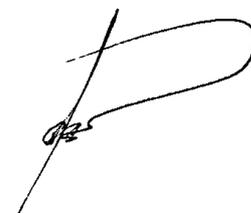


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Зарифьян А.А.

Ростов-на-Дону – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	15
1.1 Технические предпосылки проблемы проворота бандажей колесных пар магистральных электровозов	15
1.2 Анализ причин возникновения проворотов бандажей	19
1.3 Влияние факторов, воздействующих на соединение колесного центра и бандажа, в реальной эксплуатации	28
1.4 Анализ статистики проворотов бандажей колесных пар пассажирских и грузовых магистральных электровозов	31
1.5 Анализ работ в области надежности колесных пар грузовых электровозов и предотвращения проворотов бандажей	34
1.6 Выбор методов математического моделирования	39
1.7 Постановка задач исследования	41
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОВОЗА ЗЭС5К	43
2.1 Объект исследования	44
2.2 Математическая модель электромагнитной подсистемы	45
2.3 Экспериментальная проверка адекватности математической модели электромагнитной подсистемы	64
2.4 Математическая модель механической подсистемы тягового электропривода электровоза ЗЭС5К	68
2.5 Выводы по главе 2	70
ГЛАВА 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОДСИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ПРИВОДА	72

3.1 Компьютерное моделирование переходных процессов в тяговом электроприводе электровоза ЗЭС5К при некорректных действиях локомотивной бригады	72
3.2 Компьютерное моделирование переходных процессов в тяговом электроприводе электровоза ЗЭС5К при отрыве токоприемника от контактной сети	74
3.3 Компьютерное моделирование переходных процессов в тяговом электроприводе электровоза ЗЭС5К при бросках напряжения в контактной сети	77
3.4 Компьютерное моделирование переходных процессов в тяговом электроприводе электровоза ЗЭС5К при изменении условий сцепления колес с рельсами	80
3.5 Расчет момента на колесной паре при реальном режиме движения электровоза	83
3.6 Выводы по главе 3	85
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА СИЛОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОЛЕСНОГО ЦЕНТРА И БАНДАЖА	86
4.1 Постановка задачи	86
4.2 Аналитический расчет неподвижности соединения колесного центра и бандажа при реальных условиях эксплуатации	88
4.3 Компьютерное моделирование процессов силового взаимодействия в соединении колесного центра и бандажа с применением программного комплекса «Универсальный механизм»	97
4.4 Совершенствование конструкции грузовых электровозов серии «Ермак» для повышения надежности	102
4.5 Выводы по главе 4	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	108

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Конструкция и основные технические характеристики колесных пар грузовых и пассажирских электровозов	126
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Основные технические характеристики электрооборудования электровоза ЗЭС5К	128
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт рассмотрения результатов диссертационной работы ООО «Производственная компания «Новочеркасский электровозостроительный завод» (ООО «ПК «НЭВЗ»)	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт рассмотрения результатов диссертационной работы АО «Системы управления и приборы» (АО «СУП»)	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акт рассмотрения результатов диссертационной работы Северо-Кавказской дирекцией тяги Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД»	137

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. 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-километров, 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, собственно, бандажа и/или колесного центра, применения некачественных материалов, несовершенств конструкции (параметры профиля бандажа) или несоблюдения технологии сборки.

Рассматриваемая проблема может иметь электромеханическую природу, т. е. являться результатом работы тягового электропривода в нештатных режимах, спровоцированных внешними воздействиями на систему управления, систему электропитания и др. Это приводит к броскам момента тяговых двигателей, которые через тяговую передачу попадают на колесную пару, вызывая динамические нагрузки в соединении колесного центра и бандажа. В качестве

режимов работы, провоцирующих броски момента тягового двигателя, рассматриваются:

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

Воздействия на колесную пару со стороны тягового электропривода в этих режимах непродолжительны во времени и имеют ударный характер. Как показывает практика эксплуатации электровозов, такие режимы работы способны нарушить неподвижность соединения колесного центра и бандажа как самостоятельно, так и при совместном действии с другими факторами, приводящими к проворотам. Например, бросок момента тягового двигателя при длительном фрикционном торможении, т. е. при возникновении в бандаже температурного поля в результате трения тормозных колодок. Более подробно данный вопрос рассмотрен в первом разделе диссертации.

Разработка методов и инструментов исследования влияния электромеханических процессов на надежность соединения колесного центра и бандажа позволит дать оценку:

- эффективности конструкции данного механического узла;
- перспективным технологиям изготовления элементов локомотивных колес;
- целесообразности применения новых материалов для изготовления бандажей и новых профилей.

Целью работы является создание нового подхода к исследованию надежности конструкции колесных пар грузовых электровозов (как эксплуатируемых, 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 боксование 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.

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. П. Буйносов, А. В. Обрывалин, В. И. Сакало, А. В. Бородин, Д. А. Курасов, Л. В. Ярышева, А. В. Горский, А. А. Воробьев, А. А. Шишов, А. Н. Никулин, А. В. Сухов, Г. А. Филиппов и др.

Способы повышения надежности локомотивных колес с точки зрения совершенствования конструкции представлены в исследованиях В. А. Тихонова, А. В. Горского, В. Л. Балдина, 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 А. В. Курков, Д. П. Кононов, Ю. В. Гомонец, А. А. Воробьев,

И. А. Иванов, В. Беломытцев, Д. С. Денисов, Я. А. Мишин, С. В. Кротов, Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов, Р. Ю. Григорьев, В. В. Попов, Ю. С. Ромен, Е. М. Бромберг, Р. А. Сахаров, К. К. Ким, 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.

Теоретическая и практическая значимость работы

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.

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. 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.

Методы исследования. Модель электрической части тягового электропривода электровоза ЗЭС5К 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 ЗЭС5К 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» (ОАО «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 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.

Положения и результаты, выносимые автором 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 проворотами 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.

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;

Результаты диссертации реализованы в виде компьютерных моделей и методики анализа несущей способности соединения колесного центра и бандажа.

Апробация 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 «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава» (г. Ростов-на-Дону, 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»

Работа полностью доложена и обсуждена на расширенном заседании кафедры «Тяговый подвижной состав» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» — октября 2024 г.

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

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.

ГЛАВА 1

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей главе рассмотрено состояние проблемы проворота бандажей колёсных пар магистральных электровозов, ее технические предпосылки, статистические данные. Проанализированы данные из реальной эксплуатации о режимах и условиях работы электровозов, в результате которых произошли провороты бандажей. Представлен обзор существующих в настоящее время подходов к решению вопроса повышения надёжности колёсных пар электровозов в части снижения количества проворотов бандажей [1.1, 1.2].

1.1 Технические предпосылки проблемы проворота бандажей колёсных пар магистральных электровозов

С момента начала массового применения электрической тяги на железнодорожном транспорте в 1956 году и до сегодняшнего дня наблюдается устойчивая тенденция увеличения мощности электровозов. Это обусловлено:

- постоянным ростом объемов грузовых и пассажирских перевозок;
- стремлением к сокращению времени транспортировки;
- стремлением к повышению пропускной способности железнодорожных магистралей.

Рост мощности электровозов влияет на характер процессов, протекающих в механической части тягового привода. Это приводит к возникновению научно-технических задач, процесс решения которых продолжается по настоящее время.

Изменение мощности различных поколений отечественных грузовых и пассажирских электровозов постоянного и переменного тока показано на рисунках 1.1 – 1.4. Для большей наглядности на указанных рисунках графики мощностей дополнены осевыми формулами рассматриваемых серий электровозов.



Рис. 1.1 Мощность электровозов постоянного тока в продолжительном режиме работы



Рис. 1.2 Мощность тяговых двигателей, применяемых на отечественных электровозах постоянного тока в продолжительном режиме работы

выросла с 1800 до 8800 кВт. Мощность тяговых двигателей, применяемых на рассматриваемых сериях электровозов, возросла с 300 до 1050 кВт.

Аналогичную картину показывает анализ данных по электровозам переменного тока. За рассматриваемый период времени мощность электровозов переменного тока, с учётом их осевой формулы, возросла с 2010 до 12600 кВт. Мощность тяговых двигателей, применяемых в составе рассматриваемых серий электровозов переменного тока, выросла с 335 до 1050 кВт.

Следует отметить, что указанные значения мощностей тяговых двигателей приведены для продолжительного режима работы. Однако для современных и перспективных электровозов существует понятие часового и получасового режима работы тягового двигателя. В таких режимах тяговый двигатель работает с повышенной мощностью для обеспечения движения электровоза с составом на особо тяжелых участках пути. Примером служит грузовой электровоз 2,3ЭС5С с асинхронными тяговыми двигателями, которые в получасовом режиме способны обеспечить мощность 1300 кВт на каждую ось электровоза. При этом, электровозы 2,3ЭС5С оснащаются колесами бандажного типа.

Указанная тенденция является причиной постоянного возрастания нагрузки со стороны тягового электропривода на колёсную пару. Конструкция колесных пар грузовых и пассажирских электровозов, а также их технические характеристики представлены в приложении А.

Выполнено сравнение конструкции колесных пар современных электровозов и электровозов более ранних периодов [1.3 – 1.12]. Данные по современным электровозам получены автором в ходе рабочих поездок на предприятия, занимающиеся производством, сервисными работами и ремонтами электровозов.

Установлено, что электровозы всех рассматриваемых серий оборудованы колесными парами с ходовыми колесами бандажного типа и колесными центрами коробчатого сечения.

В процессе развития отечественных локомотивов (совершенствования конструкции и улучшения характеристик тяговых двигателей, применения новых технических решений в электрических схемах электровозов и т. д.) конструкция

колесных пар за рассматриваемый период времени не претерпела каких-либо существенных (для рассматриваемой задачи) изменений. Исключение в данном случае составляют скоростные пассажирские электровозы серии ЭП20 и грузовые электровозы 2ЭС5, оборудованные цельнокатаными колесами.

Это обусловлено, главным образом, стремлением к максимальному упрощению и удешевлению технологии производства колесных пар электровозов любых серий и обеспечению их доступности во всех регионах страны, что обеспечивает постоянную укомплектованность локомотивостроительных, сервисных и ремонтных предприятий данными компонентами, независимо от полигона эксплуатации электровозов.

Следовательно, результаты выполняемых исследований, имеют широкую область применения: как для вновь разрабатываемых электровозов, так и для электровозов, находящихся в эксплуатации, независимо от их поколения.

1.2 Анализ причин возникновения проворотов бандажей

Проворот возникает при ослаблении натяга бандажа на колесном центре. Прогрессируя, проворот приводит к интенсивному износу бандажного кольца. Износ бандажного кольца становится причиной продольного смещения или перекоса бандажа относительно оси вращения колесной пары, в результате чего возрастает вероятность схода колесной пары с рельсового полотна при прохождении, например, стрелочных переводов. В связи с этим каждый случай проворота бандажей представляет собой серьезную неисправность, являющуюся причиной недопуска электровоза в рейс, внепланового ремонта и длительного простоя [1.13, 1.14].

Состояние соединения колесного центра и бандажа, т. е. обеспечение нормативной величины натяга, зависит от множества факторов, комплексно воздействующих на конструкцию в различных режимах движения.

Из теории локомотивной тяги [1.15] известно, что эффективность реализации локомотивом силы тяги и параметры его движения определяются основным законом локомотивной тяги:

$$F_K \leq F_{Kmax} \quad (1.1)$$

где: F_K – некоторое текущее значение касательной силы тяги в контакте колеса с рельсом; F_{Kmax} – предельное значение касательной силы тяги в контакте колеса с рельсом.

Правая часть (1.1) определяется свойствами контакта колес с рельсами, т. е. механическими и фрикционными параметрами соприкасающихся материалов. К основным факторам, влияющим на значение F_{Kmax} , относятся:

- механическое состояние поверхностей катания колес и рельсов;
- наличие лубрикантов в контакте колес с рельсами;
- метеорологические параметры окружающей среды (главным образом – температура воздуха), определяющие состояние материалов колес и рельсов;
- воздействие температурных полей, возникающих вследствие работы фрикционных тормозов.

Левая часть (1.1) определяется моментом, подводимым к оси колесной пары от тягового двигателя. На значение и характер изменения момента влияют:

- действия локомотивной бригады (задание слишком высокого значения тяги для текущей ситуации, трогание с места или движение при неотпуске тормозов, попытки останавливать боксующую колесную пару штатными фрикционными тормозами и т. д.);
- режим работы контактной сети;
- стабильность скользящего контакта полоза токоприемника с контактным проводом.

Перечисленные факторы классифицированы по направлению их воздействия на фрикционное соединение бандажа и колесного центра, как показано на рисунке 1.5.

