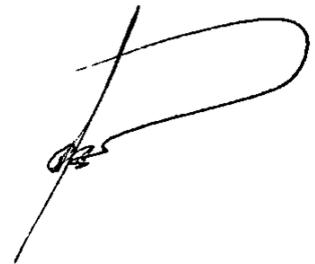


На правах рукописи



Веригин Олег Сергеевич

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВОМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ
КОЛЕСНЫХ ПАР**

Специальность 2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону
2024

Работа выполнена на кафедре «Тяговый подвижной состав» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС)

Научный руководитель *Зарифьян Александр Александрович*
доктор технических наук, профессор кафедры
«Тяговый подвижной состав»
ФГБОУ ВО РГУПС

Официальные оппоненты *Воробьев Александр Алфеевич*
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Наземные транспортно-
технологические комплексы» ФГБОУ ВО
«Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I»

Шепелин Павел Викторович
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Тяговый подвижной состав» ФГБОУ ВО
«Приволжский государственный университет
путей сообщения»

Ведущая организация АО «Научно-исследовательский и
конструкторско-технологический институт
подвижного состава»
АО «ВНИКТИ»

Защита состоится 19 декабря 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 44.2.005.03 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС) по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 (читальный зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 и на сайте <http://www.rgups.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
44.2.005.03
д.т.н., профессор



В. А. Финоченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. В соответствии со «Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» (№ 877-р от 17 июня 2008 г.), прогнозируется увеличение объема грузооборота на железных дорогах страны до 3300 млрд тонно-км, что составляет долю 1,58 раза по сравнению с уровнем 2007 года, принятого в указанном документе за базовый. При этом, среди мероприятий по реализации стратегии указаны такие пункты как:

- разработка локомотивов, в частности – электровозов, нового поколения с увеличением осевой нагрузки;

- общее увеличение наработки локомотива на отказ и, в частности, увеличение ресурса бандажей до 1 млн км.

Значительная доля отказов колесных пар грузовых электровозов связана с проворотами бандажей на колесных центрах. Проворотом является сдвиг бандажа относительно колесного центра вокруг общей для этих элементов оси вращения. Это явление необязательно сопровождается какими-либо повреждениями поверхности катания бандажа или его механическим разрушением, однако делает недопустимой (при повторном провороте в случае грузовых электровозов и при первичном провороте в случае пассажирских электровозов) дальнейшую эксплуатацию электровоза и приводит к простоям на внеплановом ремонте.

Значительная доля отказов в виде проворота бандажа не является следствием некачественного изготовления самого бандажа, применения некачественных материалов, несовершенств конструкции (параметры профиля бандажа) или несоблюдения технологии сборки. Как показано в настоящей работе, проблема проворота бандажа может иметь электромеханическую природу, т. е. являться результатом работы тягового электропривода при различных внешних воздействиях и режимах ведения поезда.

В результате анализа условий и режимов эксплуатации электровозов выявлен ряд внешних воздействий на тяговый электропривод, приводящих к броскам момента тяговых двигателей:

- некорректные действия машиниста;
- отрыв токоприемника от контактного провода;
- броски напряжения в контактной сети;
- срыв колесной пары в боксование и восстановление сцепления колес с рельсами.

Броски момента через тяговую передачу попадают на колесную пару, вызывая динамические нагрузки в соединении колесного центра и бандажа.

Такие воздействия со стороны тягового электропривода, как правило, непродолжительны во времени и часто имеют вероятностный характер проявления. Поэтому, негативный эффект от указанных воздействий может проявиться совместно с другими факторами, приводящими к проворотам. Например, бросок момента тягового двигателя при длительном контакте с

тормозными колодками, т. е. при возникновении в бандаже температурного поля в результате трения.

Разработка методов и компьютерных средств исследования влияния электромеханических процессов на надежность соединения колесного центра и бандажа позволит:

- выполнять оценку эффективности конструкции данного механического узла;
- отработать новые технологии изготовления элементов локомотивных колес;
- исследовать применение новых материалов для изготовления бандажей и новых профилей;
- оценить целесообразность применения различных конструкций колес (бандажных или цельнокатанных) в конкретных условиях работы электровоза.

Степень разработанности проблемы. Исследования в области совершенствования технологии изготовления локомотивных бандажных колес, их технического обслуживания и ремонта проводятся специалистами ведущих отраслевых НИИ и вузов. Большой вклад в данное научно-техническое направление внесли А. В. Бородин, А. П. Буйносов, А. А. Воробьев, А. В. Горский, И. П. Исаев, Д. А. Курасов, А. Н. Никулин, А. В. Обрывалин, В. И. Сакало, А. В. Сухов, Л. В. Ярышева, Г. А. Филиппов, А. А. Шишов и др.

Способы повышения надежности локомотивных колес с точки зрения совершенствования конструкции представлены в исследованиях В. Л. Балдина, А. В. Горского, В. А. Тихонова, Д. Л. Худоярова, П. В. Шепелина и др. Специалистами в данной области рассматриваются такие направления как оптимизация профилей колес, применение материалов с улучшенными характеристиками, конструктивные решения, не предусматривающие прессового соединения колесного центра и бандажа.

Еще одним направлением исследований по повышению надежности локомотивных колес является совершенствование технологий контроля качества изготовления локомотивных колес и их технического состояния в процессе эксплуатации. Среди специалистов, занимающихся разработками в данном направлении В. Беломытцев, Ю. П. Бороненко, Е. М. Бромберг, А. А. Воробьев, Ю. В. Гомонец, Р. Ю. Григорьев, Д. С. Денисов, И. А. Иванов, К. К. Ким, Д. П. Кононов, С. В. Кротов, А. В. Курков, Я. А. Мишин, В. В. Попов, Р. В. Рахимов, Ю. С. Ромен, Р. А. Сахаров, С. В. Урушев и др.

Однако перечисленные области разработок технических решений по повышению надежности локомотивных колес, в том числе и по снижению рисков возникновения проворотов бандажей не учитывают влияние режимов работы тягового электропривода и характер управления электровозом. Данный аспект недостаточно подробно проработан в исследованиях перечисленных авторов.

Цель и задачи исследования. Создание нового подхода к исследованию надежности конструкции колесных пар грузовых электровозов (как

находящихся в настоящее время в эксплуатации, так и перспективных). Суть подхода заключается:

- в рассмотрении переходных процессов в тяговом электроприводе как одной из причин проворота бандажа;

- в учете всех ступеней электромеханического преобразования энергии при возникновении внешнего воздействия, провоцирующего переходный процесс.

Применение разработанного подхода в инженерной практике позволит:

- выполнять более гибкую оценку надежности локомотивных колес в функции режимов работы тягового электропривода;

- повысить показатели надежности электровозов и ресурс колесных пар;

- научно обосновать целесообразность применения колес различной конструкции для электровозов, работающих на участках пути с различным профилем.

Для достижения цели работы необходимо решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать современное состояние исследуемого вопроса в отечественной и зарубежной практике эксплуатации подвижного состава с колесами бандажного типа, подтвердить актуальность выполнения исследований в выбранном направлении.

2. Рассмотреть статистику проворотов бандажей по различным условиям эксплуатации.

3. Определить режимы работы тягового электропривода, при которых могут происходить провороты бандажей в процессе эксплуатации.

4. Разработать математическую модель электрической части тягового электропривода электровоза ЗЭС5К с применением методов теории автоматического управления.

6. Подтвердить адекватность разработанной математической модели по экспериментальным данным, полученным в ходе опытных поездок.

7. Разработать конечноэлементную модель колеса электровоза ЗЭС5К с учетом влияния степени износа бандажа на значение натяга.

