

На правах рукописи



Вильнин Александр Даниилович

ДВУХДВИГАТЕЛЬНЫЙ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЯГОВЫЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОДЗЕМНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА С ЭФФЕКТИВНЫМ
УПРАВЛЕНИЕМ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск - 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель –

Кладиев Сергей Николаевич,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Власьевский Станислав Васильевич
доктор технических наук, профессор, кафедры
«Электротехника, электроника и электромеханика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (г. Хабаровск)

Кубарев Василий Анатольевич
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники, электропривода и промышленной электроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» (г. Новокузнецк)

Ведущая организация –

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Защита диссертации состоится «19» декабря 2018 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в ауд. № 217 8 учебного корпуса Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53а, а также на официальном сайте ТПУ <http://portal.tpu.ru/council/2801/worklist>

Автореферат разослан «19» октября 2018 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
Д 212.269.11

Дементьев Юрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. 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 вагонок 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 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 колёс 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., Волотковский С.А., Волков Д.В., Е.К. Ещин, Жеребкин Б.В., В.Г. Каширских, Клепиков В.Б., Кордаков В.Н., Кутовой 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

компания «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 (электровоза и груженных 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 движения 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.

Объектом исследования является двухдвигательный тяговый асинхронный электропривод (ТАЭП) подземного рельсового транспорта.

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

Целью 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.

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 методику автоматизированного 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, отличающиеся 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 усилий.

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

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 техническое решение на использование устройства последовательной вольтодобавки в троллейной линии постоянного тока 250В для осуществления компенсации отклонения напряжения до 30%.

4. Проведены практические исследования условий возникновения буксования и юза колес относительно рельсового пути и распределения тяговых усилий 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 тягового электропривода.

3. Алгоритм определения скорости скольжения ведущих колес электровоза относительно рельсового пути за счет использования цифровой фильтрации сигналов тока статора тяговых асинхронных двигателей ведущих колёсных 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 его работы.

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 полезной модели, 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 конференции «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» MATEC Web of Conferences (MATEC-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 индексируемые 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 178 страницах машинописного текста и содержит 87 рисунков и 4 таблицы.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, указан объект исследований, сформулированы цель и идея работы, показано соответствие работы тематике специальности, определена научная новизна работы, представлены основные защищаемые положения, а также результаты апробации и реализации работы.

В первой главе проводится краткий анализ состояния рудничной электровозной тяги, рассматривается общая характеристика условий работы тяговых электроприводов рудничных электровозов и особенности применения асинхронного привода. Анализ особенностей источников питания подземного рельсового транспорта показывает, что основным фактором, сдерживающим применение асинхронного тягового электропривода – это пониженное напряжение первичного источника питания постоянного тока 250В. Это делает невозможным применение частотно-управляемых общепромышленных двигателей для электрической тяги. Выходом из сложившейся ситуации может быть применение 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 250В с возможностью снижения его напряжения до 175 В и обеспечением вольтодобавки до 75 В.

Во второй главе описана разработка математической и имитационной моделей тягового асинхронного двигателя для частотно-регулируемого электропривода, рассмотрены принципы построения асинхронного тягового электропривода шахтного рудничного электровоза, обоснован выбор и проведена проверка адекватности расчетных параметров двигателя, а также проведено теоретическое обоснование обеспечения предельно достижимого момента ТАД.

В качестве прототипа тягового асинхронного двигателя для подземных электровозов, выбран крановый частотно-регулируемый двигатель 4МТКМ1Ф2П225L6 производства ОАО Сибэлектромотор. Предложены рекомендации по усилению корпуса двигателя, изменению способа крепления двигателя к механическому редуктору с учетом требований, предъявляемым к тяговым двигателям рудничного электровоза.

Момент асинхронного двигателя определяется по выражению:

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

или $M = U^2 \cdot H = \text{const},$

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 величины вращающего момента. Для этого необходимо пересчитать параметры схемы замещения двигателя, умножив их на коэффициент пересчета (коэффициент трансформации) $k = U/U_{\text{н}}$.

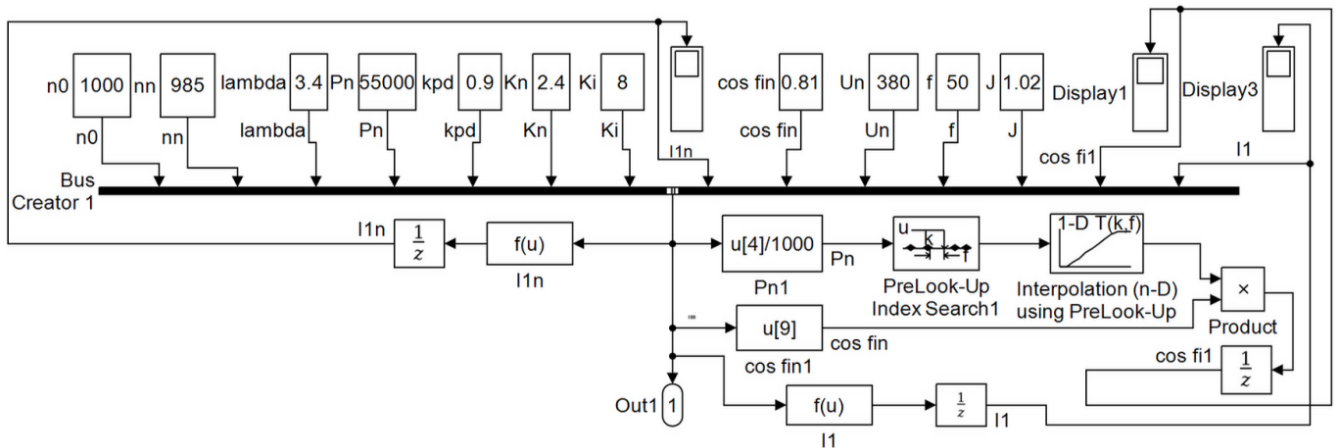


Рисунок 1. Имитационная модель расчёта параметров схемы замещения асинхронного двигателя (блок ввода параметров двигателя)