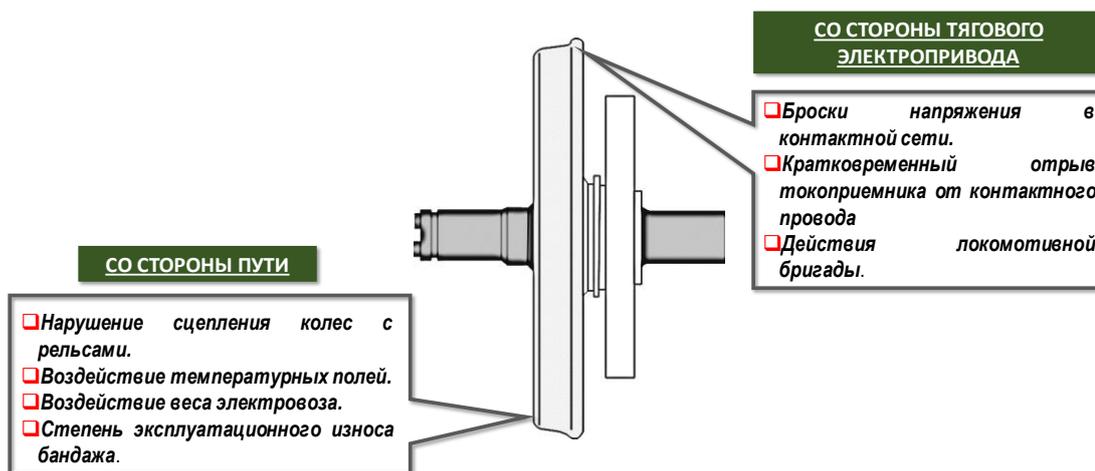


Рис. 1.5 Классификация факторов, воздействующих на соединение колесного центра и бандажа

Надежность соединения бандажа и колесного центра определяется из условия неподвижности соединения с натягом [1.16 – 1.18]. Неподвижность соединения с натягом характеризуется несущей способностью, т. е. максимальным значением момента, которое способно передать соединение без сдвига элементов. Представленные на рисунке 1.5 факторы резко или постепенно вызывают снижение несущей способности соединения колесного центра и бандажа, тем самым делая колесную пару более уязвимой к возникновению проворотов.

Далее рассмотрена физика воздействия каждого из перечисленных на рис. 1.5 факторов на соединение колесного центра и бандажа.

Вес электровоза является постоянно действующей нагрузкой на колесную пару, оказывающей влияние на равномерность распределения контактных напряжений [1.13 – 1.15] в соединении колесного центра и бандажа. Вес P электровоза, приложенный к буксовому узлу, вызывает появление изгибающего момента T относительно контакта колеса с рельсом. Совокупное воздействие изгибающих моментов T через буксовые узлы одной колесной пары вызывает деформации поверхности сопряжения колесного центра и бандажа. Таким образом, как показано на рисунке 1.6, происходит перераспределение контактного напряжения в направлении оси вращения колесной пары. Одновременно вес

электровоза нарушает равномерность распределения контактных напряжений вдоль линии сопряжения бандажа и колесного центра, что также показано на рисунке 1.6. Как видно из рисунка 1.6, вдоль линии сопряжения бандажа и колесного центра повышенные контактные напряжения наблюдаются в нижней части колеса. При этом, в верхней части колеса контактные напряжения несколько снижены. При движении бандаж (как более упругий элемент конструкции колеса) испытывает знакопеременную нагрузку вдоль линии сопряжения с колесным центром, что обусловлено вращением колеса.

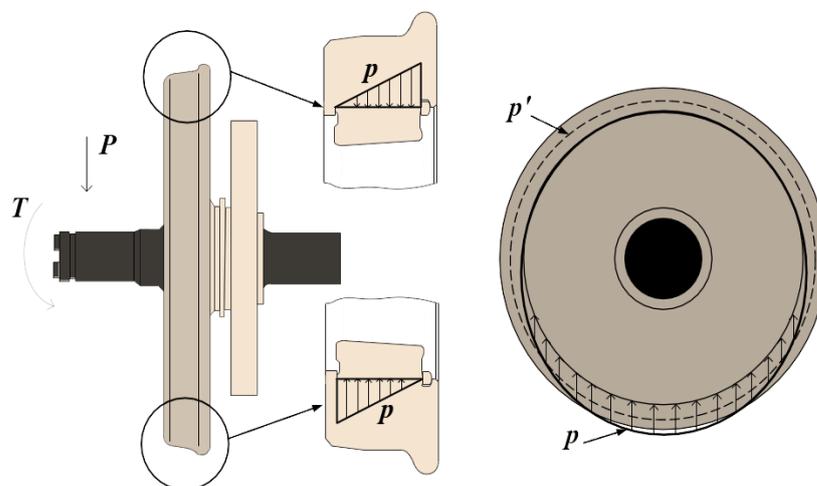


Рис. 1.6 Распределение контактных напряжений в соединении бандажа и колесного центра под действием веса электровоза

Воздействие температурных полей на элементы конструкции колесной пары заключается в изменении их геометрических параметров [1.19 – 1.27]. Материалы, из которых изготовлены ее элементы, характеризуются различной степенью температурной деформации и по-разному реагируют на воздействие высоких или низких температур.

При нахождении электровоза в условиях низких температур окружающей среды происходит уменьшение соединительных диаметров бандажа и колесного центра. Это приводит к ослаблению натяга и снижению несущей способности соединения бандажа и колесного центра в силу различной интенсивности

изменения их геометрии. Также, низкие температуры увеличивают хрупкость материалов колеса, повышая вероятность механического разрушения в ряде случаев.

При движении электровоза длительное время в режиме фрикционного торможения или при экстренном торможении происходит интенсивный нагрев бандажа и увеличение его посадочного диаметра. Воздействие теплового поля от фрикционного торможения в данном случае вызывает локальный перегрев поверхности катания бандажа и поверхности тормозной колодки, как показано на рисунке 1.7. Фотоматериал получен по результатам эксплуатации электровозов ЗЭС5К, приписанных к локомотивному депо Тайшет. Наличие побеголостей синего цвета на поверхности бандажа соответствует его нагреву при торможении до температуры порядка 300 – 320 °С.



Рис. 1.7 Локальный перегрев поверхности катания бандажа и поверхности тормозной колодки электровоза ЗЭС5К

Особо следует указать на формирование температурных полей при отказах и некорректной работе бортовых систем электровоза, в частности, при неотпуске тормозов в режиме тяги. Данное явление может происходить достаточно длительное время, например, в случае электровоза ЗЭС5К №724 на перегоне Хабаровск – Ружино. Движение с неотпущенными на бустерной секции тормозами в режиме тяги длилось 1 час 16 минут (при весе поезда 1707 т.). Скорость движения составляла 77 км/ч. Такой режим работы привел к перегреву и повторному провороту бандажей, что не позволило производить дальнейшую эксплуатацию электровоза без внепланового ремонта.

Известны случаи самопроизвольного наполнения тормозных цилиндров при движении электровоза с составом. Например, такой режим работы электровоза 4ЭС5К №018, проявлявшийся на бустерной секции, привел к нагреву и первичному провороту бандажей сразу на четырех колесных парах с обеих сторон. В отличие от предыдущего случая, локомотивная бригада предпринимала все необходимые действия для обеспечения отпуска тормозов, что значительно сократило время движения с заторможенными колесами. Однако, сообщенной при трении колодок тепловой энергии все равно было достаточно для нарушения натяга.

При работе электровоза в режиме тяги *нарушение условий сцепления колес с рельсами* приводит к возникновению боксования. При чрезмерно интенсивном развитии процесса боксования для борьбы с этим явлением применяется метод импульсной подсыпки песка под боксующую колесную пару. Это обеспечивает резкое изменение фрикционных характеристик контакта колеса с рельсом, увеличивая коэффициент сцепления. При этом, происходит максимально быстрый вывод боксующей колесной пары в штатный режим работы. Это сопровождается высокими динамическими моментами ударного характера.

Высокие динамические нагрузки приводят к проворотам бандажей колесных пар, сползанию зубчатых колес тяговых редукторов со ступиц, излому зубьев тяговых зубчатых передач [1.5].

Нештатные изменения напряжения во входной электрической цепи электровоза относятся к нестационарным режимам работы, оказывающим

значительное влияние на тяговый привод. В работе рассмотрены *отрыв токоприемника от контактного провода и броски напряжения в контактной сети* на основе теоретических и практических материалов, приведенных в [1.28].

Отрыв токоприемника от контактного провода сопровождается потерей питания силового оборудования из-за прерывания тока во входной электрической цепи электровоза. Наиболее часто встречающимися причинами отрыва токоприемника от контактного провода является обледенение либо недостаточная степень натяжения последнего. Для электровозов переменного тока отрыв токоприемника от контактной сети относится к потере питания на первичной стороне тягового трансформатора. Поэтому, достаточно кратковременный отрыв токоприемника не приводит к аварийному разбору электрической схемы электровоза из-за значительной электромагнитной инерционности ее элементов (тяговые двигатели, индуктивные шунты, сглаживающие реакторы).

Энергия, запасенная в индуктивных элементах, создает контурный ток, поддерживающий противо-ЭДС тяговых двигателей и, соответственно, магнитный поток. Затухание магнитного потока происходит сравнительно медленно и, если продолжительность нарушения скользящего контакта полоза токоприемника и контактного провода невелика, то к моменту восстановления контакта ЭДС сохраняет значительную величину. Бросок напряжения в момент восстановления скользящего контакта полоза токоприемника и контактного провода определяется разностью между напряжением контактной сети и противо-ЭДС тяговых двигателей с учетом параметров преобразования энергии через тяговый трансформатор и полупроводниковый преобразователь.

Скорость переходного процесса тока при восстановлении напряжения через 2-3 с после отрыва токоприемника от контактного провода составляет 50-60 кА/с. В среднем частота возникновения составляет 1-2 случая на 10 тыс. км. пробега электровоза.

Броски напряжения в контактной сети, составляющие от 15 до 30 % номинального напряжения, возникают при изменении режимов работы и количества электровозов, подключенных к участку сети тягового

электроснабжения. Бросок напряжения приводит к кратковременному переходу системы «полупроводниковый преобразователь – тяговый двигатель» на механическую характеристику, соответствующую новому значению напряжения. Это сопровождается скачкообразным изменением тока якоря тягового двигателя и момента на его валу.

Скорость изменения тока при данном переходном процессе составляет 20 – 50 кА/с, бросок тока может достигать двух номинальных токов тягового двигателя, при этом, длительность процесса не превышает 0,1-0,2 с, частота возникновения составляет 1-2 случая на 10 тыс. км. пробега электровоза.

Под *действиями локомотивной бригады* понимается ошибочно выбираемое задание тяги электровоза в соответствии со сложившимися в конкретный момент времени условиями.

Последствия неверного задания значения тяги наглядно проявляется при трогании электровоза с составом, если заданное значение силы тяги не спровоцировало боксование. В данном случае излишек механической энергии, сообщенный колесной паре, воспринимает соединение колесного центра и бандажа. Это приводит к срезу микронеровностей на поверхностях сопряжения колесного центра и бандажа, что в свою очередь снижает значение коэффициента трения. Данный процесс обладает эффектом накопления.

Однако, при завышении интенсивности возрастания силы тяги в эксплуатации имеют место случаи немедленного проворота или даже механического разрушения бандажа в виде поперечной трещины. Практический пример такого явления рассмотрен далее.

Следует отметить, что даже при наличии ограничения на интенсивность нарастания тока, заложенного в программное обеспечение электровоза, описанные процессы при эксплуатации имеют место. Данная информация получена автором от сотрудников локомотивных депо Транссибирской и Байкало-Амурской магистралей, а также, от технических специалистов предприятий, занимающихся производством и испытаниями колесных пар.

Эксплуатационный износ бандажа проявляется в уменьшении его толщины и появлении локальных повреждений поверхности катания, как показано на рисунках 1.8, 1.9. Это постепенно нарушает геометрию профиля бандажа, восстановление которого выполняется токарным способом, что также приводит к постепенному уменьшению толщины бандажа.



Рис. 1.8 Выкрашивание поверхности катания бандажа электровоза 3ЭС5К
(депо приписки Тайшет)



Рис. 1.9 Ползуны на поверхности катания бандажа электровоза 3ЭС5К
(депо приписки Иланская)

Уменьшение толщины бандажа приводит к снижению его жесткости и к усугублению неравномерности распределения контактных напряжений вдоль линии сопряжения с колесным центром.

1.3 Влияние факторов, воздействующих на соединение колесного центра и бандажа, в реальной эксплуатации.

В условиях реальной эксплуатации электровозов рассмотренные в разделе 1.2 факторы воздействуют на колесные пары комплексно, в конечном итоге влияя на степень износа или тип эксплуатационного повреждения.

На рисунке 1.10 показан первичный проворот бандажа колесной пары, что видно по смещению заводских меток на бандаже и колесном центре. Данное явление допускает дальнейшую эксплуатацию грузового электровоза с нанесением новых меток.



