

На правах рукописи



Маслов Максим Александрович

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
СИСТЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ БУКСОВАНИЯ ЛОКОМОТИВА
ЗА СЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Брянск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
Антипин Дмитрий Яковлевич

Официальные оппоненты: **Буйносов Александр Петрович**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Уральский государственный
университет путей сообщения»,
кафедра «Электрическая тяга», профессор

Силюта Анатолий Геннадьевич
кандидат технических наук, акционерное
общество «Научно-исследовательский
институт железнодорожного транспорта»,
лаборатория «Тепловозы» научный центр
«Тяга поездов», заведующий лабораторией

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава»

Защита диссертации состоится «16» марта 2023 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.07 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ) по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ) www.miiit.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В текущее время стоит крайне важный вопрос о повышении объема перевозок грузов с помощью железнодорожного транспорта, и отсюда появляется значительная необходимость в повышении сцепного веса поезда. Так же крайне необходимо на постоянной основе удерживать плотный график движения, что способствует поиску решений, которые смогут привести к наибольшей реализации тяговых характеристик локомотивов, в частности при движении на сложных участках пути, при трогании поездов с места, движении в горку. Принимая во внимание эти задачи, можно разъяснить потребность в повышении коэффициента сцепления в контакте колес с рельсами на техническом уровне.

Одной из самых важных перспектив в области контактного взаимодействия является вопрос изучения физико-химических и фрикционных свойств поверхностных слоев трибологической системы «колесо-рельс», а также поиск инновационных путей, способных добиться повышения как величины, так и стабильности необходимого коэффициента трения в этой взаимосвязи. Проблема описания внешних физических полей, которые оказывают влияние на трибологические свойства пары трения колеса и рельса, рассмотрена на текущий момент в достаточно малой степени. Использование механических, электрических, химических и других методов, направленных на очистку колес и рельсов, не всегда дает стабильные, положительные и очевидные результаты, о чем свидетельствует анализ значительного количества данных из литературных источников.

Степень разработанности темы. Нынешнее представление о взаимодействии колеса с рельсом основывается на достижениях в таких науках, как механика, физика, химия, а также трибология, триботехника, материаловедение и других. Работы как отечественных, так и зарубежных исследователей А.И. Ивахина, В.О. Корчагина, Ф.П. Боудена, Д.В. Воробьева, А.П. Буйносова, Д.Н. Гаркунова, Н.Б. Демкина, Б.В. Дерягина, Д.И. Петракова, В.С. Косова, И.П. Исаева, А.Ю. Ишлинского, Д.Д. Калкера, И.В. Крагельского, Д.К. Минова, Д.Ю. Погорелова, О.С. Валинского, Г.В. Самме, Д. Тейбора, И.В. Волкова, В.И. Колесникова, А.В. Людаговского, М.Г. Шалыгина, Г.М. Волохова, С.Г. Волохова и др. позволили решить обширный круг задач, относящихся к сцеплению колеса рельсом. В настоящее время применение песка, выступающего в качестве абразива в зоне контакта колеса и рельса для обеспечения устойчивого сцепления, является наиболее распространённым. Следует отметить, что его применение приводит как к снижению электрического сопротивления балласта, так и к загрязнению путей, а также не маловажным факторам является повышение износа колес и рельсов.

Так же значительный вклад в исследование вопросов динамики, прочности, безопасности подвижного состава, включая тяговый, оказали работы ученых: Э.С. Оганьяна, А.Н. Савоськина, В.И. Киселева, В.А. Николаева, Л.Б. Цвика, Д.Н. Курилкина, Ю.А. Давыдова, А.А. Воробьева, Е.К. Рыбникова, И.И. Галиева, В.А. Четвергова, А.Г. Силюта, А.В. Сакало, В.И. Сакало, Г.С. Михальченко.

Вопросы совершенствования тягового привода и автоматизации его управления изложены в научных работах следующих исследователей: Ю.М. Инькова, А.Н. Савоськина, В.В. Грачева, А.А. Пугачева, А.В. Грищенко, А.М. Евстафьева, В.П. Смирнова, А.В. Самотканова, Е.Ю. Логиновой, О.Е. Пудовикова, М.Д. Глущенко, В.Н. Балабина, А.А. Зарифьяна, В.А. Кручек, В.В. Никитина, А.Т. Осяева, П.Г. Колпахчьяна, С.М. Овчаренко.

Цель и задачи. Цель работы заключается в разработке и техническом обосновании решений системы предотвращения буксования локомотива за счет воздействия магнитного поля на зону контакта колеса и рельса.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить существующие способы повышения коэффициента сцепления колес тягового подвижного состава и рельса;
- разработать и изготовить устройство для намагничивания зоны трения катковой установки на базе стенда для моделирования динамических процессов в тяговом приводе локомотива, получить экспериментальные данные по влиянию магнитного поля на зону контакта образцов из стали;
- исследовать влияние магнитного поля на трибологические характеристики пар контакта;
- разработать методику обоснования конструктивных решений магнитных усилителей коэффициента сцепления и созданных на их основе устройств предупреждения и предотвращения буксования, позволяющую формировать патентоспособные решения;
- обосновать конструктивные решения магнитного усилителя коэффициента сцепления колеса и рельса, а также его рациональные параметры;
- разработать проектное решение устройства предупреждения и предотвращения буксования локомотива;
- выполнить оценку работоспособности и эффективности предложенной системы предупреждения и предотвращения буксования.

Объектом исследования в работе является система предотвращения буксования колёс локомотива.

Предметом исследования является зона контакта колеса и рельса.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1 Методами математического и натурного моделирования обоснованы рациональные параметры устройства для намагничивания зоны контакта катков.

2 Экспериментальными методами выполнена оценка влияния магнитного поля на микроструктуру поверхностей пары трения.

3 Разработана методика, позволяющая получить патентоспособные решения противобуксовочных систем подвижного состава на основе объектной модели технических решений.

4 Обоснована принципиальная схема устройства предупреждения и предотвращения буксования, построенная на базе магнитных усилителей коэффициента сцепления.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1 Предложены технические решения, обеспечивающие реализацию воздействия на зону контакта колеса и рельса на основе существующих способов и систем усиления коэффициента сцепления.

2 Разработана конечно-элементная электромагнитная модель устройства намагничивания зоны трения катковой установки, позволяющая определить выбор рациональных параметров устройства для намагничивания.

3 Разработано устройство намагничивания зоны трения катковой установки.

4 Проведены экспериментальные исследования, позволившие сделать выводы о влиянии магнитного поля на коэффициент трения и микроструктуру материала.

5 Предложена классификация конструктивных особенностей магнитных усилителей коэффициента сцепления, позволяющая на основе объектной модели технических решений получить патентоспособные решения.

