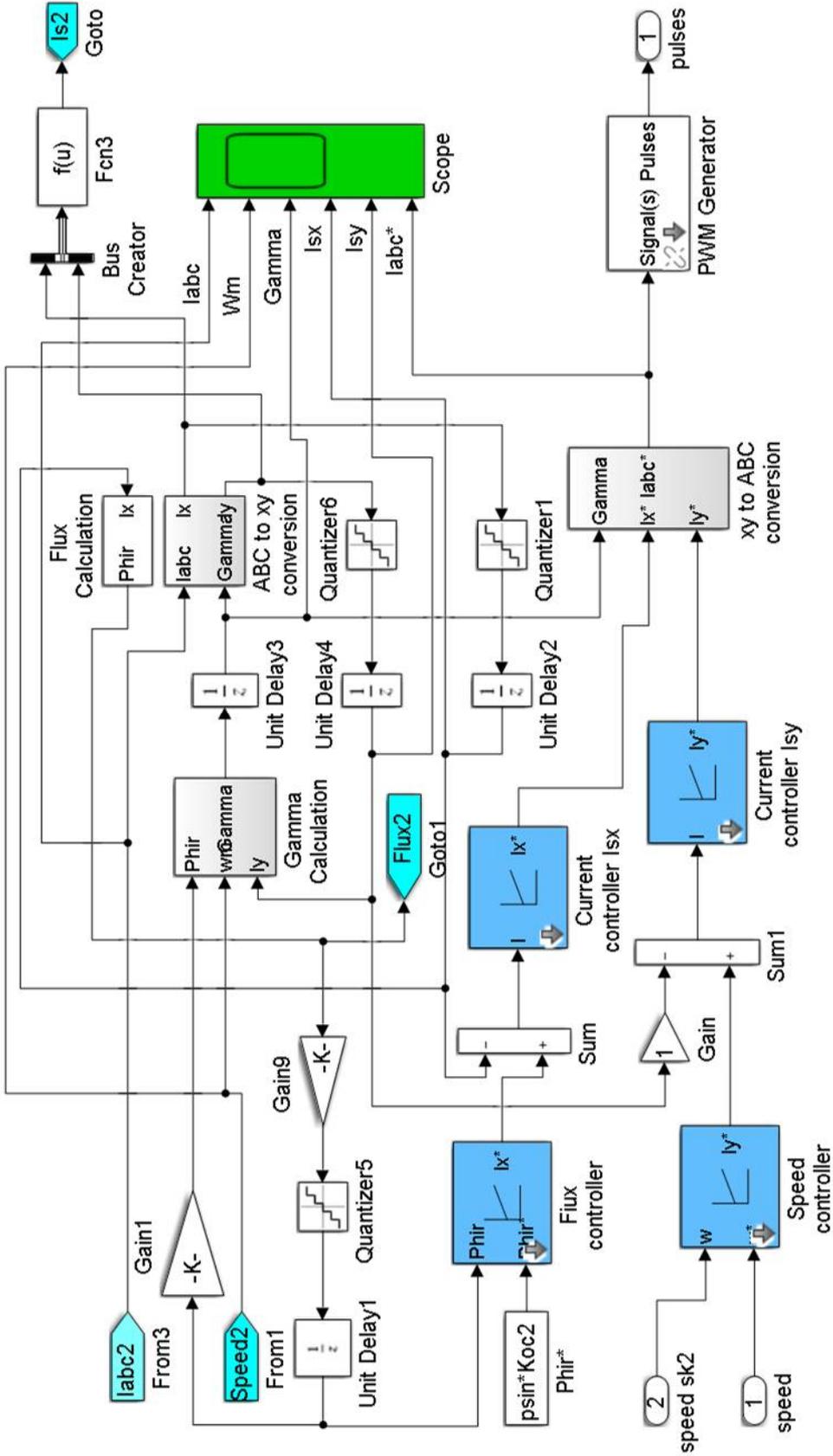


Рисунок 4.1.1. Имитационная модель блока *Vector Control* асинхронного ЭП

4.1.2. Тяговый электропривод переменного тока

Проведём аналогичные исследования с реализацией тягового ЭП второй колёсной пары (КП2) на основе асинхронного двигателя (АД). На рисунке 4.10 представлена имитационная модель тягового частотно-регулируемого асинхронного ЭП с регулятором скольжения. Отличительной особенностью этой модели является включение обмоток статора АД по схеме « Δ » – треугольник – для снижения напряжения питания шины постоянного тока силовой схемы до уровня 310 В вместо 250 В, как в ЭП постоянного тока.

Электромеханические процессы моделируются блоком *Subsystem2*, а электромагнитные процессы моделируются блоком *Vector Control1*. Для формирования тяговых характеристик АД, близких к тяговому ЭП постоянного тока, осуществляется частотное векторное управление ТАЭП с постоянством потокосцепления ротора $\Psi_2 = \text{const}$. Система векторного управления отражена на рисунке 4.11.

Основным элементом системы является регулятор скорости скольжения, выход которого задаёт активную составляющую тока статора АД по координате y , а следовательно, и момент на его валу. По координате x задаётся реактивная составляющая тока статора, создающая магнитный поток ротора, управляемая выходным напряжением регулятора потокосцепления *Flux Controller*. Преобразователь координат x, y to ABC переводит векторные сигналы тока статора из синхронно вращающейся с полем статора системы координат x, y в неподвижную трёхфазную систему ABC . На выходе преобразователя действует трёхфазный задающий сигнал, который определяет программу работы устройства управления трёхфазным силовым инвертором *Three-phase Inverter1* (см. рисунок 4.10).

Пуск ЭП начинается с момента времени $t = 0,1$ с для установления номинального значения потокосцепления ротора $\Psi_{2н}$. Как только в обмотке статора АД появляется ток, возникает электромагнитный момент на выходе АД.

В модели на рисунке 4.10 электромагнитный момент формируется в блоке *Encoder1* и по беспроводной линии *From3* подаётся на вход T_e электромеханического блока *Subsystem2*. Как только момент АД превысит моменты сопротивления, которые действуют на входах TR и TA блока *Subsystem2*, начинается разгон ротора АД, появляется скорость, которая через вход $1R$ блока *Encoder1* поступает на АД через согласующий блок *Simulink-PS Converter2* и учитывается при формировании электромагнитных процессов в АД.

Датчик тока *Current Sensor1*, протекающего по обмоткам статора АД, квантуется по уровню и времени (блоки *Quantizer3* и *Unit Delay7*) и через беспроводную цепь *Go to3* поступает в блок управления *Vector Control1* на вход *From3* (см. рисунок 4.11). С помощью преобразователя координат *ABC to x, y conversion* сигналы тока преобразуются из неподвижной трёхфазной системы координат в синхронно вращающуюся с полем статора двухфазную систему x, y .

Сигналы проекций тока статора на оси x, y , после квантования по уровню и времени, подаются в виде сигналов обратной связи на входы обратных связей регуляторов *Current Controller I_{sx}* и *Current Controller I_{sy}* (см. рисунок 4.11).

Таким образом, сформированы ток обмотки статора, момент АД и его скорость. На выходе сумматора *Sum2* на рисунке 4.10 формируется круговая скорость скольжения (буксования) КП2, которая подаётся на вход *In1* блока *Subsystem1*. На второй вход *In2* этого блока подаётся управляющий сигнал $Uz1$, вырабатываемый блоком управления *Vector Control1*.

Выходными сигналами *Subsystem1* являются:

- *Out1* – скорость скольжения, которая подаётся на вход обратной связи регулятора скорости скольжения (блок *Vector Control1*);
- *Out2* – момент сопротивления, создающий тяговое усилие. Сигнал с выхода *Out2 Subsystem1* поступает в виде активного момента сопротивления TA на соответствующий вход блока *Subsystem2* на модель АД.

Задание на скорость локомотива поступает от блока *Timer2*, имеющего аналогичные настройки диалогового окна, показанные на рисунке 4.4 для тягового ЭП постоянного тока первой колёсной пары КП1. Диаграммы скоростей КП2 с частотно-регулируемым асинхронным ЭП на рисунке 4.12 и тяговых усилий – на рисунке 4.13 сформированы аналогичными сигналами управления для тягового ЭП постоянного тока (см. рисунки 4.8 и 4.9). Сигнал с выхода регулятора скорости скольжения задаёт активную составляющую тока статора АД, формирует его момент и скорости.

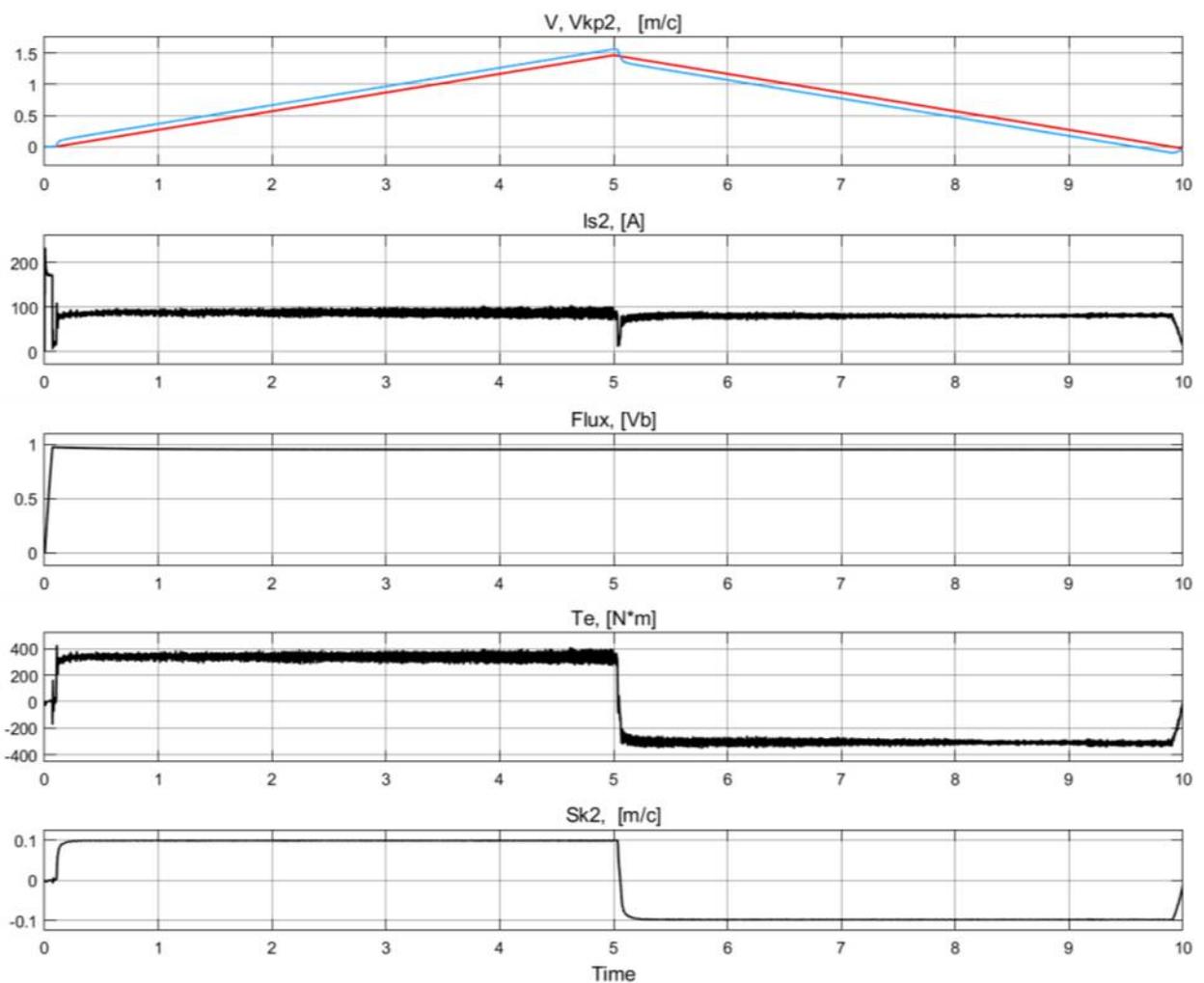


Рисунок 4.12. Диаграммы скорости, тока статора, потокосцепления, момента и скорости скольжения асинхронного тягового электропривода

с коэффициентом сцепления $\psi_0 = 0,175$

Анализ зависимостей на рисунке 4.12 показывает, что линейная скорость колёсной пары $v_{кр1}$ на 0,1 м/с превышает линейную скорость движения локомотива v . Различается незначительно только вид характеристик тока и момента для разных типов ЭП, связанных с принципом работы систем управления.

Как у ЭП постоянного тока, так и у ЭП переменного тока, алгоритм управления по критерию ограничения скорости скольжения на допустимом уровне работает аналогично, выполняя свою основную задачу по формированию необходимого тягового усилия на сцепке (рисунок 4.13).

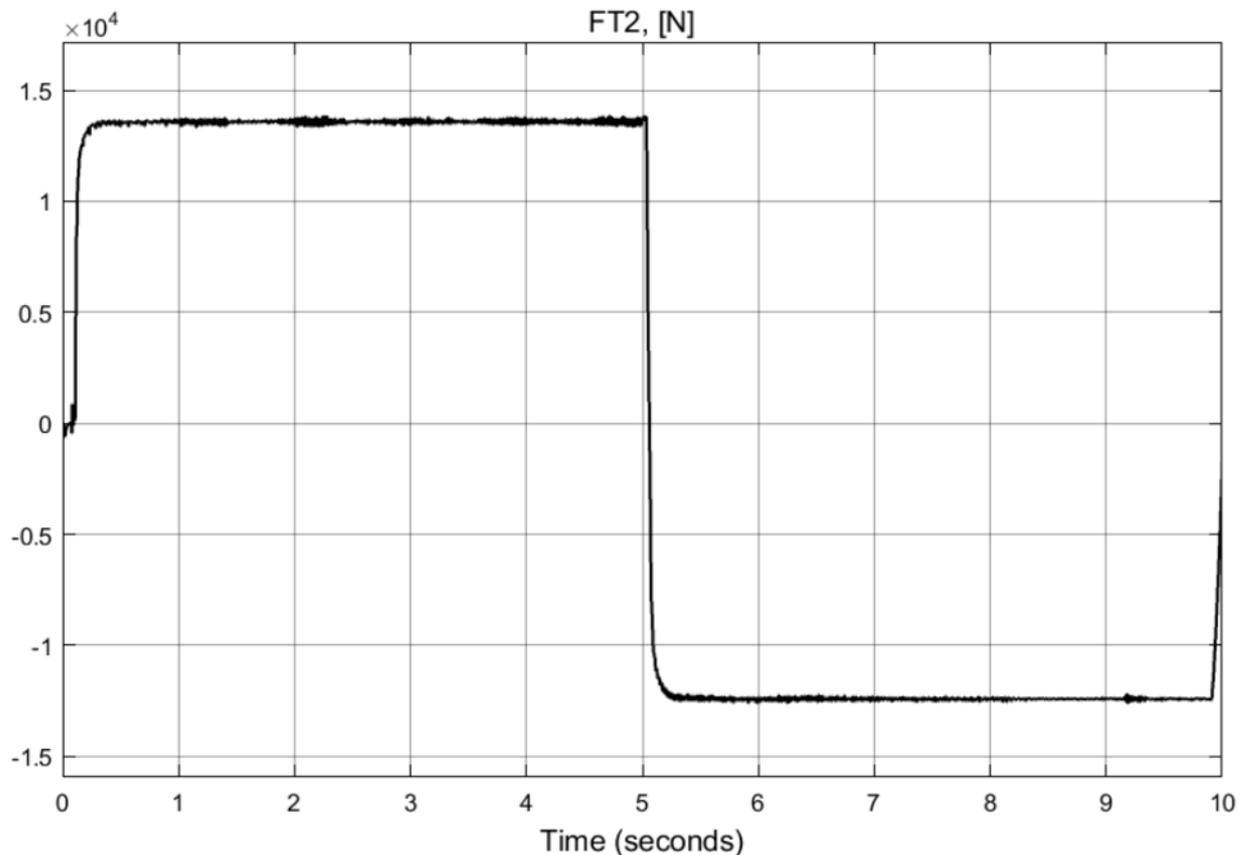


Рисунок 4.13. Диаграммы усилия тяги асинхронного тягового электропривода с коэффициентом сцепления $\psi_0 = 0,175$

Тяговое усилие для коэффициентов сцепления колёс с рельсами $\psi_0 = 0,175$ и $\psi_0 = 0,12$ для частотно-регулируемого асинхронного ЭП повторяет характеристики тяги для ЭП постоянного тока.

Для окончательного вывода об идентичности работы тяговых ЭП рассмотрим полную имитационную модель подвижного состава с реализацией первой колесной пары КП1 на постоянном токе и КП2 – на переменном.

4.1.3. Имитационная модель подвижного состава с реализацией первой колесной пары на постоянном токе и второй колесной пары на переменном токе

Имитационная модель подвижного состава с тяговым электроприводом постоянного тока первой колёсной пары и асинхронным электроприводом второй колёсной пары с регулятором скорости скольжения показана на рисунке 4.14. Тяговые усилия, создаваемые на обеих колёсных парах от привода постоянного тока и привода переменного тока через сумматор *Sum*, поступают на имитационную модель механической системы – блок *Subsystem5*.

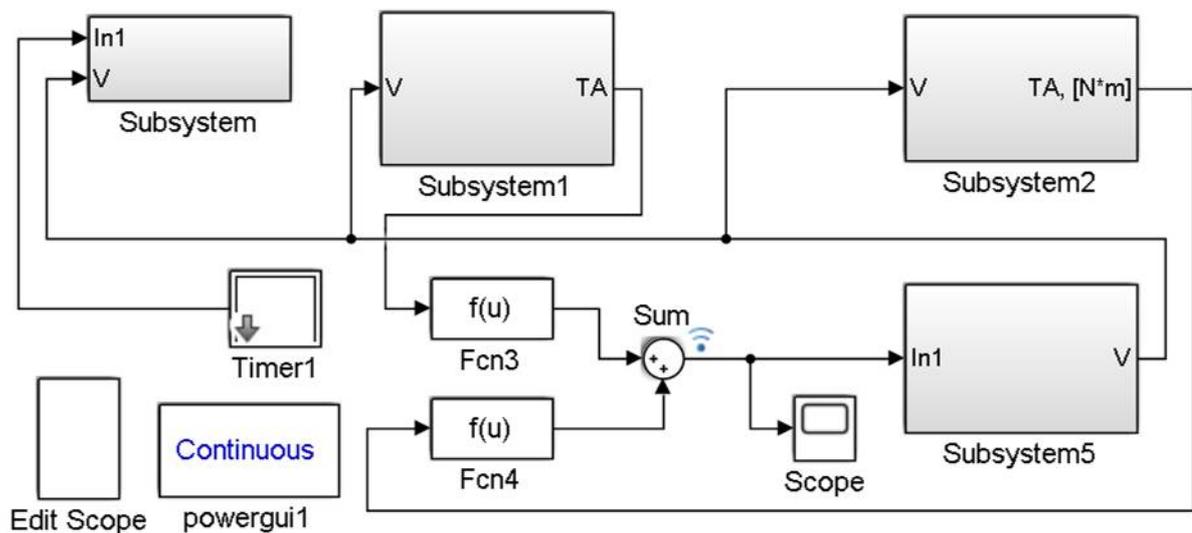


Рисунок 4.14. Блок-схема уточнённой имитационной модели подвижного состава с тяговым электроприводом постоянного тока первой колёсной пары и асинхронным электроприводом второй колёсной пары с регулятором скорости скольжения

Блок *Subsystem5* формирует скорость движения локомотива, управляемую, в свою очередь, регулятором скорости скольжения – блок *Subsystem*.