Рис. 1.10 Проворот бандажа колесной пары электровоза 3ЭС5К

Показанные на рисунке 1.9 ползуны характерны, например, для экстренного или слишком интенсивного фрикционного торможения, а также, для юза колесных пар и проявляются совместно с воздействием температурного поля. Ползун

является причиной периодических ударных нагрузок в механической части, т. к. его наличие на поверхности катания бандажа нарушает геометрию круга катания. Негативное влияние ударных нагрузок на техническое состояние бандажа заключается в развитии микротрещин, особенно в случае наличия на бандаже иных повреждений, дефектов и конструктивных особенностей, являющихся концентраторами механических напряжений.

На рисунке 1.11 показана поперечная трещина бандажа колесной пары электровоза 3ЭС5К приписки к локомотивному депо Иланская. Причиной данного повреждения являются ударные нагрузки в совокупности с производственными и эксплуатационными дефектами металла, из которого изготавливается бандаж. Также, дополнительной причиной поперечной трещины может являться степень износа и проточки, т. е. текущее значение толщины бандажа, а, следовательно, его пониженная жесткость.



Рис. 1.11 Поперечная трещина бандажа электровоза 3ЭС5К

Комбинации и степень воздействия факторов, описанных в разделе 1.2, практически не поддаются точной формализации и учету при моделировании и

носят вероятностный характер. Последствия их воздействия при наличии концентраторов напряжений хорошо демонстрируются опытом эксплуатации грузовых электровозов постоянного тока серии 2ЭС10. Опубликованные по этому вопросу исследования [1.29 – 1.33] посвящены проблеме преждевременного разрушения и выхода из строя бандажей электровозов данной серии. Подобного рода отказы, также, имеют место у электровозов других серий. Пример разрыва бандажа электровоза ВЛ80С в схожих с описанными выше условиях показан на рисунке 1.12.



Рис 1.12 Разрыв бандажа грузового электровоза ВЛ80С

В [1.29 – 1.33] установлено, что разрушения бандажей происходят по причине наличия в материале, из которого они изготавливаются, неметаллических включений. В дополнение к этому концентратором напряжения в конструкции бандажа является заводское клеймо, нанесенное на торцовую внешнюю поверхность бандажа. В сочетании с эксплуатацией электровоза в условиях низких температур, а также со чрезмерными значениями реализуемых мощности электровоза и силы тяги, т. е. с работой тягового электропривода, это приводит к

разрывам бандажей, а также, к сколам металла в области гребня. В обоих случаях повреждения не допускают эксплуатации электровоза.

1.4 Анализ статистики проворотов бандажей колесных пар пассажирских и грузовых магистральных электровозов

При анализе проблемы проворота бандажей колесных пар магистральных электровозов, эксплуатируемых в Российской Федерации рассмотрена статистика отказов по механической части. Данные статистики получены путем обработки информации о 30 тысячах случаев отказов на электровозах переменного тока ЭП1(М, П) и 2(3, 4)ЭС5К и постоянного тока 2(3)ЭС4К, в период с 2005 по 2019 г. Данная информация получена автором от производителя указанных серий электровозов, а также, от электровозоремонтных заводов и сервисных локомотивных депо.

Рассматриваемые электровозы различаются по функциональному назначению (грузовые, пассажирские, грузопассажирские), роду тока, типу механического тягового привода (опорно-осевое подвешивание тяговых двигателей с двухсторонним опорно-осевым редуктором, опорно-рамное подвешивание тяговых двигателей с односторонним опорно-осевым редуктором и резинокордной муфтой), но во всех рассматриваемых сериях электровозов применяется тяговый электропривод с коллекторными тяговыми двигателями.

Установлено наличие большого количества проворотов бандажей колесных пар электровозов на всех вышеуказанных сериях электроподвижного состава.

Диаграмма распределения количества отказов, связанных с проворотами бандажей по сериям электровозов, приведена на рисунке 1.12. Наибольший процент проворотов бандажей (74,44 %) суммарно приходится на грузовые электровозы серии «Ермак» 2(3,4)ЭС5К. Это закономерно, так как электровозы данной серии эксплуатируются с тяжелыми грузовыми поездами на участках железной дороги со сложным профилем (Транссибирская магистраль, Байкало-Амурская магистраль). Для сравнения, например, электровозы серии «Дончак» 2(3)ЭС4К в настоящее время эксплуатируются на таких полигонах, как

Октябрьская железная дорога (депо приписки - Волховстрой) и Черноморское побережье Краснодарского края (перегоны от Белореченска и Горячего Ключа до Адлера). На этих полигонах не производится вождение поездов повышенного веса с интенсивностью, характерной для Транссибирской и Байкало-Амурской магистралей.

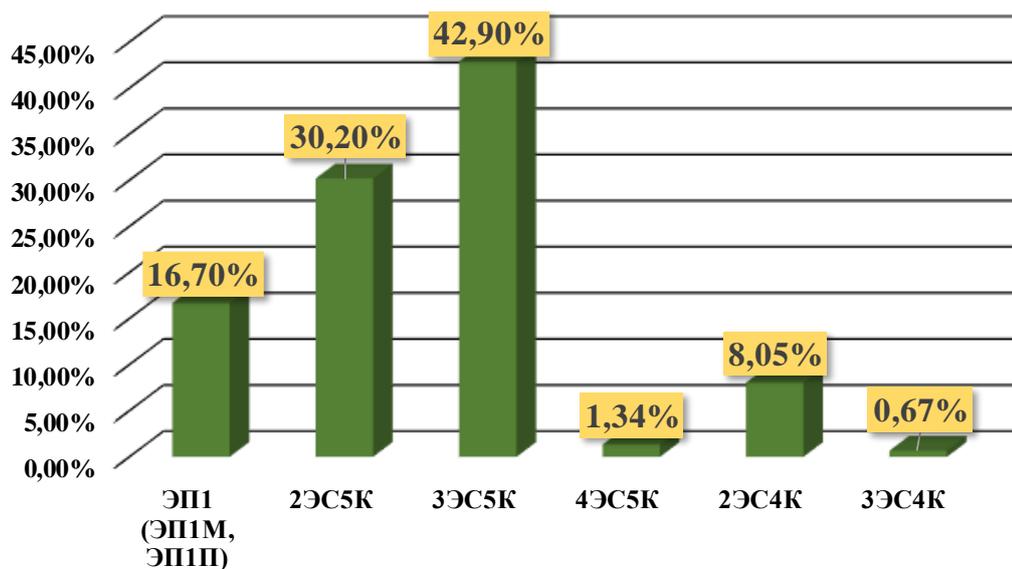


Рис. 1.12 Статистика проворотов бандажей колесных пар по сериям электровозов

Следовательно, актуальными являются исследования проблемы проворота бандажей именно для электровозов серии «Ермак» 2(3, 4)ЭС5К, так как они являются наиболее массово выпускаемыми грузовыми электровозами переменного тока на сегодняшний день.

Статистика по первичным и вторичным проворотам для электровозов серии 2(3, 4)ЭС5К показана на рисунке 1.13. Значительная доля (73,6 %) приходится на повторные провороты бандажей колесных пар. Это характерно для электровозов серии 2ЭС5К и 3ЭС5К, при этом количество повторных проворотов бандажей превышает количество первичных проворотов более чем в два раза. Данное соотношение не наблюдается у электровозов серии 4ЭС5К, что обусловлено сравнительно коротким сроком эксплуатации и небольшим количеством произведенных в настоящее время электровозов.

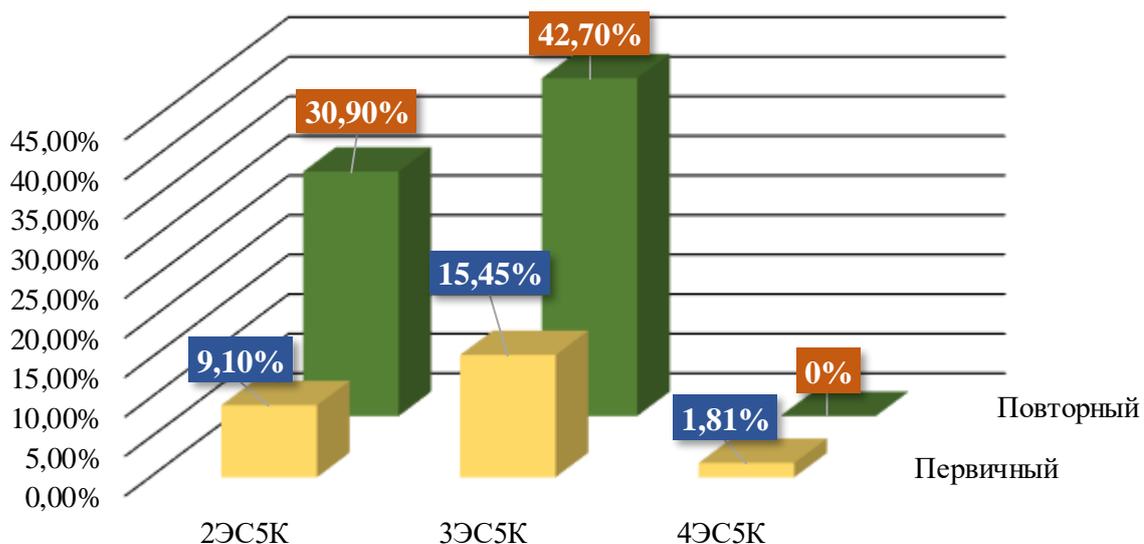


Рис. 1.13 Статистика первичных и повторных проворотов бандажей электровозов серий 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К

Преобладание повторных проворотов бандажей указывает на то, что в качестве причин, приводящих к их возникновению, следует рассматривать совокупное воздействие таких факторов, как:

- условия эксплуатации электровозов (массы водимых поездов, задаваемые режимы работы, профиль пути и т.д.);
- технические характеристики колес, обеспечиваемые в результате технического обслуживания и ремонта (степень износа бандажа).

Анализ статистики проворотов бандажей по сезонам эксплуатации не выявил ярко выраженной закономерности распределения. Диаграмма распределения отказов показана на рисунке 1.14. Максимальная доля проворотов бандажей приходится на зимний период и составляет 28,8 %. Минимальная доля случаев проворотов бандажей колесных пар приходится на весенний период и составляет 19,8 %, что указывает на сравнительно равномерное распределение отказов механической части в виде проворотов бандажей по сезонам эксплуатации электровозов.

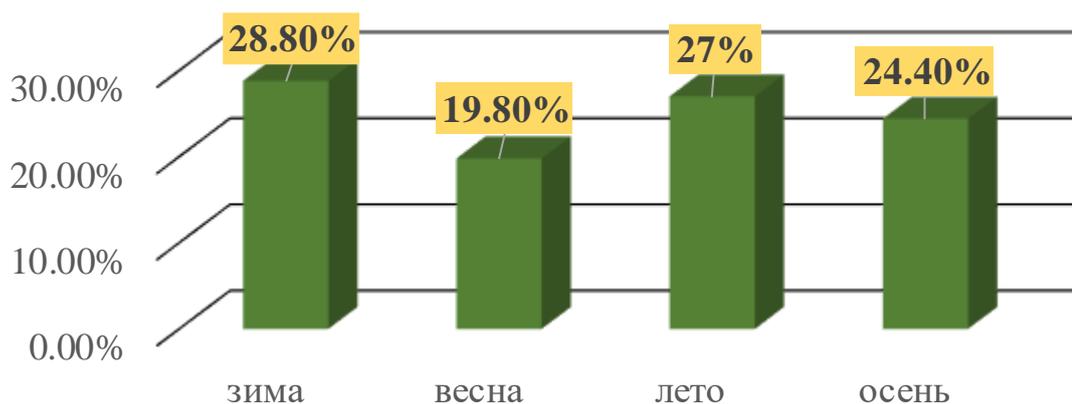


Рис. 1.14 Диаграмма распределения проворотов бандажей электровозов серии 2 (3, 4)ЭС5К по сезонам эксплуатации

Отсутствие ярко выраженной зависимости возникновения проворотов бандажей от сезона эксплуатации свидетельствует о том, что данный фактор (сезонность) не является определяющим для рассматриваемых отказов механической части магистральных электровозов.

Полученный результат указывает на то, что подавляющее большинство рассмотренных случаев возникновения проворотов бандажей приходится на грузовые электровозы переменного тока серий 2(3,4)ЭС5К. Это связано, во-первых, с массовостью их применения; во-вторых, с особенностями полигонов, на которых в основном эксплуатируются данные электровозы; в-третьих, с типом применяемого тягового электропривода и особенностями силовых электромеханических процессов, протекающих в данном узле.