6 Разработана конечно-элементная электромагнитная модель, позволившая определить параметры магнитного усилителя коэффициента сцепления и подтвердить его работоспособность.

7 Предложена принципиальная схема противобуксовочной системы на базе магнитного усилителя коэффициента сцепления.

8 Разработана пространственная твердотельная динамическая модель поезда с локомотивом, оборудованного предложенной противобуксовочной системой, позволившей подтвердить ее работоспособность и эффективность.

Методология и методы исследования. Для исследования магнитных полей использовано конечно-элементное моделирование, позволяющее исследовать электромагнитные процессы, происходящие в парах трения. Экспериментальные исследования проводились на модернизированных стендовых установках с использованием средств контроля и обработки данных с использованием ПЭВМ, а также с использованием металлографического оборудования и профилографических методов контроля. Исследование динамических характеристик подвижного состава проводилось с использованием пространственных динамических моделей подвижного состава по реальным неровностям пути, реализованных в среде модуля *UM Loco* программного комплекса «Универсальный механизм».

Положения, выносимые на защиту:

– обоснование использования модернизированных стендовых установок при изучении эффекта влияния магнитного поля на взаимодействие стальных пар трения;

– результаты исследований влияния магнитного поля на коэффициент трения и микроструктуру поверхности образцов;

– обоснование применения объектной модели для получения патентоспособных технических решений при разработке противобуксовочных устройств на базе магнитных усилителей коэффициента сцепления;

– математическая модель магнитного усилителя коэффициента сцепления для определения влияния величины воздушного зазора между магнитным индуктором и рельсом на индукцию магнитного поля между колесом и рельсом;

– схема противобуксовочной системы на базе магнитного усилителя коэффициента сцепления;

– результаты компьютерного моделирования предложенной противобуксовочной системы, установленной на динамической модели поезда при различных условиях движения.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительной сходимостью данных расчетов с результатами экспериментальных исследований, проведенных на разработанном стенде и натурных испытаний магистрального тепловоза 2ТЭ25КМ, а также с результатами исследований, которые проведены ранее ведущими учеными и исследовательскими центрами.

Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: «Наука и образование в современных условиях» (Научно-издательский центр «Мир науки», 2017), «Техника и технологии наземного транспорта» (УрГУПС, 2018), IV международная конференция по промышленному инжинирингу ICIE 2018 «Springer International Publishing, 2018», V Международная научно-практическая конференция «Новые горизонты» (БГТУ, 2018), V международная конференция по промышленному инжинирингу ICIE 2019 «Springer International Publishing, 2019», VI Международная научно-практическая конференция «Новые горизонты» посвященная 90-летию БГТУ (БГТУ, 2019), VII научно-практическая конференция с международным участием «Новые горизонты» (БГТУ, 2020), Международная интернет-конференция «Современные проблемы железнодорожного транспорта» (РУТ, 2020), VIII научно-практическая конференция с международным участием «Новые горизонты» (БГТУ, 2021), III Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике» (ЮЗГУ, 2021).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка литературы из 142 наименований и шести приложений. Общий объем диссертации 160 страниц основного текста, включая 75 рисунка, 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отражены актуальность и степень разработанности темы, поставлены цели и задачи, выбраны методы проведения исследований, изложены научная новизна, основные положения и практическая ценность работы, показаны достоверность результатов и степень апробации.

В **первом разделе** работы проведен анализ состояния вопроса и степени разработанности проблемы взаимодействия колеса и рельса при наличии магнитного поля, рассмотрены способы повышения сцепления колес локомотивов с рельсами.

На основе обзора результатов исследований отечественных и зарубежных ученых выделены основные факторы влияющие на коэффициент сцепления колеса с рельсом, выполнена их классификация, позволившая выделить следующие пути увеличения коэффициента сцепления:

- увеличение коэффициента сцепления путём изменения конструкции пути и локомотива;
- увеличение коэффициента сцепления изменением физических характеристик пятен контакта колеса и рельса.

Проведен обзор существующих методов, посвященных исследованиям влияния магнитного поля на фрикционное взаимодействие металлических тел, позволивший определить, что для стальных поверхностей внешнее магнитное поле изменяет характер коэффициента трения, в частности улучшает коэффициент сцепления колеса с рельсом. Установлена эффективность использования экспериментальных исследований в указанной области с применением специализированных стендов. Анализ совокупности исследований в области усиления сцепления колес локомотивов с рельсами, а также методов изучения влияния различных физических процессов на трибологические характеристики пары «колесо-рельс» позволил сформулировать цели диссертационной работы, а также поставить ее задачи.

Во **втором разделе** приведены результаты экспериментальных исследований влияния магнитного поля на физические свойства стальных образцов, разработано и изготовлено устройство, позволяющее производить намагничивание зоны контакта фрикционных пар, моделирующих колесо и рельс. Использование программного комплекса *Ansys Maxwell* позволило определить величины напряженности магнитного поля в зоне контакта катков в зависимости от угла поворота магнитопроводов (рисунок 1).

Для поиска самой короткой траектории магнитного потока и направления вектора магнитного поля по отношению к зоне контакта катков каткового стенда задано плечо магнитопроводов, которое обозначено как величины $L1$ и $L2$, помимо этого были заданы углы поворота обеих частей магнитопроводов по отношению к горизонтальной оси, она же является осью, расположенной в пятне контакта $\alpha1$ и $\alpha2$; при этом проекции частей магнитопровода $X1$, $X2$ на горизонтальную ось и $Y1$, $Y2$ на вертикальную ось выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} X1(\alpha1) &:= A1B1 \cdot \cos(\alpha1); Y1(\alpha1) := A1B1 \cdot \sin(\alpha1); \\ X2(\alpha2) &:= A2B2 \cdot \cos(\alpha2); Y2(\alpha2) := A2B2 \cdot \sin(\alpha2). \end{aligned} \quad (1)$$

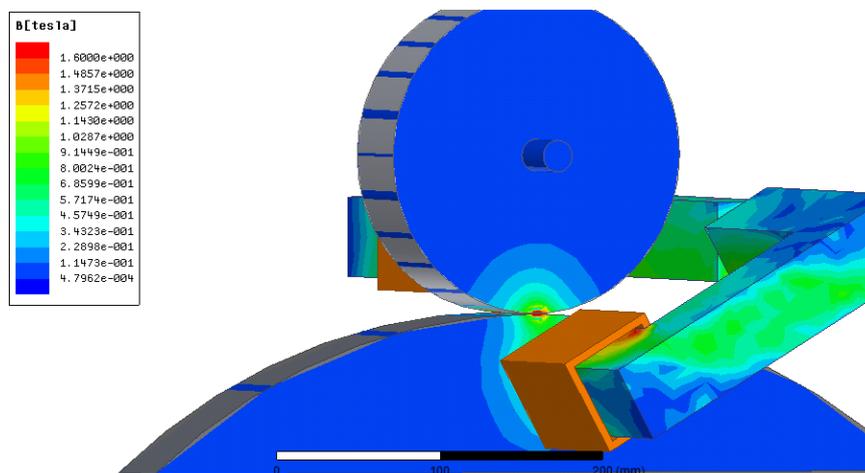


Рисунок 1 – Ориентация вектора и распределение магнитного поля

Определение самой короткой траектории магнитного потока $B1 - B2$ и направление вектора магнитного поля относительно зоны трения катков катковой установки β (в градусах) было получено с помощью выражений:

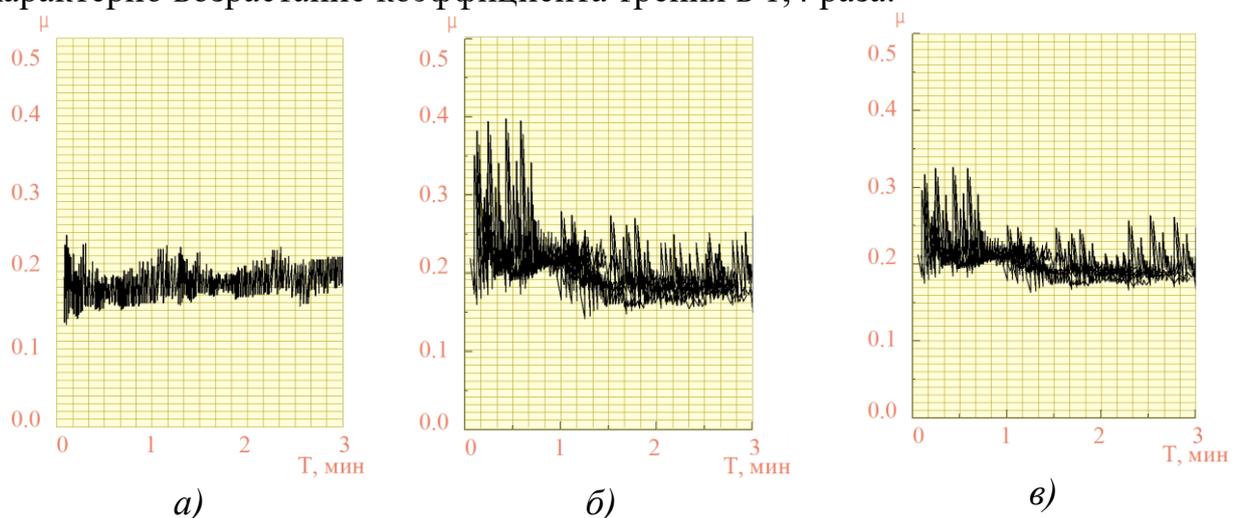
$$B1B2(\alpha1, \alpha2) := \sqrt{h^2 + (X1(\alpha1) - X2(\alpha2))^2 + (Y1(\alpha1) + Y2(\alpha2))^2}, \quad (2)$$

$$\beta(\alpha1, \alpha2) := \arccos \left[\frac{h}{\sqrt{h^2 + (X1(\alpha1) - X2(\alpha2))^2 + (Y1(\alpha1) + Y2(\alpha2))^2}} \right] \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (3)$$

Установлено, что рациональным углом поворота магнитопроводов, обеспечивающим максимальное насыщение зоны контакта колесо-рельс, является поворот на 15° каждой части магнитопровода в противоположные стороны. С учетом полученных результатов была выполнена модернизация специализированного стенда за счет внедрения в его конструкцию устройства для намагничивания зоны трения катковой установки, а также глобального и прецизионного позиционеров, позволяющих менять его положение на стенде.

Проведенные на модернизированном стенде испытания позволили получить зависимости коэффициента трения от времени (рисунок 2), а также выполнить оценку влияния скорости вращения и влияния напряженности магнитного поля на коэффициент сцепления. Определено, что при рациональном размещении намагничивающего устройства, происходит увеличение коэффициента трения:

- при воздействии магнитного поля на зону контакта (рисунок 2, б) максимальное увеличение коэффициента трения было зафиксировано в 1,7 раз;
- после выключения намагничивающего устройства (рисунок 2, в), характерно возрастание коэффициента трения в 1,4 раза.



а – без действия магнитного поля; б – воздействие магнитного поля на зону контакта; в – после воздействия магнитного поля на зону контакта колеса с рельсом

Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения от времени

Усовершенствованная конструкция стенда позволяет приблизить условия проведения эксперимента к реальным условиям эксплуатации подвижного состава, а также выделить влияние отдельных факторов на сцепление в системе «колесо-рельс».

Была проведена оценка влияния электромагнитного поля на физико-механические свойства образцов. Для этого была использована модернизированная установка трения для исследования поверхностных испытаний ферромагнитных образцов.

С помощью установки и серии исследований установлено, что при воздействии магнитного поля на образцы:

- осуществляется диполь-дипольное взаимодействие между образцами;
- дислокации открепляются от точечного дефекта, перемещаются ближе к поверхности металла;
- разрушение окисных плёнок приводит к адгезии;
- происходит перемещение дефектов кристаллической решётки.

Третий раздел посвящен исследованиям конструктивных особенностей магнитных усилителей сцепления колеса локомотива с рельсом.

Составлена четырехуровневая классификация технических решений для магнитных усилителей коэффициента сцепления (МУКС). В процессе составления классификации были использованы различные источники научно-технической информации, в которых были представлены конструктивные особенности известных в настоящее время устройств, способных повышать сцепные свойства контакта «колесо-рельс» при помощи оказываемого воздействия на пятно контакта магнитного поля, другими словами, электромагнитных усилителей сцепления и устройств, способных повысить давление на ось локомотива с использованием создаваемого ими магнитного поля.

Выполнен поиск новых технических решений магнитных усилителей сцепления с использованием объектной модели и разработанной классификации конструктивных особенностей МУКС.

Произведен анализ рационального расположения электромагнитных индукторов на экипажной части локомотива. В качестве критериев при определении рационального варианта были выбраны: безопасность; ремонтпригодность; унификация конструкции; пространство для размещения электромагнита; энергоэффективность; вписывание в габарит. По результатам анализа наиболее перспективным был выбран вариант с размещением электромагнитного индуктора перед первой колесной парой по ходу движения.

При выполнении расчёта магнитной системы главной целью является определение величины магнитного поля на участке магнитной цепи. На этапе предварительного расчёта достаточно использование упрощённых моделей.

Выполнен анализ материалов, позволивший выбрать ферромагнитный материал для сердечника электромагнитного индуктора. На рисунках 3, 4 представлены кривые намагничивания материалов, примененных в данной работе.

Для оценки эффективности предложенного варианта конструктивного исполнения магнитного усилителя коэффициента сцепления с использованием конечно-элементного программного комплекса была разработана его электромагнитная модель (рисунки 5, 6).