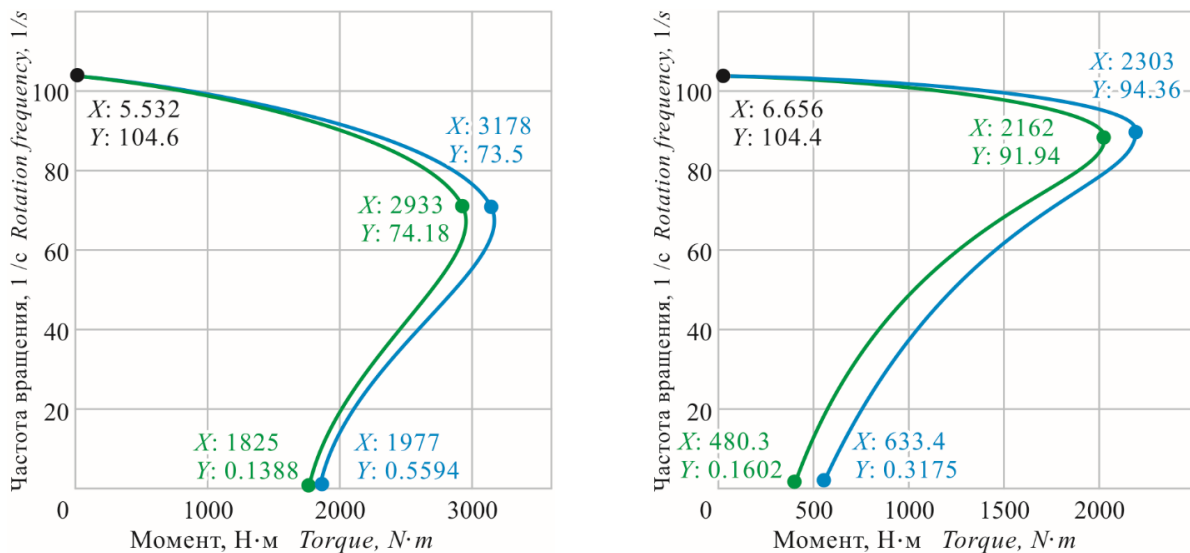


Рисунок 2. (а)

(б)

Статические механические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225L6

(а) на стандартное напряжение – 220В; (б) на пониженное напряжение – 178В

Статические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225L6 с часовой мощностью 55 кВт с обмоткой статора и ротора, пересчитанной на пониженное напряжение питания 178 В представлены на рисунке 2 и 3. Максимальный момент

ТАД с пониженным напряжением обмотки статора 178В не отличается от момента ТАД на стандартное напряжение 220В. При этом ток фазы статора вырос на 24,5%.

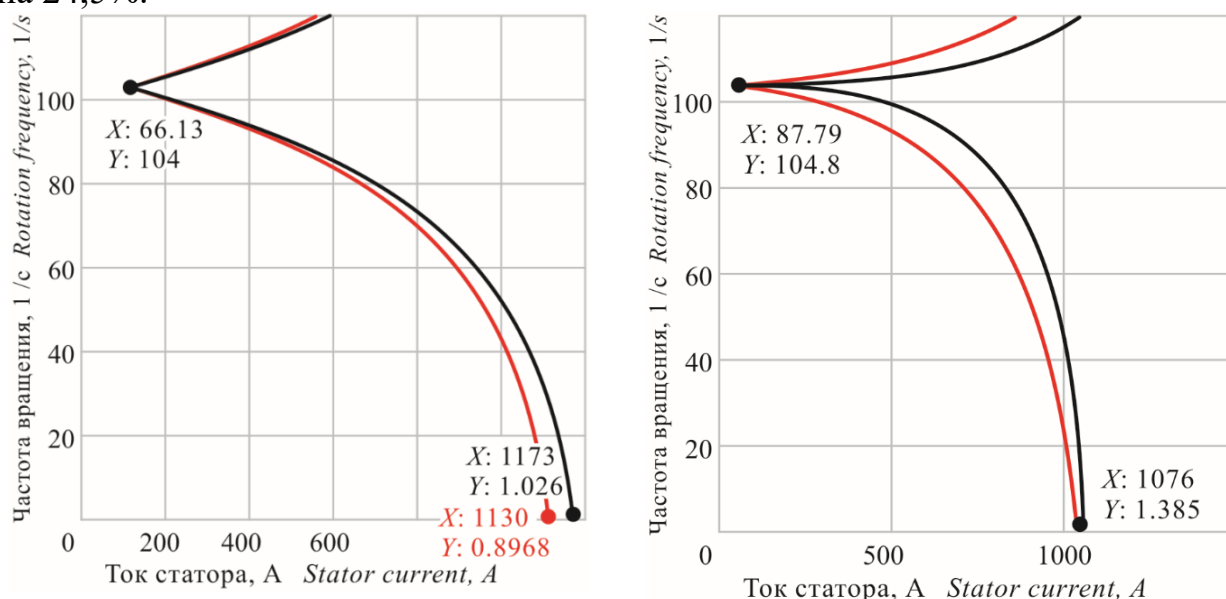


Рисунок 3. (а)

(б)

Статические электромеханические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225L6
а) на 220В; б) на пониженное напряжение питания 178В

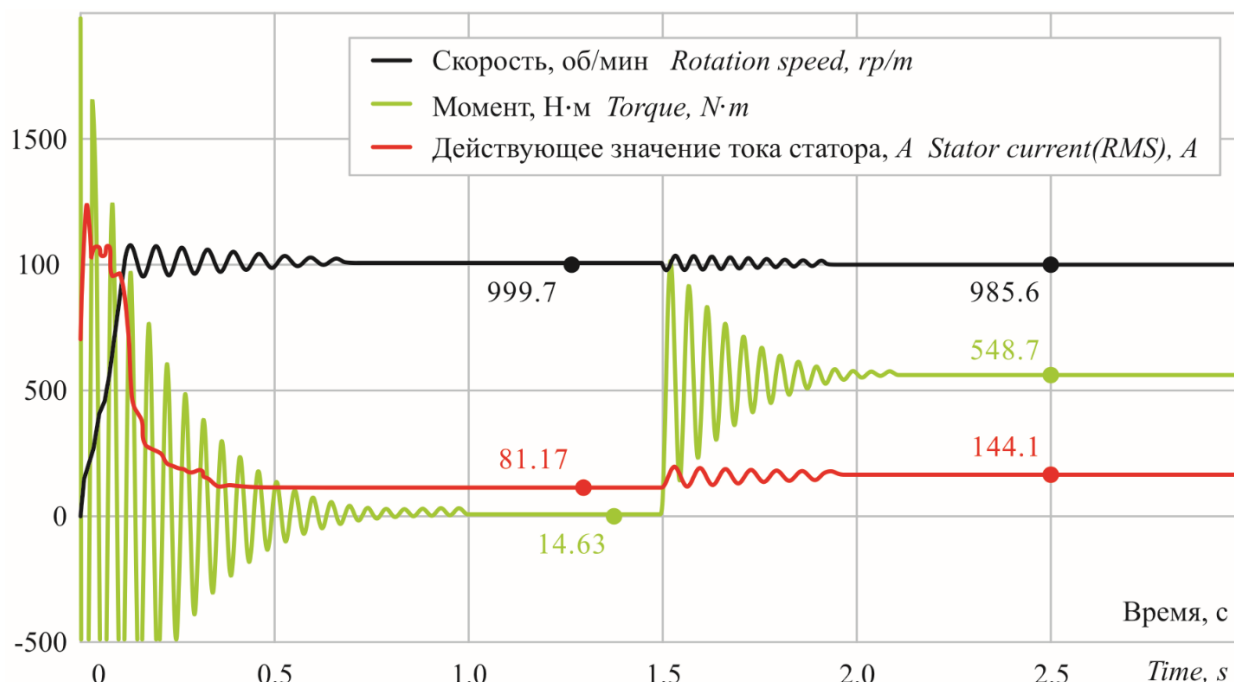


Рисунок 4. Динамические характеристики пуска ТАД на пониженное напряжение 178 В и схемой соединения обмоток статора «Δ».