На рисунках 4.15 и 4.16 представлены диаграммы работы тяговых электроприводов постоянного и переменного тока.

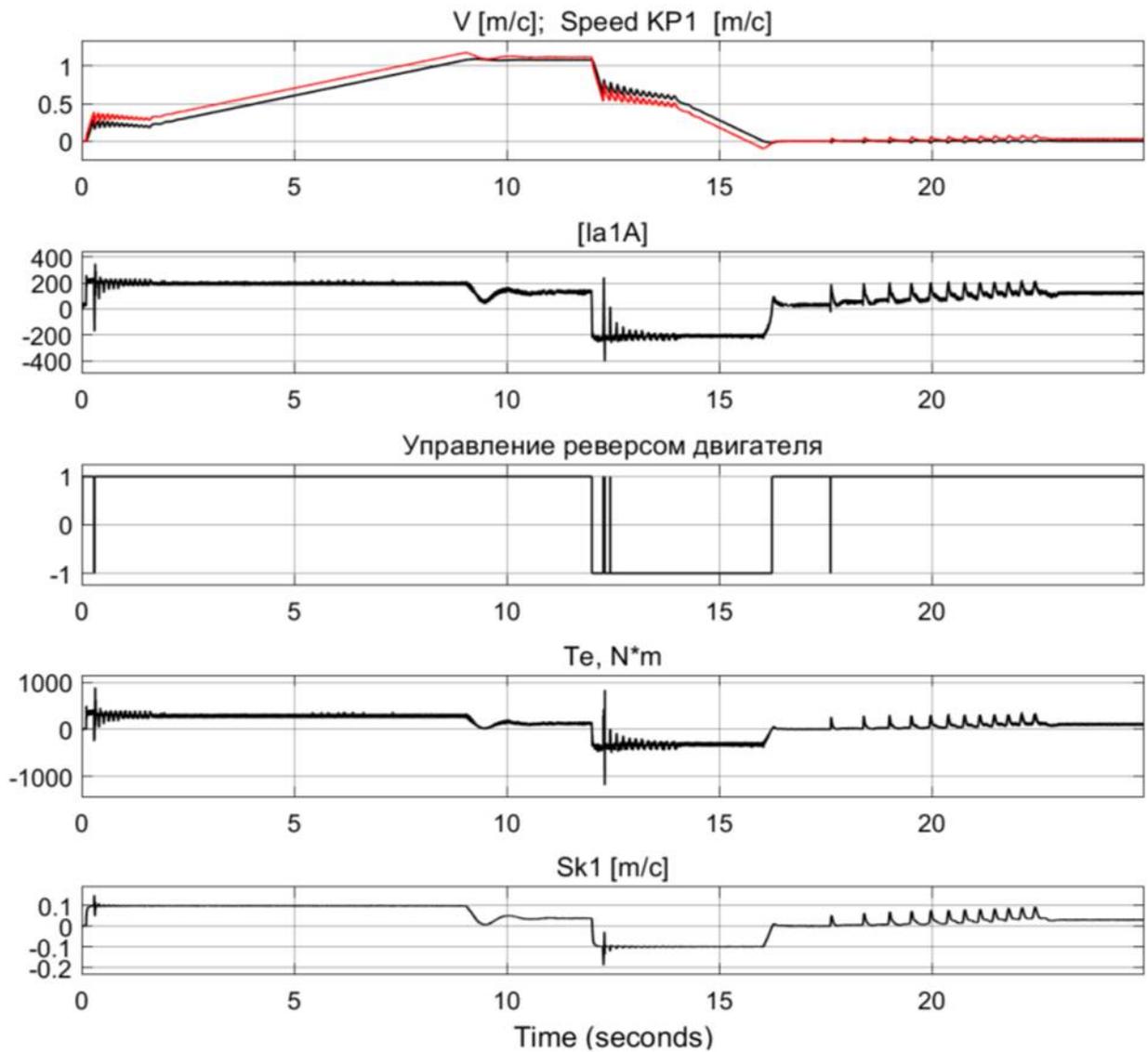


Рисунок 4.15. Диаграммы скорости, тока якоря, момента и скорости скольжения тягового электропривода постоянного тока первой колёсной пары (КП1) уточнённой имитационной модели состава

Из диаграмм рисунка видно, что развиваемые тяговые моменты приводов постоянного и переменного тока близки по величине. Скоростные диаграммы полностью совпадают. Самое главное, что скорость скольжения в статических режимах работы не превышает величину 0,1 м/с, а в переходных режимах (при влиянии сцепки из вагонов) регулятор скольжения стабилизирует скорость скольжения на уровне заданного значения 0,1 м/с. Динамические отклонения скорости скольжения, вызванные управлением скоростью и внутренними возмущениями в сцепке, не превышают величины 0,2 м/с.

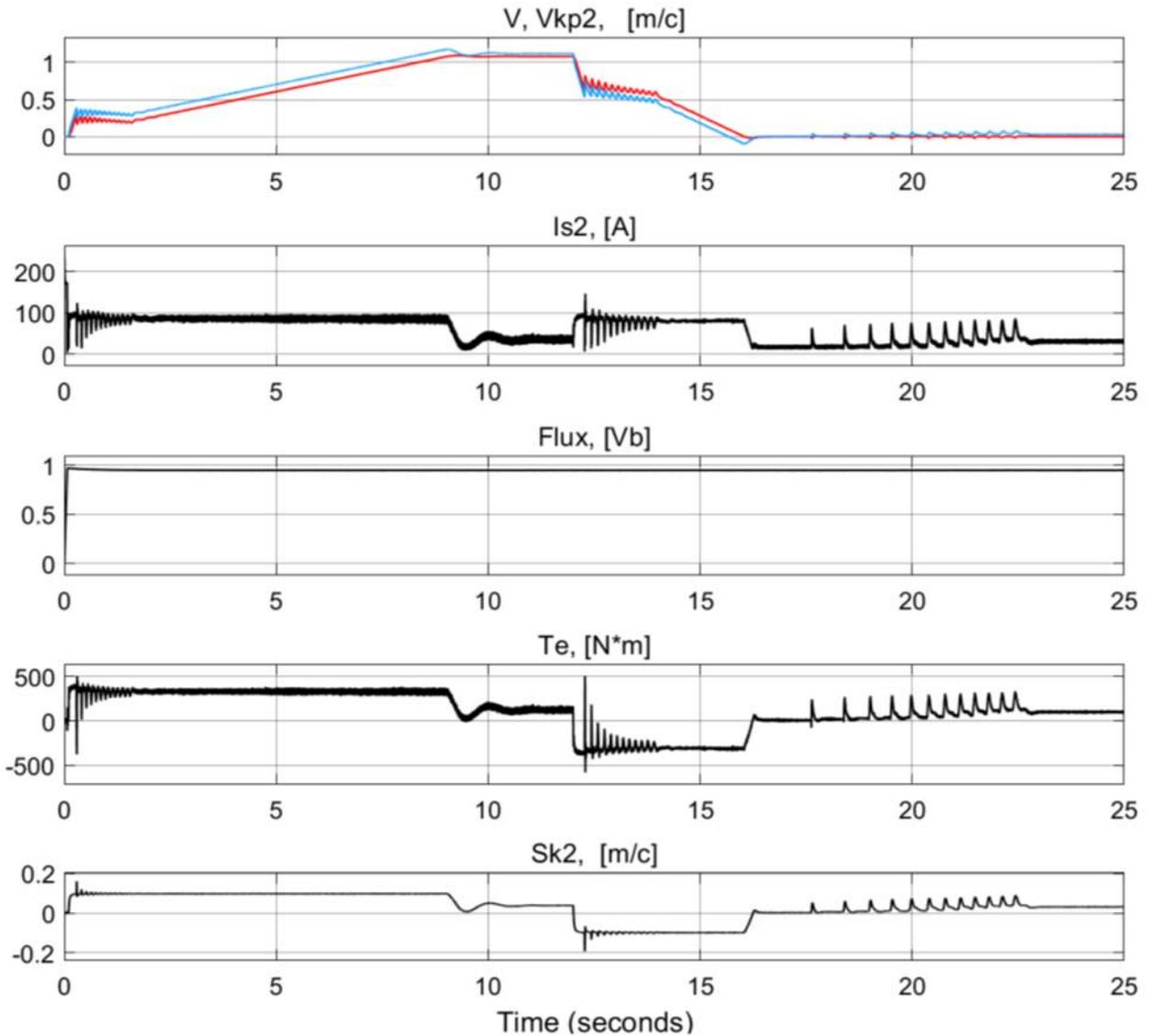


Рисунок 4.16. Диаграммы скорости, тока якоря, момента и скорости скольжения тягового частотно-регулируемого электропривода второй колёсной пары (КП2) уточнённой имитационной модели состава

Диаграмма тягового усилия локомотива с двухдвигательным тяговым электроприводом постоянного тока первой колёсной пары и частотно-регулируемым асинхронным электроприводом второй колёсной пары, полученная на уточненной имитационной модели состава, представленная на рисунке 4.17, демонстрирует равноценный вклад электроприводов разных типов, но с системой управления, работающей по одному принципу, в общее тяговое усилие локомотива, перемещающего грузовой состав.

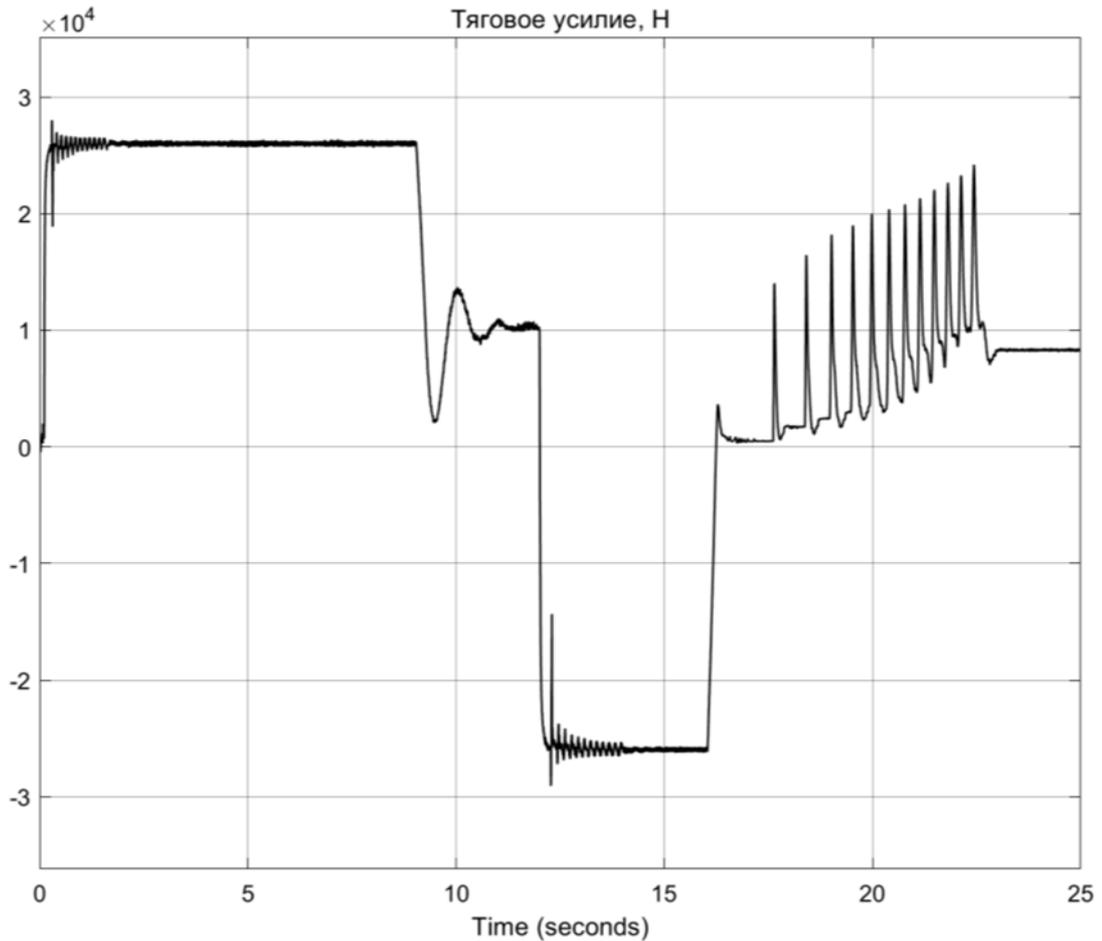


Рисунок 4.17. Диаграмма тягового усилия локомотива с двухдвигательным тяговым электроприводом постоянного тока первой колёсной пары и частотно-регулируемым асинхронным электроприводом второй колёсной пары, полученная на уточнённой имитационной модели состава

Данное исследование однозначно доказывает работоспособность метода управления тяговыми электроприводами подземного электровоза с грузёным составом по критерию допустимой скорости скольжения независимо от типа регулируемого электропривода. Следовательно, предлагаемый метод управления подземным рельсовым составом является универсальным с точки зрения способности предотвращать неэффективные режимы буксования колес при разгоне состава. При изменении режима работы привод изменяет скорость скольжения и момент. То есть регулирование тягового момента осуществляется через скольжение.

4.2. Моделирование работы алгоритма управления тяговым электроприводом переменного тока для предотвращения буксования и юза электровоза с составом

4.2.1. Движение состава на подъем

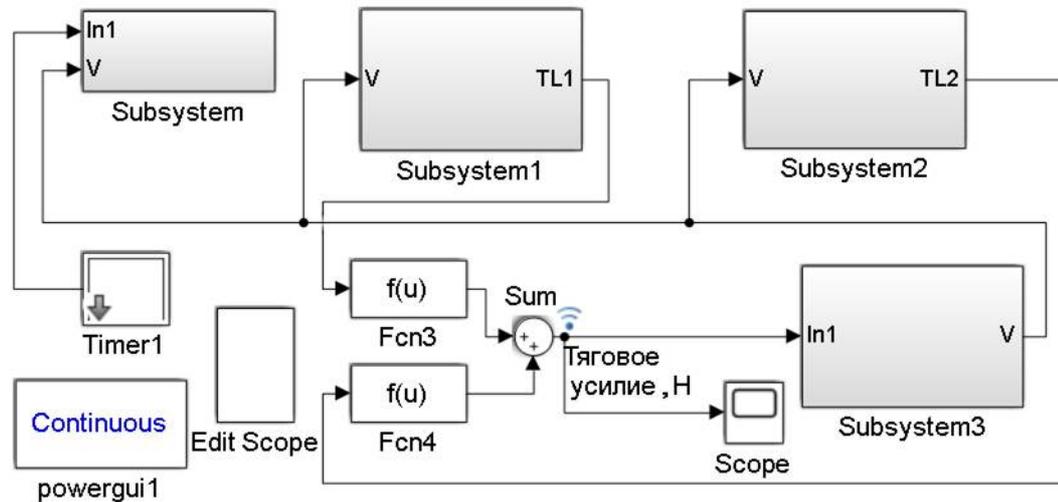


Рисунок 4.18. Блок-схема уточненной имитационной модели подвижного состава с двухдвигательным тяговым асинхронным электроприводом с регулятором скорости скольжения

На рисунке 4.18 представлена блок-схема полной имитационной модели подвижного состава с рудничным электровозом. Отдельные элементы, входящие в модель, были рассмотрены ранее. Например, блок *Subsystem* – регулятор скорости (описание работы блока в пп. 4.1.1, 4.1.2). Блок *Subsystem1* – тяговый электропривод переменного тока первой колесной пары (описание работы в пп. 4.1.1, 4.1.2). Блок *Subsystem2* – тяговый электропривод переменного тока второй колесной пары. Его структура аналогична структуре блока *Subsystem1*. Блок *Subsystem3* – имитационная модель сцепки, работа блока описана в п. 3.3 главы 3 (см. рисунок 3.26). Блоки *Fcn3* и *Fcn4* обеспечивают перевод моментов колесных пар электровоза в тяговое усилие, а блок *Sum* – сумматор – обеспечивает суммирование тягового усилия локомотива от двух приводов.

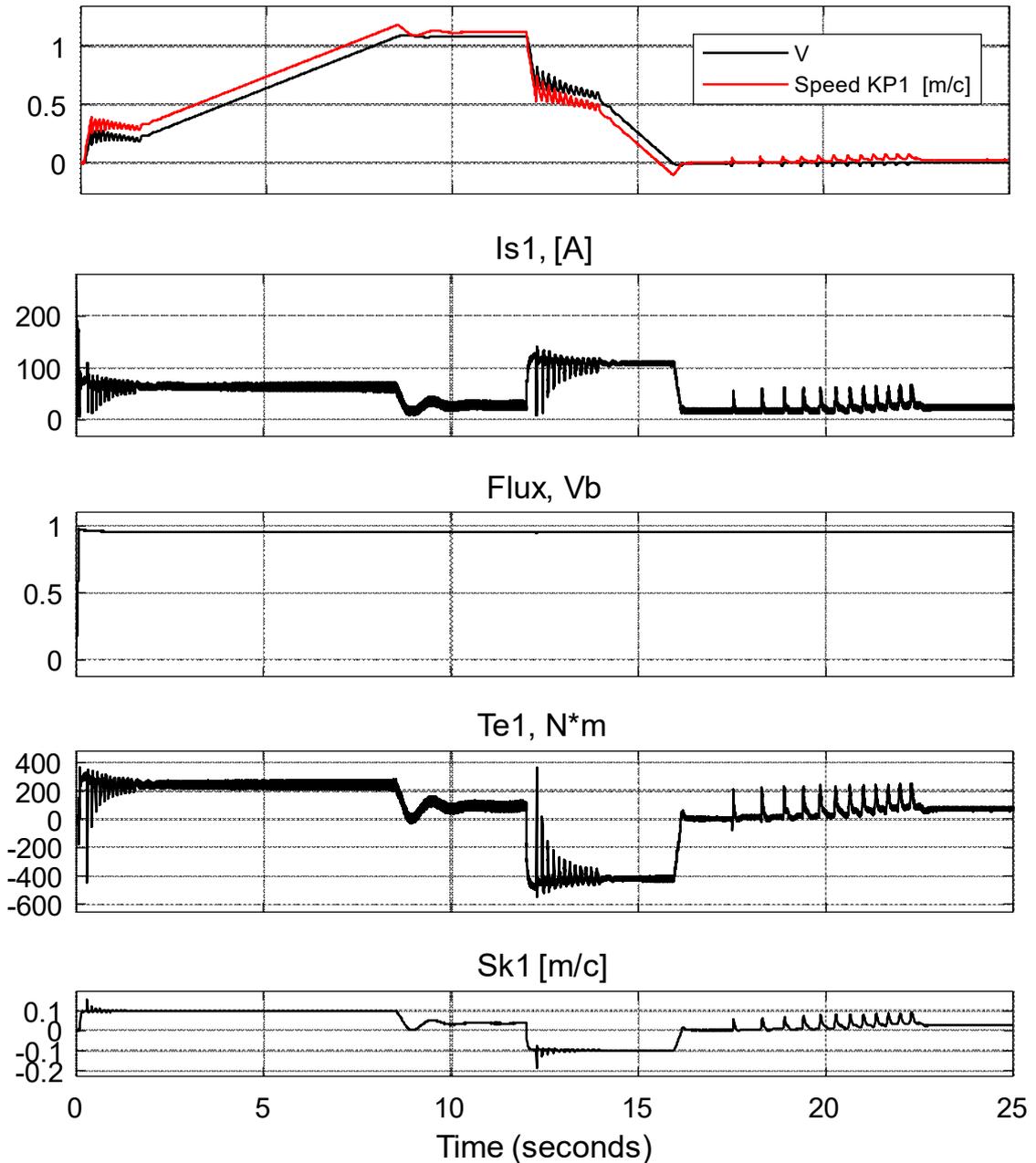


Рисунок 4.19. Скорость скольжения ($Sk1$), линейная скорость локомотива (v), линейной скорости колеса в точке контакта с рельсом ($SpeedKP1$), действующее значение тока статора (I_{s1}), потокосцепление ротора (Ψ_2) и электромагнитный момент (T_{e1}) тягового двигателя первой колёсной пары (КП1) при разгоне грузового состава **на подъём 5 промилле** до скорости 1,08 м/с (3,9 км/ч)

На рисунках 4.19 и 4.20 представлены результаты моделирования работы тягового электропривода первой и второй колесных пар с учетом уточненной имитационной модели подвижного состава.