1.5 Анализ работ в области надежности колесных пар грузовых электровозов и предотвращения проворотов бандажей

При анализе научного опыта в вопросе проворота бандажей колесных пар электровозов, установлено, что наиболее широко данный опыт представлен в отечественном электровозостроении. Это объясняется тем, что в зарубежной

железнодорожной технике в подавляющем большинстве применяются колесные пары с цельнокатанными колесами. Здесь речь идет о странах Европейского союза и Японии и о тех странах, в которые поставляется продукция их локомотивостроительной отрасли.

Применение бандажных колес на грузовых локомотивах (как электрических, так и дизельных) в настоящее время, помимо России, распространено в США, Китае, Индии и на территории СНГ и государств Средней Азии. В этих государствах имеет место интенсивный грузопоток по железнодорожным магистралям, в том числе со сложным профилем пути, а также, в силу эксплуатации (страны Средней Азии) импортированных из России и Китая локомотивов.

Проблему повышения надежности и долговечности колесных пар, в части проворотов бандажей, освещаемую в научно-технической литературе, 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.

Решения в области технологии изготовления, технического обслуживания и ремонта колесных пар имеют своей целью повышение однородности распределения усилия, обеспечиваемого соединением с натягом.

Рассмотрены результаты научно-исследовательской и инженерной работы таких специалистов как А. П. Буйносов, А. В. Обрывалин, И. П. Исаев, В. И. Сакало, А. В. Бородин, Д. А. Курасов, Л. В. Ярышева, А. В. Горский, А. А. Воробьев, А. А. Шишов, А. Н. Никулин, А. В. Сухов, Г. А. Филиппов и др.

В работах по данному направлению рассматриваются новые способы механической обработки сопрягаемых поверхностей, пути совершенствования уже внедренных технологий, проводится количественная оценка эффекта от предлагаемых решений [1.13, 1.14, 1.34 – 1.38]. Следует отметить работы в области повышения однородности термического воздействия на сопрягаемые детали с целью минимизации неоднородности распределения усилия по поверхности сопряжения колесного центра и бандажа [1.20 – 1.23, 1.39].

Крупным научным направлением является обеспечение прочностных и геометрических характеристик поверхности катания бандажа как способа снижения эксплуатационного износа колеса. Проводятся исследования и разработки по совершенствованию формирования и восстановления профиля катания токарным способом [1.40 – 1.45]. Предлагаются методы поверхностного упрочнения бандажей, в том числе и плазменной технологией [1.46 – 1.49]. Выполняются научные исследования механизмов образования и развития эксплуатационных повреждений и их влияние на напряженно-деформированное состояние бандажа [1.39, 1.50, 1.51].

Работы по повышению надежности и ресурса колесных пар путем совершенствования конструкции ее элементов можно разделить на три направления:

- оптимизация профилей колес;
- применение материалов с улучшенными характеристиками;
- конструктивные решения, не предусматривающие прессового соединения.

По данному вопросу следует отметить работы таких исследователей как А. П. Буйносов, В. А. Тихонов, А. В. Горский, Д. Л. Худояров, В. Л. Балдин и др.

Оптимизация профилей колес заключается в поиске геометрических параметров профиля, обеспечивающих максимальный ресурс до очередной обточки и оптимальное соотношение величины износа и нарастания проката по кругу катания в зависимости от толщины бандажа [1.52 – 1.54].

Разработки в области применения новых материалов посвящены поиску оптимальных параметров стали для изготовления бандажа, которая обеспечит повышенные показатели износостойкости колес [1.29 – 1.33, 1.55]. Другой подход [1.56 – 1.58] заключается в применении различных покрытий, наносимых на поверхности катания колес и на гребни. Применение покрытий позволяет оптимизировать триботехнические характеристики поверхности колеса при движении по рельсам и, соответственно, снизить износ бандажа.

Альтернативными направлениями развития конструкции локомотивных колес являются применение цельнокатаных колес, исключая применение

бандажа, а также, применение конструкции с независимо вращающимися бандажами.

Еще одной альтернативой бандажным колесам является применение технологии независимого вращения всех поверхностей катаний колес в различных вариантах исполнения:

а) с применением фрикционного соединения колесного центра и бандажа, обеспечивающего срыв этого соединения и обратное его восстановление при определенных соотношениях момента тягового двигателя и момента от сил сопротивления движению;

б) с независимым вращением всех поверхностей катания колес и с подрессориванием бандажей колес;

в) с гибкими независимо вращающимися бандажами.

Результаты научных исследований и разработок по перечисленным пунктам опубликованы в [1.25, 1.26, 1.59 – 1.63]

Следует отметить, что конструкция (а) подробно проработана для применения в составе поездов метрополитена. Принцип работы колесной пары в данном случае позволяет снизить изнашивание поверхностей катания колесных пар при прохождении кривых малого радиуса.

При рассмотрении подходов к повышению надежности колесных пар путем контроля качества и технического состояния установлено два крупных направления разработок в данной области:

- разработка средств контроля качества изготовления колесных пар на предприятии;

- разработка средств и методов мониторинга технического состояния и остаточного ресурса колесных пар при эксплуатации.

В данной части обзора рассмотрены работы следующих авторов: А. П. Буйносов, А. В. Курков, Д. П. Кононов, Ю. В. Гомонец, А. А. Воробьев, И. А. Иванов, В. Беломытцев, Д. С. Денисов, Я. А. Мишин, С. В. Кротов, Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов, Р. Ю. Григорьев, В. В. Попов, Ю. С. Ромен, Е. М. Бромберг, Р. А. Сахаров, К. К. Ким, С. В. Урушев и др.

Исследователями представлены различные средства контроля качества изготовления колесных пар в виде:

- автономных приборов позволяющих проверять однородность материала и отсутствие дефектов как колесных пар в собранном виде, так и отдельных деталей [1.64, 1.66];

- автоматизированных систем контроля геометрических и других параметров колесных пар [1.67 – 1.70].

Результаты научных исследований в области мониторинга технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса колесных пар позволили сформулировать критерии оценки указанных параметров, к примеру, по состоянию поверхности катания колеса [1.71 – 1.73].

Проработаны методы косвенной оценки состояния колесных пар, заключающиеся в выполнении измерений при испытаниях подвижного состава, а также, в режиме реального времени условиях реальной эксплуатации [1.74 – 1.78].

По результатам сформулированы следующие выводы:

- проблема проворота бандажа является частью более общего понятия надежности и долговечности колесной пары, что указывает на актуальность данной проблемы и целесообразность проведения исследований для поиска ее решения;

- технические решения по снижению рисков возникновения проворотов бандажей разработаны достаточно подробно в областях изготовления, ремонта, поиска оптимальной конструкции и контроля качества и технического состояния;

- имеется ряд исследований, посвященных влиянию динамических воздействий от дефектов поверхности катания бандажа на процессы его силового взаимодействия с колесным центром через прессовое соединение. Это обосновывает целесообразность рассмотрения задачи неподвижности прессового соединения в динамике;

- перечисленные области разработки технических решений по снижению рисков возникновения проворотов бандажей не учитывают влияние режимов работы тягового электропривода и характер управления электровозом.

1.6 Выбор методов математического моделирования

При исследовании проворотов бандажей колесных пар как явления электромеханической природы выбор методов и инструментов математического моделирования производился по следующим критериям:

- моделирование переходных процессов в тяговом электроприводе при некорректных действиях локомотивной бригады, бросках напряжения в контактной сети, отрыве токоприемника от контактного провода, срыве колес в боксование;

- моделирование несущей способности фрикционного соединения колесного центра и бандажа в функции эксплуатационного износа колеса;

Таким образом, для решения задач требуется разработка математической модели тягового электропривода электровоза, которая должна описывать процессы преобразования энергии в электрической схеме электровоза от контактной сети до колеса.

Для моделирования переходных процессов применен метод преобразования Лапласа и представление электрической части тягового электропривода в виде системы передаточных функций. Такой подход позволяет уйти от необходимости аналитического или численного решения системы дифференциальных уравнений, позволяет представить математическое описание в удобном, наглядном виде. При этом, выбранный подход позволяет с высокой степенью точности описывать динамику исследуемого объекта без излишней детализации его внутренней структуры. Например, в рамках решаемой задачи не рассматриваются вопросы схемотехники тягового преобразователя или особенности конструкции электромагнитной системы тягового двигателя. Указанное учитывается в значениях параметров (коэффициентов усиления и постоянных времени) соответствующих передаточных функций.

Также, весьма простой является задача формализации математического описания для работы с прикладным программным обеспечением, таким как MATLAB, SimInTech, GNU Octave, SciLab, OpenModelica. Перечисленные программы имеют в составе готовые инструментарии для работы с

преобразованием Лапласа и с передаточными функциями как в виде текстовых программ, так и в виде имитационных моделей. Данная особенность программного обеспечения позволяет значительно упростить процесс моделирования, т. к. исключена необходимость написания дополнительных подпрограмм, процедур и алгоритмов. Для решения задач, поставленных в диссертации, выбрано программное обеспечение MATLAB/Simulink.

Анализ научно-технической литературы в данной области показывает, что выбранный подход применяется как отечественными, так и зарубежными учеными при создании и исследовании тяговых электроприводов. Исследования зарубежных специалистов [1.79 – 1.106] посвящены вопросам синтеза систем автоматического управления тяговыми электроприводами, моделированию работы тяговых преобразователей, моделированию динамических процессов при прохождении нейтральных вставок и т. д.

Исследования российских ученых [1.107, 1.108] посвящены вопросам динамики перспективных электроприводов с асинхронными тяговыми двигателями.

Для моделирования несущей способности колеса электровоза под воздействием эксплуатационного износа бандажа и переходных процессов момента тягового двигателя выбран метод конечных элементов. Данный метод в настоящее время широко применяется при решении широкого спектра задач в железнодорожной отрасли как в Российской Федерации, так и за рубежом [1.109 – 1.111]. Тематика исследований включает в себя как вопросы надежности механических узлов тягового подвижного состава, так и вопросы технологии их изготовления.

Выбор обусловлен тем, что в рамках поставленных задач большое значение имеет:

- геометрия колеса и ее изменение при эксплуатационном износе (уменьшение толщины бандажа);
- свойства материалов бандажа и колесного центра;

- пространственное распределение усилий во фрикционном соединении колесного центра и бандажа.

Другим фактором, указывающим на целесообразность применения метода конечных элементов, является большое количество прикладного программного обеспечения: ANSYS, SolidWorks и т. д. Среди отечественного программного обеспечения следует отметить T-Flex CAD и Универсальный механизм. Для решения задач диссертации выбрано программное обеспечение Универсальный механизм. Факторами в пользу выбора данного программного обеспечения являются:

- наличие специализированного прикладного пакета UMLoco для моделирования механических узлов железнодорожной техники;

- возможность интеграции с MATLAB/Simulink, что в перспективе позволит включить в процесс моделирования не только значение броска момента тягового двигателя, но и характер переходного процесса.

1.7 Постановка задач исследования.

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-километров, 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. Для решения этой задачи необходимо рассмотреть надежность бандажного колеса с учетом динамических процессов, создаваемых тяговым приводом. Необходимость этого обусловлена тенденцией повышения мощности тяговых двигателей электровозов.

Целью работы является создание нового подхода к исследованию надежности конструкции колесных пар грузовых электровозов. Суть подхода

заключается в рассмотрении электромеханических переходных процессов в тяговом приводе как причины проворота бандажа на колесном центре в совокупности с техническим состоянием колеса.

Применение разработанного подхода в инженерной практике позволит:

- повысить показатели надежности электровозов и ресурс колесных пар;
- выполнять более гибкую оценку надежности локомотивных колес;
- значительно сократить время проектирования механической части электровозов.

Поставленная цель требует решения следующего комплекса задач:

- разработать математическую модель электрической части тягового привода электровоза 3ЭС5К для моделирования электромеханических переходных процессов с применением данных из реальной эксплуатации электровозов;

- проверить адекватности математической модели электрической части тягового привода электровоза 3ЭС5К по экспериментальным данным из опытных поездок;

- на основе данных из реальной эксплуатации электровоза 3ЭС5К выполнить моделирование переходных процессов момента тягового двигателя, вызванных: отрывом токоприемника от контактного провода, бросками напряжения в контактной сети, некорректными действиями локомотивной бригады, нарушением сцепления колес с рельсами;

- разработать конечноэлементную модель колеса электровоза 3ЭС5К для оценки несущей способности соединения колесного центра и бандажа при различной степени износа последнего и воздействии температурного поля;

- выполнить моделирование процессов силового взаимодействия в соединении колесного центра и бандажа при воздействии электромеханических переходных процессов в тяговом приводе совместно с температурным полем для различных степеней износа бандажа.

ГЛАВА 2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОВОЗА ЗЭС5К

В настоящей главе разработана компьютерная модель тягового привода электровоза ЗЭС5К. Компьютерная модель состоит из электромагнитной и механической подсистем. Электромагнитная подсистема предназначена для расчета момента тягового двигателя при внешних воздействиях:

- действия локомотивной бригады;
- броски напряжения в контактной сети;
- отрыв токоприемника от контактного провода;
- срыв колес в боксование.