Динамические характеристики прямого пуска ТАД с последующим «набросом» нагрузки приведены на рисунке 4. Характер переходных процессов и установившихся значений моментов и скорости тягового асинхронного двигателя с напряжением 178 В находится в пределах выявленных зависимостей для двигателя на стандартное напряжение 220 В, а ток статора возрос на 25%.

В третьей главе описана математическая модель электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза и принцип формирования тягового усилия частотно-регулируемым асинхронным электроприводом рудничного электровоза.

В главе также представлен метод определения явления буксования подземного электровоза, который лег в основу патента на полезную модель №141267 РФ. Необходимым элементом для построения эффективного алгоритмы управления скоростью движения локомотива и защиты от буксования и юза, является способ измерения линейной скорости движения локомотива. Основной проблемой является техническая сложность реализации такого измерения, т.к. точное измерение линейной скорости через тяговую колесную пару невозможно.

Предложенный метод определения буксования позволяет, с помощью введения в контур управления моментом тягового двигателя зондирующих колебаний. Математическое описание метода косвенного обнаружения буксования колесной пары на основе использования предложенной авторами фильтрующей схемы, позволяющей оценивать временные характеристики электровоза, связанные с буксованием.

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.

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, R – радиус колеса, $U_1(t) = v_1(t) - v_{эв}(t)$.

Для определения скорости скольжения, из сигнала $M_1(t)$ необходимо выделить полезную составляющую, для чего он пропускается через последовательно соединенные полосовой фильтр и фильтр низких частот.

Принцип действия предложенного метода обнаружения буксования показан на рисунке 6. При работе алгоритма компенсации буксования величина скорости скольжения остается постоянной и удерживается в интервале $[0, 1 \dots 0, 16]$ м/с.

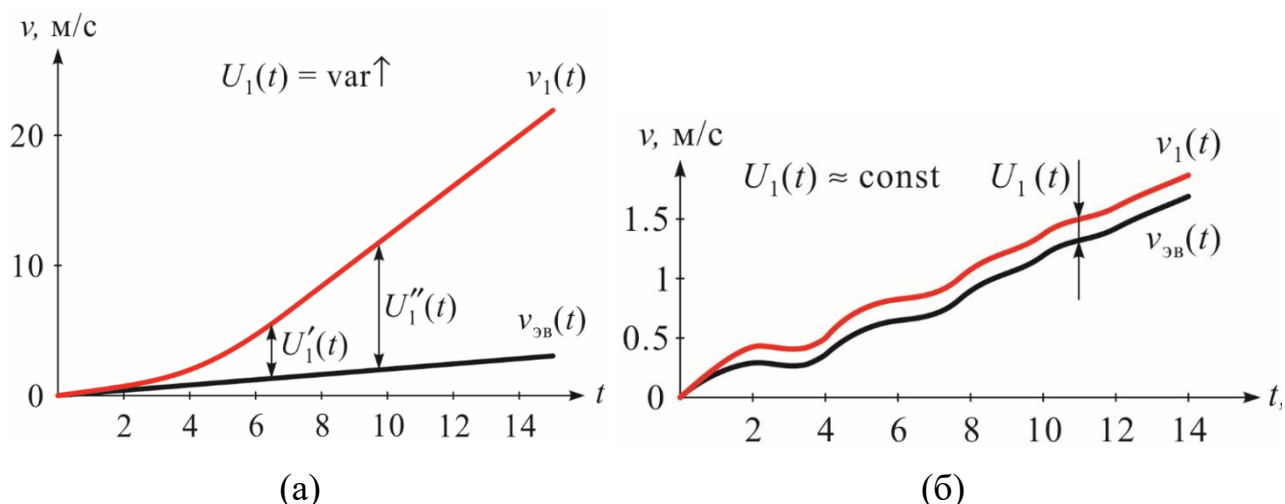


Рисунок 6. Графики линейных скоростей $v_1(t)$ и $v_{эв}(t)$ а) без и б) при использовании алгоритма компенсации буксования

Сигнал скорости скольжения, полученный косвенным способом, имеет транспортную задержку, которая затрудняет использования данного метода в реальном масштабе времени. Вследствие этого для повышения точности системы управления предпочтительным является прямое измерение скорости скольжения.

Практические исследования коэффициента трения скольжения подземного рельсового транспорта, состоящего из локомотива с груженными вагонами, проведены профессором Ренгевичем А.А. и другими коллективами исследователей. Экспериментально установлено, что при используемых материалах и состоянии контактных поверхностей, постоянной нагрузке на оси колесной пары и скорости электровоза, коэффициент трения скольжения, зависит лишь от скорости скольжения колёсной пары U_1 . Полученные зависимости в абсолютных величинах приведены на рисунке 7.

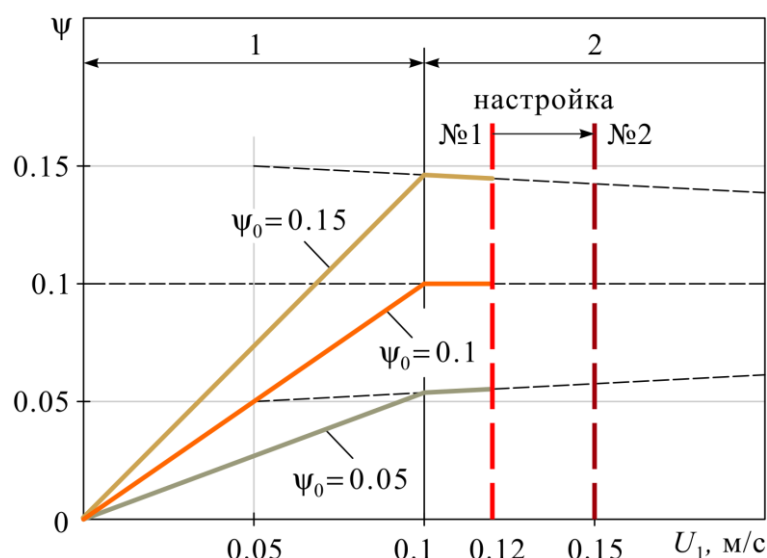


Рисунок 7. Экспериментальная зависимость коэффициента сцепления от скорости скольжения $\psi(U_1)$, где ψ_0 – теоретический или потенциальный коэффициент трения скольжения; $U_0=0,1$ (м/с) – максимальная скорость упругого скольжения

Тогда зависимость $\psi(U_1)$ можно условно разделить на зоны: упругого скольжения; комбинированного скольжения; скольжения с интенсивным износом контактирующих поверхностей ($U_1 \gg U_0$).