8. Выполнить моделирование переходных процессов момента на валу тягового двигателя при:

- некорректных действиях машиниста при задании режима тяги;

- нестационарной работе контактной сети;

- кратковременном отрыве токоприемника от контактного провода;

- срыве колесной пары в боксовании и восстановлении сцепления колес с рельсами.

9. Выполнить компьютерное моделирование работы колесной пары при воздействии смоделированных переходных процессов момента тягового двигателя при различной степени износа бандажа.

10. Сделать выводы о возможности возникновения проворота бандажа при различных нештатных внешних воздействиях с учетом степени износа бандажа.

11. Обосновать целесообразность создания специального исполнения грузового электровоза серии ЗЭС5К «Ермак» для работы на железнодорожных полигонах со сложным профилем пути.

Объектом исследования является грузовой магистральный электровоз серии ЗЭС5К с коллекторными тяговыми двигателями и колесами бандажного типа.

Предметом исследования является надежность работы колесных пар электровоза ЗЭС5К в части возникновения проворотов бандажей.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам научной специальности 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»:

п. 2 (...) Развитие парков локомотивов (...);

п. 4 (...) Улучшение эксплуатационных показателей подвижного состава (...);

п. 6 Улучшение динамических и прочностных качеств подвижного состава

(...) Повышение безопасности движения, обеспечение работоспособности ходовых частей подвижного состава;

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Обоснован подход к исследованию надежности колёсных пар грузовых магистральных электровозов (в части проворотов бандажей) как результата электромеханических процессов в тяговом электроприводе.

2. Создана компьютерная модель тягового электропривода:

- описывающая электрическую часть с учётом нелинейностей основных элементов силовой электрической схемы, влияние на её работу возмущающих воздействий со стороны железнодорожного пути, задания и изменения режимов работы, а также, со стороны контактной сети;

- описывающая механическую часть тягового электропривода в виде конечноэлементной модели колеса в виде системы тел с представлением бандажа колёсной пары в виде упругого элемента;

- позволяющая оценивать возможность возникновения проворота бандажа колёсной пары при совокупном воздействии внешних факторов и учёте режимов работы тягового электропривода;

- позволяющая оценивать возможность возникновения проворота бандажа колёсной пары при учёте степени эксплуатационного износа и количества обточек при восстановлении профиля;

- позволяющая оценивать алгоритмы и способы управления тяговым электроприводом на предмет влияния на надёжность колёсных пар;

- позволяющая исследовать новые конструктивные решения колёсных пар перспективных электровозов на предмет устойчивости к электромеханическим переходным процессам.

3. Получены результаты исследования надёжности колёсной пары с бандажом различной степени износа при возникновении в тяговом электроприводе бросков момента тягового двигателя, вызванных:

- некорректными действиями локомотивной бригады при задании режима работы тягового электропривода;

- бросками напряжения в контактной сети;

- кратковременным отрывом токоприёмника от контактного провода;
- нарушением условий сцепления колес с рельсами.

Практическая ценность исследования заключается в следующем:

1. Установлена степень влияния переходных процессов в тяговом электроприводе электровоза переменного тока на неподвижность соединения колесного центра и бандажа.

2. Разработан метод моделирования процессов силового взаимодействия колесного центра и бандажа при внешних воздействиях на тяговый электропривод: ошибочные действия локомотивной бригады, нестационарные процессы в контактной сети, отрыв токоприемника от контактного провода, изменение условий сцепления колес с рельсами. Разработанный метод позволяет работать как с перечисленными воздействиями по отдельности, так и с их комплексным проявлением, а также позволяет использовать при моделировании как исходные данные, задаваемые исследователем, так и данные реальных поездок.

3. Выполнена оценка степени воздействия электромеханических переходных процессов, вызванных перечисленными выше факторами, на стабильность соединения колесного центра и бандажа в зависимости от степени эксплуатационного износа бандажа и интенсивности воздействия фрикционных тормозов.

4. Дана рекомендация о необходимости создания специального исполнения электровозов серии 2,3,4ЭС5К «Ермак» с предложенной автором конструкцией тягового электропривода электровоза с поосным регулированием силы тяги и механической частью с колесами цельнокатаного типа. Предложенные конструктивные решения тягового электропривода электровоза позволят водить поезда повышенного веса и длины по полигонам железных дорог со сложным профилем пути.

Методы исследования. Модель электрической части тягового электропривода электровоза 3ЭС5К разработана с применением методов теории автоматического управления, теории электрического привода, теории локомотивной тяги и теории электрических цепей. В математической модели учтены нелинейности элементов электрической схемы силовых цепей электровоза.

Модель колеса магистрального грузового электровоза 3ЭС5К разработана в виде конечноэлементного объекта с применением программного комплекса «Универсальный механизм». Данное программное обеспечение разработано профессором Д.Ю. Погореловым при участии сотрудников кафедры «Локомотивы» Брянского государственного технического университета (БГТУ, г. Брянск) под руководством профессора Г.С. Михальченко и сотрудников ОАО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ», г. Коломна) под руководством профессора В.С. Коссова.

Механическая часть представлена в виде совокупности абсолютно жестких тел (ось колесной пары, колесный центр, тяговая передача) и тела,

обладающего свойствами упругости (бандаж). В модели учтено ослабление натяга бандажа совокупно от эксплуатационного износа и от температурного воздействия при длительном фрикционном торможении.

Достоверность и обоснованность научных результатов обеспечена:

- корректностью формулировок задач и построения компьютерных моделей;

- адекватностью примененных методов математического моделирования электромеханических процессов в тяговом электроприводе, а также, процессов управления тяговым электроприводом;

- адекватностью примененных методов математического моделирования силового взаимодействия бандажа и колесного центра.

Это позволяет применить в качестве исходных данных непосредственно результаты экспериментов и/или записи реальных поездок электровоза в процессе его эксплуатации.

Результаты моделирования подтверждаются сравнением с данными реальных поездок электровозов с составом и с результатами опытных поездок на испытательном полигоне.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Научное обоснование необходимости учёта электромеханических переходных процессов в тяговом электроприводе совместно с воздействием фрикционного торможения при исследовании вопросов надежности колесных пар, связанных с поворотами бандажей.

2. Компьютерная модель тягового электропривода грузового электровоза переменного тока, позволяющая выполнять исследования силового взаимодействия колесного центра и бандажа при комплексном воздействии факторов, влияющих на неподвижность их соединения.

3. Результаты исследования неподвижности соединения колёсного центра и бандажа при работе тягового электропривода в нештатных режимах и при различной степени эксплуатационного износа бандажа.

4. Рекомендации по созданию специальных исполнений грузовых электровозов для вождения поездов повышенного веса на железнодорожных полигонах со сложным профилем пути.

Пути реализации актуальных наиболее практически значимых результатов работы представлены в приложениях В, Г, Д к диссертации.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и были одобрены на конференциях, в том числе:

- Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава» (г. Ростов-на-Дону, 2019 г.);

- Международная научно-практическая конференция «Транспорт: наука, образование, производство» (г. Ростов-на-Дону, 2020 г.);

- Международная научно-практическая конференция «Транспорт: наука, образование, производство» (г. Ростов-на-Дону, 2021 г.);

- Международная научная конференция «Механика и трибология транспортных систем» (г. Ростов-на-Дону, 2021 г.).
- Пятый научно-технический семинар «Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ» (г. Брянск, 2022 г.)
- Международная научно-практическая конференция «Транспорт: наука, образование, производство» (г. Ростов-на-Дону, 2023 г.);
- XI Международный симпозиум «Eltrans-2023. «Электрификация и электрическая тяга: цифровая трансформация железнодорожного транспорта»

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 15 печатных работ, из них 6 статей в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, библиографического списка из 155 наименований. Общий объем работы составляет 138 страниц, включая 49 иллюстраций и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована ее цель.