Механическая подсистема предназначена для исследования проворота бандажа при воздействии момента тягового двигателя, рассчитанного в электромагнитной подсистеме, на колесо через тяговую механическую передачу.

Тема моделирования тяговых приводов электровозов с применением методов теории автоматического управления достаточно развита и широко освещена в научно-технической литературе [1.84, 1.85, 2.1 – 2.9]. Основными направлениями исследований являются:

- разработка систем управления тяговыми приводами;
- исследование динамики тяговых приводов;
- моделирование аварийных режимов в электрической и механической части.

Отличием модели, представленной в настоящей главе, является то, что она предназначена для расчета переходных процессов момента тягового двигателя, вызванных:

- некорректными действиями локомотивной бригады;
- бросками напряжения в контактной сети;
- нарушением скользящего контакта токоприемника и контактного провода;
- срывом колесной пары в боксование.

На основании рассчитанных переходных процессов выполняется исследование колеса электровоза на предмет проворота бандажа в зависимости от внешних воздействий на электрическую часть тягового привода.

Материалы настоящей главы изложены в следующих публикациях автора [2.10 – 2.14].

2.1 Объект исследования

В качестве объекта исследования рассматривается тяговый привод грузового электровоза ЗЭС5К [2.15 – 2.19]. Обоснованием для данного выбора являются статистические данные по проворотам бандажей и география эксплуатации электровозов данной серии, приведенные в главе 1.

Электровоз ЗЭС5К построен по трехсекционной схеме с двумя головными и одной бустерной секцией и имеет 12 тяговых осей. В настоящее время на железных дорогах России эксплуатируются электровозы данной серии в двух исполнениях: с потелечным и поосным регулированием силы тяги. В зависимости от исполнения электровоза различается структура тягового привода в части электрической схемы.

Тяговый привод электровоза ЗЭС5К с потележечным регулированием силы тяги представляет собой многоканальную электромеханическую систему. Питание тяговых двигателей осуществляется от выпрямительно-инверторного преобразователя. Преобразователь обеспечивает работу группы из двух параллельно соединенных тяговых двигателей. Каждая такая группа тяговых двигателей смонтирована на одной тележке.

Тяговый привод электровоза ЗЭС5К с поосным регулированием силы тяги обеспечивает индивидуальное управление каждой тяговой осью электровоза. В схеме питания тяговых двигателей применены выпрямительно-инверторные преобразователи, обеспечивающие питание тяговых двигателей по независимым выходным каналам. Фактически, для каждой колесной пары обеспечивается индивидуальный привод.

Следует отметить, что электрическая схема тягового привода электровоза ЗЭС5К с поосным регулированием силы тяги предусматривает работу тяговых двигателей с независимым возбуждением в режиме тяги. Питание обмоток возбуждения обеспечивается от выпрямительных устройств возбуждения.

Эксплуатация электровозов с таким схмотехническим решением показывает (помимо преимуществ, которые дает схема независимого возбуждения) повышение количества отказов в части проворотов бандажей. Одной из возможных причин этого является высокая жесткость механических характеристик тяговых двигателей при независимом возбуждении и, соответственно, тяговых характеристик электровоза.

По механической части указанные исполнения электровоза существенных различий не имеют за исключением применения различных типов моторно-осевых подшипников. Однако, данное различие не имеет принципиального значения в рамках решаемой задачи.

Также, отсутствуют различия между исполнениями в части структуры системы управления тяговым приводом. В обоих случаях система управления построена по принципу подчиненного регулирования с двумя контурами: контур регулирования тока тягового двигателя и контур регулирования частоты вращения. Для обоих рассматриваемых исполнений контуры регулирования реализованы индивидуально для каждого тягового двигателя. Разница заключается в алгоритме обработки сигналов обратных связей и не является принципиальной в рамках решаемой задачи.

Электровозы с потележечным регулированием силы тяги в настоящее время являются наиболее многочисленными. Это связано с тем, что производство электровозов с поосным регулированием силы тяги в качестве базовой модели ООО «ПК «НЭВЗ» начато сравнительно недавно. Таким образом, при разработке математической модели тягового привода за базовую модель взят электровоз ЗЭС5К с потележечным регулированием силы тяги. Однако, в математической модели предусмотрена возможность изменения ее структуры.

2.2 Математическая модель электромагнитной подсистемы

Исходные электрические схемы тягового привода показаны на рисунках 2.1 и 2.2. Математическая модель электромагнитной подсистемы в рамках решаемой задачи разрабатывается только для режима тяги.

На рисунках 2.1 и 2.2 приняты следующие обозначения: L_d , R_d – индуктивность и активное сопротивление дросселя помехоподавления; L_{pc} , R_{pc} –

индуктивность и активное сопротивление сглаживающего реактора; $L_{я}$, $R_{я}$ – индуктивность и активное сопротивление цепи якоря тягового двигателя; $L_{в}$, $R_{в}$ – индуктивность и активное сопротивление обмотки возбуждения тягового двигателя; $L_{ко}$, $R_{ко}$ – индуктивность и активное сопротивление компенсационной обмотки тягового двигателя; $R_{ст}$ – сопротивление резистора ступенчатого ослабления возбуждения, $L_{шш}$, $R_{шш}$ – индуктивность и активное сопротивление индуктивного шунта; E – противо-ЭДС тягового двигателя; $I_{сп}$ – ток выходной цепи статического преобразователя; $I_{я}$ – ток якоря тягового двигателя, $I_{ов}$ – ток возбуждения; $I_{пов}$ – ток цепи постоянного ослабления возбуждения, $I_{шш}$ – ток цепи индуктивного шунта, ТТ – тяговый трансформатор, СП – статический преобразователь, $U_{г}$ – выходное напряжение статического преобразователя, M – тяговые двигатели.

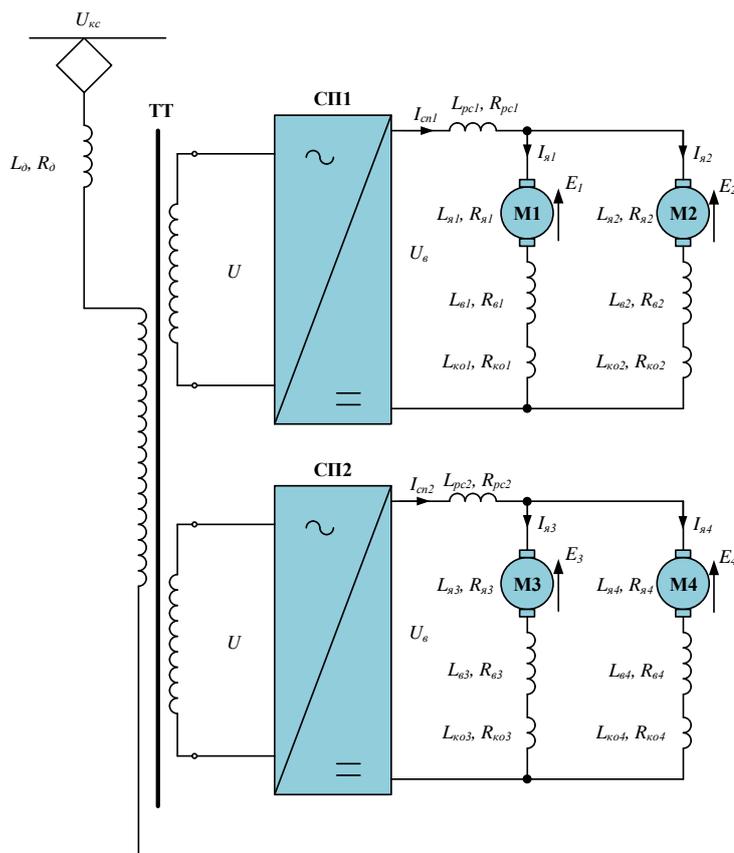


Рис. 2.1 – Электрическая принципиальная схема тягового привода одной секции электровоза ЗЭС5К

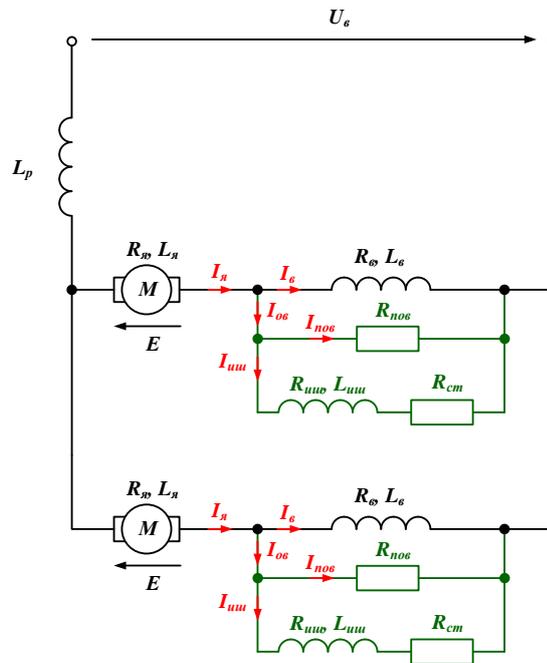


Рис. 2.2 Электрическая принципиальная схема силовых цепей тягового привода

По представленной расчетной схеме составлена система дифференциальных уравнений (2.1).

$$\left\{ \begin{array}{l}
 U_{\text{ТП}} = U_{\text{ТД}} + U_{\text{р}} \\
 I_{\text{ТП}} = \sum_{k=1}^2 I_{\text{Я}k} \\
 U_{\text{р}} = I_{\text{ТП}} R_{\text{р}} + L_{\text{р}} (I_{\text{ТП}}) \frac{dI_{\text{ТП}}}{dt} \\
 U_{\text{ТД}} = U_{\text{Я}} + U_{\text{В}} \\
 I_{\text{Я}} = I_{\text{В}} + I_{\text{ОВ}} \\
 I_{\text{ОВ}} = I_{\text{ПОВ}} + I_{\text{ИШ}} \\
 U_{\text{Я}} = I_{\text{Я}} R_{\text{Я}} + L_{\text{Я}} (I_{\text{Я}}) \frac{dI_{\text{Я}}}{dt} + e \\
 U_{\text{В}} = I_{\text{В}} R_{\text{В}} + L_{\text{В}} (I_{\text{В}}) \frac{dI_{\text{В}}}{dt} \\
 U_{\text{В}} = I_{\text{ПОВ}} R_{\text{ПОВ}} \\
 U_{\text{В}} = I_{\text{ИШ}} (R_{\text{ИШ}} + R_{\text{ДОБ}}) + L_{\text{ИШ}} (I_{\text{ИШ}}) \frac{dI_{\text{ИШ}}}{dt} \\
 J \frac{d\Omega}{dt} = M - M_{\text{с}} \\
 E = C\Phi\Omega = CL_{\text{В}} (I_{\text{В}}) I_{\text{В}} \Omega \\
 M = C\Phi I_{\text{Я}}
 \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Особенностью системы (2.1) является наличие четырех переменных коэффициентов, которые представляют собой индуктивности, изменяющиеся в функции тока нелинейно.

Зависимость индуктивности сглаживающего реактора РС-19 от тока показана на рисунке 2.3. При значениях тока до 600 А индуктивность сглаживающего реактора остается относительно постоянной. В диапазоне токов от 600 до 1100 А наблюдается снижение индуктивности с ростом тока, близкое к линейному.