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

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

$$\psi(U_1) = \psi_0 + (U - U_0) \operatorname{tg} \alpha \quad \text{при } |U| \geq U_0; \text{ где } \operatorname{tg} \alpha = 0,016 - 0,03 \sqrt{10\psi_0 - 0,7}.$$

В качестве критерия управления скольжением выбираем скорость скольжения с ограничением её величины на уровне 0,1...0,15 м/с. Именно в этом диапазоне, варьируя величиной уровня ограничения, согласно теоретическим представлениям можно найти точку максимального сцепления. На основании данного принципа была разработана структура системы управления двухдвигательным тяговым электроприводом, представленная на рисунке 8.

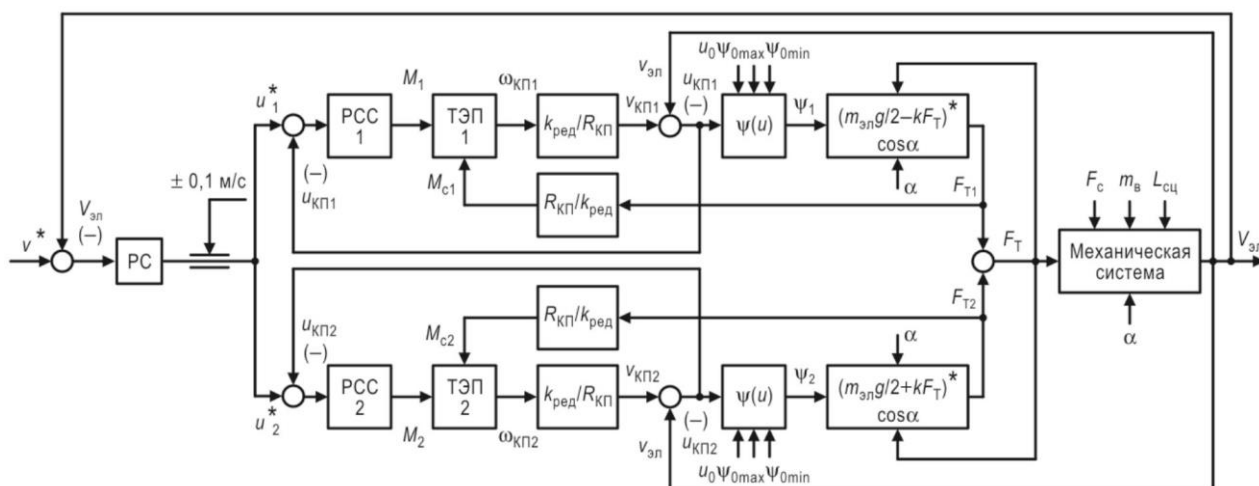


Рисунок 8. Структура системы управления двухдвигательным тяговым электроприводом

Система управления имеет структуру подчиненной системы управления, 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, который обеспечивает работу тяговых электроприводов колесных пар (ТЭП1, ТЭП2) в рамках диапазона максимальной тяги, т.е. в режимах упругого или комбинированного скольжения.

В настоящей работе механическая система подвижного состава, в отличие от известных работ в данной области исследований, представлена в виде распределенной массы, состоящей из 12 вагонов. Они соединены сцепными устройствами, характеризующимися люфтом (свободным ходом), упругостью и вязкостью. Модель механической системы подвижного состава представлена на рисунке 9.