В первой главе проанализировано развитие конструкции колесных пар бандажного типа, применяемых на отечественных электровозах и изменение значений мощностей тяговых электроприводов электровозов различных поколений. Установлено значительное возрастание мощности тяговых двигателей на колесную пару при неизменности конструкции колесных пар.

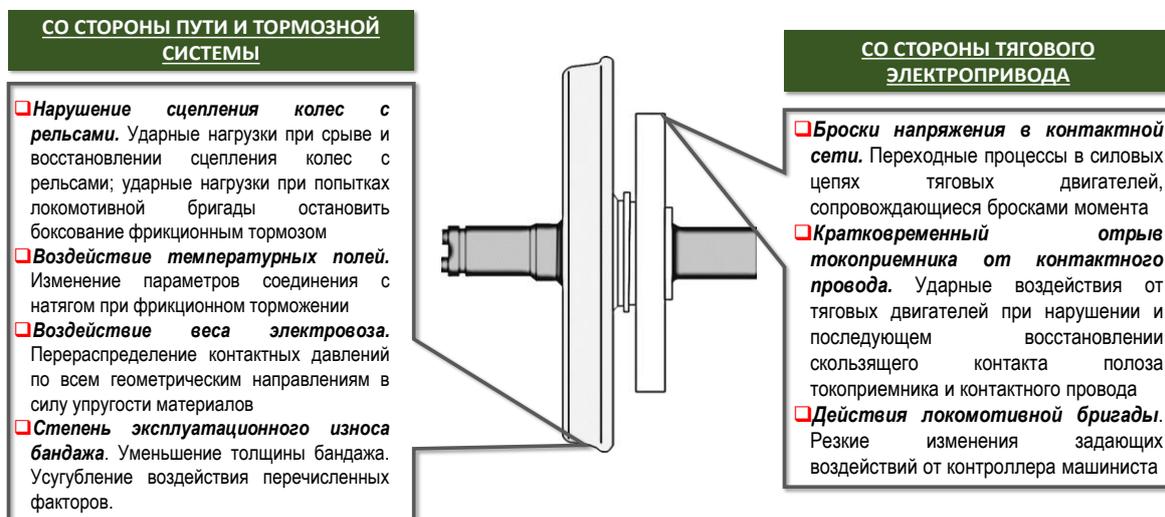


Рисунок 1 - Классификация факторов, воздействующих на фрикционное соединение колесного центра и бандажа

Установлены основные эксплуатационные факторы и режимы работы тягового электропривода, оказывающие значительное влияние на надежность работы механической части электровоза. Схематично классификация приведена на рисунке 1. Показано, что значительное количество этих факторов имеют электромеханическую природу в совокупности с режимами длительного,

экстренного фрикционного торможения или движения при неотпущенных тормозах.

Рассмотрено распределение в различных геометрических направлениях контактных напряжений во фрикционном соединении колесного центра и бандажа при воздействии веса электровоза и момента тягового двигателя, как показано на рисунке 2. Показано изменение распределения контактных напряжений при эксплуатационном износе бандажа.

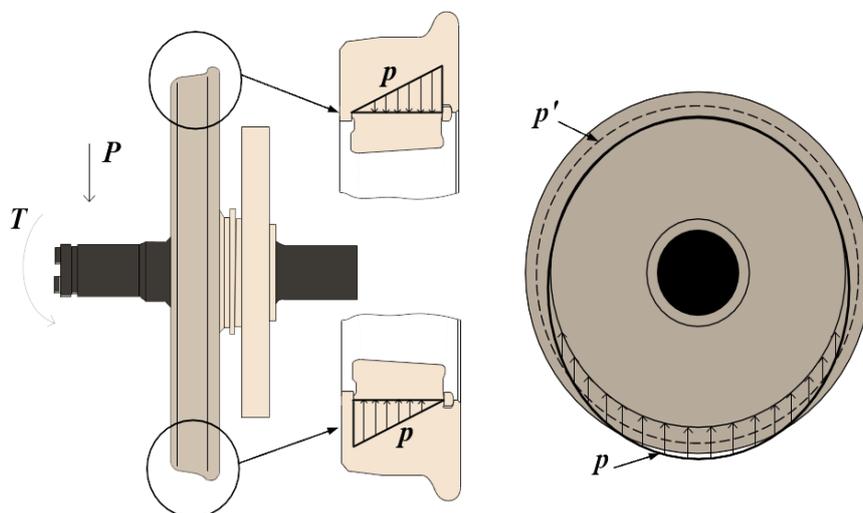


Рисунок 2 – Распределение контактных напряжений в колесе электровоза

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: P – осевая нагрузка электровоза; T – изгибающий момент; p – контактное напряжение; p' – линия распределения контактного напряжения при отсутствии воздействия осевой нагрузки электровоза.

Подробно рассмотрены физические процессы, создаваемые в механической части тягового электропривода перечисленными выше факторами (рисунок 1) и их негативное воздействие на неподвижность фрикционного соединения колесного центра и бандажа. При подробном рассмотрении данных об эксплуатации электровозов в депо приписки определены случаи, вызывающие наиболее тяжелые электромеханические переходные процессы:

- отрыв токоприемника от контактного провода;
- броски напряжения в контактной сети (нестационарные процессы в контактной сети);
- некорректные действия локомотивной бригады (резкое изменение задания на тягу, попытки остановки боксущей колесной пары штатным фрикционным тормозом, несвоевременное обнаружение и устранение неотпуска тормозов при движении в режиме тяги или холодным резервом);
- нарушение условий сцепления колес с рельсами.

Приведены примеры (рисунки 3, 4) повреждений колесных пар магистральных электровозов в условиях реальной эксплуатации при комплексном воздействии рассматриваемых в данной главе факторов.



a)



б)

Рисунок 3 – Эксплуатационные повреждения колес электровозов:
(а) ползун, (б) проворот бандажа



a)



б)

Рисунок 4 – Эксплуатационные повреждения колес электровозов:
(а) поперечная трещина, (б) разрыв бандажа

Проанализирована статистика проворотов бандажей колесных пар магистральных электровозов на основании данных по гарантийным и негарантийным отказам. Данные получены от электровозостроительных, сервисных и эксплуатационных предприятий.

При исследовании статистических данных установлено, что наиболее подвержены проворотам бандажей грузовые электровозы, работающие на участках со сложным профилем пути и выполняющие вождение поездов повышенного веса (рисунок 5).

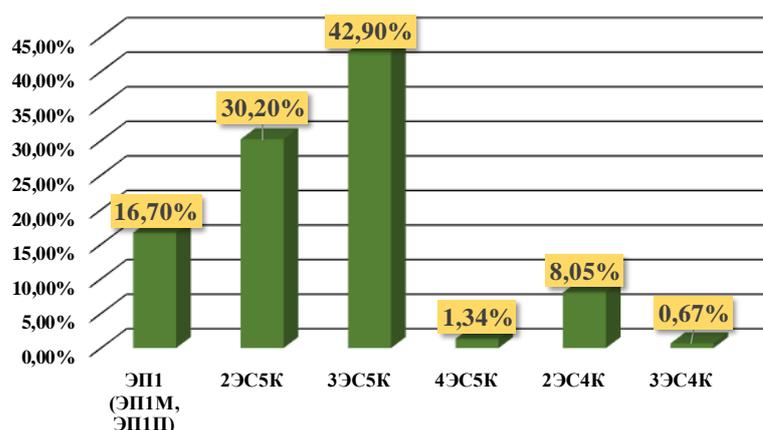


Рисунок 5 – Статистика проворотов бандажей по сериям электровозов

При этом, ярко выраженной зависимости рассматриваемого отказа от сезона эксплуатации на основе статистических данных не выявлено, что проиллюстрировано рисунком 6.