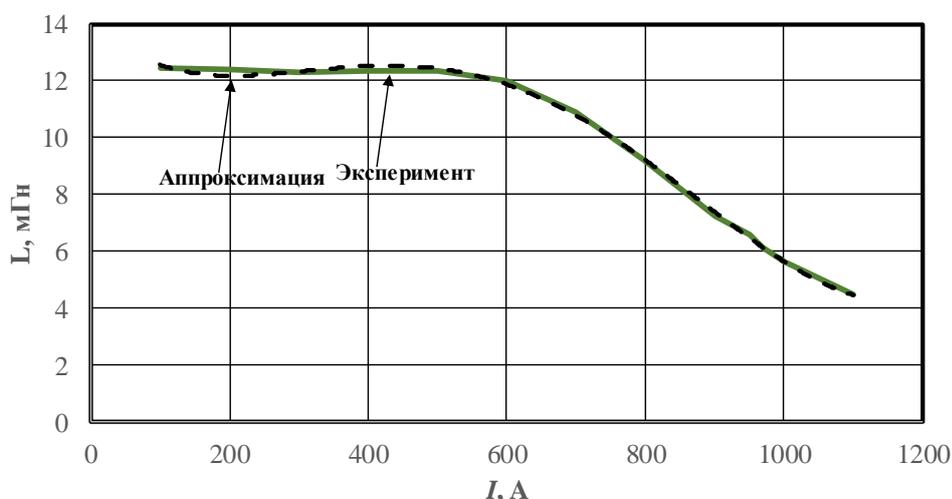


Рис. 2.3 Аппроксимация зависимости индуктивности реактора РС-19 от тока полиномом пятого порядка

В соответствии с [2.21, 2.22] нелинейности сглаживающего реактора оказывают значительное влияние на электромагнитные процессы в цепях тяговых двигателей. Поэтому, принятие индуктивности в виде константы будет недостаточно корректным. Наиболее оптимальным упрощением является аппроксимация нелинейной функцией (рисунок 2.3), что позволило получить аналитическое выражение (2.2).

$$L_p(I) = 6 \cdot 10^{-11} \cdot I^4 - 10^{-7} \cdot I^3 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 - 0,0227 \cdot I + 14,031 \quad (2.2)$$

В соответствии с приложением Б, индуктивность обмотки якоря тягового двигателя НБ-514 меняется в небольших пределах как в функции тока, так и функции степени ослабления магнитного поля машины. Таким образом, значение индуктивности якорной обмотки принимается постоянным и равным среднему значению в окрестности рабочей точки, соответствующей номинальному режиму:

$$L_{\text{я}}(I_{\text{я}}) = \text{const} = 0,6\text{мГн}$$

Индуктивность обмотки возбуждения тягового двигателя НБ-514 входит в дифференциальное уравнение системы (2.1), описывающее баланс напряжений в контуре возбуждения, а также, в уравнение противо-ЭДС тягового двигателя. В первом случае целесообразно принять индуктивность обмотки возбуждения постоянной величиной из-за незначительного изменения (приложение Б) индуктивности в рабочем диапазоне токов. Дополнительным основанием служит отсутствие ярко выраженной зависимости от режима работы схемы ослабления тока возбуждения тягового двигателя. Принятое значение индуктивности:

$$L_{\text{в}}(I_{\text{в}}) = \text{const} = 0,65\text{мГн}$$

Во втором случае зависимость индуктивности от тока возбуждения представлена в виде аппроксимирующей кривой для более детального описания электромагнитных процессов в двигателе с последовательным возбуждением. Аппроксимация выполнена для каждого режима ослабления возбуждения, предусмотренного электрической схемой. Аппроксимирующие кривые описываются полиномиальными функциями. Результаты аппроксимации приведены на рисунках 2.4 – 2.7.

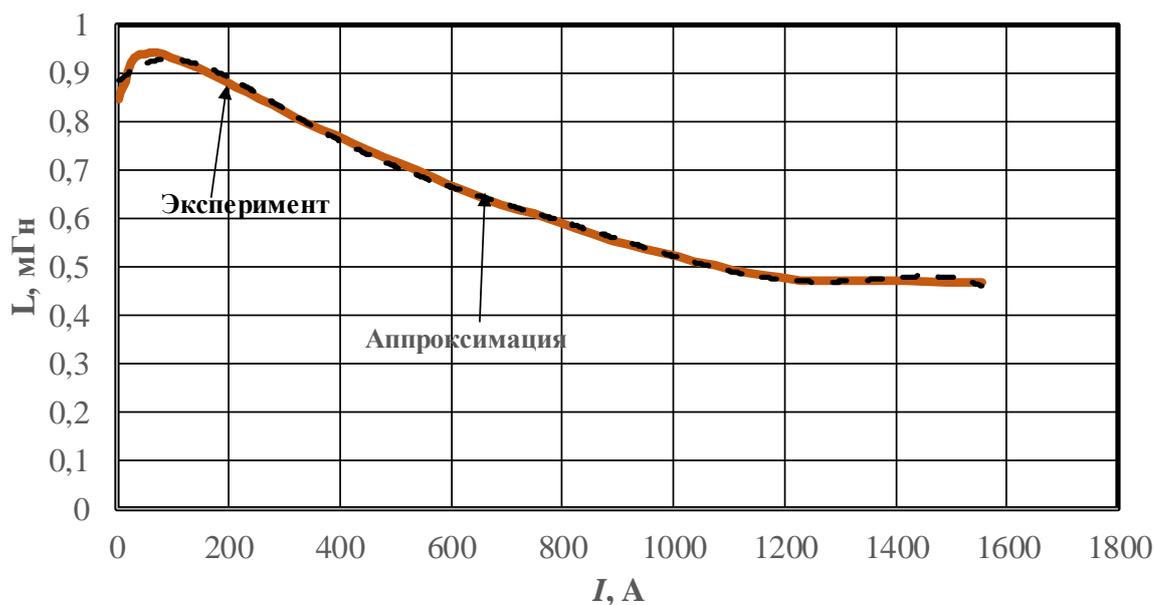


Рис. 2.4 Аппроксимация индуктивности обмотки возбуждения тягового двигателя НБ-514 при ослаблении поля 98 %

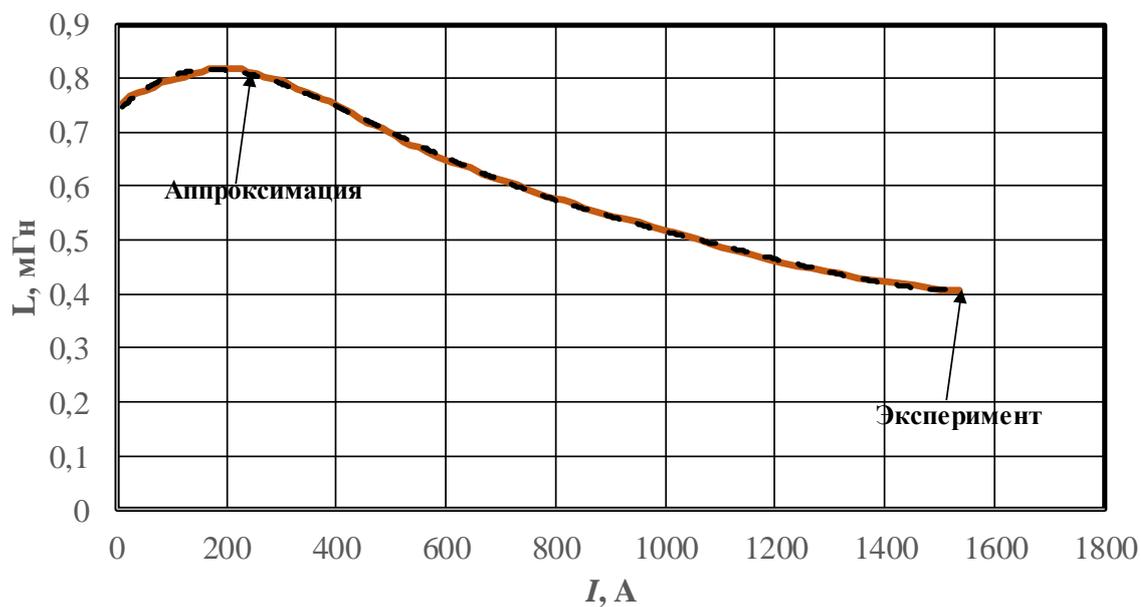


Рис. 2.5 Аппроксимация индуктивности обмотки возбуждения тягового двигателя НБ-514 при ослаблении поля 74 %

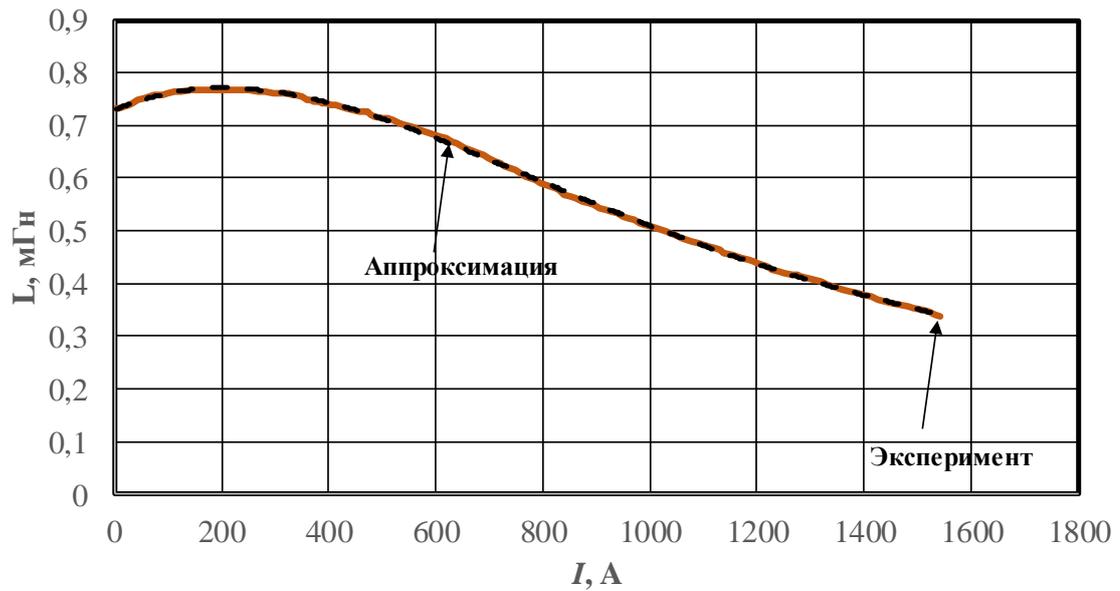


Рис. 2.6 Аппроксимация индуктивности обмотки возбуждения тягового двигателя НБ-514 при ослаблении поля 57 %

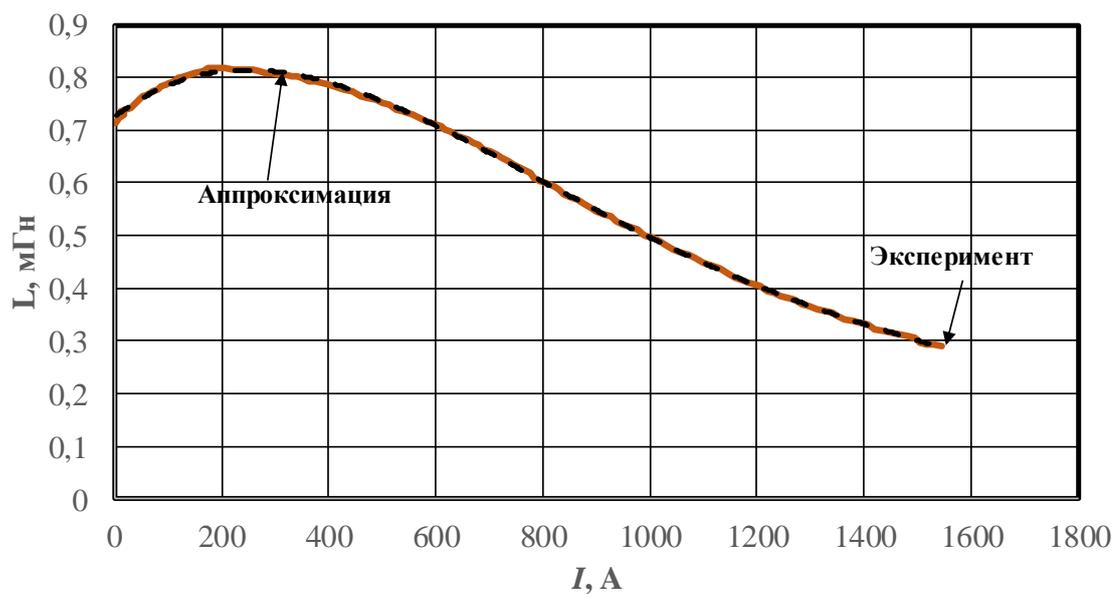


Рис. 2.7 Аппроксимация индуктивности обмотки возбуждения тягового двигателя НБ-514 при ослаблении поля 48 %

Аналитическое выражение индуктивности обмотки возбуждения при степени ослабления поля 98%, показанной на рисунке 2.4, имеет вид:

$$L_{B_{98}}(I) = -2 \cdot 10^{-18} \cdot I^6 + 10^{-14} \cdot I^5 - 2 \cdot 10^{-11} \cdot I^4 + 2 \cdot 10^{-8} \cdot I^3 - 9 \cdot 10^{-6} \cdot I^2 - 0,0012 \cdot I + 0,8797 \quad (2.3)$$

Аналитическое выражение индуктивности обмотки возбуждения при степени ослабления поля 74%, показанной на рисунке 2.5, имеет вид:

$$L_{B74}(I) = 4 \cdot 10^{-20} \cdot I^6 + 5 \cdot 10^{-16} \cdot I^5 - 3 \cdot 10^{-12} \cdot I^4 + 5 \cdot 10^{-9} \cdot I^3 - 4 \cdot 10^{-6} \cdot I^2 - 0,001 \cdot I + 0,7367 \quad (2.4)$$

Аналитическое выражение индуктивности обмотки возбуждения при степени ослабления поля 57%, показанной на рисунке 2.6, имеет вид:

$$L_{B57}(I) = -2 \cdot 10^{-13} \cdot I^4 + 8 \cdot 10^{-10} \cdot I^3 - 10^{-6} \cdot I^2 - 0,0004 \cdot I + 0,7291 \quad (2.5)$$

Аналитическое выражение индуктивности обмотки возбуждения при степени ослабления поля 48%, показанной на рисунке 2.7, имеет вид:

$$L_{B48}(I) = -3 \cdot 10^{-13} \cdot I^4 + 10^{-9} \cdot I^3 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot I^2 - 0,0008 \cdot I + 0,7252 \quad (2.6)$$

Индуктивность индуктивного шунта ИШ-009 изменяется в пределах 1 мГн, при этом, диапазон изменения тока составляет от 100 до 600 А. Поскольку индуктивный шунт является элементом, ограничивающим броски тока при ослаблении возбуждения, принято допущение о том, что индуктивность ИШ-009 постоянна и равна среднему значению на указанном диапазоне токов:

$$L_{иш}(I_{иш}) = const = 2,1\text{мГн}$$

В силу близости и подобия кривых индуктивностей обмотки возбуждения на разных ступенях ослабления тока возбуждения в математической модели применяется одна кривая индуктивности (2.3).