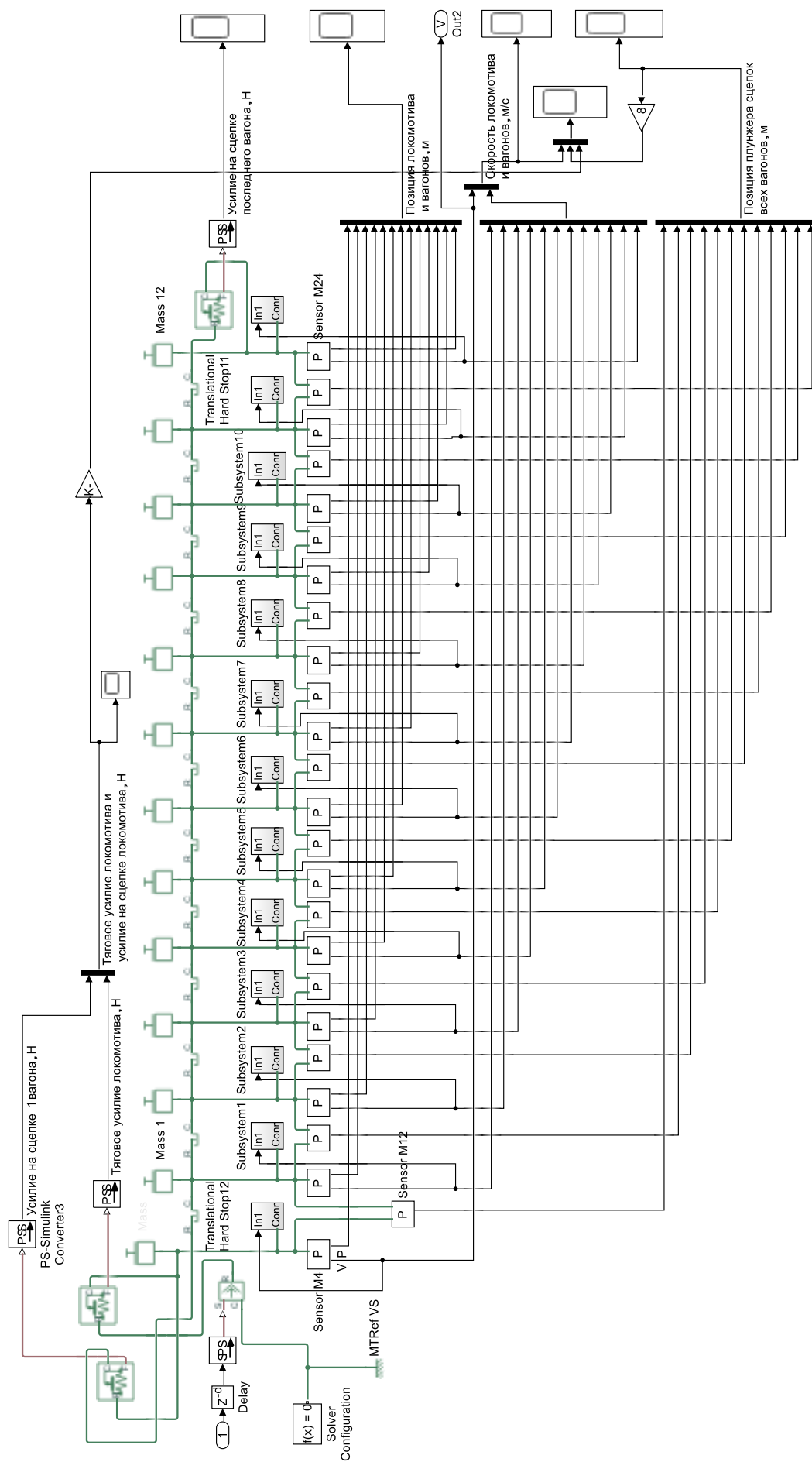


Рисунок 9. Модель механической системы подвижного состава

В четвертой главе представлены результаты исследования практического применения разработанных теоретических положений.

Разработанный алгоритм обладает свойством универсальности и одинаково эффективно может управлять как асинхронным приводом, так и приводом постоянного тока. Для сравнительной оценки качества управления асинхронным приводом и приводом постоянного тока, было проведено моделирование работы двухдвигательного электровоза, привода колесных пар которого гипотетически оснащены приводами разного типа – первый приводом постоянного тока с тяговым двигателем ДК-812, второй – асинхронным приводом с тяговым двигателем 4МТКМ2П225Л6.

В соответствии с блок схемой уточнённой имитационной модели подвижного состава с тяговым электроприводом постоянного тока первой колёсной пары и асинхронным электроприводом второй колёсной пары с РСС, были получены диаграммы скорости, тока статора, потокосцепления, момента и скорости скольжения привода постоянного тока и асинхронного тягового электропривода с коэффициентом сцепления: $\psi_0=0,175$. Моделирование показало идентичность работы приводов постоянного и переменного тока.

Для моделирования работы электропривода в различных режимах была разработана уточненная имитационная модель (См. рисунок 10), учитывающая такие факторы как ограничения по сцеплению, динамическое перераспределение веса электровоза между осями, наличие сцепки (учтены ее люфт и упругость), а также распределенный характер массы состава.

Далее в главе представлено моделирование работы алгоритма управления тяговым двухдвигательным частотно-регулируемым электроприводом в режимах пуска и остановки состава на подъеме и на спуске. На рисунках 11 и 12 представлены результаты моделирования работы тягового электропривода первой и второй колесных пар, с учетом уточненной имитационной модели подвижного состава.

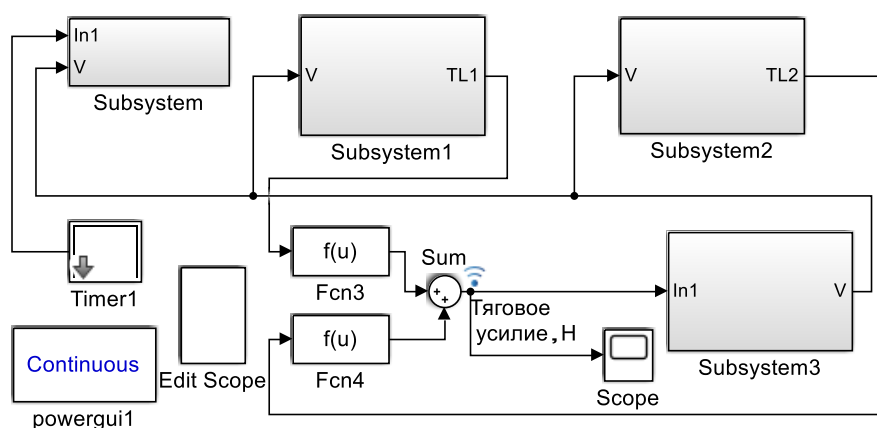


Рисунок 10. Блок схема уточненной имитационной модели подвижного состава с двухдвигательным тяговым асинхронным электроприводом с РСС