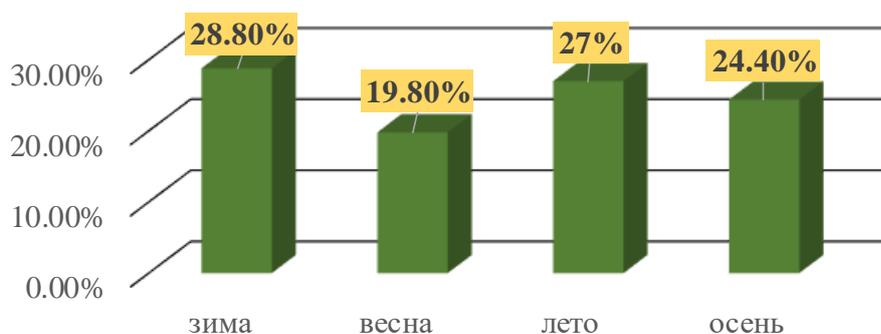


Рисунок 6 – Статистика проворотов бандажей по сезонам эксплуатации

Результат рассмотрения статистики говорит о том, что провороты бандажей являются результатом тяжелых условий ведения поезда с точки зрения его веса и профиля пути, а также режима управления электровозом.

Выполнен обзор научных работ в области повышения надежности колесных пар бандажного типа. Рассмотрены работы таких авторов как: В. Беломытцев, А. В. Бородин, А. П. Буйносов, А. А. Воробьев, Ю. В. Гомонец, А. В. Горский, Д. С. Денисов, И. А. Иванов, И. П. Исаев, Д. П. Кононов, Д. А. Курасов, А. В. Курков, Я. А. Мишин, А. Н. Никулин, А. В. Обрывагин, В. И. Сакало, А. В. Сухов, Г. А. Филиппов, А. А. Шишов, Л. В. Ярышева и др.

Установлено, что современные подходы к повышению надежности колесных пар бандажного типа можно классифицировать на три направления: технология изготовления, технического обслуживания и ремонта колесных пар; совершенствование конструкции колесной пары и ее элементов; контроль качества и технического состояния колесных пар и их составных частей.

Таким образом, показано, что при исследовании вопросов надежности колесных пар бандажного типа не уделено достаточного внимания провороту бандажа как явлению, имеющему в том числе и электромеханическую природу.

Во второй главе разработана математическая модель тягового электропривода электровоза 3ЭС5К, выполнена ее компьютерная реализация и подтверждена адекватность. Математическая модель электрической части тягового электропривода представлена на рисунке 7.

Математическая модель учитывает нелинейные свойства обмоток возбуждения тяговых двигателей и дросселя помехоподавления. Нелинейности учтены в виде аналитических выражений, которые получены методом аппроксимации экспериментальных характеристик указанных элементов. Для аппроксимации применен инструментальный MATLAB/Curve Fitting Toolbox. Представленная на рисунке 7 модель построена для одной тележки электровоза с потележечным регулированием силы тяги. Компьютерная реализация модели выполнена с применением программного обеспечения MATLAB/Simulink. Модель допускает масштабирование до любой составности электровоза.

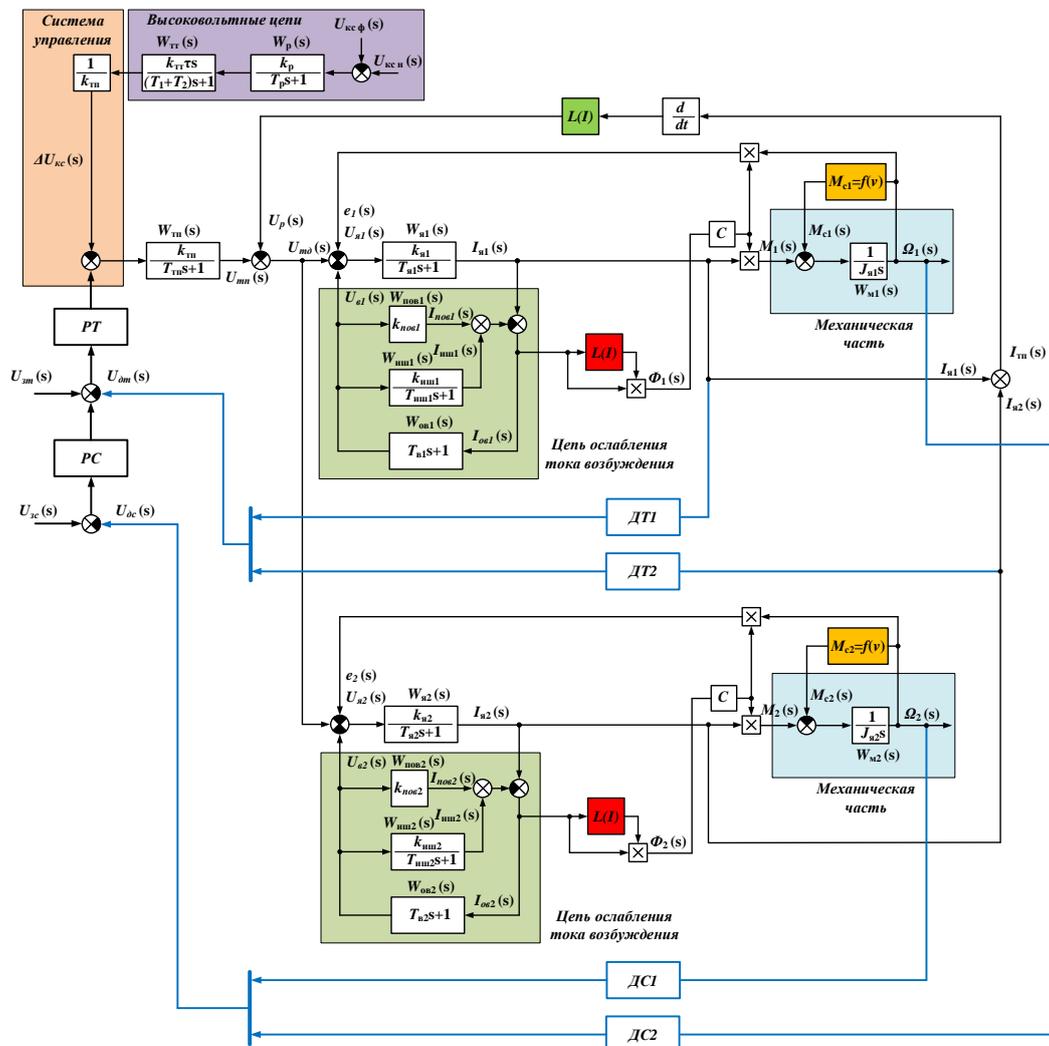


Рисунок 7 – Математическая модель электрической части тягового электропривода электровоза 3ЭС5К

Адекватность модели подтверждена в рамках экспериментальной и эксплуатационной поездок электровоза ЗЭС5К. Экспериментальная поездка выполнялась на испытательном полигоне ООО «ПК «НЭВЗ» (г. Новочеркасск). Эксплуатационная поездка выполнялась по маршруту Красноярск – Иланская. В обоих случаях получена высокая степень соответствия расчетных и экспериментальных данных, что проиллюстрировано рисунками 8 и 9.

При помощи модели электрической части выполняются расчеты переходных процессов в тяговом электроприводе, вызванных определенными выше внешними воздействиями. Результатом моделирования является значение броска момента, сообщаемого от тягового двигателя колесу (с учетом механической передачи).