Для составления структурной схемы тягового электропривода представлены в виде объекта управления все элементы цепи преобразования энергии от контактной сети до тягового двигателя.

Для выполнения расчета значений параметров схемы замещения тягового трансформатора принято допущение в соответствии с [2.23 – 2.26]. Во время цикла перемагничивания магнитная проницаемость стали, собственные и взаимные индуктивности считаются постоянными величинами.

Расчет параметров передаточной функции тягового трансформатора электровоза выполняется по Т-образной схеме замещения, которая показана на рисунке 2.8.

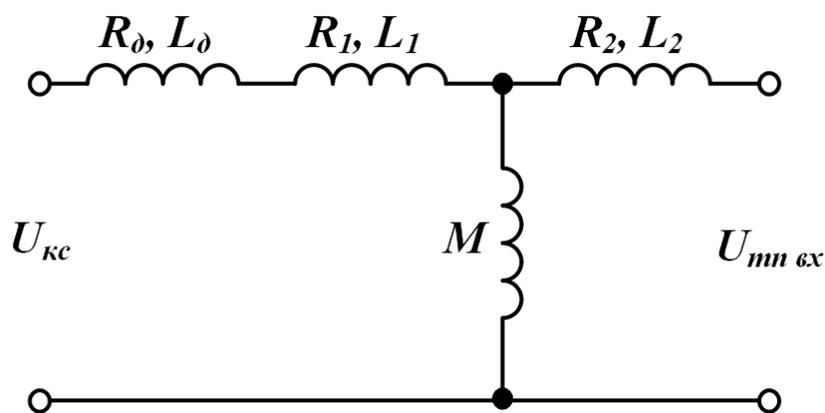


Рис. 2.8 Т-образная схема замещения тягового трансформатора ОНДЦЭ-4350/25 для одной тяговой обмотки

Для упрощения математической модели тягового привода электровоза электромагнитные свойства дросселя помехоподавления рассматриваются совместно с первичной обмоткой тягового трансформатора. Это реализовано суммированием активных и индуктивных сопротивлений данных элементов электрической схемы.

Конструкцией трансформатора предусмотрена секционированная тяговая обмотка. В соответствии с этим расчет параметров схемы замещения выполнен для всех конфигураций тяговой обмотки трансформатора, формирующих четыре зоны регулирования напряжения тяговых двигателей.

Параметры самой схемы замещения определяются по методике [2.27], исходными данными для расчета служат паспортные данные трансформатора, приведенные в приложении Б.

Ток холостого хода трансформатора:

$$I_0 = \frac{I_{xx}\%}{100} I_{1H} = \frac{0,8}{100} 173,8 = 1,3904A$$

Полное сопротивление намагничивающего контура

$$Z_M = \frac{U_1}{I_0} = \frac{25000}{1,3904} = 179800M$$

Активное сопротивление намагничивающего контура

$$R_M = \frac{\Delta P_{xx}}{I_0^2} = \frac{3700}{(1,3904)^2} = 1913,91310M$$

Реактивное сопротивление намагничивающего контура

$$X_M = \sqrt{Z_M^2 - R_M^2} = \sqrt{(17980)^2 - (1913,9131)^2} = 17878,28460M$$

Активное сопротивление короткого замыкания

$$R_K = \frac{P_{K3}}{I_1^2} = \frac{56800}{173,8^2} = 1,88040M$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_K = \frac{U_K\%U_{1H}}{100I_{1H}} = \frac{7 \cdot 25000}{100 \cdot 173,8} = 10,0690M$$

Реактивное сопротивление короткого замыкания

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{(10,069)^2 - (1,8804)^2} = 9,89190M$$

Сопротивление первичной (сетевой) обмотки и приведенное сопротивление вторичной (тяговой) обмотки

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2} = \frac{1,8804}{2} = 0,9402 \text{ Ом}$$
$$X_1 = X_2' = \frac{X_k}{2} = \frac{9,8919}{2} = 4,9460 \text{ Ом}$$

Индуктивность контура намагничивания

$$M = \frac{X_m}{2\pi f} = \frac{17878,2846}{314} = 56,9083 \text{ Гн}$$

Индуктивности обмоток трансформатора

$$L_1 = \frac{X_1}{2\pi f} = \frac{4,946}{314} = 0,0157 \text{ Гн}$$
$$L_2' = L_1 = 0,0157 \text{ Гн}$$

В соответствии с [2.27] передаточная функция тягового трансформатора имеет следующий вид:

$$W_{\text{ТТ}}(s) = \frac{k_{\text{ТТ}}\tau s}{(T_1 + T_2)s + 1}$$

где:

$$k_{\text{ТТ}} = \frac{R_H}{R_H + R_2} \qquad \tau = \frac{M}{R_1}$$
$$T_1 = \frac{L_1 + L_2}{R_1} \qquad T_2 = \frac{L_2}{R_2 + R_H}$$

В математических выражениях для параметров передаточной функции применяются не приведенные сопротивления и индуктивности. Выполнен пересчет приведенных сопротивлений и индуктивности вторичной обмотки тягового трансформатора. Вычисления в соответствии с [2.27] выполним по соотношениям:

$$R_2 = \frac{R'_2}{k} \qquad L_2 = \frac{L'_2}{k}$$

Результаты расчетов параметров вторичной обмотки тягового трансформатора приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Результаты расчетов параметров вторичной обмотки тягового трансформатора для четырех зон регулирования напряжения

Номер зоны регулирования напряжения	Коэффициент трансформации	Активное сопротивление R_2 , Ом	Индуктивность L_2 , Гн
1	79,37	0,000107	$2,53 \cdot 10^{-5}$
2	39,68	0,000428	$1,06 \cdot 10^{-5}$
3	26,45	0,000965	$2,28 \cdot 10^{-5}$
4	19,84	0,00171	$4,06 \cdot 10^{-5}$

При расчете параметров передаточной функции применяется параметр R_H , который представляет собой активное сопротивление нагрузки тягового трансформатора. В соответствии с электрической схемой тягового привода активное сопротивление нагрузки на каждую тяговую обмотку трансформатора складывается из: активного сопротивления якорной цепи и цепи возбуждения тяговых двигателей.

В условиях решаемой задачи не учитывается падение напряжения на тяговом преобразователе в силу его малого значения по сравнению с остальными элементами силовых цепей тягового привода.

В таблице 2.2 приведены результаты расчета параметров передаточной функции тягового трансформатора для всех зон регулирования напряжения.

Таблица 2.2 Параметры передаточной функции тягового трансформатора

Номер зоны регулирования напряжения	$k_{\text{тп}}$	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$	$\tau, \text{с}$
1	0,99	0,0167	0,0008	60,5
2	0,98	0,0167	0,0003	60,5
3	0,96	0,0167	0,0007	60,5
4	0,94	0,0167	0,0013	60,5

При определении параметров передаточной функции тягового преобразователя ВИП-4000 применялись его паспортные данные, а также, его силовая схема и схема управления.

В соответствии с методикой [2.28] рассматриваемый объект с достаточной точностью описывается апериодическим звеном первого порядка:

$$W_{\text{тп}}(s) = \frac{k_{\text{тп}}}{T_{\text{тп}}s + 1}$$

где: $k_{\text{тп}}$ – коэффициент усиления; $T_{\text{тп}}$ – постоянная времени.

Коэффициент усиления передаточной функции тягового преобразователя можно определить по соотношению:

$$k_{\text{тп}} = \frac{U_{\text{тп}}}{U_3}$$

где: $U_{\text{тп}}$ – выходное напряжение тягового преобразователя; U_3 – напряжение задания.

$$k_{\text{тп}} = \frac{U_{\text{тп}}}{U_3} = \frac{1260}{10} = 126$$

Постоянная времени складывается из постоянной времени фильтра, включаемого на входе системы управления преобразователя, составляющей 0,003 с, и постоянной времени, обусловленной работой силовой схемы, которая составляет 0,0017 с [2.29 – 2.31]. Таким образом, постоянная времени тягового преобразователя составляет 0,0047 с.

Передаточная функция тягового преобразователя ВИП-4000 по результатам выполненных расчетов примет вид:

$$W_{\text{ТП}}(s) = \frac{k_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}}s + 1} = \frac{126}{0,0047s + 1}$$

Для составления структурной схемы электромагнитной подсистемы применим к системе дифференциальных уравнений (2.1) прямое преобразование Лапласа, а также, учтем принятые выше допущения и полученные значения индуктивных параметров обмоток. В результате получена система уравнений (2.2).

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\text{ТП}}(s) = U_{\text{ТД}}(s) + U_{\text{р}}(s) \\ I_{\text{ТП}}(s) = \sum_{k=1}^2 I_{\text{я}k}(s) \\ U_{\text{р}}(s) = I_{\text{ТП}}(s)R_{\text{р}} + L_{\text{р}}(I_{\text{ТП}})I_{\text{ТП}}(s)s \\ U_{\text{ТД}}(s) = U_{\text{я}}(s) + U_{\text{в}}(s) \\ I_{\text{я}}(s) = I_{\text{в}}(s) + I_{\text{ов}}(s) \\ I_{\text{ов}}(s) = I_{\text{пов}}(s) + I_{\text{иш}}(s) \\ U_{\text{я}}(s) = I_{\text{я}}(s)R_{\text{я}} + L_{\text{я}}(I_{\text{я}})I_{\text{я}}(s)s + e(s) \\ U_{\text{в}}(s) = I_{\text{в}}(s)R_{\text{в}} + L_{\text{в}}(I_{\text{в}})I_{\text{в}}(s)s \\ U_{\text{в}}(s) = I_{\text{пов}}(s)R_{\text{пов}} \\ U_{\text{в}}(s) = I_{\text{иш}}(s)(R_{\text{иш}} + R_{\text{доб}}) + L_{\text{иш}}(I_{\text{иш}})I_{\text{иш}}(s)s \\ J\Omega(s)s = M(s) - M_{\text{с}}(s) \\ e(s) = C\Phi(s)\Omega(s) = CL_{\text{в}}(I_{\text{в}})I_{\text{в}}(s)\Omega(s) \\ M(s) = C\Phi(s)I_{\text{я}}(s) \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Применяя к системе уравнений (2.2) ряд алгебраических операций, получим передаточные функции звеньев разрабатываемой структурной схемы.