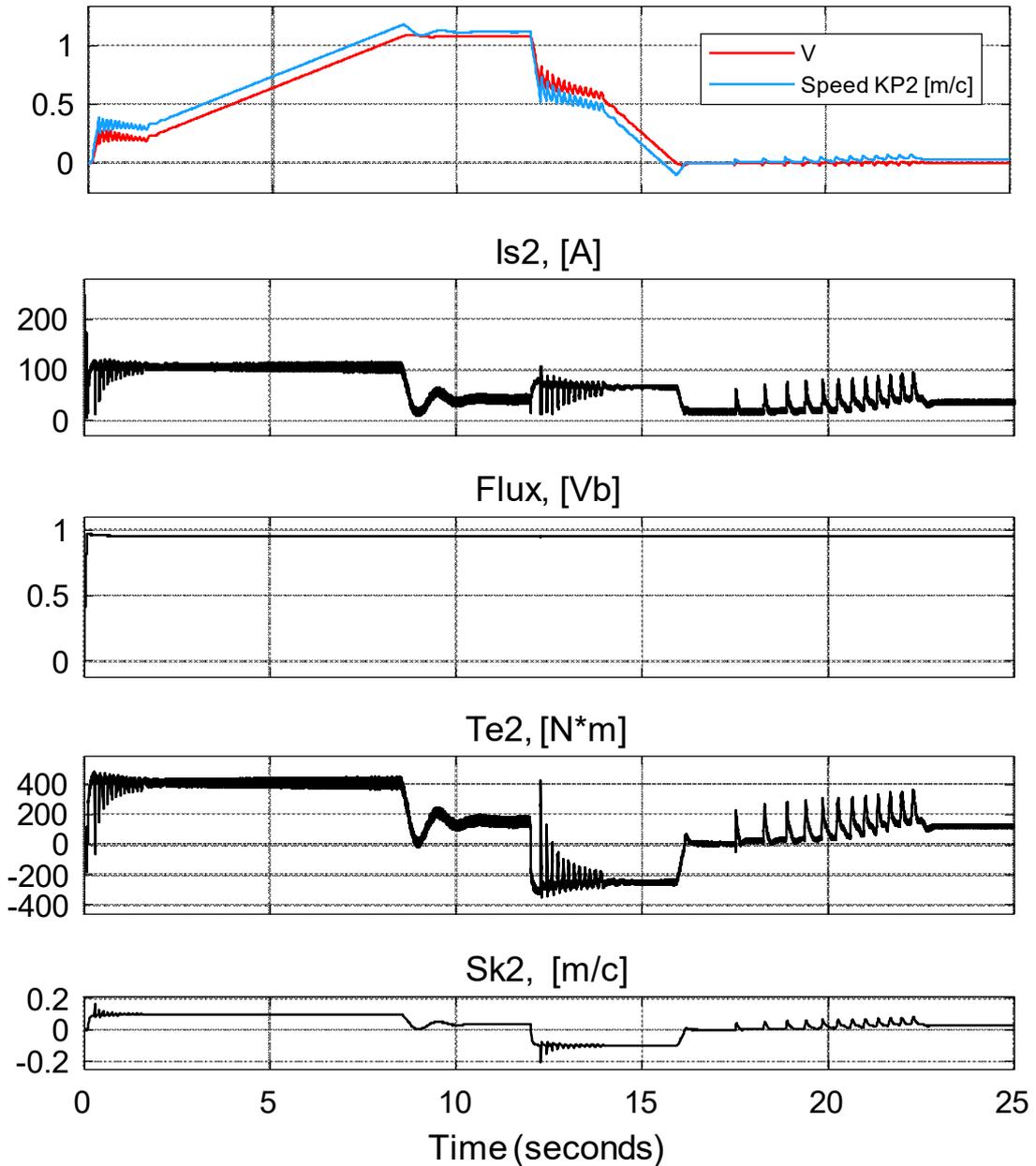


Рисунок 4.20. Скорость скольжения ($Sk2$), линейная скорость локомотива (v), линейная скорости колеса в точке контакта с рельсом ($SpeedKP2$), действующее значение тока статора (I_{s2}), потокосцепление ротора (Ψ_2) и электромагнитного момента (T_{e2}) тягового двигателя второй колёсной пары (КП2) при разгоне груженого состава **на подъём 5 промилле** до скорости 1,08 м/с (3,9 км/ч)

На интервале времени $[0 \dots 0,1]$ секунда идет рост потокосцепления ротора тяговых электродвигателей обеих колесных пар от 0 до $\Psi_{2ном}$.

С момента времени 0,1 с формируется команда на пуск электроприводов первой и второй колесных пар.

При нулевой скорости устанавливается линейная скорость на ободу колеса, равная 0,1 м/с. Этой скорости, при нулевой скорости локомотива, соответствует скорость скольжения 0,1 м/с. При данном значении скорости скольжения система управления формирует тяговый момент колесных пар локомотива. С ростом скорости скольжения начинают увеличиваться тяговые моменты ТАД1 и ТАД2. Как только суммарное усилие, создаваемое электроприводами колесных пар 1 и 2 превысит усилие сопротивления движению состава, начнется рост скорости локомотива и вагонов.

Процесс разгона груженого состава на подъём 5 промилле до скорости 1,08 м/с (3,9 км/ч) можно условно разделить на несколько этапов.

Первый этап демонстрирует работу сцепки. Он длится до момента времени 1,83 с. После срабатывания сцепки последнего вагона скорость локомотива составляет 0,235 м/с. Естественно, что линейная скорость в точке контакта колеса с рельсом на 0,1 м/с больше скорости движения локомотива.

Второй этап разгона характеризуется (после 1,83 с) линейным нарастанием скорости локомотива с максимально возможным для данных условий ускорением.

Как видно из диаграмм на рисунках 4.19, 4.20, процесс разгона состава протекает с одинаковой скоростью скольжения – 0,1 м/с, но развиваемый момент АД первой колесной пары ($T_{e1} = 224$ Н м) меньше, чем момент АД второй колесной пары ($T_{e2} = 406$ Н м). Это обусловлено перераспределением веса локомотива на колесные пары за счет действия сцепки при разгоне.

Скоростные диаграммы первой и второй колесных пар абсолютно одинаковы, т. к. они формируются при одинаковом суммарном тяговом усилии, действующем на сцепке локомотива от двух электроприводов.

Переходный процесс пуска заканчивается в момент времени 9 с. Далее начинается третий этап движения состава с постоянной линейной скоростью 1,08 м/с. Как видно на диаграммах, представленных на рисунках 4.19–4.21, скорость скольжения на третьем этапе снижается от 0,1 до 0,038 м/с. При этом

момент сопротивления на первой колесной паре стал 111,8 Н·м. На второй колесной паре скорость скольжения тоже стала 0,038 м/с, а момент нагрузки снизился до величины 150 Н·м. Таким образом, величина скорости скольжения определяет величину суммарной нагрузки, т. е. момента сопротивления, на обе колесные пары.

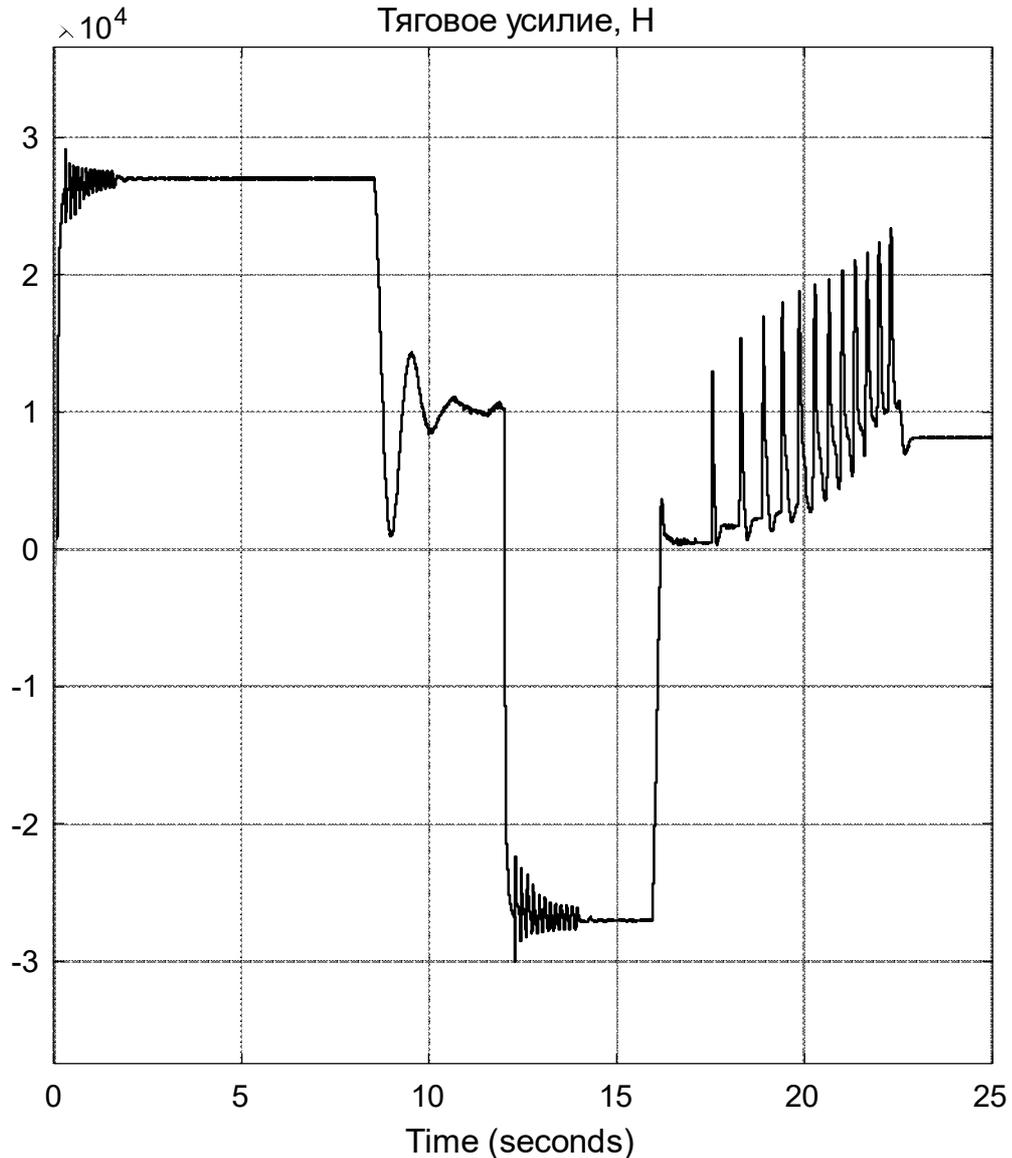


Рисунок 4.21. Тяговое усилие локомотива при разгоне грузового состава на подъем 5 промилле до скорости 1,08 м/с

Четвертый этап протекает в период с 12 до 14 с. На этом этапе плунжеры сцепок вагонов с крайнего положительного значения +25 мм переходят на крайнее отрицательное значение –25 мм. Суммарное перемещение плунжеров

на этом этапе составляет 50 мм. То есть физическая интерпретация данного переходного процесса объясняется тем, что растянутый состав на предыдущем этапе движения собрался, выбрав зазоры в сцепных устройствах.

На пятом этапе, с 14 по 16 секунды, идет процесс торможения состава. Скорость скольжения установилась на уровне 0,1 м/с, но при этом динамические скачки скорости скольжения не превышают величину 0,2 м/с.

При останове локомотива начинается шестой этап переходного процесса. Так как состав останавливается на подъеме, то при нулевой скорости локомотива начинается скатывание вагонов назад под действием силы тяжести. При этом происходит переключение плунжеров в сцепках, которое на диаграммах отображается в виде бросков моментов $Te1$ и $Te2$. В момент, когда сработала сцепка последнего вагона, тяговый электропривод должен развивать суммарный момент от обеих колесных пар 150 Н·м. Скорость скольжения в начале шестого этапа равна нулю, но по мере срабатывания сцепок она растет ступенчато до величины 0,015 м/с.

В качестве вывода можно отметить, что в конце шестого этапа для удержания вагонов и локомотива на подъеме на нулевой скорости тяговые электроприводы должны развивать скорость скольжения 0,015 м/с. Развиваемое тяговое усилие 8200 Н (см. рисунок 4.21) удерживает состав на месте от скатывания назад без применения механических тормозов.

Процессы изменения тяговых моментов колесных пар 1 и 2 для рассмотренного режима движения на подъем подробно проанализированы на рисунках 4.22 и 4.23. Причем можно заметить, что рисунок 4.23 повторяет 4.21, но в нем добавлены численные значения уровней.

На втором этапе разгона состава (рисунок 4.22) тяговый момент электропривода второй колесной пары $TL2 = +405,9$ Н·м, а первой колесной пары $TL1 = +237,8$ Н·м, что соответствует их суммарному действию +643,7 Н·м. Разница в моментах, развиваемых электроприводами колесных пар, обусловлена

действием тягового усилия на сцепке локомотива, т. е. при разгоне перераспределяется вес состава, увеличивая долю веса на вторую колесную пару и уменьшая на первую.

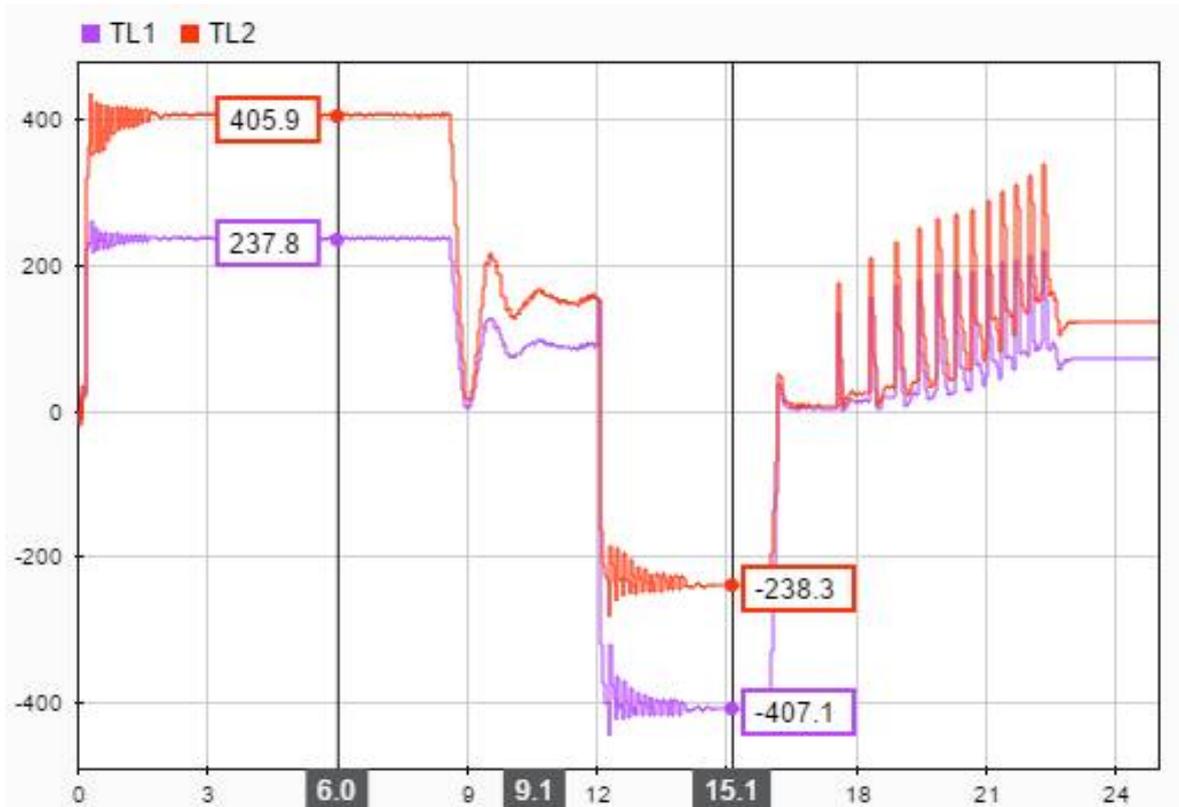


Рисунок 4.22. Характеристики тяговых моментов первой колёсной пары $[TL1]$ Н·м и $[TL2]$ Н·м при разгоне груженого состава **на подъём 5 промилле** до скорости 1,08 м/с

Перераспределение веса состава при торможении (этап пятый) происходит в обратном порядке. На оси первой колесной пары момент $TL1 = -407,1$ Н·м, а на оси второй $TL2 = -238,3$ Н·м, что в сумме дает сопоставимое значение $-645,4$ Н·м, которое и определяет тяговое усилие локомотива. В режиме пуска суммарный момент составил 26900 Н, а в режиме торможения – 27000 Н (рисунок 4.23).

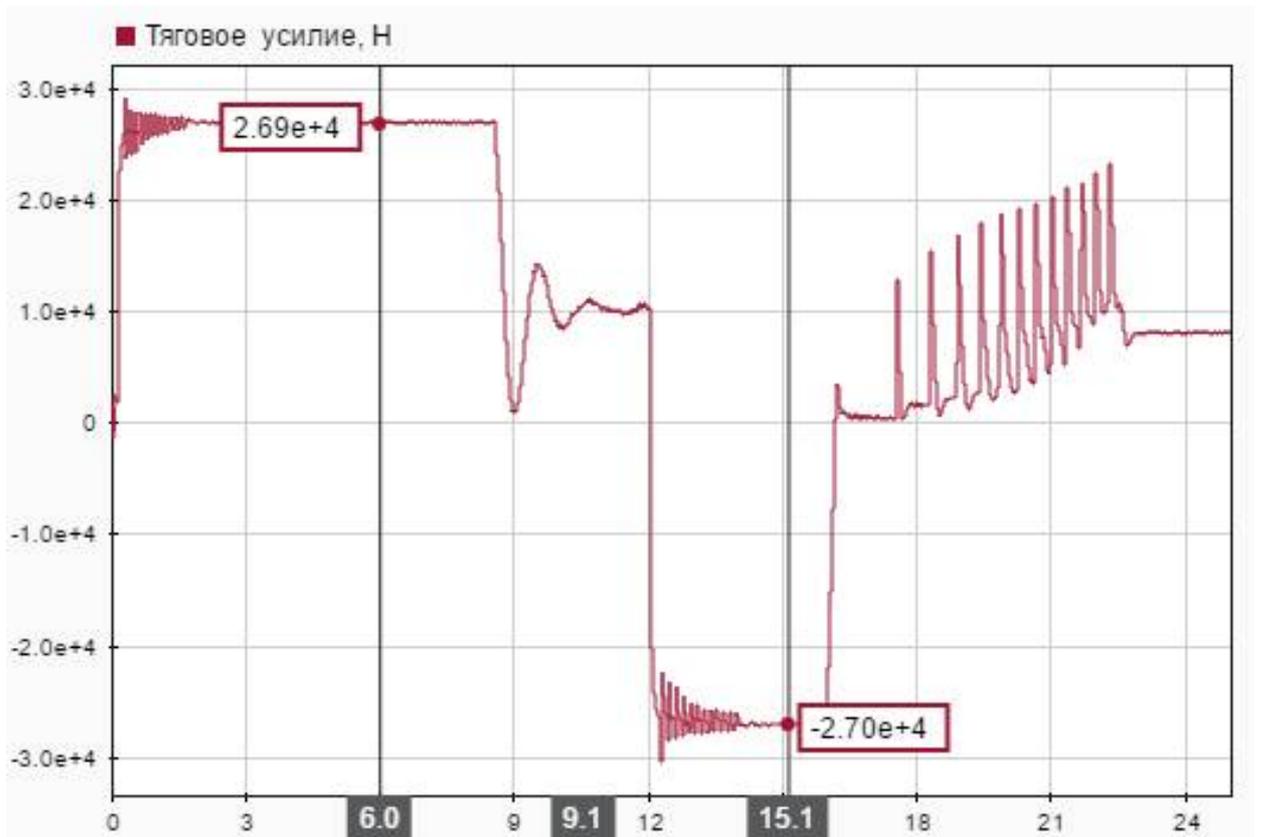


Рисунок 4.23. Тяговое усилие локомотива при разгоне грузового состава на подъём 5 промилле до скорости 1,08 м/с

Таким образом, в режиме разгона и торможения суммарный момент остается примерно одинаковым.