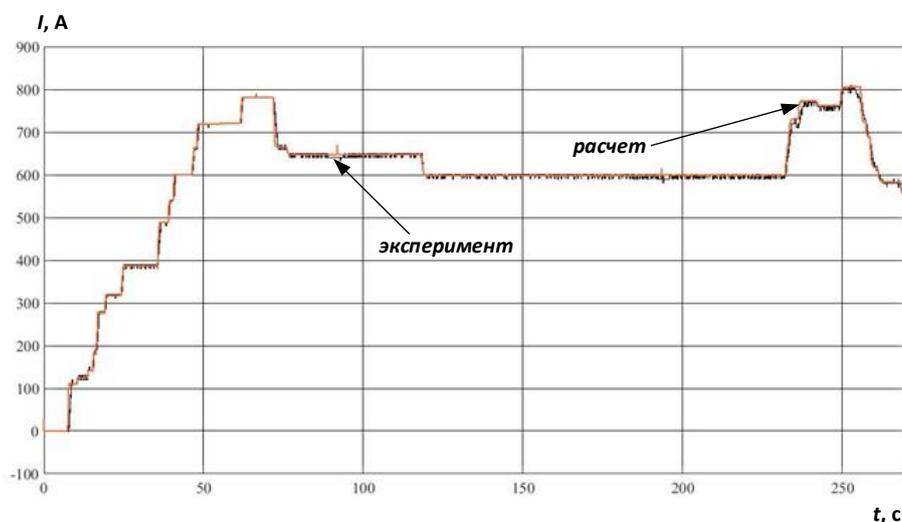


Рисунок 8 – Экспериментальная и расчетная временные диаграммы тока якоря тягового двигателя на испытательном полигоне

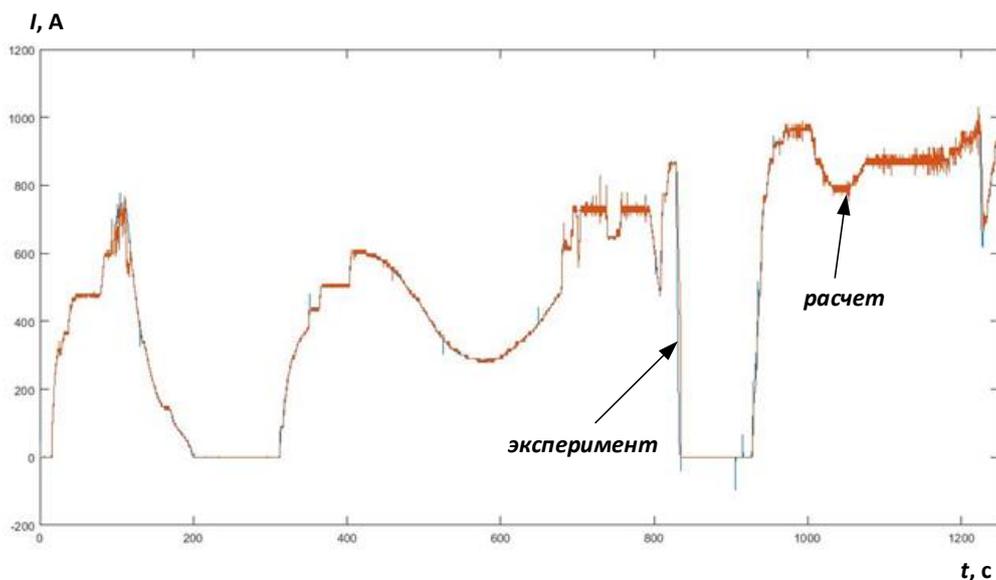


Рисунок 9 – Экспериментальная и расчетная временные диаграммы тока якоря тягового двигателя в условиях реальной эксплуатации

Моделирование механической части выполнено с применением метода конечных элементов и программного обеспечения Универсальный механизм. Механическая часть тягового электропривода в рамках выполняемого исследования представляет собой колесо. Колесо описано как система двух тел: колесного центра с коробчатым сечением и бандажа – в виде кольца прямоугольного сечения. Конечноэлементная модель показана на рисунке 10.

Функциональным назначением конечноэлементной модели механической части является расчет несущей способности соединения колесного центра и бандажа. При этом учитывается степень износа бандажа и ослабление натяга в результате нагревания от воздействия тормозных колодок. Результатом расчета является величина момента, которую колесо способно передавать без сдвига бандажа в заданном техническом состоянии.

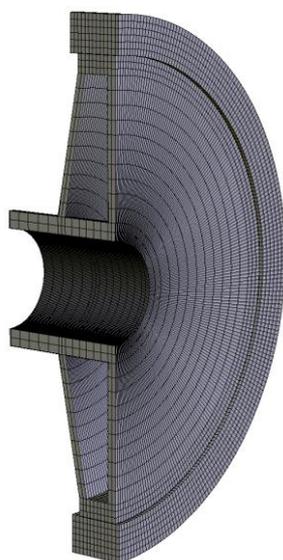


Рисунок 10 – Конечноэлементная модель колеса электровоза 3ЭС5К

В третьей главе выполнено моделирование переходных процессов в тяговом электроприводе, вызванных: некорректными действиями локомотивной бригады; бросками напряжения в контактной сети; кратковременным отрывом токоприемника от контактного провода; нарушением условий сцепления колес с рельсами.

Результатами моделирования являются переходные процессы момента на валу тягового двигателя, по которым выполнена оценка механических нагрузок, возникающих в соединении колесного центра и бандажа. Полученные значения механических нагрузок используются на следующем этапе исследований для определения возможности проворота бандажа.

В качестве экспериментальных данных для подтверждения достоверности результатов моделирования использовались записи реальных поездок электровоза с составом, полученные из штатного регистратора МСУД.

Учитывая пропорциональную зависимость момента тягового двигателя НБ-514 от квадрата тока цепи якоря, достоверность результатов моделирования

момента проверялась сопоставлением расчетных и экспериментальных данных о токе.

На рисунках 11 – 14 приведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных по исследуемым процессам. Высокая степень сходимости результатов моделирования с данными из штатного регистратора МСУД указывает на достоверность результатов моделирования переходных процессов момента тягового двигателя.

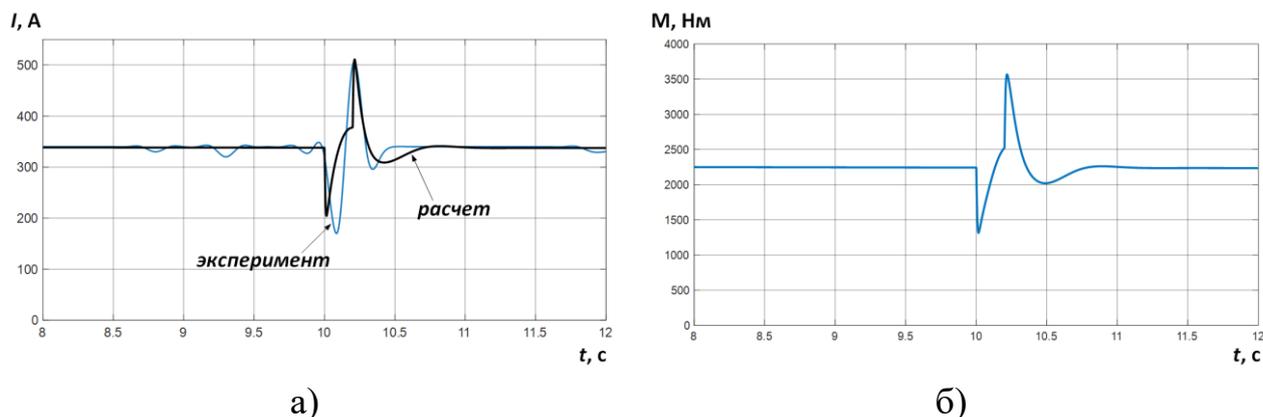


Рисунок 11 – Переходные процессы (а) тока и (б) момента тягового двигателя при отрыве токоприемника от контактного провода