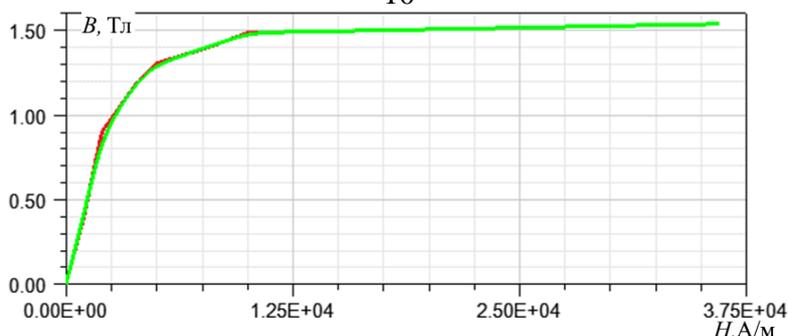


Рисунок 3 – Кривая намагничивания колеса и рельса

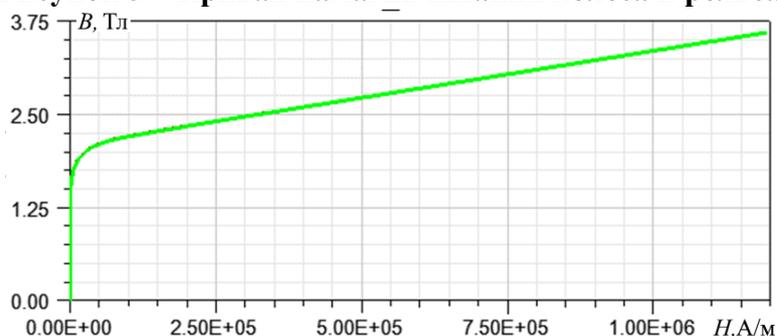


Рисунок 4 – Кривая намагничивания магнитопровода

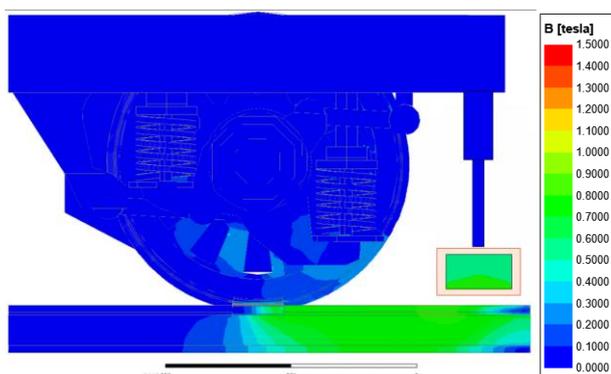


Рисунок 5 – Концентрация магнитного поля при зазоре 30 мм

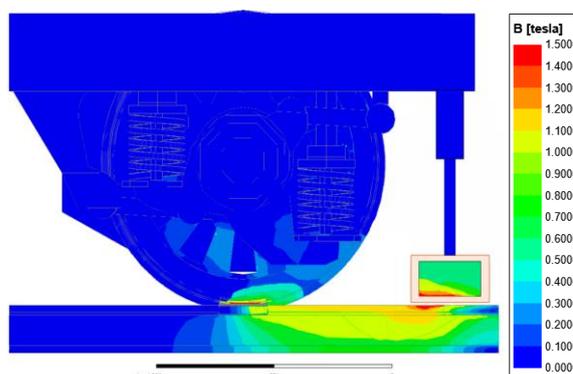


Рисунок 6 – Концентрация магнитного поля при зазоре 15 мм

Которая позволила установить зависимость влияния величины воздушного зазора между элементами индукторного устройства и рельсовым полотном на распределение магнитного поля в пятне контакта колеса и рельса. За счёт уменьшения воздушного зазора от 30 мм до 15 мм можно обеспечить увеличение магнитной индукции в пятне контакта от 0,9 до 1,0 Тл (рисунок 7), что позволит добиться наименьших потерь магнитного потока в экипажной части.

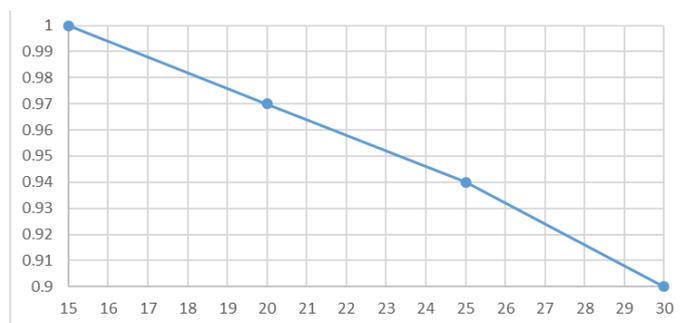


Рисунок 7 – Индукция между колесом и рельсом в зависимости от зазора между магнитопроводом и рельсом

Анализ полученных данных указывает на то, что использование МУКС позволяет увеличить сцепление колеса с рельсом, и в свою очередь противодействует возникновению ползунов на поверхностях колеса при юзе. Также при этом уменьшается вероятность проскальзывания при трогании и движении в гору. Указанные эффекты улучшают тяговые качества локомотива и позволяют максимально эффективно использовать тяговые свойства. Не менее значимым преимуществом предложенной конструкции является снижение стоимости ремонта ходовой части локомотива.

В четвертом разделе приведены результаты оценки эффективности технических решений устройств предотвращения буксования построенных на платформе магнитных усилителей коэффициента сцепления.

Разработка системы увеличения коэффициента сцепления колеса и рельса требует наличия информативных данных о характере влияния динамических характеристик локомотива на эффективность системы. Необходимость проведения значительного объема многовариантных расчетов для вновь проектируемых сложных электромеханических систем определяет выбор математического моделирования в качестве метода исследования. В качестве инструмента для реализации указанного метода выбран программный комплекс моделирования динамики систем тел «Универсальный механизм».