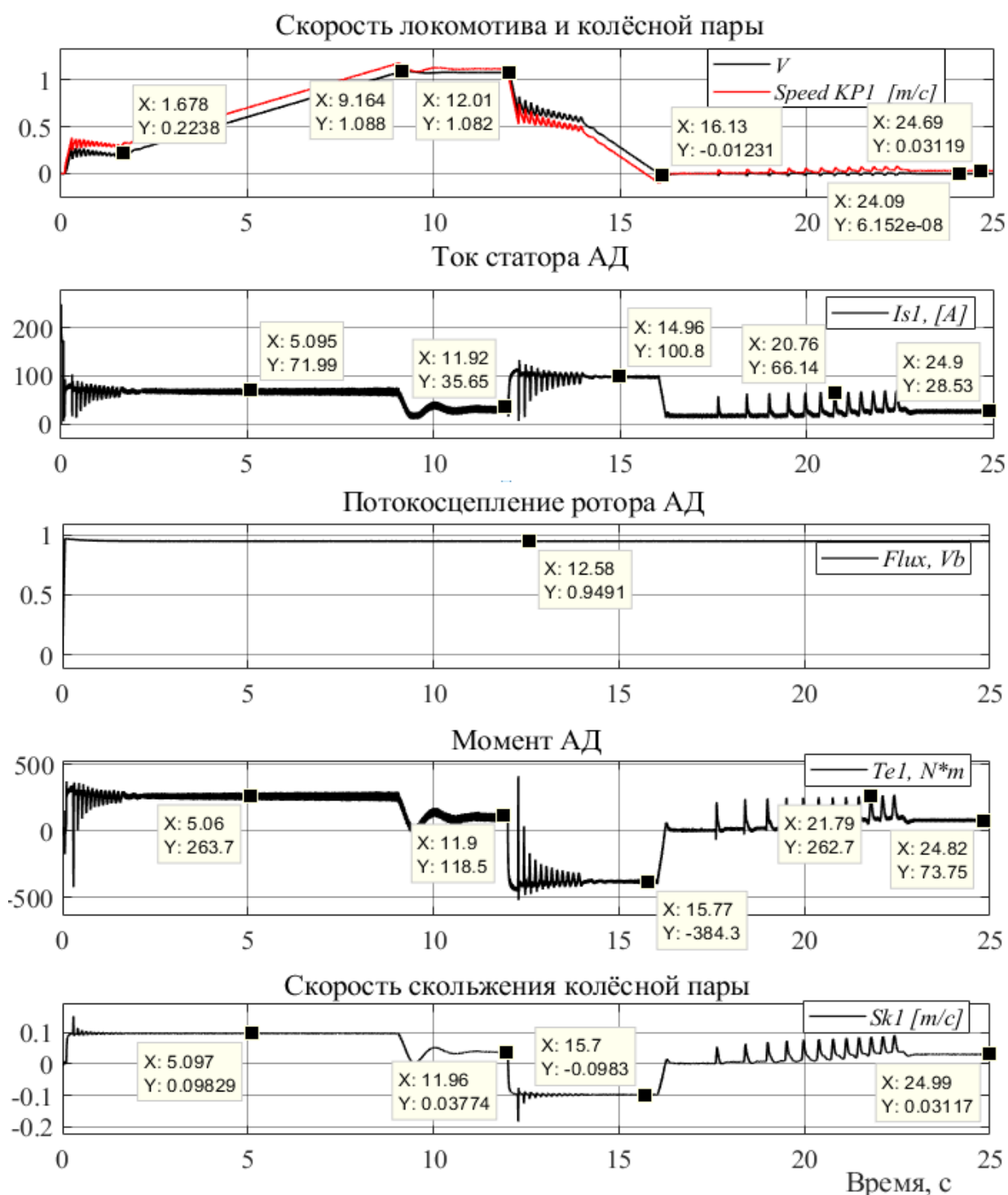


Рисунок 11. Характеристики скорости скольжения ($Sk1$), линейной скорости локомотива (v), линейной скорости колеса в точке контакта с рельсом ($SpeedKP1$), действующего значения тока статора (I_{s1}), потокосцепления ротора (Ψ_2), и электромагнитного момента (T_{e1}) тягового двигателя первой колёсной пары (КП1) при разгоне груженого состава на подъём 5 промилле до скорости 1,08 м/с

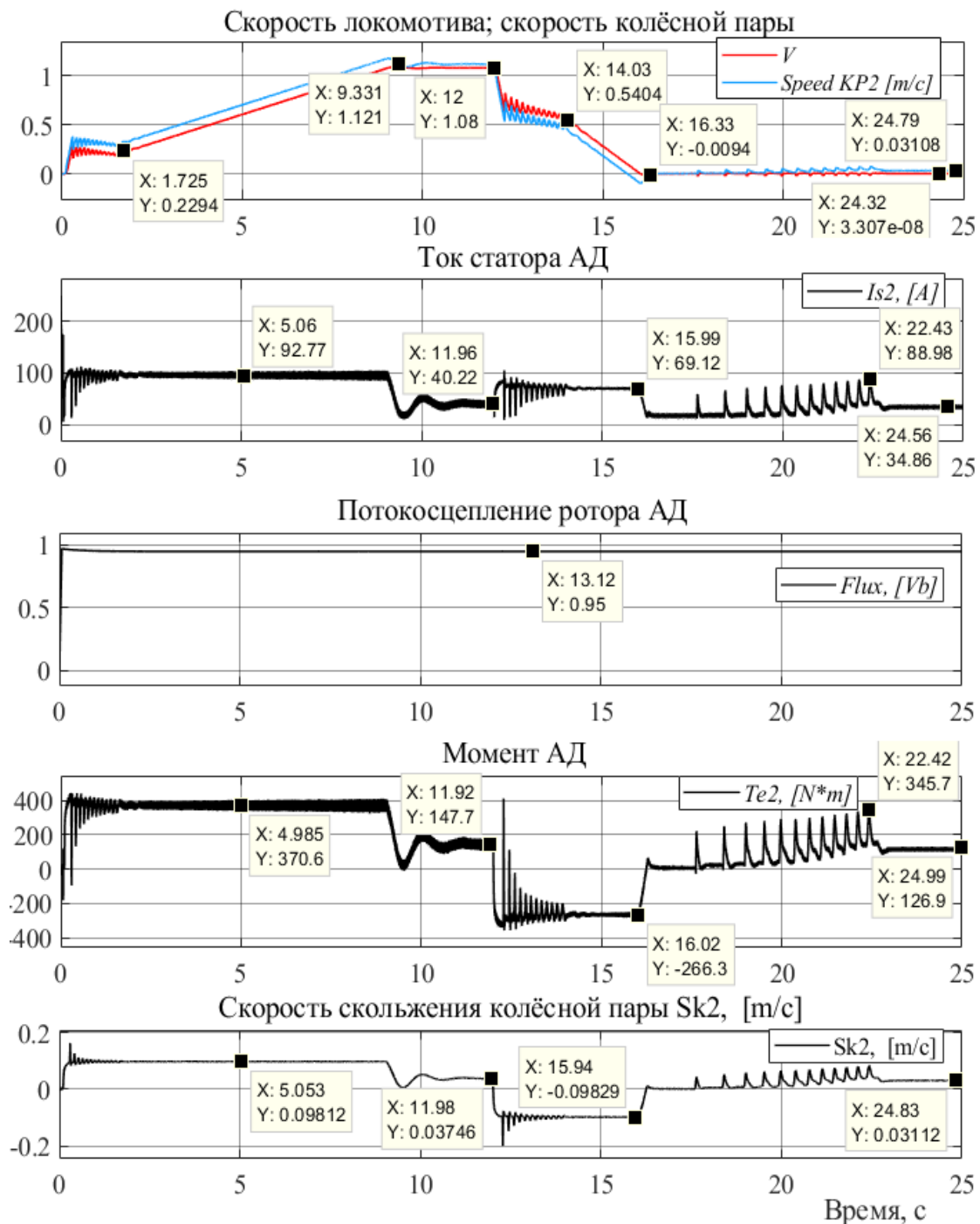


Рисунок 12. Характеристики скорости скольжения ($Sk2$), линейной скорости локомотива (v), линейной скорости колеса в точке контакта с рельсом ($SpeedKP2$), действующего значения тока статора (I_{s2}), потокосцепления ротора (Ψ_2), и электромагнитного момента (T_{e2}) тягового двигателя второй колёсной пары (КП2) при разгоне груженого состава на подъём 5 промилле до скорости 1,08 м/с

Тяговое усилие электровоза пропорционально сумме тяговых моментов колёсных пар. Движение на спуск происходит аналогичным образом, диаграммы представлены на рисунке 13. В отличие от движения на подъём, движение на спуск отличается на этапах набора и снижения скорости. На спуске разгон происходит быстрее, а остановка медленнее. В остальном данные режимы совпадают.