4.2.2. Движение на спуск

Рассмотрим случай разгона грузёного состава при спуске (под уклон) 5 промилле.

Диаграммы, показывающие режимы работы локомотива, представлены на рисунках: 4.24 – для первой колесной пары, 4.25 – для второй, 4.26 – для обеих колесных пар.

Качественно управление по скорости скольжения двухдвигательным тяговым электроприводом не изменилось, а диаграммы переходных процессов подобны тем, что были получены в разделе 4.2.1. Скорость скольжения на диаграмме не превышает значения 0,15 м/с.

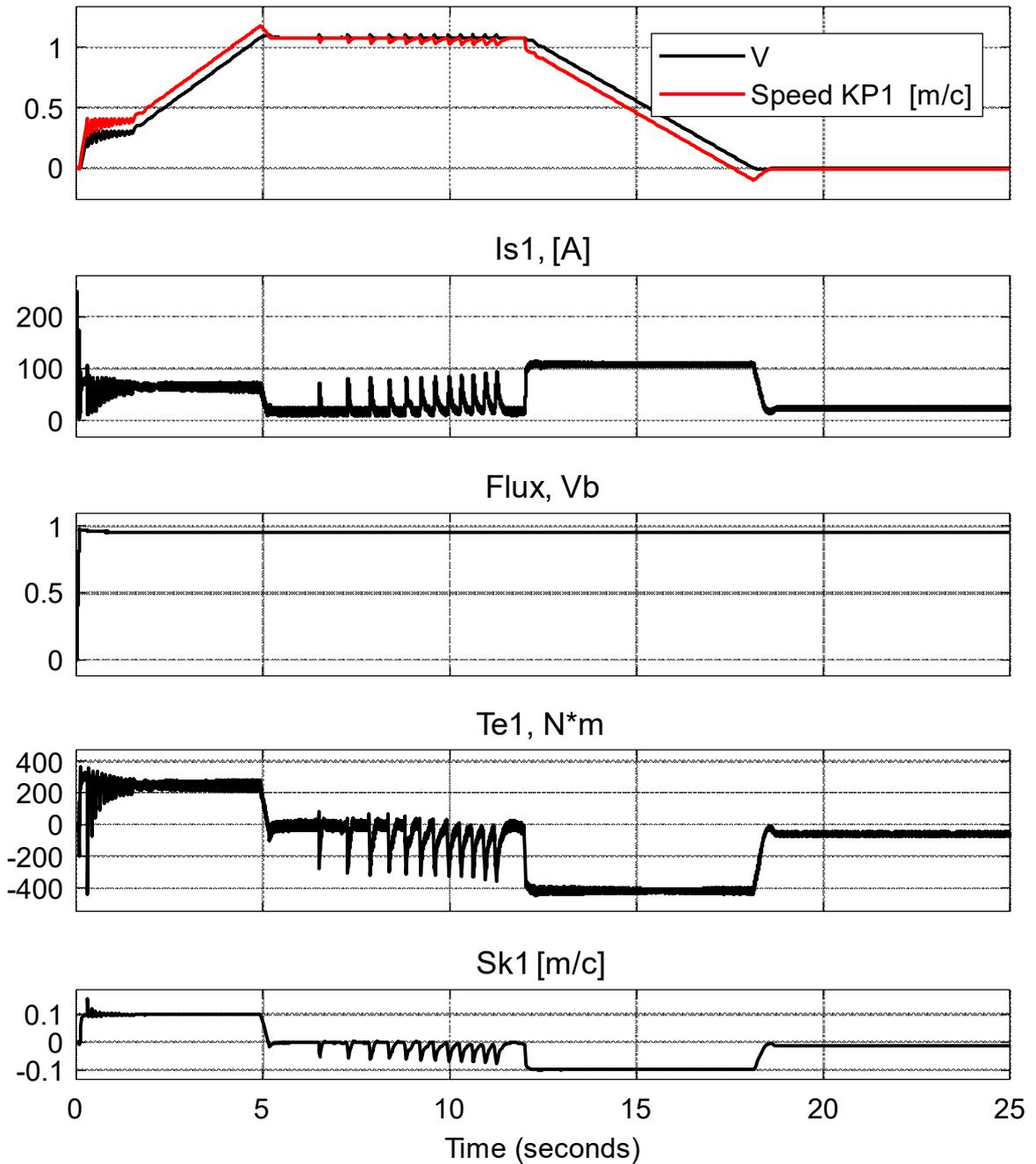


Рисунок 4.24. Характеристики скорости скольжения ($Sk1$), линейной скорости локомотива (v), линейной скорости колеса в точке контакта с рельсом ($SpeedKP1$), действующего значения тока статора (I_{s1}), потокосцепления ротора (Ψ_2) и электромагнитного момента (T_{e1}) тягового двигателя первой колёсной пары (КП1) при разгоне груженого состава на спуск 5 промилле до скорости 1,08 м/с (3,9 км/ч)

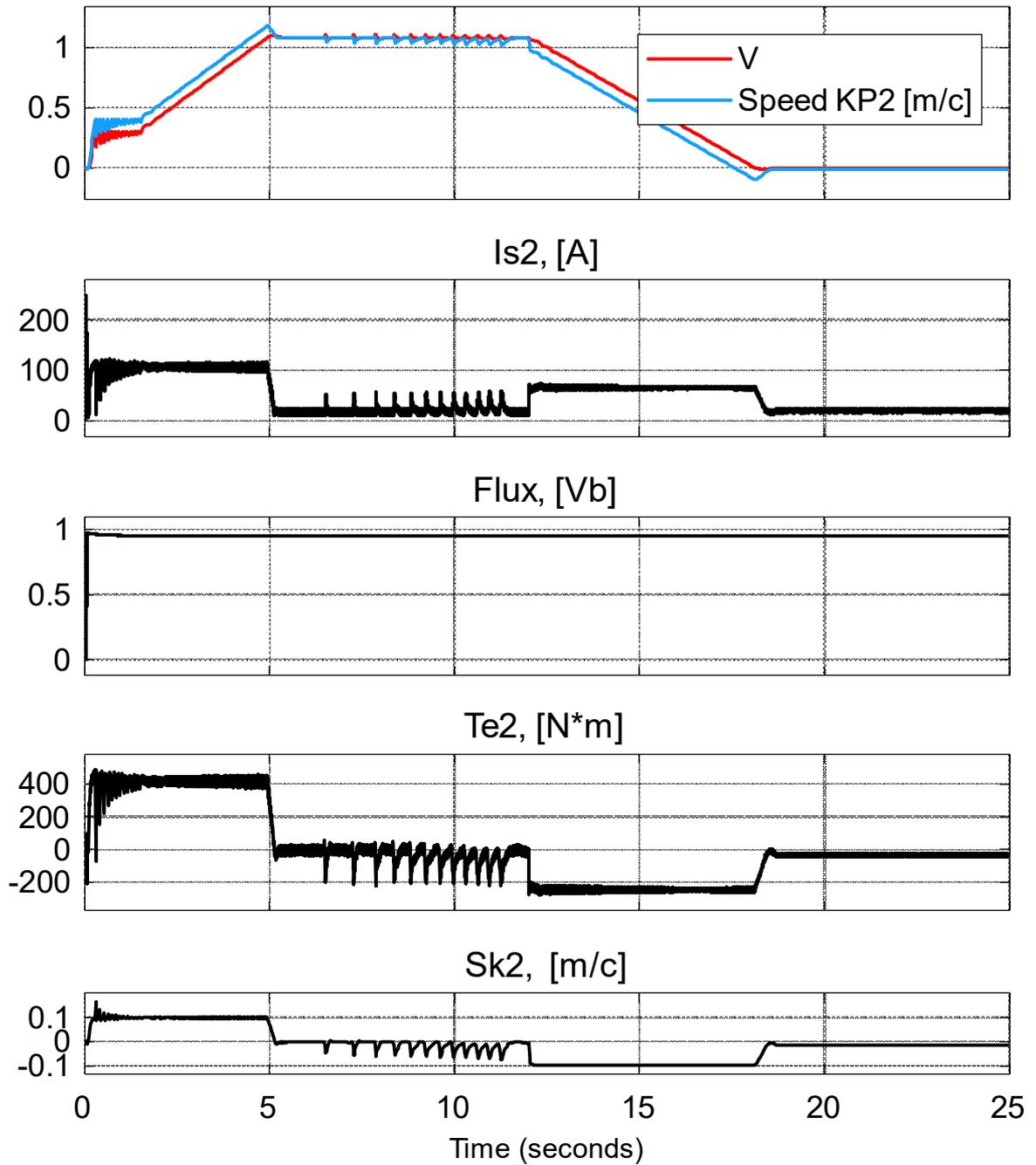


Рисунок 4.25. Характеристики скорости скольжения (Sk_2), линейной скорости локомотива (v), линейной скорости колеса в точке контакта с рельсом ($Speed_{KP2}$), действующего значения тока статора (I_{s2}), потокосцепления ротора (Ψ_2) и электромагнитного момента (T_{e2}) тягового двигателя второй колёсной пары (КП2) при разгоне груженого состава на спуск 5 промилле до скорости 1,08 м/с (3,9 км/ч)

Естественно, время пуска состава на заданную скорость 1,08 м/с уменьшилось до 5 секунд.

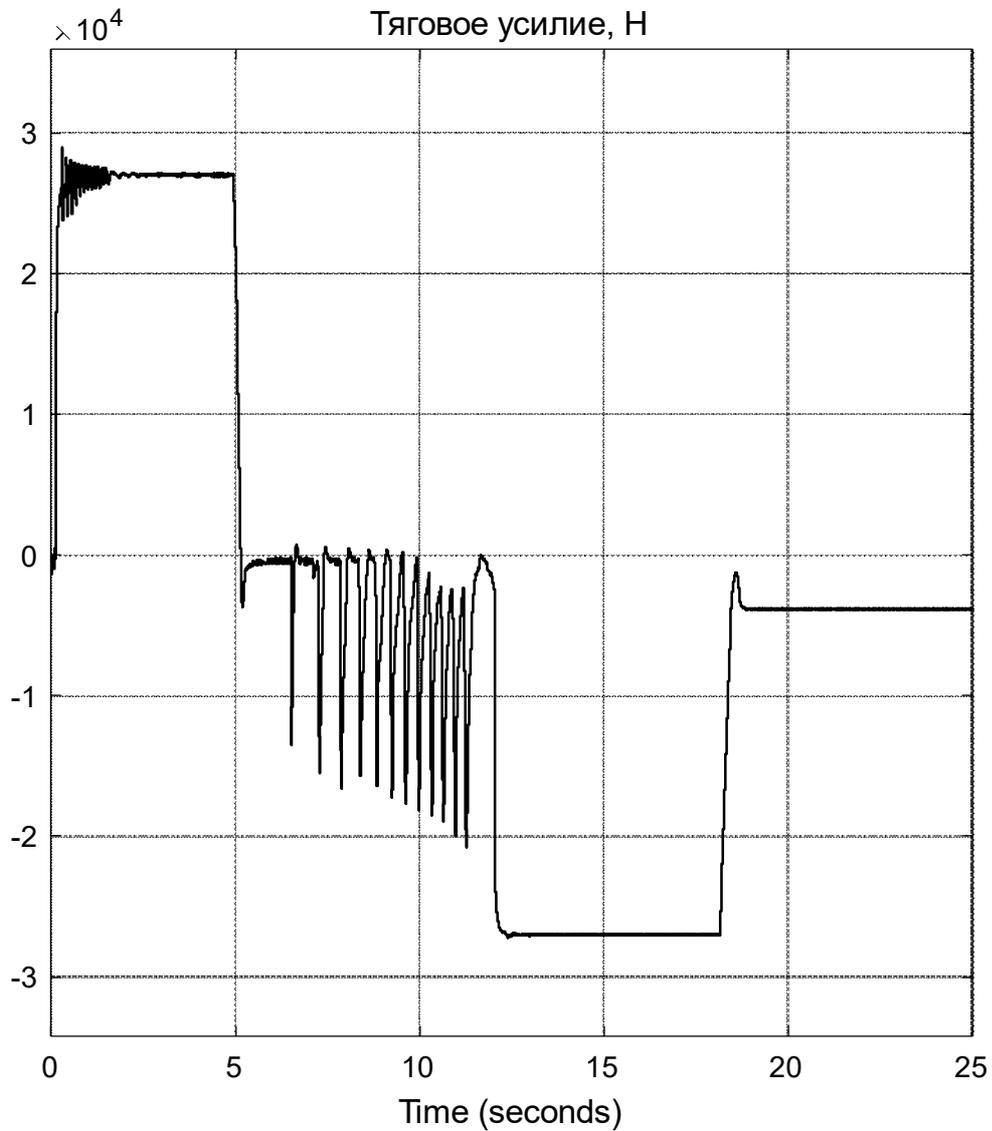


Рисунок 4.26. Тяговое усилие локомотива при разгоне груженого состава на спуск 5 промилле до скорости 1,08 м/с

Во время установившегося равномерного движения (третий этап переходного процесса), протекающего на интервале от 5 до 12 с, произошло переключение сцепки вагонов. Поэтому на этом этапе система управления тяговыми электроприводами для поддержания скорости состава постоянной препятствует изменению суммарного тягового усилия локомотива, совершая в ди-

намике 12 импульсов (равно количеству вагонов) уменьшения момента электроприводов первой и второй колесных пар. Соответственно, на этом интервале броски скорости скольжения величиной не более 0,1 м/с происходят в отрицательную область, при этом создается отрицательное тяговое усилие, компенсирующее толчки вагонов, догоняющих локомотив, а установившаяся скорость состава при движении под уклон составляет не более 0,01 м/с.

На четвертом этапе идет торможение состава до нулевой скорости. Время торможения увеличивается за счет действия активной составляющей силы веса состава, движущегося под уклон. Однако скорость скольжения и в этом случае не превышает 0,1 м/с.

На пятом этапе движения состава под уклон переключения сцепки не наблюдается.

На шестом этапе первый и второй тяговые электроприводы развивают отрицательные тяговые моменты и создают суммарное тяговое усилие 4000 Н (см. рисунок 4.26), которое удерживает состав от скатывания вперед за счет действия активной составляющей веса. Установившаяся скорость скольжения на этом этапе составила 0,01 м/с.

Сравнение возможностей системы управления тягового электропривода постоянного тока, предложенной в диссертации Ю. Н. Кутового, выполнявшейся под руководством профессора В.Б. Клепикова, и тягового асинхронного электропривода, предложенной автором настоящей работы, представлено на рисунках 3.17 и 4.27. Сравнение производилось по более нагруженной второй колёсной паре при разгоне полностью гружёного состава до скорости 2 м/с на подъёме пять промилле.

Скорость скольжения асинхронного тягового электропривода с контролем скорости скольжения на уровне 0,1 м/с показывает, что в динамике скорость скольжения не превысила 0,17 м/с и за 1,5 секунды установилась на уровне 0,1 м/с.

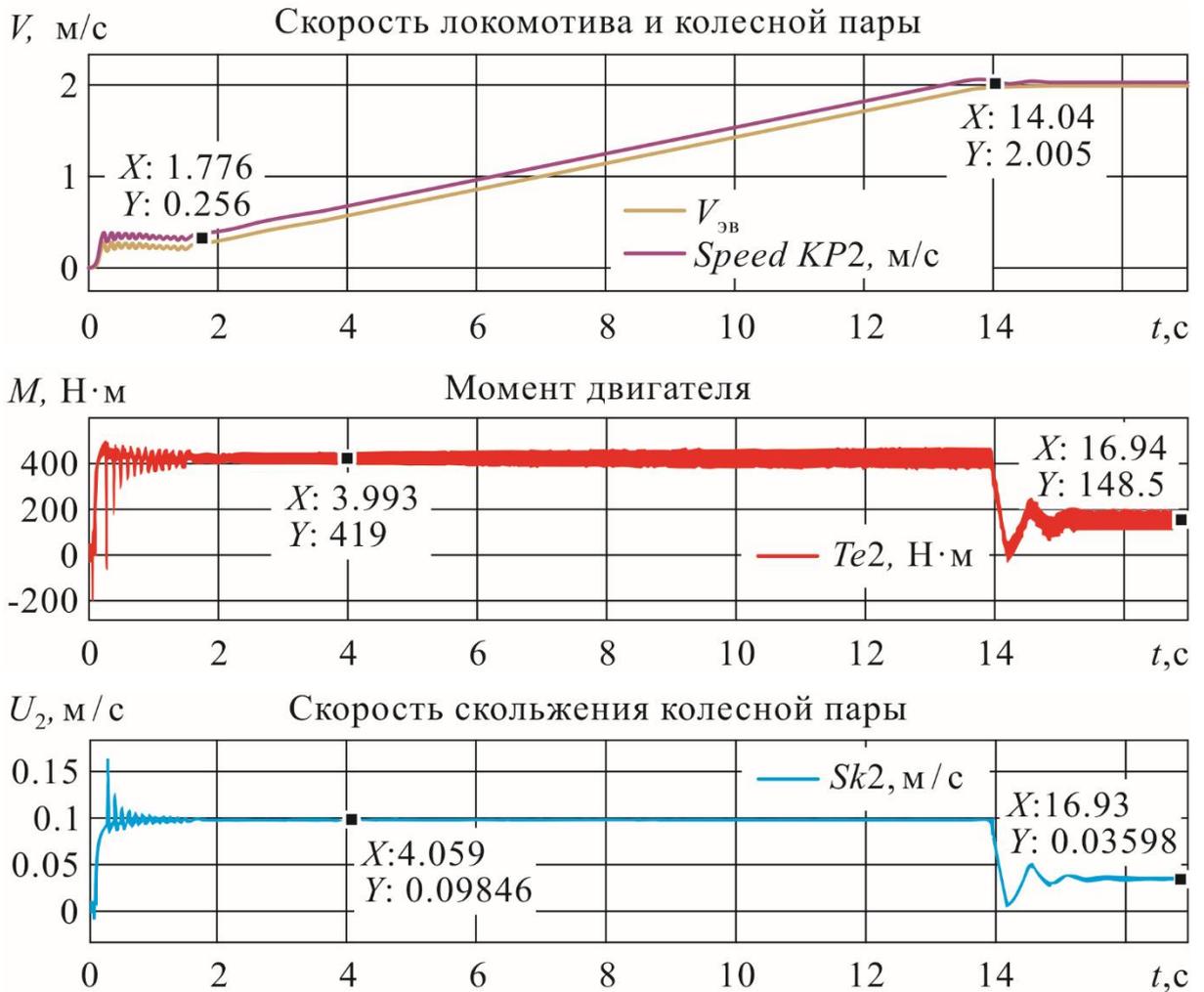


Рисунок 4.27. Диаграммы пуска электропривода электровоза К-14
на подъём 5 ‰

Скорость скольжения в динамике для системы управления с защитой от избыточного скольжения (см. рисунок 3.17) [60] составила 0,6 м/с и установилась за 28 секунд. Общее время разгона в предложенной системе управления относительно сравниваемой уменьшилось в два раза при условии сохранения коэффициента сцепления колёс с рельсовым путём на уровне 0,175.