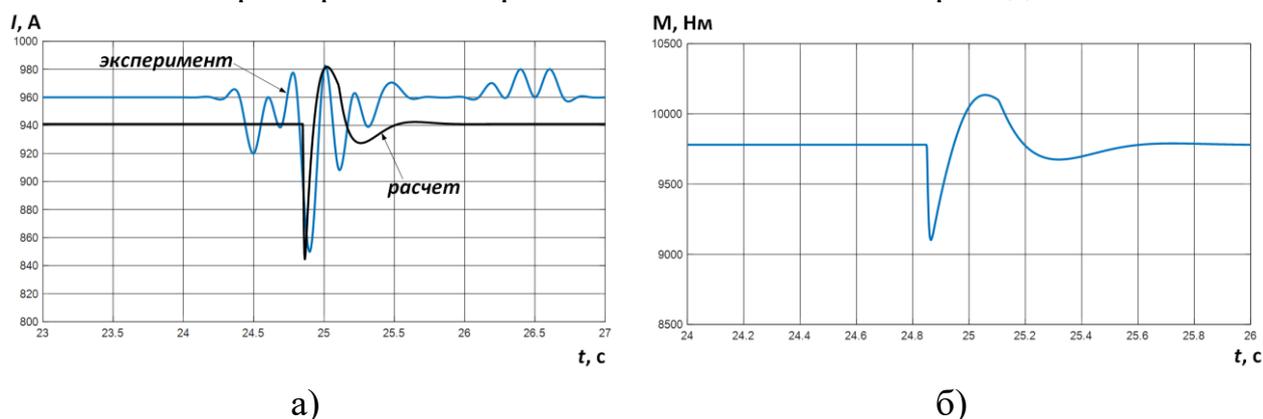


Рисунок 12 – Переходные процессы (а) тока и (б) момента тягового двигателя при броске напряжения в контактной сети

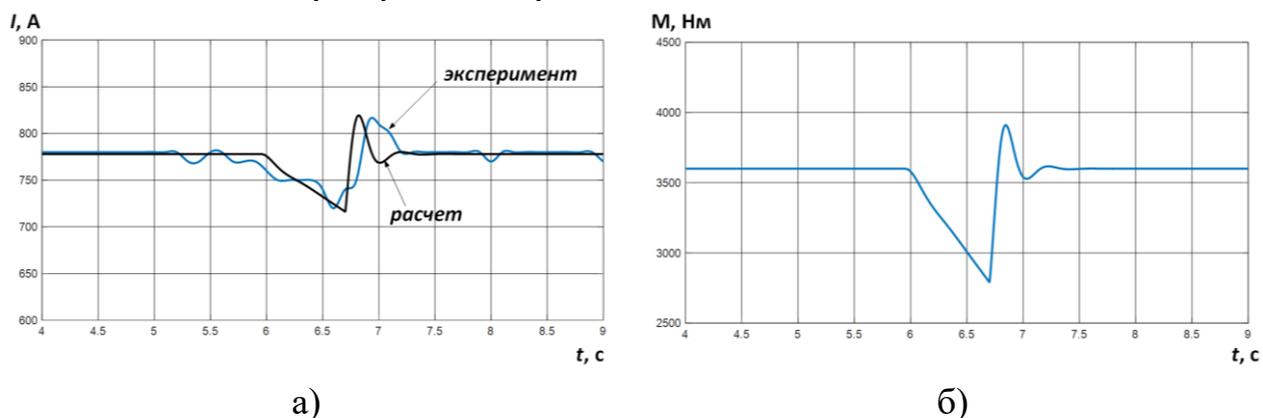


Рисунок 13 – Переходные процессы (а) тока и (б) момента тягового двигателя при срыве колесной пары в боксовании

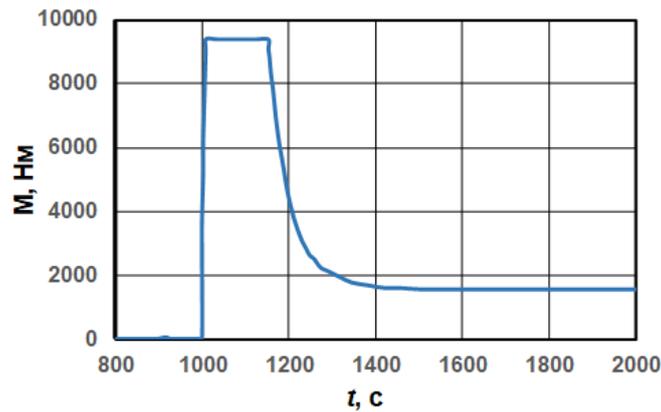


Рисунок 14 – Переходный процесс момента на валу тягового двигателя при некорректных действиях локомотивной бригады

Значения бросков момента для всех рассматриваемых случаев определялись по графикам. Для определения механических нагрузок на колесе значения бросков момента приведены к оси колесной пары по соотношению:

$$\Delta M_{\text{пр}} = \Delta M \cdot i_{\text{ред}}$$

где: $\Delta M_{\text{пр}}$ – значение броска момента, приведенное к оси колесной пары; ΔM – бросок момента на валу тягового двигателя (в соответствии с графиком переходного процесса); $i_{\text{ред}}$ – передаточное отношение тягового редуктора.

Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов механических нагрузок от переходных процессов

№	Внешнее воздействие на тяговый электропривод	$\Delta M_{\text{пр}}$, кНм
1	Кратковременный отрыв токоприемника от контактной сети	9,2
2	Бросок напряжения в контактной сети	5,0
3	Срыв колесной пары в боксование	5,0
4	Некорректные действия локомотивной бригады (резкое повышение задания на тягу на скорости 8 км/ч)	38,5

В четвертой главе выполнено моделирование несущей способности соединения колесного центра и бандажа в зависимости от степени износа последнего и при воздействии рассмотренных выше процессов.

Рассматривалось приложение рассчитанных выше нагрузок при движении электровоза после длительного воздействия фрикционного тормоза (в конце затяжного спуска и при ошибочном срабатывании тормозной системы в режиме тяги). Указанные режимы имеют место в реальной эксплуатации, что подтверждается данными из локомотивных депо.

Ослабление натяга бандажа на колесном центре в зависимости от степени износа и температурного воздействия определялось аналитически в соответствии с ГОСТ 33783-2016 «Колесные пары железнодорожного подвижного состава. Методы определения показателей прочности». При этом степень износа бандажа определялась в расчетах его толщиной, а степень температурного воздействия – длительностью. Помимо ослабления натяга был определен максимальный момент, передаваемый соединением колесного центра и бандажа. Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов несущей способности соединения колесного центра и бандажа

Исследуемый режим	Штатное фрикционное торможение (предельно изношенный бандаж)	Движение в режиме тяги с прижатыми тормозными колодками (новый бандаж)	Движение в режиме тяги с прижатыми тормозными колодками (предельно изношенный бандаж)
Относительное ослабление натяга, %	62	83	112
Максимальный момент, передаваемый фрикционным соединением, кНм	27,1	28,7	25,7

На основании полученных расчетных данных при помощи конечноэлементной модели выполнен расчет несущей способности соединения колесного центра и бандажа. Результаты расчета проиллюстрированы рисунком 15 и сведены в таблицы 3 - 5.