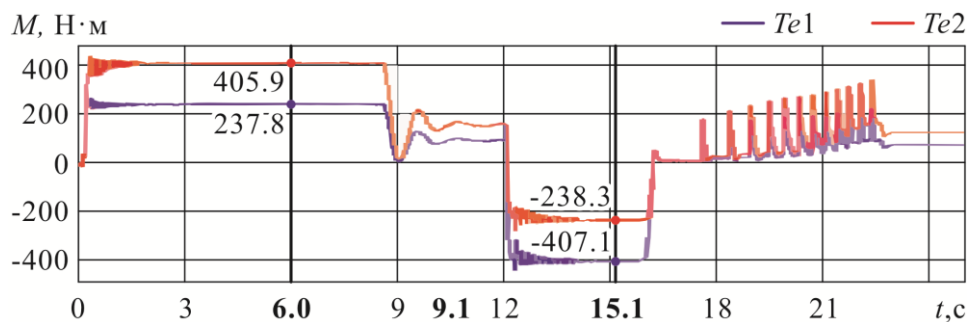


Рисунок 13. Характеристики тяговых моментов первой колёсной пары [TL1] Н·м и [TL2] Н·м при разгоне груженого состава на подъём 5⁰/₀₀ до скорости 1,08 м/с

Сравнение возможностей систем управления, разработки Кутового Ю.Н. и предложенное автором, представлены на рисунках 14 и 15.

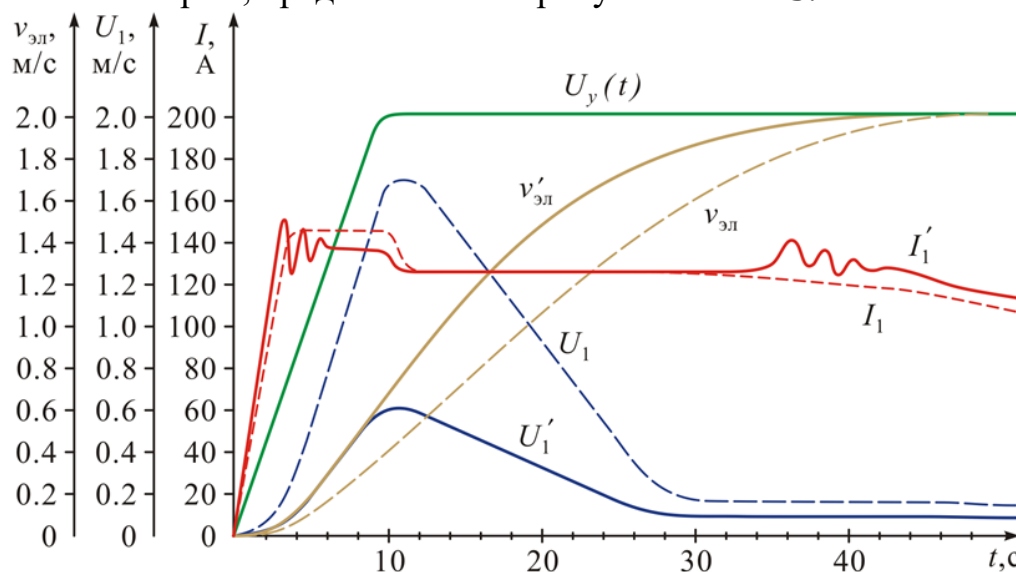


Рисунок 14. Диаграммы пуска электропривода электровоза АРП14 на подъём 5⁰/₀₀

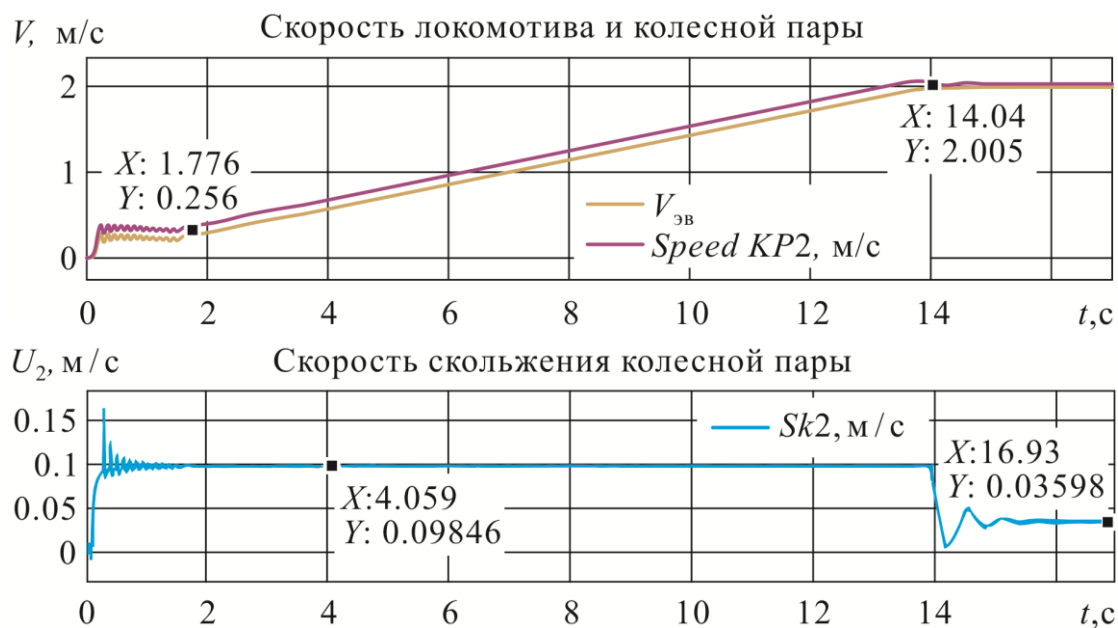


Рисунок 15. Диаграммы пуска электропривода электровоза К-14 на подъём 5⁰/₀₀

Результаты имитационного моделирования частично проверены экспериментально на опытной установке (рис. 16). В частности, подтверждено положение, что определённому значению скорости скольжения колёс относительно рельс соответствует режим максимального тягового усилия.