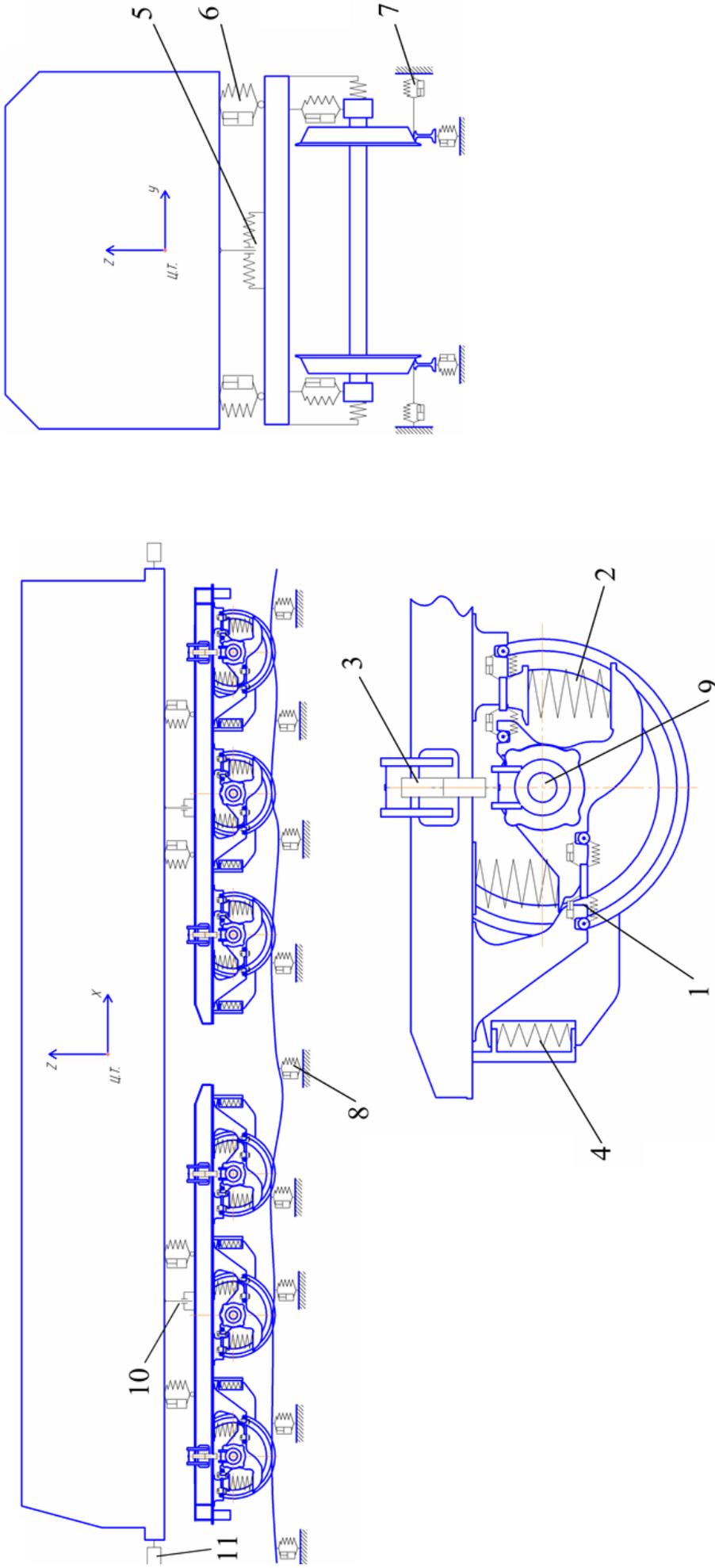
Оценка работоспособности и эффективности, предложенной противобуксовочной системы, выполнена методами твердотельного математического моделирования. В качестве объекта исследования принят магистральный грузовой двухсекционный тепловоз с электрической передачей переменного тока 2ТЭ25КМ производства АО «УК «БМЗ».

Для этого в среде программного комплекса разработана динамическая модель секции тепловоза сформированная с использованием метода подсистем. Модель сформирована из абсолютно твердых тел, связанных шарнирами и силовыми элементами. Структурная схема динамической модели секции тепловоза представлена на рисунке 8.

На ее основе сформирована модель поезда, состоящего из двух секций локомотива, трёх пространственных твердотельных моделей полувагонов, а также 27 упрощенных моделей полувагонов, описанных с использованием функционала модуля *UM Train* программного комплекса «Универсальный механизм».

Достоверность результатов, получаемых с использованием предложенной модели, подтверждена удовлетворительной сходимостью данных математического моделирования с данными натурных ходовых испытаний.

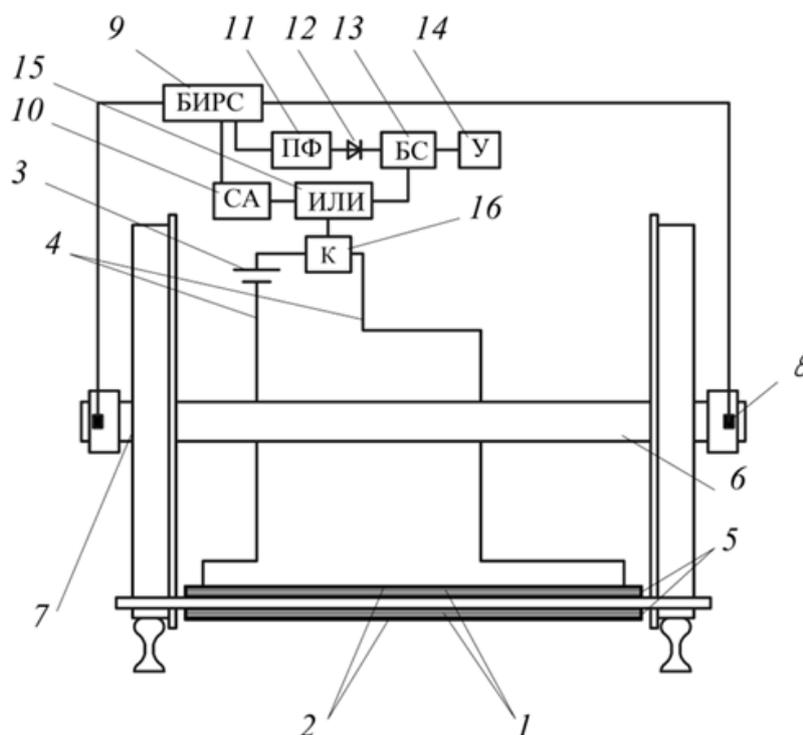
На основе разработанной системы МУКС предложено противобуксовочное устройство, позволяющее в автоматическом режиме определять момент начала буксования и производить его ликвидацию при помощи усиления сцепления за счет создания магнитного поля в зоне контакта колеса с рельсом. В качестве основного информативного признака для предупреждения буксования в устройстве приняты продольные ускорения буксы. Функциональная блок-схема устройства представлена на рисунке 9.



1 – вращательный шарнир и упруго-диссипативные элементы, учитывающие свойства резино-металлического шарнира; 2 – линейный силовой элемент, моделирующий пружину буксовой ступени подвешивания; 3 – диссипативный линейный силовой элемент, моделирующий гаситель колебаний; 4 – линейный силовой элемент, моделирующий подвешивание тягового электроподвижателя на раму тележки; 5 – линейный силовой элемент, передающий усилие в поперечном направлении моделирующий пружину шкворневой балки; 6 – упруго-диссипативные элементы; 7 – упруго-диссипативный элемент, моделирующий упругие свойства рельсового полотна в горизонтальной плоскости; 8 – упруго-диссипативный элемент, моделирующий свойства рельсового полотна в вертикальной плоскости; 9 – вращательный шарнир, описывающий буксу; 10 – контактный и силовой элемент передачи усилия в продольном направлении между кузовом и рамой тележки через шкворень; 11 – подсистема «сценное устройство»

Рисунок 8 – Структурная схема динамической модели секции тепловоза

Достоинством предложенного противобуксовочного устройства является подача в катушку тока только при появлении возможности буксования колес. Это позволяет снизить расход энергии на питание катушки и на преодоление дополнительного сопротивления движению, вызванного вихревыми токами в движущихся частях экипажной части локомотива.