Таблица 3 – Результаты моделирования при штатном фрикционном торможении при предельно изношенном состоянии бандажей

f_0	0,1	0,05	0,02	0,015
M_0 , кН·м	174,2	87,1	34,8	26,1

Таблица 4 – Результаты моделирования при длительном движении электровоза в режиме тяги с прижатыми тормозными колодками и при новом бандаже

f_0	0,1	0,05	0,03	0,02
M_0 , кН·м	134,7	67,4	40,4	26,9

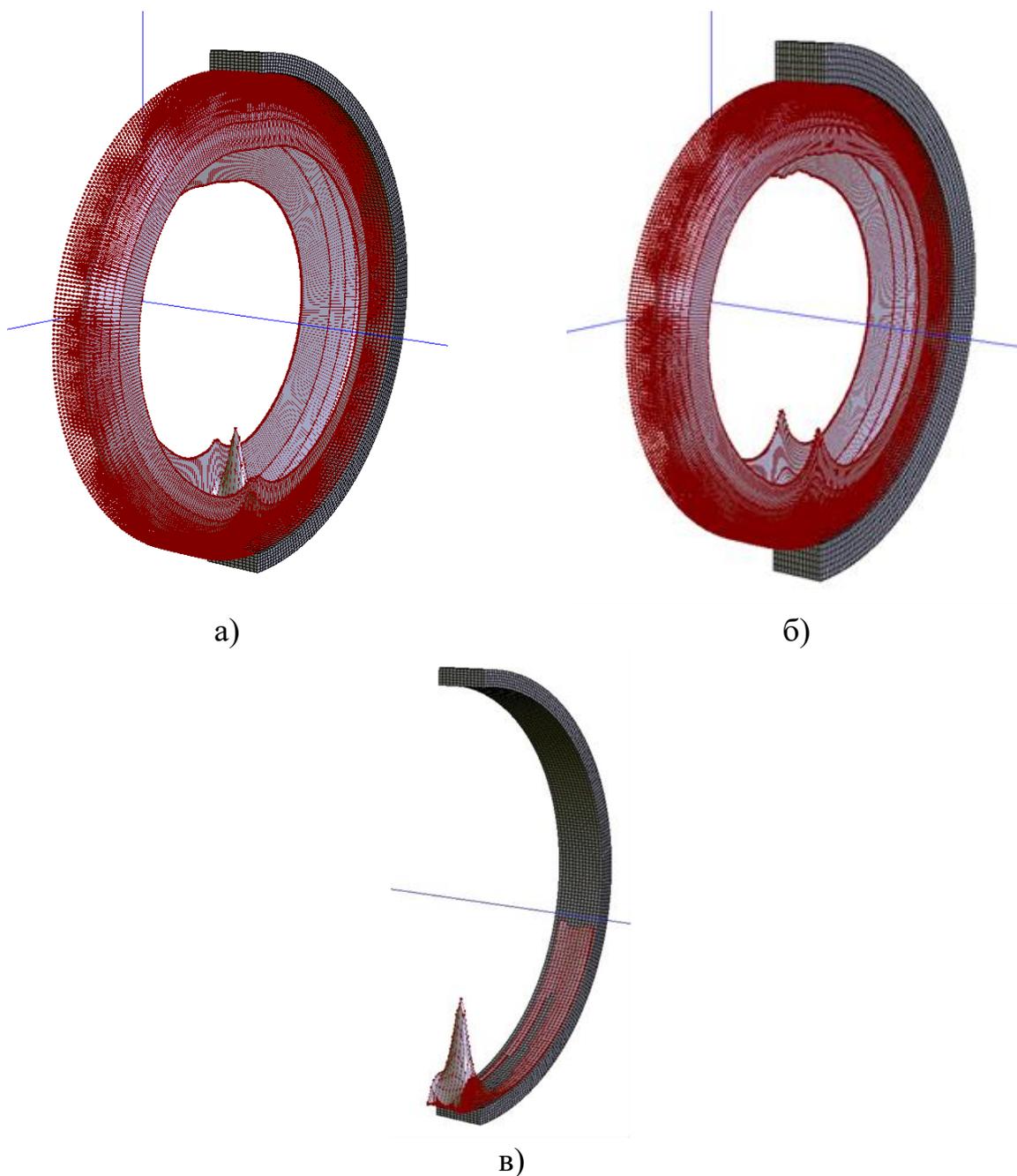


Рисунок 15 – Пространственное распределение контактных напряжений в соединении колесного центра и бандажа при ослаблении натяга
(а) 62 %, (б) 83 %, (в) 112 %

Таблица 5 – Результаты моделирования при длительном движении электровоза в режиме тяги с прижатыми тормозными колодками и при предельно изношенном бандаже

f_0	0,1	0,2	0,3	0,35	0,4
M_0 , кН·м	6,64	13,3	19,9	23,4	26,5

Как видно из представленных данных, помимо режимов, вызывающих различные по интенсивности температурные поля и технического состояния

бандажа, выполнялось варьирование коэффициента трения f_0 между колесным центром и бандажом по поверхности соединения с натягом.

В результате выполненного моделирования при сравнении несущей способности соединения колесного центра и бандажа со значениями момента от тягового двигателя при рассмотренных выше переходных процессах установлено:

- при штатном торможении электровоза (при предельно изношенном состоянии бандажа) проворот бандажа на колесном центре возможен в том случае, если коэффициент трения в соединении составит не более 0,02;
- при длительном движении электровоза в режиме тяги с прижатыми тормозными колодками (при новом бандаже) проворот бандажа на колесном центре возможен в том случае, если коэффициент трения в соединении составит не более 0,02;
- при длительном движении электровоза в режиме тяги с прижатыми тормозными колодками (при предельно изношенном бандаже) проворот бандажа на колесном центре возможен в том случае, если коэффициент трения в соединении составит не более 0,3.

Таким образом, наиболее предрасположенным к возникновению проворота бандажа является режим работы колеса, при котором происходит длительное воздействие температурного поля при значительной степени износа бандажа. В таком случае значение момента, сообщаемого колесной паре при возникновении электромеханических переходных процессов, значительно превышает несущую способность соединения с натягом. При этом соответствующие значения несущей способности соединения колесного центра и бандажа возможны при высоких значениях коэффициента трения по поверхности соединения.

Однако значительно пониженные значения коэффициента трения в рассмотренных случаях не являются показателем невозможности возникновения проворота бандажа. Понижение коэффициента трения является следствием работы фрикционного соединения в условиях вибрационных и ударных нагрузок, а также нагрузок вероятностного характера. Также снижению коэффициента трения могут способствовать степень прилегания сопрягаемых поверхностей, обеспечение необходимых значений шероховатости и геометрических параметров, т. е. качество изготовления деталей и сборки колес.

Подтверждением последнему служит значительное количество случаев проворота бандажей на новых колесах электровозов, в том числе и при транспортировании холодным резервом.

В заключении перечислены результаты и выводы, полученные в диссертационной работе:

1. Разработана компьютерная модель тягового привода для исследования проворота бандажа колес грузового электровоза с применением эксплуатационной информации из реальных поездов, в качестве которой можно применить:

- записи из файлов регистратора МСУД;

- записи поездок, выполненные системами автоматизированного ведения поезда, такими как УСАВП-Г или ИСАВП-РТ (для электровозов, укомплектованных данными системами);

- записи опытных и экспериментальных поездок, выполненные при помощи компьютеризированных измерительных комплексов, в рамках проведения испытаний электровозов.

2. Разработана методика исследования надежности бандажных колес грузового электровоза. Методика позволяет оценить несущую способность колеса электровоза при динамических воздействиях со стороны тягового двигателя, вызванных:

- некорректными действиями локомотивной бригады;
- кратковременным отрывом токоприемника от контактного провода;
- бросками напряжения в контактной сети;
- срывом колесной пары в боксование.

При этом методика учитывает текущее техническое состояние исследуемого колеса, обусловленное как эксплуатационным износом, так и воздействием нагрева от фрикционного торможения в штатном или аварийном режиме работы тормозной системы.

3. Получен научный задел для реализации разработанной методики при прогнозировании надежности и целесообразности применения бандажных колес для перспективных типов грузовых и пассажирских электровозов. Данный задел обеспечен возможностью адаптации разработанной компьютерной модели к исследуемым конструкциям колес (профиль, материалы, технологии обработки деталей и т. д.) и к структуре и схмотехнике тягового привода (тип тягового двигателя, элементная база и схмотехника тягового преобразователя, реализуемые алгоритмы управления и т. д.).