4.3. Опытная экспериментальная установка

4.3.1. Описание экспериментального стенда

Стенд представляет собой уменьшенную массогабаритную модель электровоза и состава (см. рисунок. 4.28). Опытная экспериментальная установка приведена на рисунках 4.29 и 4.30.

Стенд «Тележка»

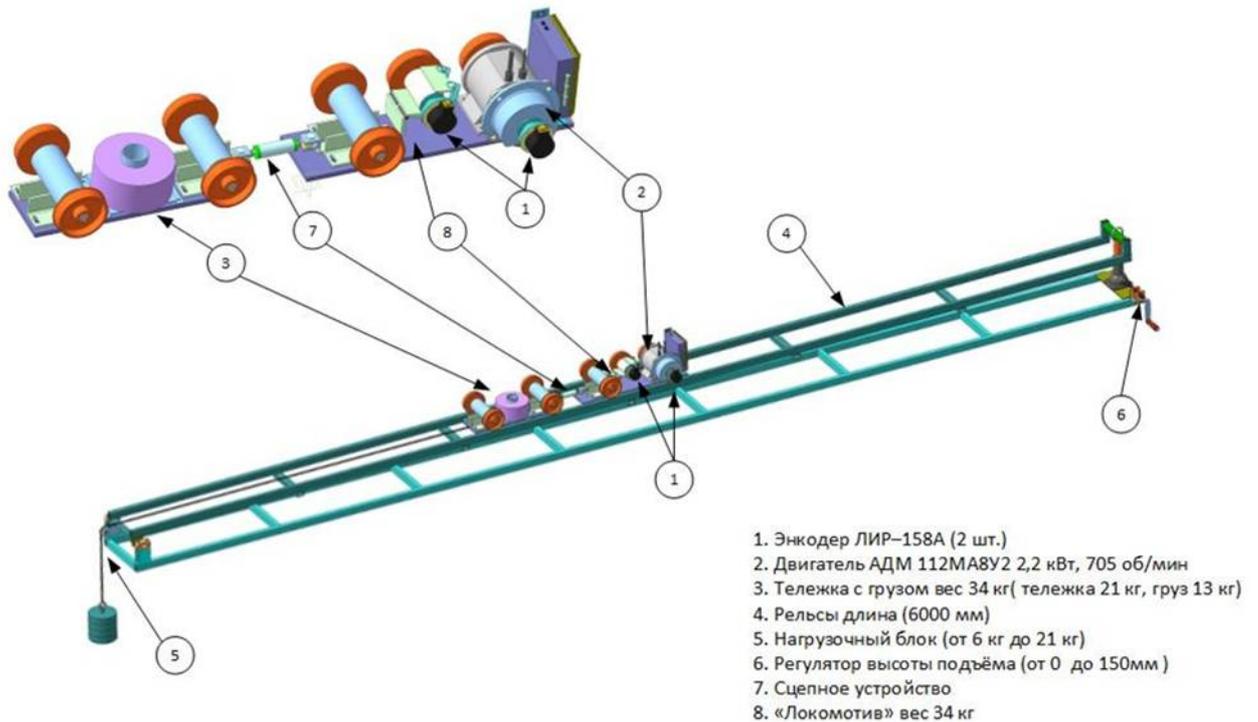


Рисунок 4.28. Экспериментальный стенд. Общий вид.

Стенд имеет следующие возможности:

- прямое измерение скорости скольжение за счет ненагруженного колеса;
- ступенчатая регулировка веса электровоза и тележки;
- ступенчатая регулировка силы сопротивления;
- упругая механическая связь электровоза и тележки;
- регулируемый уклон рельсового пути;
- цифровое регулирование скорости и момента тягового двигателя.

Модель локомотива выполнена с одним тяговым двигателем для снижения стоимости конструкции. В качестве тягового преобразователя используется сервоусилитель USD (см. рисунок 4.31) производства ООО «Мехатроника-Софт» (г. Томск).



Рисунок 4.29. Рельсовый путь



Рисунок 4.30. Электровоз и тележка

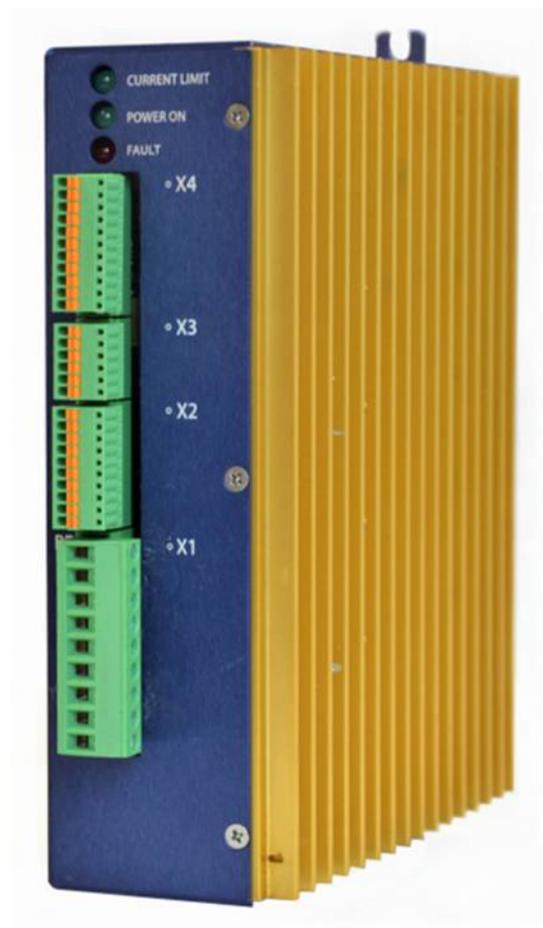


Рисунок 4.31. Сервоусилитель USD производства ООО «Мехатроника-Софт»

4.3.2. Система управления

Сервоусилитель оснащён специальным программным обеспечением – системой DriveLink, позволяющей гибко конфигурировать сервоконтроллер под имеющуюся задачу. В сервоконтроллере также имеется возможность запускать пользовательские алгоритмы, реализованные на языке Си. В состав программы DriveLink включен стандартный компилятор компании Texas Instruments, чей микроконтроллер применен в сервоконтроллере. Программа пользователя сохраняется в энергонезависимой памяти сервоконтроллера, откуда её возможно считать и запустить на исполнение.

Использованные программно-технические средства разработаны ООО «Мехатроника-Софт» под руководством Каракулова А.С. по заказу компании Potomac Electric.

4.3.3. Экспериментальные исследования

Результаты имитационного моделирования частично проверены экспериментально. В частности, подтверждено положение, что определённому значению скорости скольжения колёс относительно рельс соответствует режим максимального тягового усилия.

С увеличением скорости скольжения растёт линейная скорость движения состава и сокращается время пуска, следовательно, тяговое усилие растёт до оптимального значения. При чрезмерном увеличении скорости скольжения, тяговое усилие не растёт, а даже снижается за счёт проскальзывания колёс относительно рельсового пути.

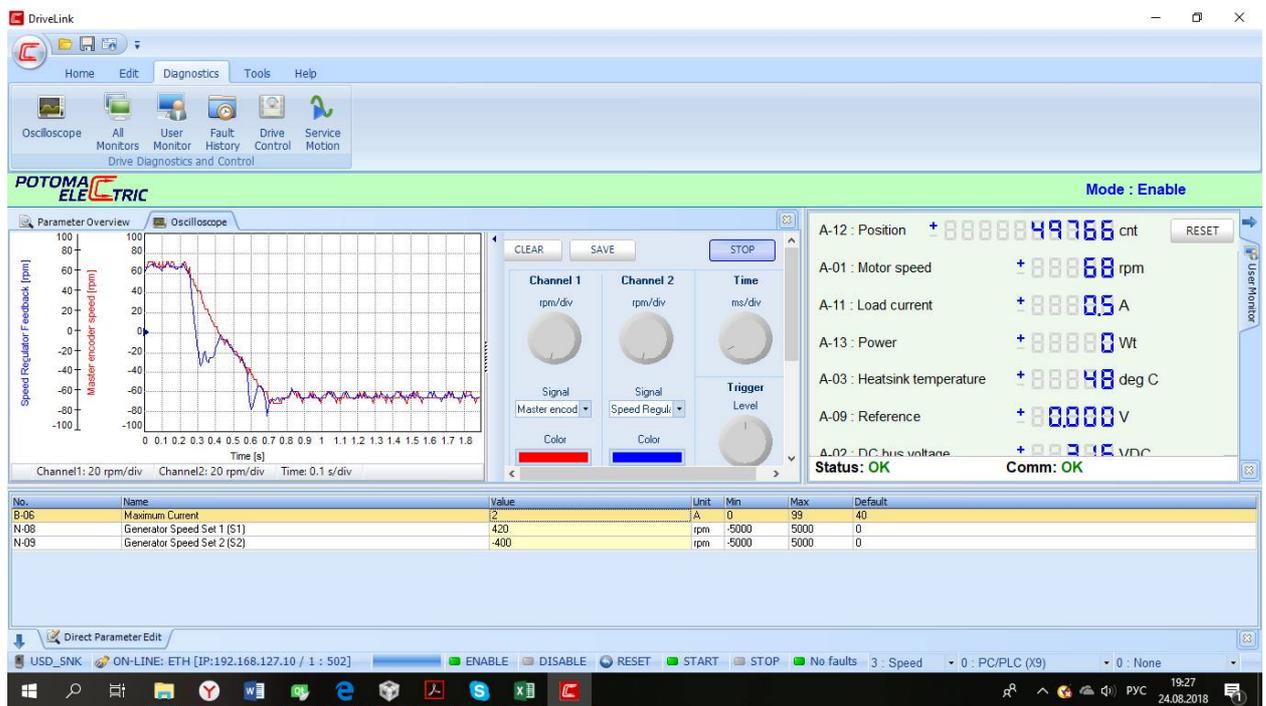
Эксперимент проводился на положительном уклоне с углом подъёма рельсового пути в ходе экспериментов 15 ‰. Движение электровоза отдельно, и электровоза с тележкой (грузового состава) осуществлялось в циклическом реверсивном режиме в относительных единицах, пропорциональных току статорной обмотки тягового двигателя.



Рис 4.32. Электровоз, режим пуска, ограничение момента на уровне 1 отн. ед.



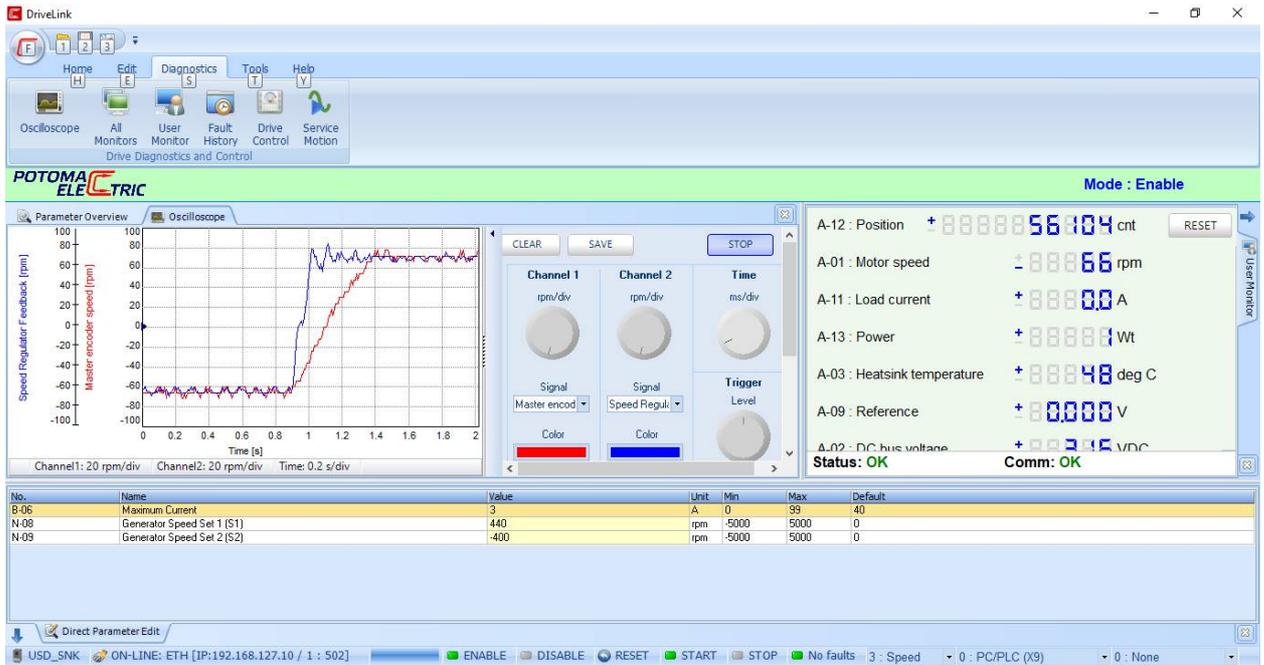
а)



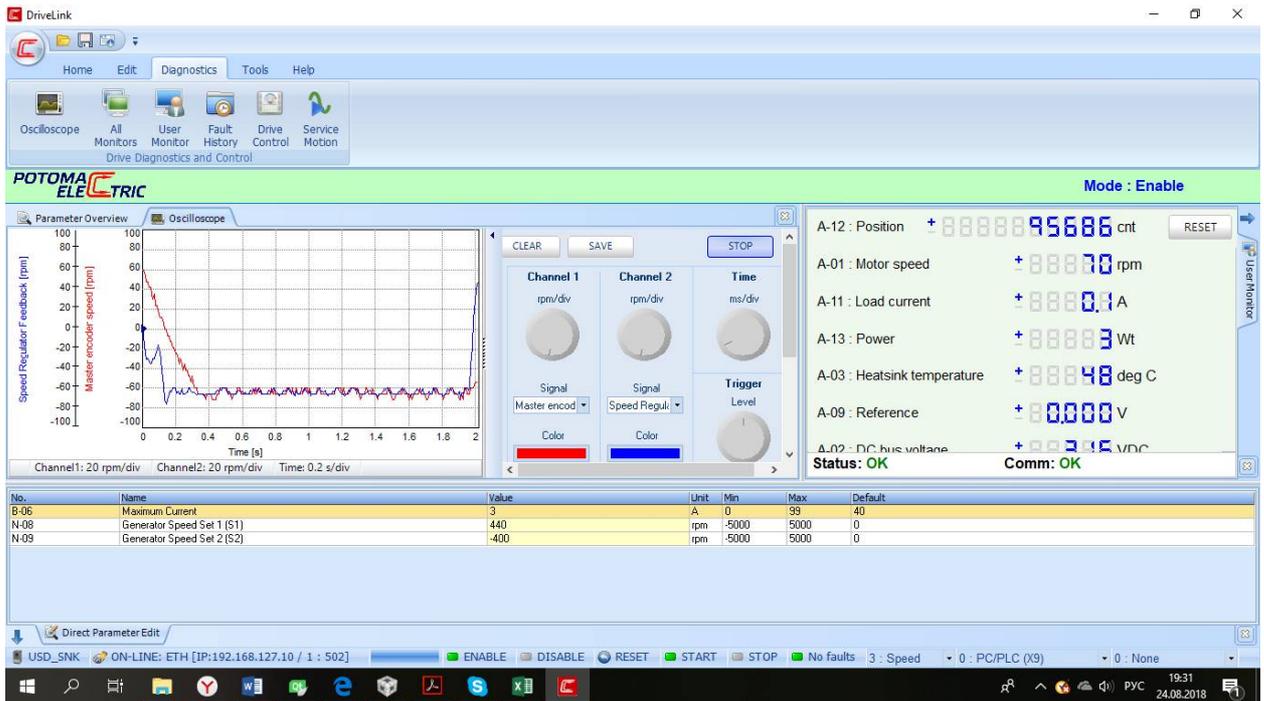
б)

Рисунок 4.33. Электровоз, ограничение момента на уровне 2 отн. ед.:

а – режим пуска; б – режим торможения.



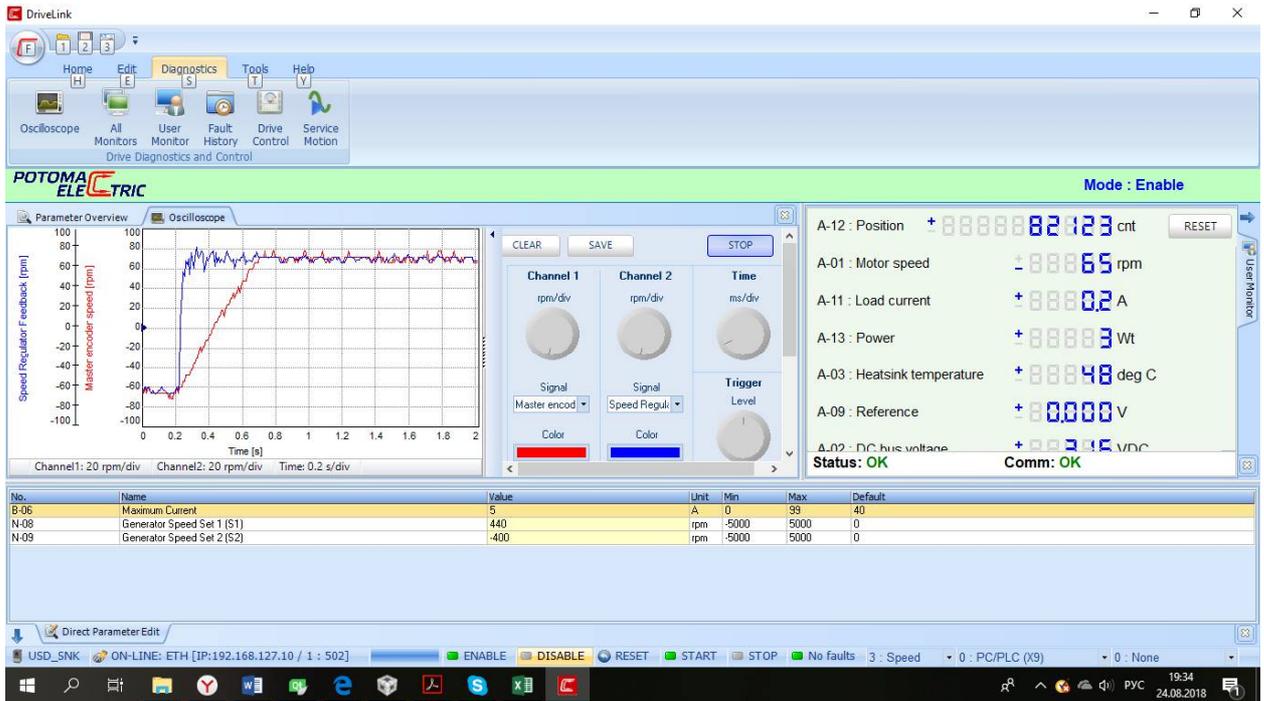
a)



б)

Рисунок 4.34. Электровоз, ограничение момента на уровне 3 отн. ед.:

а – режим пуска; б – режим торможения.