1 – обмотка; 2 – катушка; 3 – источник питания; 4 – провод; 5 – магнитопровод; 6 – ось;
7 – колесная пара; 8 – датчик продольных ускорений; 9 – блок измерения разности сигналов;
10 – статистический анализатор сигналов; 11 – полосовой фильтр; 12 – выпрямитель; 13 – блок
сравнения; 14 – блок уставки; 15 – логический элемент; 16 – ключ

Рисунок 9 – Функциональная блок-схема устройства предотвращения буксования

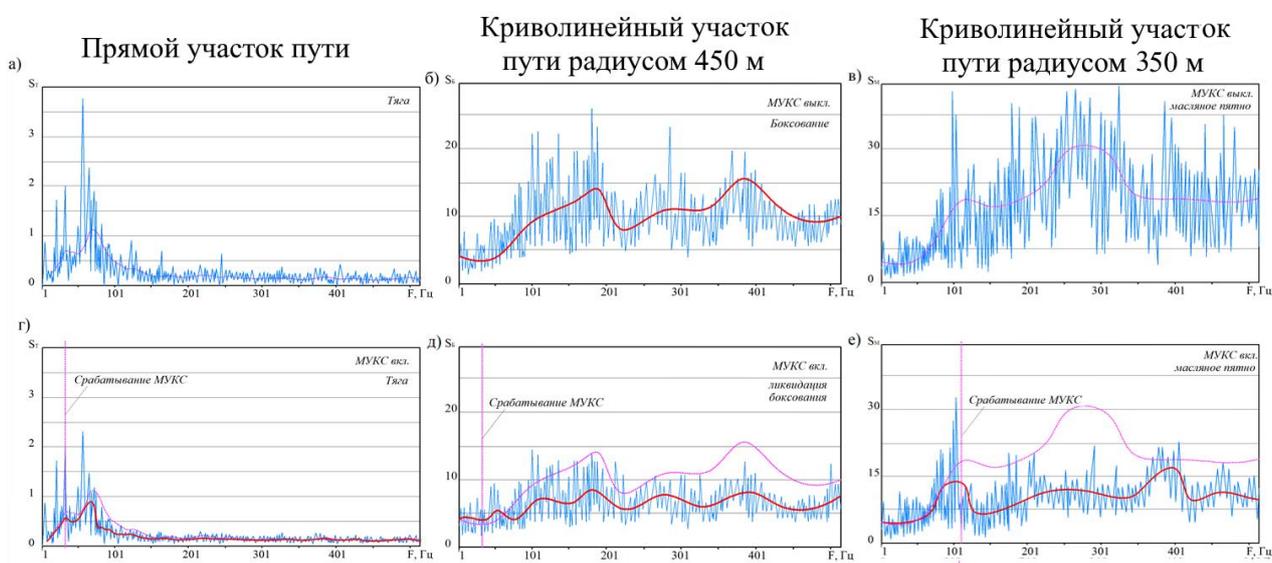
В программном пакете *Matlab Simulink* была составлена схема управления устройством предупреждения буксования, соответствующая рисунку 9. Используя модуль *UM Control* программного комплекса «Универсальный механизм», схема управления была интегрирована в компьютерную модель локомотива, оборудованного МУКС. При моделировании на каждом шаге интегрирования данные о продольных ускорениях буксы локомотива передаются из модуля *UM Loco* в импортированную из *Mathlab Simulink* схему управления устройством предотвращения буксования. При этом система регулирования подает сигнал на ключ, замыкающий цепь питания МУКС и намагничивающий ток индукторов для поддержания сцепления за счёт усиления коэффициента трения между поверхностями колеса и рельса. В качестве обратного сигнала в модуль *UM Loco* передаётся соответствующее значение коэффициента сцепления, обеспеченного работой МУКС. Аналогичный процесс повторяется на каждом шаге интегрирования.

Оценка эффективности работы предложенной системы проводилась на основе моделирования трогания с места и движения описанной выше модели железнодорожного состава на прямом и криволинейных участках пути на чистых и

загрязненных рельсах с включенной и выключенной системой предотвращения буксования.

В качестве примера на рисунке 10 представлены спектры изменения ускорений буксы в различных частотных диапазонах для режимов тяги и буксования, полученные на прямолинейных и криволинейных участках пути, в кривых радиусами 350 и 450 м. На графиках резкое возрастание амплитуд ускорений объясняется продольными колебаниями буксы на поводках.

Анализ данных показывает, что с момента срабатывания устройства предупреждения буксования и начала буксования, сигнал передается на ключ, который в свою очередь выполняет замыкание цепи на индукторное устройство, с этого момента активируется МУКС, который ликвидирует буксования. На графиках же заметно значительное снижение частот колебаний, что свидетельствует о повышении коэффициента трения в зоне контакта системы «колесо-рельс».



*а – тяга; б – буксование; в – буксование при наезде на масляное пятно; г – тяга с включённым МУКС; д – ликвидация буксования при срабатывании МУКС; е – срабатывание МУКС при наезде на масляное пятно
 - - - - линия тренда; — — — — линия тренда при срабатывании МУКС*

Рисунок 10 – Спектры сигналов переходного процесса от тяги к буксованию при разных условиях

Ввиду нелинейности коэффициента сцепления установлено, что при использовании МУКС его значение увеличивается в пределах от 0,019 до 0,0776 по сравнению с исходным и позволяет достигнуть величины коэффициента сцепления $\psi=0,497$.

Анализ полученных результатов указывает на безопасность, работоспособность и эффективность предлагаемой системы предотвращения буксования. Включение предложенной системы управления МУКС позволяет обеспечить увеличение коэффициента сцепления на 23,2 % и исключить возникновение буксования.

Таким образом, предложенная в работе система предотвращения буксования, построенная на основе МУКС, позволяет обеспечить улучшение тяговых характеристик и безопасную эксплуатацию локомотива без подачи

песка в зону контакта колеса с рельсом. Это, в свою очередь, позволяет снизить эксплуатационные затраты, связанные с износом колес и рельсов, а также стоимость жизненного цикла локомотива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Исследованы методы повышения коэффициента сцепления колес локомотива и рельса, проведен анализ их достоинств и недостатков, позволивший принять в качестве рационального метода введение магнитного поля в зону контакта колеса с рельсом.