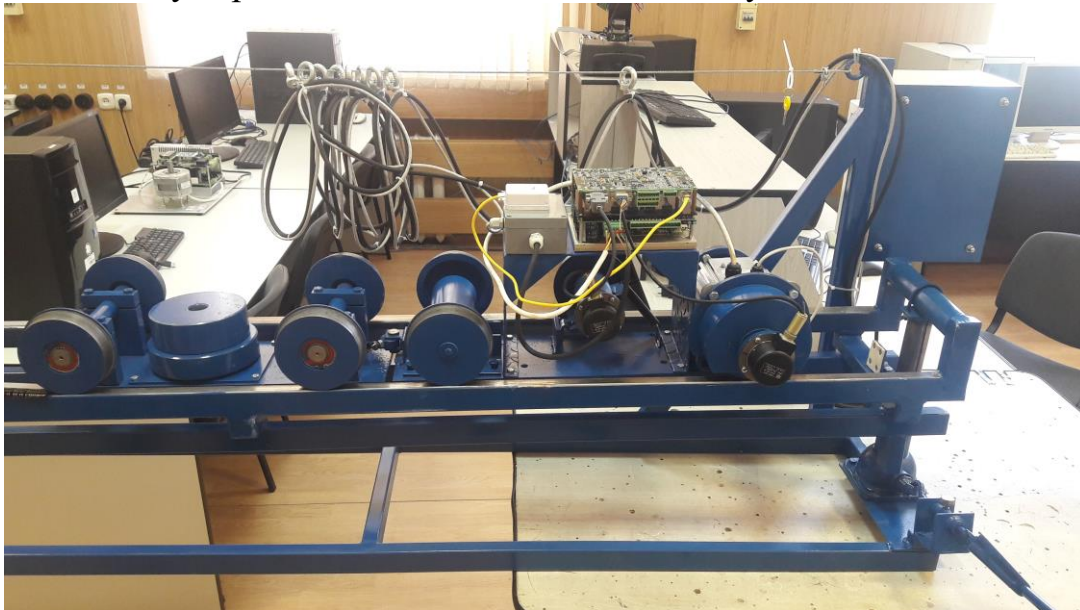


Рисунок 16. Общий вид экспериментальной установки



Рисунок 17. Электровоз с гружёной тележкой, цикл движения «вперед-назад»

Основные выводы по работе:

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 колесных 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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Издания из **перечня ВАК** для кандидатских диссертаций:

1. Кладиев С.Н., Вильнин А.Д., Пякилля Б.И. Модель электромеханической системы подвижного состава рудничного электровоза // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 1 (37). С. 65-68.
2. Вильнин А. Д., Кладиев С. Н., Пякилля Б. И. Исследование процесса буксования колёсной пары рудничного электровоза в переходных режимах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2013 – Т. 323 – №. 4. – С. 143-146.
3. Вильнин А. Д., Кладиев С. Н., Пякилля Б. И. Метод обнаружения явления буксования в тяговом электровозе // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013 – №. 3 (39). – С. 264-266.
4. Вильнин А.Д. Оценочные исследования тягового асинхронного электродвигателя с пониженным напряжением питания для рудничного электровоза / О. В. Арсентьев и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – 2017. – Т. 328, № 11. – С. 126-138.

Scopus:

1. Arsentiev, O.V., Baranov, P.R., Vilnin, A.D., Kladiev, S.N. Evaluative research of induction traction electric motor with low-level power supply for mine locomotive (2017) Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering, 328 (11), pp. 126-138.
2. Kladiev, S.N., Pyakillya, B.I., Vilnin, A.D. Mathematical model of traction electric drive for mine electric train (2014) MATEC Web of Conferences, 19, Conference Paper № 01040.

Патенты:

1. Вильнин А. Д., Горюнов А. Г., Ливенцов С. Н., Лысенко А. А., Цхе А. В. Система управления электродвигателями постоянного тока последовательного возбуждения: Патент 60447 Российская Федерация; Патентообладатель: ФГАОУ ВО НИ ТПУ; Опубликовано 10.05.2006.
2. Вильнин А. Д., Цхе А.В. Устройство управления электродвигателем постоянного тока последовательного возбуждения: Патент 73283 Российская Федерация; Патентообладатель: ФГАОУ ВО НИ ТПУ; Опубликовано 28.12.2007.
3. Вильнин А. Д., Кладиев С. Н., Пякилла 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.

Прочие публикации:

1. Вильнин А. Д., Горюнов А.Г., Ливенцов С. Н., Селиванов В. В. Современный тяговый электропривод // Сборник тезисов докладов III Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы атомной энергетики и промышленности», 7-8 июня 2005г — Томск: ТПУ, 2005. – с.143.
2. Вильнин А. Д. Моделирование электромеханических процессов в тяговом электроприводе шахтного электровоза // Сборник трудов международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» СТТ-2007, Т. 1. –Томск: ТПУ, 2007. 547 с.
3. Вильнин А. Д., Сушко В. П., Цхе А. В. Исследование электромеханических процессов в электроприводе рудничного электровоза К14 // Сборник материалов международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», 17-19 октября 2007 г. – Томск: ТПУ, 2007 г. 444 с.
4. Вильнин А. Д., Сушко В. П., Цхе А. В. Исследование асинхронного электропривода рудничного электровоза // Сборник трудов международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», 24-28 марта 2008 г., Т. 1. – Томск: ТПУ, 2008.

5. Вильнин А. Д., Сушко В. П., Цхе А. В. Методы обнаружения буксования в системах управления тяговым электроприводом локомотива // Сборник трудов международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», 4-8 мая 2009 г., Т. 1. –Томск: ТПУ, 2009 г. – С. 379-380., 613 с.
6. Вильнин А. Д., Сушко В. П., Цхе А. В. Способ управления двигателем постоянного тока с последовательным возбуждением // Сборник трудов юбилейной научно-технической конференции «Автоматизация и управление в промышленности, науке и образовании», 29-30 июня 2009 г. – Томск: ТПУ, 2009 г. – С. 61-64.
7. Вильнин А. Д., Десятов А.В., Терехин В.Б. Исследование асинхронного привода рудничного электровоза // Сборник трудов международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», 18-22 апреля 2011 г., Т. 1. – Томск: ТПУ, 2011. – С. 445-447.
8. Вильнин А.Д., Кладиев С.Н. Структура тягового электропривода рудничного электровоза // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и их пути решения в науке, транспорте, производстве образовании 2011». – Выпуск 4. Том 2. –Одесса: Черноморье, 2011. – с. 80-85.
9. Вильнин А. Д., Десятов А.В., Терехин В.Б. Компьютерная модель асинхронного электропривода рудничного электровоза // Сборник трудов международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии», 18-22 апреля 2011 г., Т. 1. –Томск: ТПУ, 2011. – С. 447-449. 581 с.
10. Вильнин А. Д., Кладиев С. Н., Пякилля Б. И. Алгоритм компенсации эффекта буксования колесной пары рельсового транспорта // Электромеханические преобразователи энергии: материалы VI Международной научно-технической конференции, Томск, 9-11 Октября 2013. – Томск: ТПУ, 2013 - С. 258-262.
11. Вильнин А. Д., Кладиев С. Н., Пякилля Б. И. Имитационная модель тягового электропривода // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 22-26 Апреля 2013. – Иркутск: ИрГТУ, 2013 - Т. 1 – С. 78-82.

Подписано в печать 18.10.2018 г. Тираж 100 экз.
Кол-во стр. 22. Заказ 188
Бумага офсетная. Формат А5. Печать RISO.
Отпечатано в типографии ООО «СПБ Графика»
634034, г. Томск, ул. Усова 4 а, оф. 150.
тел. 89039547362