а)



б)

Рисунок 4.35. Электровоз, ограничение момента на уровне 5 отн. ед.:

а – режим пуска; б – режим торможения.



а)



б)

Рисунок 4.36. Грузовой состав, ограничение момента на уровне 2 отн. ед.:

а – режим пуска; б – режим торможения.

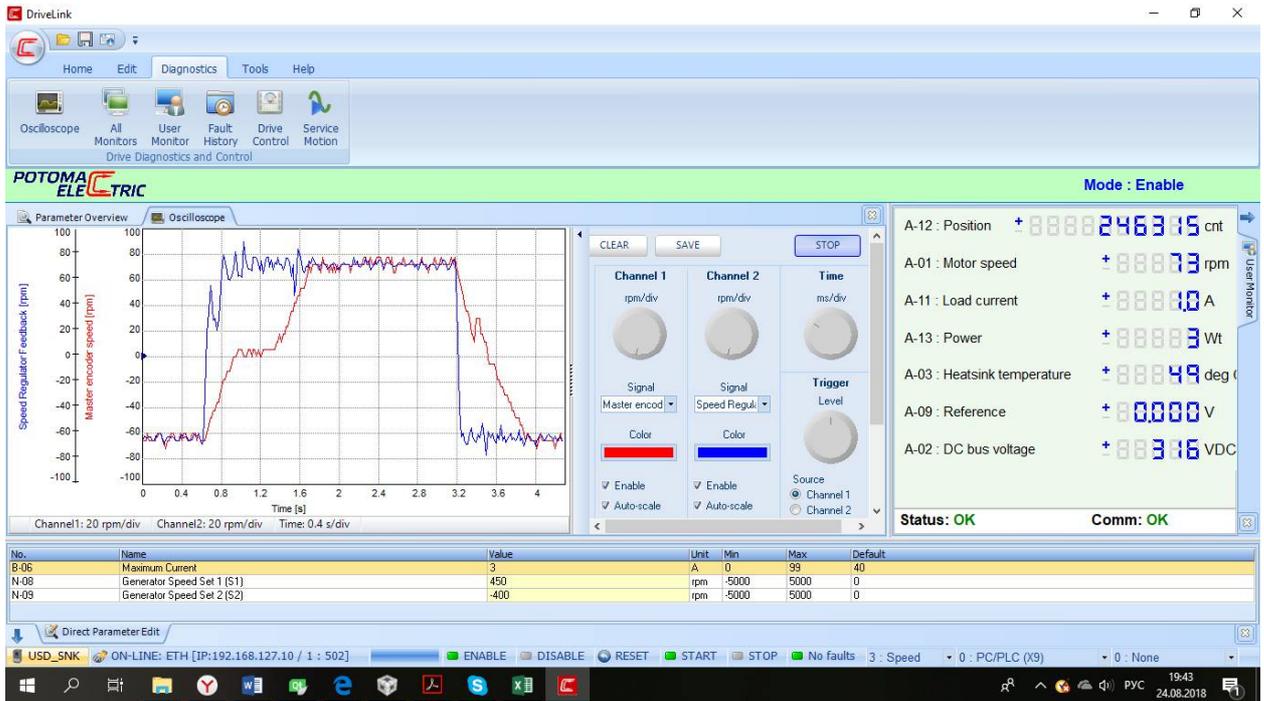


Рисунок 4.37. Грузовой состав, цикл «вперед-назад»,
ограничение момента на уровне 3 отн. ед.

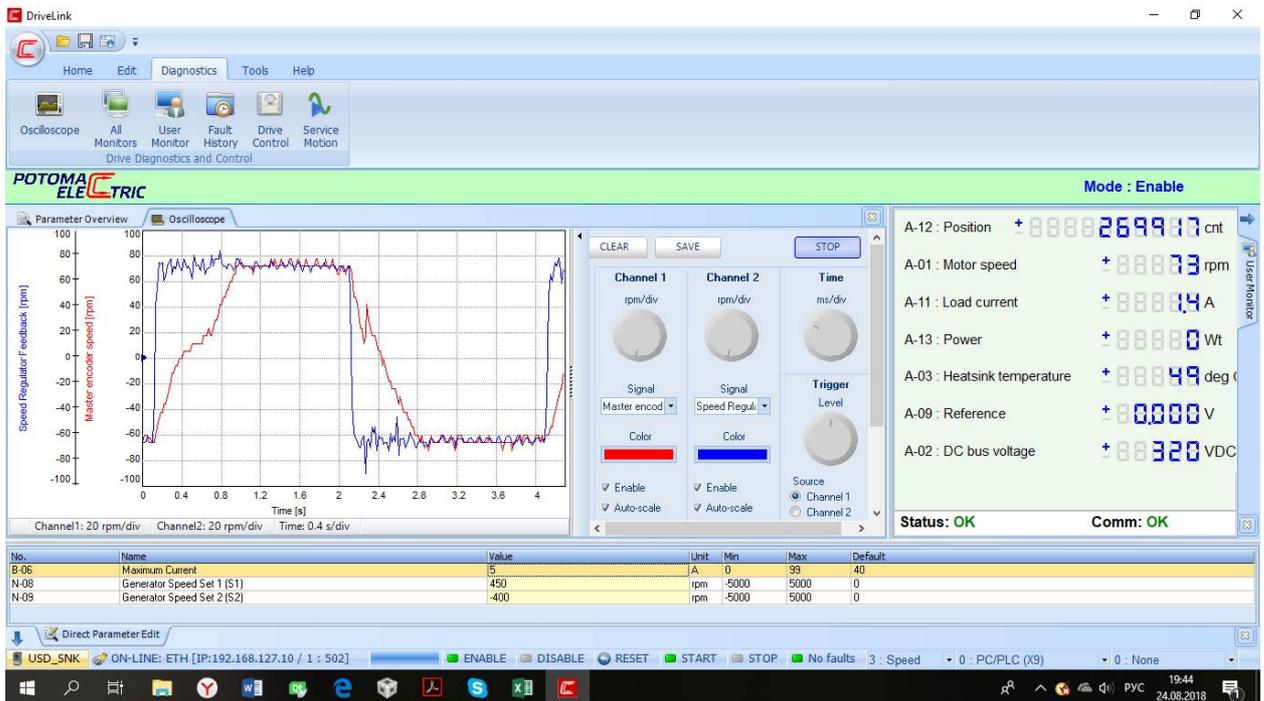


Рисунок 4.38. Грузовой состав, цикл «вперед-назад»,
ограничение момента на уровне 5 отн. ед.

Выводы по четвертой главе

Результаты исследования режимов работы двухдвигательного тягового частотно-регулируемого электропривода подземного электровоза при откатке грузов составом из двенадцати вагонов с помощью разработанной полной имитационной модели в среде *MatLab* позволяют сделать следующие выводы:

1. Работоспособность предложенного способа управления движением подземного грузового состава с электровозом, получающим питание от троллейной линии, с предотвращением неэффективных режимов работы (буксования и юза), доказана.

2. Сравнение результатов работы системы управления тяговым электроприводом с обратной связью по избыточному скольжению в САУ скорости [60], где скорость скольжения при движении гружёного состава на подъем 5 промилле составила 0,6 м/с, показало, что предложенный способ управления реализует тот же самый режим разгона состава со скоростью скольжения не более 0,1 м/с. Время разгона до скорости 2 м/с по способу управления Ю.Н. Кутового составило 28 с, а по предложенному способу с контролем скорости скольжения составит, с учетом действия сцепных усилий грузового состава, не более 14 с.

3. Критерий способа управления движением подземного грузового рельсового состава в виде скорости скольжения, ограниченной теоретически и практически обоснованной величиной, позволяет решать задачи достижения максимально допустимых тяговых усилий локомотива, допустимых значений ускорения и замедления состава при различных режимах работы.

4. В зависимости от разности скоростей движения самого локомотива и состава из вагонов и линейных скоростей в точке контакта колёс с рельсами первой и второй колёсных пар система управления автоматически вырабатывает оптимальный сигнал скорости скольжения и перераспределяет тяговые моменты между приводами колёсных пар для формирования необходимого тягового усилия электровоза.

Заключение

Диссертация представляет собой научную квалификационную работу, в которой на основании выполненных исследований разработаны теоретические положения, представляющие собой научные достижения в области разработки систем автоматического управления движением подвижного состава рудничного электровоза. При этом решены научные задачи и обоснованы технические решения, имеющие важное значение для подземного транспорта в горнодобывающей отрасли.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана уточнённая имитационная модель системы управления движением двухдвигательным тяговым электроприводом рудничного электровоза, включающая:

а) частотно-управляемый тяговый асинхронный двигатель с обмотками статора на пониженное напряжение питания 178 В, повышенным на 50 % моментом и оригинальным блоком реактивной и активной нагрузки;

б) механическую систему подвижного состава, учитывающую распределение масс локомотива и вагонов по длине состава, параметры сцепных устройств и позволяющую исследовать их взаимное влияние на тяговое усилие локомотива, положение вагонов в составе и усилия в сцепных устройствах;

в) систему управления двухдвигательным электроприводом электровоза, применимую как для переменного, так и постоянного тока.

2. Предложены алгоритм и устройство косвенного определения скорости скольжения относительно рельсового пути за счет цифровой фильтрации сигналов тока статора тягового асинхронного двигателя ведущей колесной пары.

3. На основании теоретических и практических исследований выявлен критерий эффективности управления двухдвигательным тяговым электроприводом, а именно точность стабилизации скорости скольжения на уровне 0,1 м/с.

4. Предложены структура и алгоритм системы управления движением, формирующая моменты двухдвигательного тягового электропривода колесных пар в зависимости от скорости их скольжения.

5. Проведены исследования режимов работы двухдвигательного тягового частотно-регулируемого асинхронного электропривода и регулируемого электропривода постоянного тока на имитационной модели в программной среде *Sim Power Systems* и *Simulink MatLab*; определены условия возникновения буксования и юза колес относительно рельсового пути и перераспределения тяговых моментов ведущих колёсных пар за счёт действия усилий на сцепке в зависимости от разгона, торможения состава и от профиля пути. Время разгона полностью гружёного состава на подъём сократилось в 2 раза.

Список использованной литературы

1. Пармас Я.Ю. Судьба асинхронного привода / Я.Ю. Пармас // Электрическая тепловая тяга. – 1992. – № 1. – С. 41–45.
2. Анализ эксплуатации шахтных электровозов / В.Г. Щербаков [и др.]// Вестник ВЭЛНИИ. Электровозостроение: сб. науч. тр. – Новочеркасск:ВЭЛНИИ, 1997. – №37. – С. 143–147.
3. Синчук О.Н. Особенности переходных электромагнитных процессов в тяговом электроприводе с импульсным преобразователем напряжения рудничных аккумуляторных электровозов/ О.Н. Синчук, О.А. Удовенко, В.В. Чумак // Электротехника. – 2004. – № 6. – С. 58–60.
4. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга / С.А. Волотковский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1981. – 389 с.
5. Синчук О.Н. Системы управления рудничным электровозным транспортом / О.Н. Синчук, Т.М. Беридзе, Э.С. Гузов. – Москва: Недра, 1993. – 254 с.
6. Амонс И.М. Опытный образец аккумуляторного электровоза АРП-8Т-900 / И.М. Амонс // Уголь Украины. – 2003. – №10. – С. 14–15.
7. Довженко В.П. Транзисторные модули для управления приводом рудничных электровозов / В.П. Довженко, В.Г. Вакульчик, В.Л. Дебелый // Уголь Украины. – 2003. – № 10. – С. 16–18.
8. Вильнин А.Д. Система управления электродвигателями постоянного тока последовательного возбуждения: Патент 60447 Российская федерация, опубл. 2006.
9. Вильнин А.Д., Цхе А.В. Устройство управления электродвигателем постоянного тока последовательного возбуждения: Патент 73283 Российская федерация, опубл. 2007.
10. Вильнин А.Д. Способ управления двигателем постоянного тока с последовательным возбуждением / А.Д. Вильнин, В.П. Сушко, А.В. Цхе // Автоматизация и управление в промышленности, науке и образовании: сб. тр. юбилейной науч.-технич. конф. –Томск: ТПУ, 2009. –

- С. 61–64.
11. Вильнин А.Д., Современный тяговый электропривод / А.Д. Вильнин // Физико-технические проблемы атомной энергетики и промышленности: сб. тезисов докладов III Международной науч.-практич. конф. – Томск:ТПУ, 2005. – С. 143.
 12. Жулев О.Н. Проблемы создания электровозов с асинхронными тяговыми двигателями / О.Н. Жулев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1983. – № 11. – С. 19–27.
 13. Бахвалов Ю.А. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом / Ю.А. Бахвалов, Е.М. Плохов. – М.: Транспорт, 2001. – 286 с.
 14. Носков А.Л. Российское электровозостроение на пороге XXI века/ А.Л. Носков // Вестник ВЭЛНИИ. Электровозостроение: сб. науч. тр. – Новочеркасск: ВЭЛНИИ, 1999. – № 41. – С. 3–14.
 15. Лещев А.И. Промышленный электровоз НПМ2 с асинхронными тяговыми двигателями/ А.И. Лещев, К.П. Солтус, С.А. Усвицкий // Вестник ВЭЛНИИ. Электровозостроение: сб. науч. тр. – Новочеркасск:ВЭЛНИИ, – 2004. – № 1. С. 118–125.
 16. Аккумуляторный рудничный электровоз с тяговым приводом трехфазного тока // Железные дороги мира. – 1997. – №. 9. – С. 31–35.
 17. Промышленные испытания электровозов с асинхронными приводом на Объединенном Кировском руднике ОАО "Апатит"/ В.А. Пивнев [и др.]// Горное оборудование и электромеханика. – 2006. – № 3. С. 37–38.
 18. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н.А. Ротанов [и др.]; под ред. Н.А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.
 19. Бочаров В.М. Компьютерное моделирование запуска асинхронного короткозамкнутого каскада / В.М. Бочаров, Т.В. Бочарова, Д.В. Волков // Совершенствование технологии, механизации и организации

- строительства и эксплуатации горнодобывающих предприятий и пути повышения качества подготовки специалистов сб. науч. ст. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2004. – С. 69–75.
20. Способ выравнивания нагрузок асинхронных тяговых двигателей электроподвижного состава: патент 2193979 РФ, МПК7 В60L9/16 / Конашинский А.Ю., Сорин Л.Н., Янов В.П.; заявл. 03.11.2001 опубл. 10.12.2002
21. Сысоева Н.Я. Испытание изоляции тягового асинхронного двигателя НТА-1200 в процессе изготовления / Н.Я. Сысоева // Вестник ВЭЛНИИ. Электровозостроение: сб. науч. тр. – Новочеркасск: ВЭЛНИИ, 2002. – № 41. – С. 328–335.
22. Пискунов С.В. Тяговые асинхронные двигатели для приводов подвижного состава городского электротранспорта / С.В. Пискунов, В.С. Ворошилов, В.А. Поляков // Электротехника. – 2005. – № 5. – С. 32–34.
23. Розанов Ю.К. Силовая электроника / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – Москва: МЭИ, 2009. – 632 с.
24. Arsentiev O. V. Evaluative research of induction traction electric motor with low-level power supply for mine locomotive / O. V. Arsentiev [et al.]// Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. Tomsk Polytechnic University, Publishing House, – 2017. Vol. 328, № 11. – P. 126–138.
25. Конашинский А.Ю. Влияние электрических видов коррекции электромеханических характеристик асинхронных тяговых двигателей на их энергетические показатели / А.Ю. Конашинский // Вестник ВЭЛНИИ. Электровозостроение: сб. науч. тр. – Новочеркасск: ВЭЛНИИ, 2002. – № 42. – С. 228–241.
26. Конашинский А.Ю. Особенности работы осевых приводов электроподвижного состава с параллельным питанием асинхронных тяговых двигателей / А.Ю. Конашинский // Вестник ВЭЛНИИ.

- Электровозостроение: сб. науч. тр. – Новочеркасск:ВЭлНИИ,. – 2008. – № 55. – С. 24–27.
27. Волков Д.В. Асинхронный частотно-регулируемый привод шахтного электровоза с автоматическим выравниванием нагрузок тяговых двигателей: дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 2010, –149 с.
28. Мальцева О.П. Системы управления асинхронных частотно-регулируемых электроприводов / О.П. Мальцева, Л.С. Удут, Н.В. Кояин – Томск:ТПУ, 2011. – 476 с.
29. Баранов П.Р. Исследование характеристик тяговых асинхронных двигателей для частотно-управляемого рудничного электровоза / П.Р. Баранов [и др.]// VIII Международная (XIX Всероссийская) научно-техническая конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: сб. тр. науч.-технич. конф. – Саранск: НИМГУ им. Н.П. Огарёва, 2014. – С. 212–216.
30. Baranov P.R. et al. Studying Characteristics of Traction Induction Motors for Variable-Speed Mine Electric Locomotive/ P.R. Baranov [et al]// Appl. Mech. Mater. Trans Tech Publications, – 2015. Vol. 770. – P. 378–383.
31. Самотканов А.В. Комплексная математическая модель вспомогательного электропривода тепловоза / А.В. Самотканов // VIII Международная (XIX Всероссийская) научно-техническая конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: сб. тр. науч.-технич. конф. – Саранск: НИМГУ им. Н.П. Огарёва, 2014. – С. 216–220.
32. Самотканов А.В. Передаточная функция вспомогательного электропривода тепловоза / А.В. Самотканов, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // VIII Международная (XIX Всероссийская) научно-техническая конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: сб. тр. науч.-технич. конф. – Саранск: НИМГУ им. Н.П. Огарёва, 2014. – С. 220–223.
33. Федяева Г.А. Система управления асинхронным тяговым электроприводом гибридного маневрового тепловоза / Г.А. Федяева,

- А.Н. Тарасов // VIII Международная (XIX Всероссийская) научно-техническая конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: сб. тр. науч.-технич. конф. – Саранск: НИМГУ им. Н.П. Огарёва, 2014. – С. 223–226.
34. Sinchuk O. Development of a system to control the motion of electric transport under conditions of iron-ore mines / Sinchuk O. [et al]// Eastern-European J. Enterp. Technol. – 2017. Vol. 3, № 2 (87). – P. 39–47.
 35. ГОСТ 2582-2013 Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. – Введ.2015-01-01 – М.: Стандартинформ, 2014. – 56 с.
 36. ГОСТ Р 52776-2007 (МЭК 60034-1-2004) Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики. – Введ.2008-01-01 – М.: Стандартинформ, 2008. – 68 с.
 37. Yurchenko O.N. et al. Development aspects of asynchronous electrotechnical complex for mine pin-storage-battery electric locomotives / O.N. Yurchenko [et al.]// Eastern-European J. Enterp. Technol. –2015. Vol. 1, № 8(73). – P. 21.
 38. Технические характеристики электродвигателя ДК-812 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.1gc.ru/oborudovanie-dlya-rudnichnyh-elektrovozov/elektrodivigatel-dk-812>.
 39. ГОСТ 17516.1-90 Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействиям. – Введ.1991-01-01 – М.: Стандартинформ, 2007. – 42 с.
 40. Wang Y. Vibration properties of locomotive traction gear excited by load fluctuation / Y. Wang, J.-X. Liu // Journal of Vibration Engineering. – 2015. Vol. 15. – P. 45–50.
 41. Каталог крановых двигателей на лапах с одним концом вала (IM 1001) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bavemz.ru/products/5/>.
 42. Краново-металлургические и рольганговые электродвигатели в составе

- частотно-регулируемых приводов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sibelektromotor.ru/kran-met2.php>
43. Технический каталог крановых двигателей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ruselprom.ru/products/elektroprivod-transporta/>
 44. Каталог электродвигатели. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://setc.ru/catalog/1.html>
 45. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 272 с.
 46. Bolovin E. V. The influence of the design method for induction motor with stationary rotor on identification of its parameters / E. V. Bolovin, A.S. Glazyrin, V.N. Brendakov // Control and Communications (SIBCON): International Siberian Conference on Russia, – Omsk: IEEE, 2015. – P. 1–7.
 47. Tkachuk R.Y. Induction motor drive's parameters identification using genetic algorithms / R.Y. Tkachuk, A.S. Glazyrin, V. I. Polichshuk // 7th International Forum on Strategic Technology IFOST: Scientific Conference – Tomsk: IEEE, 2012. – P. 586–589.
 48. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (MatLab 7.0.1): учебное пособие / В.Б. Терехин. – Томск: ТПУ, 2010. – 292 с.
 49. Fleischer M. Reduced Model Identification and Parameter Estimation for Traction Drive-Trains/ M. Fleischer, K. Kondo // IEEJ Journal of Industry Applications – 2015. Vol. 4, № 4. – P. 486–495.
 50. Kladiev S. Mathematical model of traction electric drive for mine electric train / S. Kladiev, B. Pyakillya, A. Vilnin // MATEC Web of Conferences: The 2nd International Youth Forum "Smart Grids", Tomsk – France: EDP Sciences, 2014. Vol. 19. – P. 3
 51. Терехин В.Б. Компьютерное моделирование систем электропривода постоянного и переменного тока в Simulink: учебное пособие / В.Б.