2 Разработано и изготовлено устройство для намагничивания зоны трения катковой установки, позволившее установить, что изменением положения магнитопроводов можно менять ориентацию вектора магнитного поля, что обеспечивает увеличение коэффициента трения в зоне контакта до 1,7 раза при воздействии магнитного поля и до 1,4 раза после намагничивания.

3 Экспериментально установлено, что при воздействии магнитного поля на образцы происходит изменение микроструктуры материала, обусловленное перемещением дефектов кристаллической решётки, изменением спинового слоя системы, а также откреплением дислокаций от точечного дефекта, перемещающегося ближе к поверхности металла.

4 Предложена методика определения патентоспособных решений магнитных усилителей коэффициента сцепления на основе объектной модели технических решений и разработанной классификации конструктивных особенностей МУКС.

5 Обоснована схема размещения элементов магнитного усилителя коэффициента сцепления на существующем тяговом подвижном составе. Установлена зависимость влияния величины воздушного зазора между индуктором и рельсом на распределение магнитного поля в зоне контакта колеса и рельса. За счёт уменьшения воздушного зазора от 30 мм до 15 мм можно добиться увеличения магнитной индукции в пятне контакта от 0,9 до 1,0 Тл, что позволит добиться наименьших потерь магнитного потока в экипажной части.

6 Предложена принципиальная схема устройства предупреждения и предотвращения буксования, построенная на базе магнитных усилителей коэффициента сцепления.

7 Подтверждена работоспособность и эффективность системы предотвращения буксования. Её применение обеспечивает увеличение коэффициента сцепления до 23,2 % при трогании с места. Достоверность полученных результатов подтверждена удовлетворительным соответствием данных математического моделирования и натурных ходовых испытаний тепловоза 2ТЭ25КМ.

8 Перспективной дальнейшей разработки темы является исследование возможности построения магнитных усилителей коэффициента сцепления на основе использования импульсного магнитного поля, а также создания противобуксовочных систем для вновь разрабатываемых конструкций тягового подвижного состава.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

а) в рецензируемых научных изданиях:

1 **Маслов, М.А.** Выбор объектной модели тягового привода локомотива / М.А. Маслов, В.И. Воробьев, О.В. Измеров // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – № 6 (59). – С. 69–75.

2 **Маслов, М.А.** Классификация динамических явлений в тяговом приводе локомотива / М.А. Маслов, Д.Я. Антипин, Д.А. Бондаренко, О.В. Измеров // Известия Транссиба. – 2016. – № 3(27). – С. 17–23.

3 **Маслов, М.А.** Устройство для исследования влияния магнитного поля на характеристики пар трения "колесо - рельс" / М.А. Маслов, Д.Я. Антипин, В.И. Воробьев, В.О. Корчагин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2020. – № 1(86). – С. 34–39.

4 **Маслов, М.А.** Применение объектной модели для конструирования тягового привода локомотива / М.А. Маслов, А.С. Космодамианский, Д.Я. Антипин, Д.Н. Шевченко // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 10(83). – С. 39–47.

б) в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus:

5 **Maslov, M.A.** Improving the construction of magnetic clutch amplifiers of locomotive wheels with rails / M.A. Maslov, D.Y. Antipin, V.I. Vorobiev // Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018: Lecture notes in mechanical engineering, Москва, 15–18 мая 2018 года. – Москва: Springer International Publishing, 2019. – P. 2331–2338.

6 **Maslov, M.A.** Determination of Magnetization Efficiency of Wheel-Rail Contact Zone / M.A. Maslov, D.Y. Antipin, V.O. Korchagin // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019): Conference proceedings. Series: Lecture Notes in Mechanical Engineering (LNME), Sochi, 25 – 29 марта 2019 года. – Cham: Springer International Publishing, 2020. – P. 669–675.

в) зарегистрированные объекты интеллектуальной собственности:

7 Пат. 196905 U1 Рос. Федерация: МПК В61С 15/08. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / В.И. Воробьев, О.В. Измеров, **М.А. Маслов** [и др.]; заявитель и патентообладатель Космодамианский Андрей Сергеевич. – № 2019117486: заявл. 05.06.19: опубл. 19.03.20. Бюл. № 8. – 5 с.

8 Пат. 167614 U1 Рос. Федерация: МПК В61С 15/08. Устройство для предотвращения буксования локомотива / В.И. Воробьев, Д.Я. Антипин, А.А. Пугачев, **М.А. Маслов** [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет" – № 2016117353 : заявл. 04.05.2016: опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. – 9 с.

9 Пат. 186191 U1 Рос. Федерация: МПК В61С 15/08. Устройство для предотвращения буксования локомотива / В.И. Воробьев, **М.А. Маслов**, С.О. Копылов [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет". – № 2018114134 : заявл. 17.04.2018: опубл. 11.01.2019 Бюл. № 2 . – 9 с.

10 Пат. 171138 U1 Рос. Федерация: МПК В61С 15/04, В61С 15/08. Устройство для увеличения давления колес транспортного средства на рельсы / В.И. Воробьев, Д.Я. Антипин, **М.А. Маслов** [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет". – № 2016124242 : заявл. 17.06.2016 : опубл. 22.05.2017 Бюл. № 15 . – 6 с.

11 Пат. 172641 U1 Рос. Федерация: МПК В61С 15/08, В60L 15/20. Устройство для предотвращения буксования локомотива / Д.Я. Антипин, В.И. Воробьев, **М.А. Маслов** [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет". – № 2016117354 : заявл. 04.05.2016 : опубл. 18.07.2017 Бюл. № 20 . – 6 с.

12 Пат. 172435 U1 Рос. Федерация: МПК В61С 15/08. Устройство для предотвращения буксования локомотива / Д.Я. Антипин, В.И. Воробьев, **М.А. Маслов** [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет". – № 2016117355 : заявл. 04.05.2016 : опубл. 07.07.2017 Бюл. № 19 . – 6 с.

13 Пат. 172474 U1 Рос. Федерация: МПК В61С 15/08. Устройство для предотвращения буксования локомотива / Д.Я. Антипин, В.И. Воробьев, **М.А. Маслов** [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет". – № 2016112635 : заявл. 04.04.2016 : опубл. 11.07.2017 Бюл. № 20 . – 6 с.

14 Пат. 183797 U1 Рос. Федерация: МПК В61С 15/08, В60L 15/20. Устройство для предотвращения буксования локомотива / В.И. Воробьев, Д.Я. Антипин, **М.А. Маслов** [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет". – № 2016145170 : заявл. 17.11.2016 : опубл. 02.10.2018 Бюл. № 20 . – 6 с.