4. Показано, что проворот бандажа является сложным многофакторным явлением, которому в подавляющем большинстве случаев подвержены грузовые электровозы, выполняющие вождение поездов повышенного веса на участках со сложным профилем пути. Об этом свидетельствуют представленные в диссертационной работе статистические данные.

5. Для рассмотренной в настоящей диссертационной работе серии электровозов 2,3,4ЭС5К предлагается использовать разработанные автором конструктивные решения тягового электропривода для эксплуатации на участках со сложным профилем и для вождения поездов повышенного веса и длины. Данные конструктивные решения предусматривают оснащение электровоза цельнокатаными колесами в соответствии с ГОСТ 10791-2011 «Колеса цельнокатаные. Технические условия» в совокупности с тяговым электроприводом с поосным регулированием силы тяги и возможностью работы тяговых двигателей на независимом возбуждении в режиме тяги.

Перспективы дальнейших исследований по данной работе.

1. При дальнейших исследованиях необходимо обеспечить возможность обмена данными между компьютерными моделями электрической и механической части тягового электропривода. Это позволит не только повысить

удобство применения разработанной методики исследования надежности электровозных колес, но и учитывать при моделировании не только величину броска момента, но и его форму.

2. Результаты, полученные в диссертационной работе, в части методики исследования надежности электровозных колес могут быть распространены на другие типы тяговых приводов электровозов. Это касается как электрической части (схемотехника преобразователя, синхронный или асинхронный тяговый двигатель и т.д.), так и механической части (профиль бандажа, конструкция колесного центра, технологические параметры и материалы, применяемые в конструкции).

3. Результаты, полученные в диссертационной работе, в части необходимости и перспективы применения тяговых приводов с цельнокатаными колесами могут быть распространены на грузовые тепловозы.

Основные публикации по теме диссертации

Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Иванишкин А. М. Перспективы и проблемы применения системы управления тормозами поездов повышенной длины и веса на электровозах 2ЭС5К (ЗЭС5К) / **О. С. Веригин**, А. М. Иванишкин // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2014. – № 1(67). – С. 90 – 106. – eLIBRARY ID: 21769352.

2. Никонов В. В. Перспективы и особенности применения отечественных силовых агрегатов на IGBT-транзисторах для повышения тягово-энергетических показателей электровозов 2ЭС5К (ЗЭС5К, 4ЭС5К) / **О. С. Веригин**, Н. В. Фошкина, В. В. Никонов, И. В. Синявский // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2015. – № 2(70). – С. 44 – 54. – eLIBRARY ID: 24902716.

3. **Веригин О. С.** Комплексная математическая модель тягового электропривода электровоза ЭП1М для исследования динамики механической передачи // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2015. - № 1(69). – С. 14 – 26. – eLIBRARY ID: 23563368.

4. **Веригин О. С.** Математическая модель для исследования электромагнитных процессов в силовых цепях электровоза ЭП1М в режиме тяги // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2017. - № 4(78). – С. 38 – 47. – eLIBRARY ID: 30502040.

5. Зарифьян А. А. Анализ статистики проворотов бандажей колесных пар магистральных электровозов / **О. С. Веригин**, А. А. Зарифьян // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – №4. – С. 49 – 54. – eLIBRARY ID: 41569753.

6. Зарифьян А. А. Исследование электромеханических процессов в тяговом приводе магистрального грузового электровоза переменного тока с учетом влияния контактной сети / **О. С. Веригин**, А. А. Зарифьян, В. И. Плис // Вестник

Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – №4 (84). – С. 44 – 55. – eLIBRARY ID: 47555465.

Публикации в других изданиях

7. Зарифьян А. А. Исследование проблемы проворотов бандажей колесных пар современных магистральных электровозов / **О. С. Веригин**, А. А. Зарифьян // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – №4. – С. 38 – 40. – eLIBRARY ID: 41602906.

8. **Веригин О. С.** Математическое описание тяговых электроприводов современных электровозов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями // Транспорт: наука, образование, производство. Сборник научных трудов. Ростов-на-Дону. – 2020. – С. 70 – 74. – eLIBRARY ID: 44143236.

9. Зарифьян А. А. Компьютерное моделирование взаимодействия МСУД и ВИП в режиме тяги / **О. С. Веригин**, А. А. Зарифьян, А. Ш. Мустафин, Н. В. Романченко // Транспорт: наука, образование, производство. Сборник научных трудов. Ростов-на-Дону. – 2020. – С. 289 – 293. – eLIBRARY ID: 45654452.

10. Зарифьян А. А. О возможности повышения энергетической эффективности грузовых электровозов семейства «Ермак» / **О. С. Веригин**, А. А. Зарифьян, А. Ш. Мустафин, Т. З. Талахадзе // Современное развитие науки и техники. Сборник научных трудов Всероссийской национальной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону. – 2020. – С. 114 – 118. – eLIBRARY ID: 46378647.

11. Зарифьян А. А. Моделирование тягового электропривода электровоза 3ЭС5К для исследования электромеханических процессов с учетом влияния контактной сети / **О. С. Веригин**, А. А. Зарифьян // Транспорт: наука, образование, производство. Сборник научных трудов. Ростов-на-Дону. – 2021. – С. 169 – 173. – eLIBRARY ID: 48205545.

12. Зарифьян А. А. Анализ надежности фрикционных соединений элементов колесной пары электровоза под влиянием электромеханических процессов в тяговом приводе / **О. С. Веригин**, А. А. Зарифьян, Н. В. Талахадзе // Механика и трибология транспортных систем (МехТрибоТранс-2021). – 2021. – С. 117 – 124. – eLIBRARY ID: 49957454.

13. Зарифьян А. А. Колесная пара электровоза и ее надежность под влиянием внешних воздействий / **О. С. Веригин**, А. А. Зарифьян // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ: тезисы докладов/ под общей редакцией Д. Ю. Погорелова. – Брянск: БГТУ. – 2022. – С. 125 - 127 – eLIBRARY ID: 49847432

14. Зарифьян А. А. Влияние электромеханических процессов на надежность колесных пар электровозов / А. А. Зарифьян, **О. С. Веригин** // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – №4. – С. 29 – 34. – eLIBRARY ID: 53769933.

15. Зарифьян А. А. Анализ причин, влияющих на надежность колесных пар магистральных грузовых электровозов / **О. С. Веригин**, А. А. Зарифьян // ELTRANS-2023. Электрификация и электрическая тяга: цифровая

трансформация железнодорожного транспорта: сборник трудов XI Международного симпозиума. – Санкт-Петербург, 31 мая – 2 июня 2023 года, С. 108 – 115. Издательство ООО «ИПК «НП-Принт». – eLIBRARY ID: 65675578.

Личный вклад соискателя заключается в самостоятельной разработке методики и инструментов исследования влияния электромеханических переходных процессов в тяговом электроприводе магистрального грузового электровоза переменного тока на прочность прессового соединения колесного центра и бандажа. Также, автор принимал прямое участие в написании статей и докладов по результатам выполненных исследований. Публикации [4, 6, 8] подготовлены единолично. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве: [1 – 3, 5, 7, 9 – 15] – разработка математических моделей, проведение компьютерного моделирования и экспериментальных исследований, обобщение результатов.

Веригин Олег Сергеевич

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВОМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ
КОЛЕСНЫХ ПАР**

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 07.10.2024. Формат 60x84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,39.
Тираж 100 экз. Заказ № 46-0554.

Отпечатано в ИД «Политехник»
346400, г. Новочеркасск, ул. Первомайская, 166А
idp-npi@mail.ru