- Терехин, Ю.Н. Дементьев. – Томск: ТПУ, 2015. – 307 с.
52. Wang S. Locomotive wheel slip detection based on multi-rate state identification of motor load torque / S. Wang [et al.] // Journal of The Franklin Institute – 2016. Vol. 353, № 2. – P. 521–540.
 53. Ye W. Sliding mode control of longitudinal motions for underground mining electric vehicles with parametric uncertainties / W. Ye [et al.] // International Journal of Modelling, Identification and Control – 2016. Vol. 26, № 1. – P. 68.
 54. Ye W. Fuzzy parameter tuning sliding mode control for longitudinal motion of underground mining electric vehicles based on a single wheel model / W. Ye [et al.] // International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS), China, Beijing. – China, Beijing:IEEE, 2016. – P. 283–288.
 55. Evstratov A.E. Analysis of variants of differential torque control applied to induction motor with short-circuited rotor / A.E. Evstratov [et al.] // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences – 2016. Vol. 11, № 7. – P. 4391-4398
 56. Вильнин А.Д. Компьютерная модель асинхронного электропривода рудничного электровоза / А.Д. Вильнин, А.В. Десятов, В.Б. Терехин // Современная техника и технологии: сб. тр. международной науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых – Томск: ТПУ, 2011 –Т. 1. –С. 447–449.
 57. Вильнин А.Д. Исследование асинхронного привода рудничного электровоза / А.Д. Вильнин, А.В. Десятов, В.Б. Терехин // Современная техника и технологии: сб. тр. международной науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых – Томск: ТПУ, 2011 –Т. 1. –С. 445–447.
 58. TLP90F - Локомотивы контактные [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ferrit.cz/ru/produkty/narocvennyj-transport/lokomotivu-kontaktnye/tlp90f> – (дата обращения: 18.01.2018).
 59. Вильнин А.Д., Кладиев С.Н., Пякиля Б.И. Устройство обнаружения

- буксования и юза колесной пары тягового рудничного электровоза // Патент 141267 Российская федерация; Патентообладатель: ФГАОУ ВО НИ ТПУ ; Опубликовано 27.05.2014.
60. Кутовой Ю.Н. Повышение тяговых свойств рудничного электровоза средствами электропривода: дис. ... канд. техн. наук. Харьков, 1984. – 185 с.
 61. Вильнин А.Д. Метод обнаружения явления буксования в тяговом электровозе / А.Д. Вильнин, С.Н. Кладиев, Б.И. Пякилля // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – №. 3 (39). – С. 264–266.
 62. Вильнин А.Д. Алгоритм компенсации эффекта буксования колесной пары рельсового транспорта / А.Д. Вильнин, С.Н. Кладиев, Б.И. Пякилля // Электромеханические преобразователи энергии: материалы VI Международной науч.-технич. конф. – Томск: ТПУ, 2013. С. 258–262.
 63. Вильнин А.Д. Исследование процесса буксования колёсной пары рудничного электровоза в переходных режимах / А.Д. Вильнин, С.Н. Кладиев, Б.И. Пякилля // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323, № 4. – С. 143–146.
 64. Ишлинский А.Ю. Прикладные задачи механики. Книга 1. Механика вязкопластичных и не вполне упругих тел./ А.Ю. Ишлинский. – М.: Наука, 1986. – 360 с.
 65. Ренгевич А.А. Исследование эксплуатационных режимов рудничной электровозной откатки: Автореф. дис. канд. техн. наук – Днепропетровск, 1961 – 18 с.
 66. Ренгевич А.А. Коэффициент сцепления шахтных электровозов / А.А. Ренгевич // Вопросы рудничного транспорта. – 1961. – №. 5. С. 227 – 247.
 67. Процив В.В. Экспериментальное определение характеристик сцепления шахтного локомотива в режиме торможения / В.В. Процив, А.Г. Моля //

- Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2003. – №. 2. – С. 95–97.
68. Зиборов К.А. Экспериментальное определение характеристик сцепления шахтного локомотива при кинематических и силовых несовершенствах / К.А. Зиборов, А.А. Сердюк, О.В. Дерюгин // Вибрации в технике и технологиях. – 2000. – №4 (16). – С. 60–63.
69. Djukić M. A fuzzy model for an increase in locomotive traction force / M. Djukić, S. Rusov, Z. Mitrovic // Transport. – 2010. Vol. 25, № 1. – P. 36–45.
70. Boisvert M. Estimators of wheel slip for electric vehicles using torque and encoder measurements / M.Boisvert, P. Micheau // Mechanic System and Signal Processing. – 2016. Vol. 76–77. – P. 665–676.
71. Pasillas-Lépine W. Design and experimental validation of a nonlinear wheel slip control algorithm / W. Pasillas-Lépine, A. Loría, M. Gerard // Automatica. – 2012. Vol. 48, № 8. – P. 1852-1859.
72. Polach O. Influence of locomotive tractive effort on the forces between wheel and rail / O. Polach // Vehicle System Dynamics. – 2001. Vol. 35, № 1. – P. 7–22.
73. Franchuk V.P. On wheel rolling along the rail regime with longitudinal load / V.P. Franchuk [et al.] // Nauk. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.– 2017. № 3. – P. 62–67.
74. Козаченко В.Ф. Перспективные типы тяговых электроприводов / В.Ф. Козаченко // VII Международная (XVIII Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2012: сб. тр. конф. – Иваново:ИГЭУ, 2012. – С. 16–22.
75. Жеребкин Б.В. Система векторного управления тяговым электроприводом рудничных электровозов с использованием аппарата нечеткой логики: дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2005.– С. 162
76. Новосельцев П.В. Исследование взаимодействия грузового железнодорожного состава и локомотива на основе натуральных экспериментов / П.В. Новосельцев, Ю.А. Купцов // Современные

- технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – № 22. – С. 77–81.
77. Колпахчян П.Г. Методология комплексного моделирования и способы управления асинхронным тяговым приводом магистральных электровозов: дис. ... докт. техн. наук. Новочеркасск, 2006. – С.402
78. Pichlík P. Train velocity estimation by extended Kalman filter / P. Pichlík, J. Zděnek // Proceedings of the 8th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), – Ploiesti, 2016. – P. 1-4.
79. Вильнин А.Д. Методы обнаружения буксования в системах управления тяговым электроприводом локомотива / А.Д. Вильнин, В.П. Сушко, А.В. Цхе // Современная техника и технологии: сб. тр. международной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: ТПУ, 2009. – Т.1 – С. 379–380.
80. Evstaf'ev A.M. A device and algorithm for detecting the skidding of wheel sets of electric rolling stock / A.M. Evstaf'ev [et al.] // Russian Electrical Engineering – Allerton Press, Inc., 2017. Vol. 88, № 10. – P. 672–675.
81. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: учебное пособие/ С.Г. Герман-Галкин – СПб:Корона-принт, 2001. – 320 с.
82. Quang N.P. Vector Control of Three-Phase AC Machines / N.P. Quang, J.-A. Dittrich – Clarendon Press, OXFORD. 2015. – 332 p.
83. Вильнин А.Д. Структура тягового электропривода рудничного электровоза / А.Д. Вильнин, С.Н. Кладиев // Современные проблемы и их пути решения в науке, транспорте, производстве образовании: сб. труд. международной науч.-практ. конф. – Одесса: Черноморье, 2011. Т.2. – С. 80-85
84. Кладиев С.Н. Модель электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза / С.Н. Кладиев, А.Д. Вильнин, Б.И. Пякилля // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. № 1 (37), – С. 65–68.

85. Терехин В.Б. Разработка моделей элементов систем автоматизированного электропривода в среде MATLAB: учебное пособие. / В.Б.Терехин – Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2017. – 511 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акты внедрения результатов диссертационной работы



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА МЕХАТРОНИКА-ПРО»

634513 Томская обл., Томский район, п. Кайдаловка ул. Центральная 3. Тел.: (3822) 320-500
ИНН/КПП: 7017223270 / 701401001 Р/с.: 40702810010030002069 в Филiaal Банка ВТБ (ПАО) в г.
Красноярске ИНН/КПП: 7702070139 / 246602001 к/счет 30101810200000000777 БИК 040407777
E-Mail: info@mechatronica-pro.com http://mechatronica-pro.com

04.03.2018

АКТ

об использовании результатов научно-исследовательской работы
Вильнина Александра Даниловича

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Вильнина Александра Даниловича «ДВУХДВИГАТЕЛЬНЫЙ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОДЗЕМНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА С ЭФФЕКТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ» использовались при разработке программного обеспечения преобразователя частоты FC-TED-15 с открытой программной платформой на базе микроконтроллера TMS320F28335.

Разработанные в ходе выполнения диссертационной работы алгоритмы управления двухдвигательным частотно-управляемым тяговым двигателем с контролем скорости скольжения ведущих колесных пар были реализованы в виде компонента библиотеки среды MexBIOS Development Studio, предназначенной для создания программного обеспечения систем управления электродвигателями. Контроль скорости скольжения реализован прямым и косвенным способом, с помощью наблюдателя скорости скольжения.

Настройка порога ограничения скорости скольжения позволяет осуществлять поиск точки максимальной тяги в условиях изменяющегося коэффициента сцепления локомотива и режимов работы поезда.

Разработанные алгоритмы показали свою работоспособность, как на имитационных моделях, так и на экспериментальном стенде.

Директор ООО «НПФ Мехатроника-Про»



Гусев Н.В.



Ministry of Education and Science of the Russian Federation
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
"National Research Tomsk Polytechnic University" (TPU)
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia
Tel.: (3822) 60 63 33, (3822) 70 17 79,
Fax (3822) 56 38 65, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
ORPO (National Classification of Enterprises and Organizations):
02069303,
Company Number: 1027000890166,
VAT / KPP (Code of Reason for Registration):
7018007264/701701001, BIC 046902001

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет» (ТПУ)
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия
тел.: (3822) 60 63 33, (3822) 70 17 79,
факс: (3822) 56 38 65, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
ОИПО 02069303, ОГРН 1027000890166,
ИНН/НПД 7018007264/701701001, БИК 046902001

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Вильнина Александр Даниловича «Двухдвигательный частотно-управляемый тяговый электропривод подземного электровоза с эффективным управлением» внедрены и активно используются в учебном процессе Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики (ИШЭ) Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Созданные в программной среде *MATLAB Simulink* имитационные модели позволяют получить качественные картины переходных процессов, возникающих в подземном рудничном электровозе в грузовом составе при его движении в режимах тяги, равномерного движения и торможения с учетом действия возмущающих воздействий (изменение условий сцепления, уклона и других возмущений). Система автоматического управления подвижным составом, предложенная в диссертационной работе, основана на ограничении скорости скольжения, позволяет исследовать работу принципов оптимального управления по критерию энергоэффективности.

Указанные модели используются при обучении магистрантов по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника» по дисциплине «Моделирование в электроприводе».

Директор ИШЭ



Руководитель Отделения электроэнергетики
и электротехники

А.С. Матвеев

Ю.Н. Дементьев

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Расчет силовой части вольтодобавочного устройства

Обобщенная схема повышающего преобразователя для компенсации отклонения напряжения контактной сети для облегчения пуска локомотива ТЛР90F с полностью загруженным составом представлена на рисунке 1.

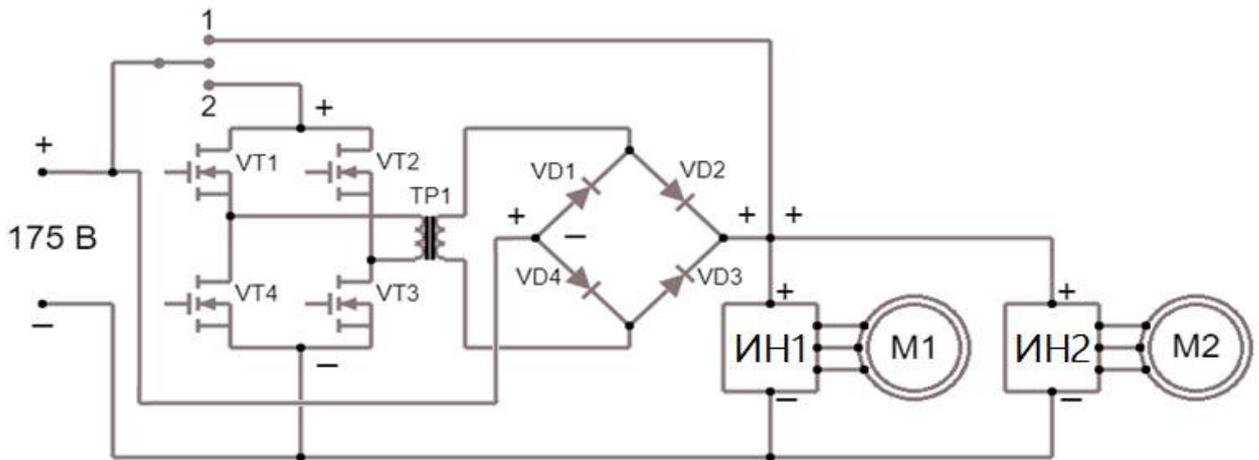


Рисунок 1. Обобщенная схема повышающего преобразователя для компенсации отклонения напряжения контактной сети

Так как выходная мощность последовательно включенного с нагрузкой преобразователя составляет порядка 33 кВт, и его ток, имеет, значение 440 А, следовательно, сечение обмоток согласующего высокочастотного трансформатора получается достаточно большим, и физически выполнить обмотку трансформатора с необходимым количеством витков при доступном размере магнитопровода не представляется возможным. Кроме того, необходимо решить вопрос охлаждения полупроводниковых приборов при прохождении через них номинального тока в прямом направлении (от сети к исполнительным тяговым двигателям). При этом размеры охладителей будут достаточно большими.

Поэтому принято решение разбить силовую часть нашего преобразователя на параллельно включенные модули, каждый из которых имеет общий охладитель с размещенными на нем ключами высокочастотного инвертора,

выпрямителя и согласующий трансформатор. Предварительный расчет показывает, что количество модулей преобразователя должно быть не менее двенадцати, тогда мощность каждого параллельно включенного модуля составит 2750Вт.

Также необходимо сказать, что решение разбить устройство на 12 модулей, позволяет снизить пульсации напряжения и получить равномерное распределение напряжения постоянного тока.

Схема блочного устройства с вольтодобавкой представлена на рисунке 2.

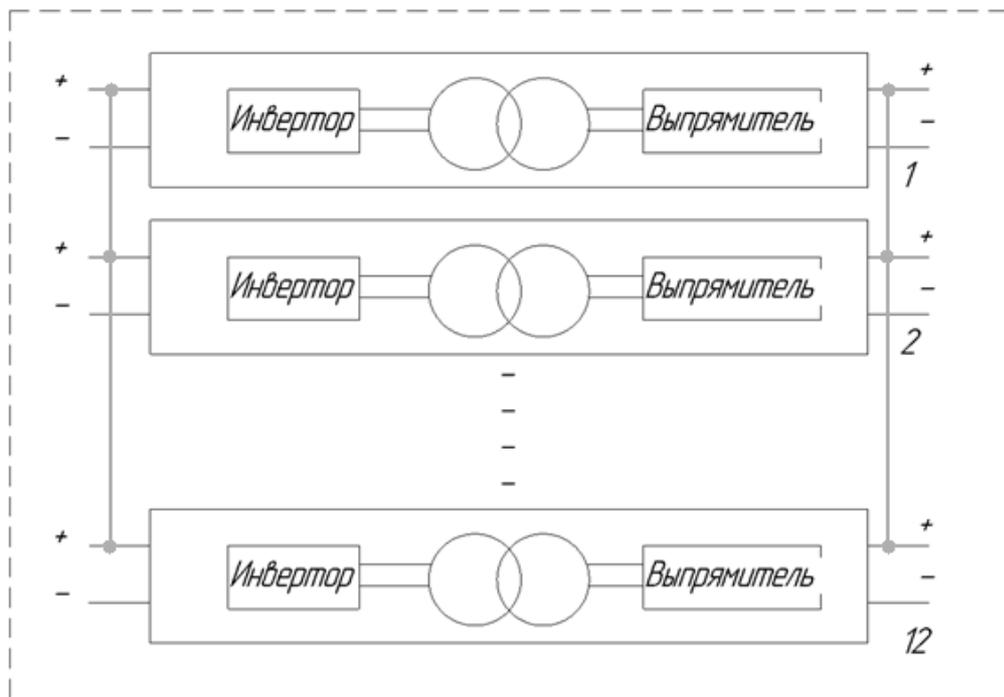


Рисунок 2. Схема устройства вольтодобавки с 12 параллельными модулями

Расчет силового трансформатора

Расчетная мощность трансформатора:

$$P_{\text{расч}} = 1,23 \times P_{\text{вых}} = 1,23 \times 2750 = 3383 \text{ (Вт)},$$

где 1,23 – коэффициент схемы.

По таблицам соответствия сердечников трансформаторов и расчетной мощности подбираем магнитопровод по [1].

Условное обозначение	Материал	Форма магнитопровода	D, мм	d, мм	h, мм
ГМ 412В ОЛ 45/70–25	Аморфное железо	Кольцевой	70	45	25

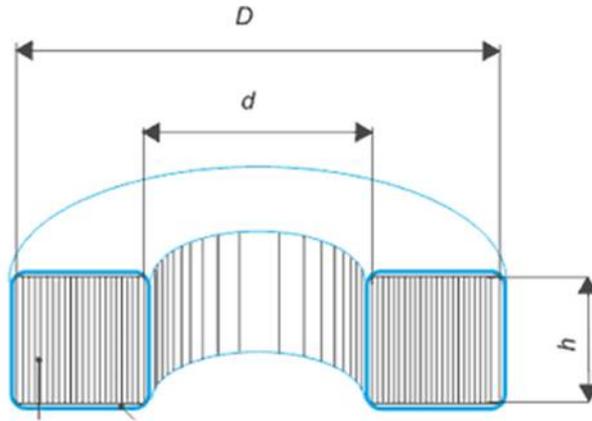


Рисунок 3. Сечение выбранного магнитопровода

Дальнейший расчет проводим по [2].