15 Пат. 185447 U1 Рос. Федерация: МПК В61С 15/08. Устройство для обнаружения начала буксования колесных пар локомотива / В.И. Воробьев, Д.Я. Антипин, **М.А. Маслов** [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет". – № 2017120585 : заявл. 13.06.2017 : опубл. 05.12.2018 Бюл. № 34 . – 13 с.

16 Пат. 187010 U1 Рос. Федерация: МПК В61С 15/08, В60В 39/10. Устройство для увеличения сцепления колес локомотива с рельсами / Д.Я. Антипин, В.И. Воробьев, **М.А. Маслов** [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет". –: заявл. 02.11.2017 : опубл. 13.02.2019 Бюл. № 5 . – 8 с.

17 Пат. 187030 U1 Рос. Федерация: МПК В61С 15/08. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / Д.Я. Антипин, В.И. Воробьев, **М.А. Маслов** [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО "Брянский государственный технический университет". – № 2017138305 : заявл. 02.11.2017 : опубл. 14.02.2019 Бюл. № 5 . – 8 с.

18 Пат. 196092 U1 Рос. Федерация: МПК В61С 15/08. Устройство для обнаружения начала буксования колесных пар локомотива и его ликвидации / В.И. Воробьев, **М.А. Маслов**, О.В. Измеров [и др.]. патентообладатель:

Космодамианский Андрей Сергеевич. – № 2019108797 : заявл. 27.03.2019: опубл. 17.02.2020. Бюл. 5. – 8 с.

19 Пат. 202706 U1 Рос. Федерация: МПК В61С 15/08. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, **М.А. Маслов** [и др.]. патентообладатель: Космодамианский Андрей Сергеевич. – № 2020132322: заявл. 01.10.2020 : опубл. 03.03.2021. Бюл. № 5 . – 8 с.

20 Пат. 202349 U1 Рос. Федерация: МПК В61С 15/08, В60L 3/10. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, **М.А. Маслов** [и др.]: патентообладатель: Космодамианский Андрей Сергеевич. – № 2020134875: заявл. 23.10.2020: опубл. 12.02.2021. Бюл. №5. – 9 с.

г) в других изданиях и материалах конференций:

21 **Маслов, М.А.** Применение предлагаемых алгоритмов для создания концепции энергосберегающего тягового привода / М.А. Маслов // Новые горизонты: VIII научно-практическая конференция с международным участием. Сборник материалов и докладов, Брянск, 20 марта 2021 г.– С. 101–105.

22 **Маслов, М.А.** Вопросы применения магнитных усилителей сцепления на локомотивах / М.А. Маслов, В.И. Воробьев // Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике: сборник научных трудов 3-й Международной научно-технической конференции. – 2021. – С. 188–191.

23 **Маслов, М.А.** Разработка концепции энергосберегающего тягового привода локомотива / М.А. Маслов // Современные проблемы железнодорожного транспорта : Сборник трудов по результатам международной интернет-конференции, Москва, 07 апреля 2020 г. – С. 348–353.

24 **Маслов, М.А.** Устройство для моделирования трения колеса с рельсом на катковой установке в условиях намагничивания / М.А. Маслов, В.О. Корчагин, В.И. Воробьев // Современные проблемы железнодорожного транспорта: Сборник трудов по результатам международной интернет-конференции, Москва, 07 апреля 2020 г. – С. 569–573.

25 **Маслов, М.А.** Выбор объектной модели устройства для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / М.А. Маслов // Новые горизонты: Материалы VII научно-практической конференции с международным участием, Брянск, 20 марта 2020 г. – С. 99–103.

26 **Маслов, М.А.** Совершенствование конструкции магнитных усилителей сцепления колёс локомотива с рельсами при осевом расположении индуктора / М.А. Маслов // Новые горизонты : Материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию БГТУ, Брянск, 21 марта 2019 г. – С. 74–79.

27 **Маслов, М.А.** Применение магнитных усилителей сцепления на локомотивах / М. А. Маслов // Совершенствование транспортных машин : Сборник научных трудов / Под редакцией В.В. Рогалева, В.И. Воробьева.

– Брянск: Брянский государственный технический университет, 2019.
– С. 139–144.

28 **Маслов, М.А.** Развитие противобуксовочных систем локомотивов / М.А. Маслов, С.О. Копылов, В.О. Корчагин // Совершенствование транспортных машин : Сборник научных трудов / Под редакцией В.В. Рогалева, В.И. Воробьева. – Брянск : Брянский государственный технический университет, 2019. – С. 75–81.

29 **Маслов, М.А.** Компоновка магнитных усилителей сцепления колёс с рельсами при использовании вспомогательного магнитопровода / М.А. Маслов, В.О. Корчагин, С.О. Копылов // Совершенствование транспортных машин : сборник научных трудов. – 2018. – С. 113–116.

30 **Маслов, М.А.** Повышение энергоэффективности тягового привода подвижного состава железных дорог / М.А. Маслов, А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев // Совершенствование транспортных машин : сборник научных трудов. – 2018. – С. 117–123.

31 **Маслов, М.А.** Устройство для повышения коэффициента сцепления ведущих колёс локомотивов с рельсами / М.А. Маслов, В.И. Воробьев, А.С. Космодамианский, В.О. Корчагин // Совершенствование транспортных машин : сборник научных трудов. – 2018. – С. 49–57.

32 **Маслов, М.А.** Совершенствование конструкции магнитных усилителей сцепления колёс локомотива с рельсами при осевом расположении индуктора / М.А. Маслов, В.О. Корчагин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4. – С. 71–74.

33 **Маслов, М.А.** Стабилизация тяговых качеств локомотивов посредством магнитных усилителей сцепления колёс с рельсами / М.А. Маслов, В.О. Корчагин // Повышение эффективности транспортных машин. – 2017. – С. 149–154.

34 **Маслов, М.А.** Модификация метода простейших технических объектов для серий Патентов оспособных решений узлов локомотива / М.А. Маслов, А.А. Пугачев, А.С. Новиков // Совершенствование транспортных машин : Сборник научных трудов. – 2017. – С. 154–157.

Монография:

35 **Маслов, М.А.** Техническая инновационика как метод поиска рациональных решений узлов тягового подвижного состава / М.А. Маслов, Д.Я. Антипин, В. И. Воробьев [и др.]. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2021. – 215 с.

Учебное пособие

36 **Маслов, М.А.** Системы автоматизированного проектирования оборудования / М.А. Маслов, О.В. Дорофеев, В.И. Воробьев [и др.]. – Орел : Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2018. – 178 с.

Маслов Максим Александрович

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СИСТЕМЫ
ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ БУКСОВАНИЯ ЛОКОМОТИВА ЗА СЧЕТ
ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «__» _____ 202_ г. Формат бумаги 60×90¹/16
Объем 1,5 усл.п.л. Тираж 80 экз. Заказ №

127994, Москва, ул. Образцова, д.9, стр. 9