Площадь сечения:

$$S_{\text{сеч}} = \frac{(D-d) \times h}{2} = \frac{(7-4,5) \times 2,5}{2} = 3,125 \text{ (см}^2\text{)}$$

Площадь окна:

$$S_o = \frac{d^2 \times \pi}{4} = \frac{4,5^2 \times 3,14}{4} = 15,9 \text{ (см}^2\text{)}$$

Габаритная мощность трансформатора:

$$P_{\text{габ}} = 2 \times S_{\text{сеч}} \times S_o \times f \times B_m \times \eta \times j \times k_c \times k_m \times k_\phi \times 10^{-2} =$$

$$= 2 \times 3,125 \times 15,9 \times 50000 \times 1,17 \times 0,97 \times 3 \times 0,7 \times 0,15 \times 1 \times 10^{-2} = 4657 \text{ (Вт)},$$

где $B_m = 1,17$ – максимальная магнитная индукция, Тл;

$\eta = 0,97$ – КПД трансформатора;

$k_c = 0,7$ – коэффициент заполнения сердечника;

$k_m = 0,15$ – коэффициент заполнения окна;

$k_\phi = 1$ – коэффициент формы.

$$P_{\text{расч}} < P_{\text{габ}} \text{ (Требуемое условие выполнено.)}$$

Мощность, используемая трансформатором:

$$P_{\text{исп}} = 1,23 \times \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{\eta} = 1,23 \times \frac{2750}{0,97} = 3487 \text{ (Вт)}$$

Рассчитываем коэффициент трансформации:

$$k_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{сети}}}{U_{\text{ВЫХ}}} = \frac{175}{75} = 2,3$$

Рассчитываем число витков первичной обмотки:

$$w_1 = \frac{U_1 \times 0,95}{4 \times B_{\text{раб}} \times S_{\text{сеч}} \times f \times k_{\text{ф}} \times k_c} = \frac{175 \times 0,95}{4 \times 0,3 \times 3,125 \times 50000 \times 1 \times 0,7} = 12,667 \approx 13$$

Число витков вторичных обмоток:

$$w_2 = \frac{w_1}{k_{\text{тр}}} = \frac{13}{2,3} = 5,65 \approx 6$$

Определяем диаметры проводов обмоток:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \times I_1}{\pi \times j}} = \sqrt{\frac{4 \times 15,7}{3,14 \times 3}} = 2,58 \text{ (мм)}$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \times I_2}{\pi \times j}} = \sqrt{\frac{4 \times 36,7}{3,14 \times 3}} = 3,94 \text{ (мм)}$$

Диаметр провода не берут более 1 мм, возьмем эмалированный провод по [3] ПЭВТЛ диаметром $d_{\text{пр1}} = 0,8$ (мм) и скручиваем в литцендрат из 4 проводников.

Второй провод диаметром $d_{\text{пр2}} = 0,8$ (мм) и скручиваем в литцендрат из 5 проводников.

Определяем площадь сечения провода первичной обмотки:

$$S_1 = \frac{I_1}{j} = \frac{15,7}{3} = 5,23 \text{ (мм}^2\text{)}$$

Площадь сечения первичной обмотки:

$$S_{M1} = S_1 \times w_1 \times 10^{-2} = 5,23 \times 13 \times 10^{-2} = 0,68 \text{ (см}^2\text{)}$$

Определяем площадь сечения провода вторичной обмотки:

$$S_2 = \frac{I_2}{j} = \frac{36,7}{3} = 12,23 \text{ (мм}^2\text{)}$$

Площадь сечения вторичной обмотки:

$$S_{M2} = S_2 \times w_2 \times 10^{-2} = 12,23 \times 6 \times 10^{-2} = 0,73 \text{ (см}^2\text{)}$$

Площадь сечения:

$$S_M = S_{M1} + S_{M2} = 0,68 + 0,73 = 1,41 \text{ (см}^2\text{)}$$

Коэффициент заполнения магнитопровода, условие:

$$k_3 = \frac{S_M + 0,1 \times S_o}{S_o} = \frac{1,41 + 0,1 \times 15,9}{15,9} = 0,189$$

Рассчитываем удельные магнитные потери трансформатора:

$$P = 3,3 \times 10^{-6} \times f^{1,7} \times B_m^{2,05} = 3,3 \times 10^{-6} \times 50000^{1,7} \times 0,3^{2,05} = 27,218 \text{ (Вт/кг)}$$

Объем сердечника:

$$\begin{aligned} V &= \frac{\pi \times h(D^2 - d^2)}{4} = \\ &= \frac{3,14 \times 25 \times 10^{-3} \times [(70 \times 10^{-3})^2 - (45 \times 10^{-3})^2]}{4} = 5,645 \times 10^{-5} \text{ (м}^3\text{)} \end{aligned}$$

Масса сердечника:

$$m = \rho \times V \times k_c = 7400 \times 5,645 \times 10^{-5} \times 0,7 = 0,292 \text{ (кг)}$$

Умножив удельные потери на массу магнитопровода, получаем потери мощности в сердечнике:

$$P_M = P_{уд} \times m = 27,218 \times 0,292 = 7,959 \text{ (Вт)}$$

Инвертор высокочастотный

$$U_{\text{НОМ}} = 175 \text{ (В)}$$

$$I = 15,7 \text{ (А)}$$

Выбираем по [4] MOSFET-транзистор FDH44N50-НД (рисунок 4), фирмы STMicroelectronics, характеристики которого:

$$I_d = 38 \text{ (А)}, U_{ds} = 400 \text{ (В)}, R_{ds} = 72 \text{ (мОм)}$$

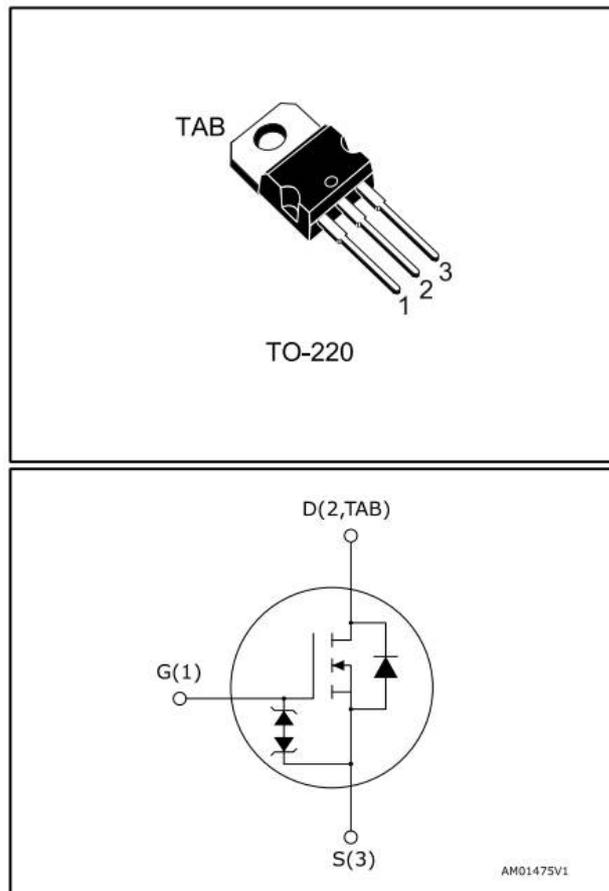


Рисунок 4. Эскиз транзистора

Рассчитаем потери по [7] на проводимость на выбранном транзисторе:

$$P_{\text{пр}} = I_{\text{cp}}^2 \times R_{ds} = 7,35^2 \times 0,072 = 3,9 \text{ (Вт)}$$

Рассчитаем потери на переключение на выбранном транзисторе:

$$P_{sw} = \frac{U_H I_H}{6T} (t_r + t_f) = \frac{175 \times 15,7}{6 \times (1/50000)} (6,7 \times 10^{-9} + 9,8 \times 10^{-9}) = 0,378 \text{ (Вт)}$$

Определим суммарные потери на транзисторе:

$$P_{\Sigma} = P_{пр} + P_{sw} = 3,9 + 0,378 = 4,278 \text{ (Вт)}$$

Определим площадь радиатора по [5], установленного под обдувом воздуха, температура окружающей среды $T_a = 35^\circ\text{C}$:

$$T_j = T_a + R_{ja} \times P_{\Sigma} = 35 + 40 \times 4,278 = 206,12 \text{ }^\circ\text{C}$$

Расчетная температура значительно превышает допустимую температуру кристалла, представленную в документации на транзистор ($T_j = 150^\circ\text{C}$), радиатор необходим.

Тепловое сопротивление для данного транзистора $R_{jc} = 0,5 \text{ (}^\circ\text{C/Вт)}$

Тепловое сопротивление корпус - радиатор $R_{cs} = 0,13 \text{ (}^\circ\text{C/Вт)}$

Выбираем рабочую температуру кристалла $T_{jmax} = 75 \text{ (}^\circ\text{C)}$

Определяем рабочую температуру радиатора

$$T_s = T_{jmax} - P_{\Sigma} (R_{jc} + R_{cs}) = 75 - 4,278 \times (0,5 + 0,13) = 72,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

Определяем необходимое тепловое сопротивление радиатор-окружающая среда

$$R_{sa} = \frac{T_s - T_a}{P_{\Sigma}} = \frac{72,3 - 35}{4,278} = 8,7$$

Определим необходимую площадь радиатора

$$S_p = \frac{1}{R_{sa}} = \frac{1}{8,7} = 0,115 \text{ (м}^2\text{)}$$

Так как у нас транзисторный мост состоит из 4-х транзисторов, то общая площадь радиатора равна:

$$S_{p,общ} = 4 \times S_p = 4 \times 0,115 = 0,46 \text{ (м}^2\text{)}$$

По определенной площади подбираем радиатор по [6].

Выбираем радиатор серии АВМ-076-200:



Рисунок 5. Корпус и эскиз радиатора

Длина ребра: $L = 0,2$ (м)

Высота ребра: $H = 0,0342$ (м)

Ширина ребра: $W = 0,0032$ (м)

Межреберное расстояние: $X = 0,01$ (м)

Отсюда, полная площадь ребра:

$$S_{\text{ребра}} = 2 \times L \times H + L \times W = 2 \times 0,2 \times 0,0342 + 0,2 \times 0,0032 = 0,0143 \text{ (м}^2\text{)}$$

Площадь между ребер:

$$S_{\text{межреб}} = L \times X = 0,2 \times 0,01 = 0,002 \text{ (м}^2\text{)}$$

С учетом количества ребер и расстояния между ними площадь радиатора:

$$S = S_{\text{ребра}} \times 38 + S_{\text{межреб}} \times 37 = 0,0143 \times 38 + 0,002 \times 37 = 0,62 \text{ (м}^2\text{)},$$

где 38 - количество ребер в выбранном радиаторе, а 37 - количество межреберных промежутков.

Выпрямитель высокочастотный

В качестве выпрямителя используется схема выпрямления со средней точкой. Выбор диодов необходимо осуществлять по среднему току и обратному напряжению.

Определяем обратное напряжение:

$$U_{\text{обр}} = 2 \times U_{\text{н}} = 2 \times 75 = 150 \text{ (В)}$$

Определяем средний ток, протекающий через диод:

$$I_{\text{дср}} = \frac{I_{\text{д}}}{2} = \frac{36,6}{2} = 18,3 \text{ (А)}$$

Выбираем диод по [4] типа STTH16003TV1 с $U_{\text{обр}} = 300 \text{ (В)}$, $I_{\text{D}} = 60 \text{ (А)}$, параметры которых превышают рассчитанные значения, фирмы STMicroelectronics.

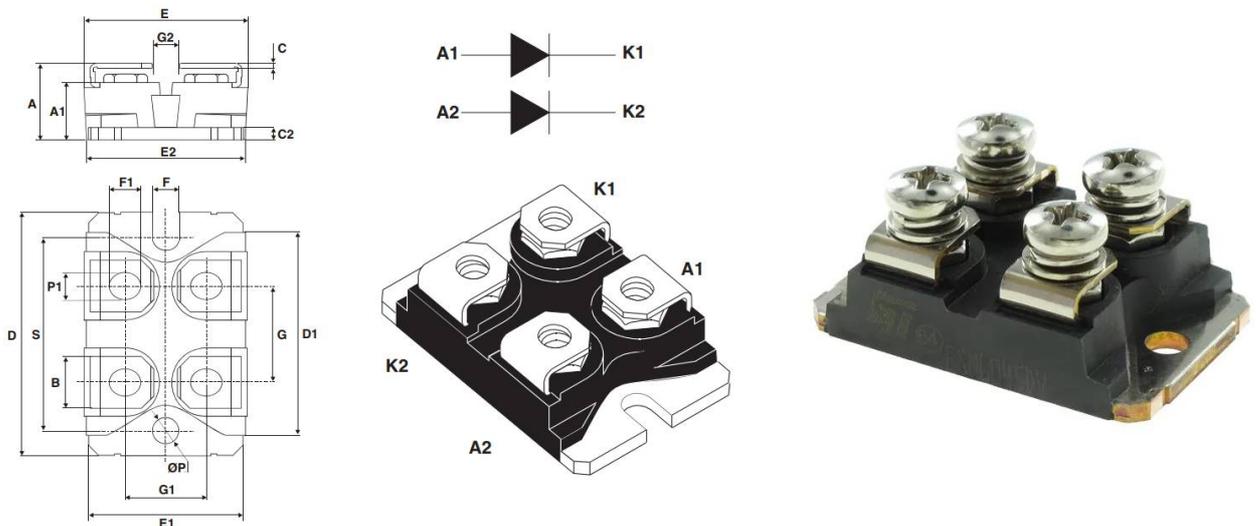


Рисунок 6. Габаритный чертеж и фото диода

В паспортных данных на диод находим график зависимости прямого падения напряжения U_f на диоде в функции от прямого тока $I_{\text{пр}}$, протекающего через него (рисунок 7).

На данном графике представлены зависимости для двух температурных режимов: 25°C , 150°C . Выбор проводим для температуры 75°C . По току

$I_{пр} = 36,6$ А определяем, что падение напряжения на диоде будет составлять приблизительно 0,86 В

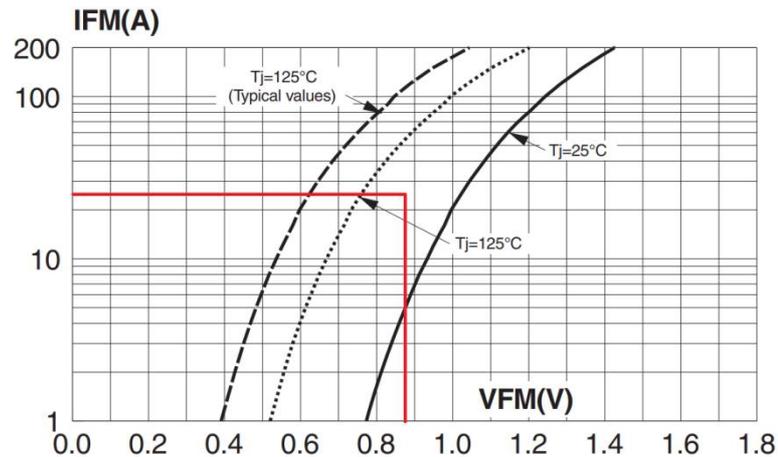


Рисунок 7. Определение мощности активных потерь в диоде, показатель определяющий нагрев полупроводникового кристалла диода, и как следствие, его корпуса.

Активные потери определяются по следующей формуле:

$$P_{VD} = I_{пр} \times U_f = 36,6 \times 0,86 = 31,47 \text{ (Вт)}$$

Определим необходимость радиатора по [5], для этого запишем уравнение теплового баланса:

$$T_j - T_a = R_{ja} \cdot P_{VD}$$

тогда температура кристалла:

$$T_j = T_a + R_{ja} \times P_{VD} = 35 + 40 \times 31,47 = 1293,8 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Расчетная температура значительно превышает допустимую температуру кристалла, представленную в документации на диод ($T_j = 150^\circ\text{C}$), радиатор необходим.

Из документации на диод находим:

Тепловое сопротивление для данного транзистора $R_{jc} = 0,7$ ($^\circ\text{C}/\text{Вт}$)

Тепловое сопротивление корпус - радиатор $R_{cs} = 0,4$ ($^\circ\text{C}/\text{Вт}$)

Выбираем рабочую температуру кристалла $T_{j\max} = 75$ ($^\circ\text{C}$)

Определяем рабочую температуру радиатора:

$$T_s = T_{j_{\max}} - P_{\Sigma} (R_{jc} + R_{cs}) = 75 - 31,47 \times (0,7 + 0,4) = 40,38 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

Определяем необходимое тепловое сопротивление радиатор-окружающая среда:

$$R_{sa} = \frac{T_s - T_a}{P_{VD}} = \frac{40,38 - 35}{31,47} = 0,17$$

Определим необходимую площадь радиатора:

$$S_p = \frac{1}{\alpha \times R_{sa}} = \frac{1}{14 \times 0,17} = 0,012 \text{ (м}^2\text{)}$$

где $\alpha = 14$ – коэффициент теплоотдачи для черного радиатора, Вт/м²·°С.

Так как у нас транзисторный мост состоит из 4-х транзисторов, то общая площадь радиатора равна:

$$S_{p.\text{общ}} = 4 \times S_p = 4 \times 0,012 = 0,048 \text{ (м}^2\text{)}$$

По определенной площади подбираем радиатор по [6].

Выбираем радиатор HS 183-150:



Рисунок 8. Корпус и эскиз радиатора

Длина ребра: $L = 0,15$ (м)

Высота ребра: $H = 0,013$ (м)

Ширина ребра: $W = 0,0014$ (м)

Межреберное расстояние: $X = 0,0046$ (м)

Отсюда, полная площадь ребра:

$$S_{\text{ребра}} = 2 \times L \times H + L \times W = 2 \times 0,15 \times 0,013 + 0,15 \times 0,0046 = 0,0046 \text{ (м}^2\text{)}$$

Площадь между ребер:

$$S_{\text{межреб}} = L \times X = 0,15 \times 0,0046 = 0,0007 \text{ (м}^2\text{)}$$

С учетом количества ребер и расстояния между ними площадь радиатора:

$$S = S_{\text{ребра}} \times 12 + S_{\text{межреб}} \times 11 = 0,0046 \times 12 + 0,0007 \times 11 = 0,063 \text{ (м}^2\text{)},$$

где 12 – количество ребер в выбранном радиаторе, а 11 – количество межреберных промежутков.

Массогабаритные показатели

Для реализации данного устройства предварительно потребуется стойка типа "Вишня" в количестве 3-х штук размером 1770×600×555. Приблизительная масса конечной установки 500÷600 кг.

Список литературы

- 1) Научно - производственное предприятие Гаммамет, 1998-2016. Екатеринбург. Электронный каталог магнитопроводов. Режим доступа: <http://gammamet.ru/index.php/ru/>. Дата обращения: 09.12.2017
- 2) Б.Ю. Семенов. Силовая электроника для любителей и профессионалов. Издательство "СОЛОН-Р", Москва, 2001. - 333 с.
- 3) Центр Комплектации «СпецТехноРесурс», 2000-2016. г. Москва. Режим доступа: <http://Laborant.ru/>. Дата обращения 09.12.2017.
- 4) Mouser Electronics, 1964-2016 Менсфилд. Электронный каталог электронных компонентов. Web: [http://eu.mouser.com /](http://eu.mouser.com/). Дата обращения 09.12.2016.
- 5) В.П. Петрович, Н.А. Воронина, А.В. Глазачев. Силовые преобразователи электрической энергии. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. - 240 с.

6) Поставщик электронных компонентов ПЛАТАН, 1997-2016. Москва. Электронный каталог электронных компонентов. Режим доступа: <http://www.platan.ru/>. Дата обращения: 09.12.2017.

7) Феофанова Л.С. Методика расчета статических потерь в транзисторе / Феофанова Л.С., Мороз С.М., Лазарев Д.Б. // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1.; Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12002> (дата обращения: 09.12.2016).