Передаточная функция цепи постоянного ослабления тока возбуждения тягового двигателя:

$$W_{\text{ТП}}(s) = \frac{I_{\text{ПОВ}}(s)}{U_{\text{В}}(s)} = \frac{1}{R_{\text{ПОВ}}} = k_{\text{ПОВ}}$$

$$W_{\text{ТП}}(s) = \frac{1}{0,294} = 3,4014$$

Передаточная функция цепи индуктивного шунта:

$$\begin{aligned} W_{\text{иш}}(s) &= \frac{I_{\text{иш}}(s)}{U_{\text{В}}(s)} = \frac{1}{R_{\text{иш}} + R_{\text{доб}} + L_{\text{иш}}s} = \\ &= \frac{1}{R_{\text{иш}} + R_{\text{доб}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L_{\text{иш}}}{R_{\text{иш}} + R_{\text{доб}}}s} = \frac{k_{\text{иш}}}{T_{\text{иш}}s + 1} \end{aligned}$$

Значения коэффициента усиления передаточной функции цепи индуктивного шунта на трех ступенях ослабления тока возбуждения (параметры резистора ослабления возбуждения приведены в приложении Б):

$$k_{\text{иш1}} = \frac{1}{R_{\text{иш}} + R_{\text{доб1}}} = \frac{1}{0,0066 + 0,0209} = 36,36$$

$$k_{\text{иш2}} = \frac{1}{R_{\text{иш}} + R_{\text{доб2}}} = \frac{1}{0,0066 + 0,017} = 42,37$$

$$k_{\text{иш3}} = \frac{1}{R_{\text{иш}}} = \frac{1}{0,0066} = 151,51$$

Значения постоянных времени передаточной функции цепи индуктивного шунта на трех ступенях ослабления тока возбуждения:

$$T_{иш1} = \frac{L_{иш}}{R_{иш} + R_{доб1}} = \frac{0,0017}{0,0066 + 0,0209} = 0,0618с$$

$$T_{иш2} = \frac{L_{иш}}{R_{иш} + R_{доб2}} = \frac{0,0017}{0,0066 + 0,017} = 0,072с$$

$$T_{иш3} = \frac{L_{иш}}{R_{иш}} = \frac{0,0017}{0,0066} = 0,2576с$$

Передаточная функция цепи индуктивного шунта на трех ступенях ослабления тока возбуждения имеет вид:

$$W_{иш1}(s) = \frac{k_{иш1}}{T_{иш1}s + 1} = \frac{36,36}{0,0618s + 1}$$

$$W_{иш2}(s) = \frac{k_{иш2}}{T_{иш2}s + 1} = \frac{42,37}{0,072s + 1}$$

$$W_{иш3}(s) = \frac{k_{иш3}}{T_{иш3}s + 1} = \frac{151,51}{0,2576s + 1}$$

Передаточная функция для расчета напряжения обмотки возбуждения:

$$W_B(s) = \frac{U_B(s)}{I_B(s)} = R_B + L_B s = 1 + \frac{L_B}{R_B} s = 1 + T_B s$$

Постоянная времени обмотки возбуждения тягового двигателя:

$$T_B = \frac{L_B}{R_B} = \frac{0,00072}{0,0194} = 0,0371с$$

Передаточная функция для расчета напряжения обмотки возбуждения тягового двигателя по результатам расчета примет вид:

$$W_B(s) = 1 + T_B s = 1 + 0,0371s$$

Передаточная функция цепи якоря тягового двигателя:

$$W_{\text{я}}(s) = \frac{I_{\text{я}}(s)}{U_{\text{я}}(s)} = \frac{1}{R_{\text{я}} + L_{\text{я}}s} = \frac{\frac{1}{R_{\text{я}}}}{1 + \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}s} = \frac{k_{\text{я}}}{T_{\text{я}}s + 1}$$

$$k_{\text{я}} = \frac{1}{R_{\text{я}}} = \frac{1}{0,0112} = 89,28$$

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = \frac{0,00065}{0,0112} = 0,058\text{с}$$

По результатам выполненных расчетов передаточная функция цепи якоря тягового двигателя имеет вид:

$$W_{\text{я}}(s) = \frac{89,28}{0,058s + 1}$$

Структурная схема электромагнитной подсистемы приведена на рисунке 2.9. На ее основании будет построена компьютерная модель в Matlab/SIMULINK.

Представленная математическая модель составлена для одной вторичной обмотки тягового трансформатора, т. е. для двух тяговых электродвигателей.

Математическая модель имеет три входных канала для ввода массивов: напряжения контактной сети $U_{\text{кв ф}}(s)$; сигнала задания тока тяговых двигателей $U_{\text{зт}}(s)$; сигнала задания скорости движения электровоза $U_{\text{зт}}(s)$.

В качестве массивов исходных данных могут быть использованы:

- экспериментальные записи, полученные в ходе проведения экспериментов или испытаний;

- записи регистраторов системы управления электровоза или бортовых систем безопасности и автоматизированного ведения поезда (в случае исследуемого электровоза – МСУД, ИСАВП-РТ).

Выходными массивами данных являются переходные процессы момента на валу тягового двигателя. Достоинством примененного подхода является учет

Общий вид компьютерной модели в Matlab/SIMULINK представлен на рисунке 2.10.

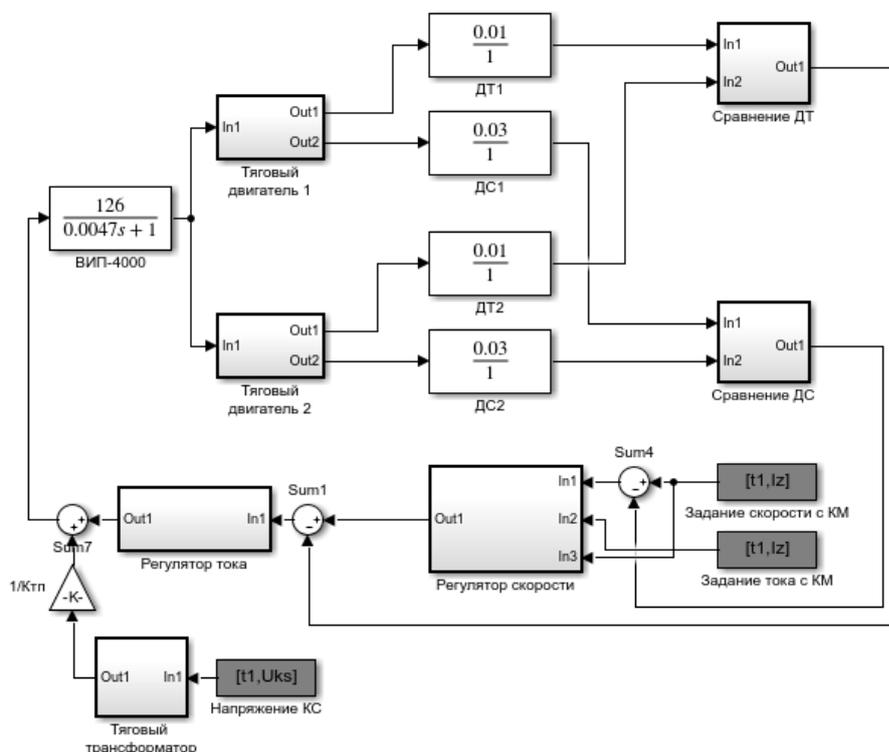


Рис. 2.10 Компьютерная модель тягового электропривода магистрального грузового электровоза 3ЭС5К в MATLAB/Simulink

Входные величины (воздействия) в представленной компьютерной модели задаются в виде массивов данных в функции времени и загружаются в нее из рабочей области (Workspace) MATLAB. В рабочую область MATLAB массивы с входными величинами могут загружаться с любого носителя информации. Коммуникацию с рабочей областью MATLAB в компьютерной модели обеспечивают блоки:

- **Задание скорости с КМ** – загрузка массива данных с сигналом задания скорости, подаваемым с датчика скорости контроллера машиниста;
- **Задание тока с КМ** – загрузка массива данных с сигналом задания тока тяговых двигателей, подаваемым с главной рукоятки контроллера машиниста;

- **Напряжение КС** – загрузка массива данных изменения во времени действующего значения напряжения контактной сети.

Результат расчета переходных процессов момента также загружается в рабочую область MATLAB, после чего может быть сохранен в любом удобном для пользователя виде: изображение, табличный файл, mat-файл (для дальнейшей обработки данных в среде MATLAB).

2.3 Экспериментальная проверка адекватности математической модели электромагнитной подсистемы тягового электропривода электровоза ЗЭС5К

Экспериментальная проверка адекватности математической модели тягового привода электровоза ЗЭС5К выполнялась на испытательном полигоне ООО «ПК «НЭВЗ» (г. Новочеркасск). Эксперимент проводился в период с 19 по 20 декабря 2020 года. Объектом эксперимента был электровоз ЗЭС5К №1090. Для записи результатов эксперимента использовался штатный регистратор МСУД, являющийся бортовым оборудованием электровоза, и измерительный комплекс на основе аналого-цифрового преобразователя L-Card E14-440.

В соответствии с программой эксперимента выполнен разгон электровоза из неподвижного состояния до скорости 60 км/ч. Разгон выполнялся одной головной секцией, при этом, бустерная и вторая головная секции электровоза двигались холодным резервом. В процессе разгона пройдены все четыре зоны регулирования напряжения тяговых двигателей, режим ослабления тока возбуждения тяговых двигателей не реализовывался в соответствии с ограничениями, действующими на испытательном полигоне. Электровоз двигался по ровному профилю пути. Далее представлены осциллограммы координат тягового электропривода и рабочих характеристик электровоза, полученные в результате выполненного эксперимента.

На рисунке 2.11 показана осциллограмма тока тягового двигателя. В ходе экспериментальной поездки выполнен плавный набор тяги, движение с постоянной тягой (неизменным значением тока тяговых двигателей), плавное снижение тяги и сброс тяги в нуль. Полученные экспериментальные данные по току тяговых

двигателей позволят проверить работу разработанной модели как в переходных, так и в установившихся режимах.

На рисунке 2.12 приведена осциллограмма скорости движения электровоза.

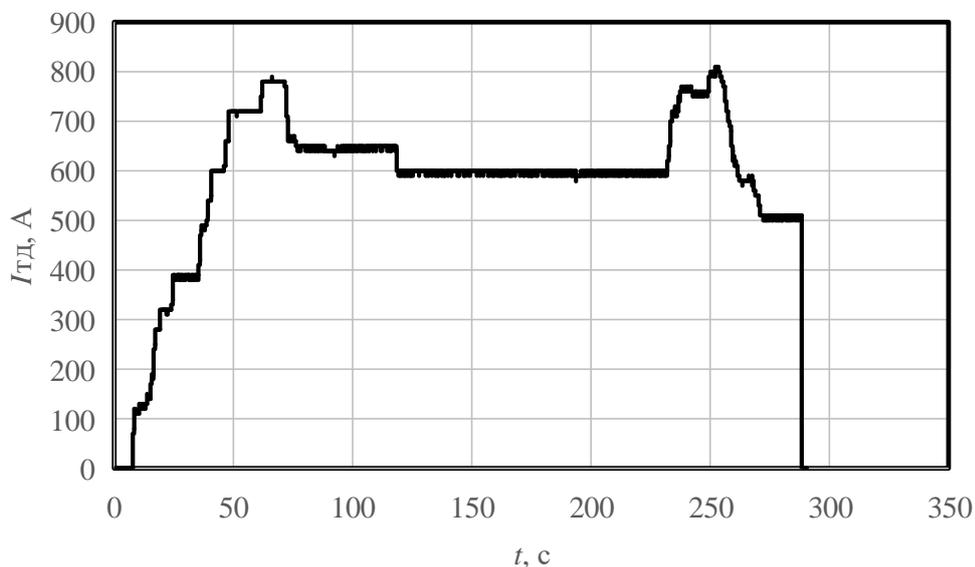


Рис. 2.11 Осциллограмма тока тягового двигателя электровоза 3ЭС5К

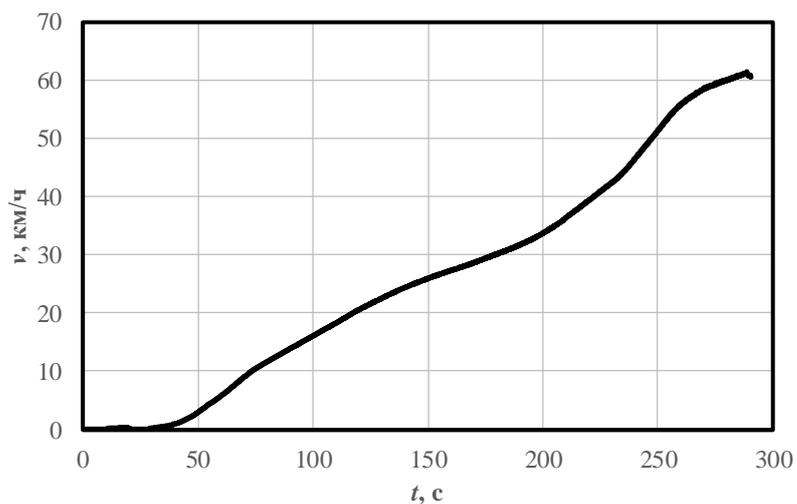


Рис. 2.12 Осциллограмма скорости электровоза 3ЭС5К

Осциллограмма напряжения контактной сети на испытательном полигоне представлена на рисунке 2.13.

В соответствии с рисунком 2.13 при проведении эксперимента в контактной сети наблюдалось напряжение, которое в среднем за время опытной поездки

составило около 26500 В и изменяясь в относительно небольшом диапазоне. Такой характер напряжения контактной сети в совокупности с ровным профилем пути на испытательном полигоне дают условия эксперимента, близкие к идеальным. В дополнение к сказанному, следует отметить, что на момент испытаний метеорологические условия (ясная погода без осадков с температурой воздуха ниже нуля) обеспечили чистую и сухую поверхность катания рельсов, что в свою очередь обусловило хорошие условия сцепления колес с рельсами и отсутствие боксования на протяжении всего процесса разгона электровоза. Это подтверждается анализом признака наличия боксования из файлов регистратора МСУД за данную опытную поездку.

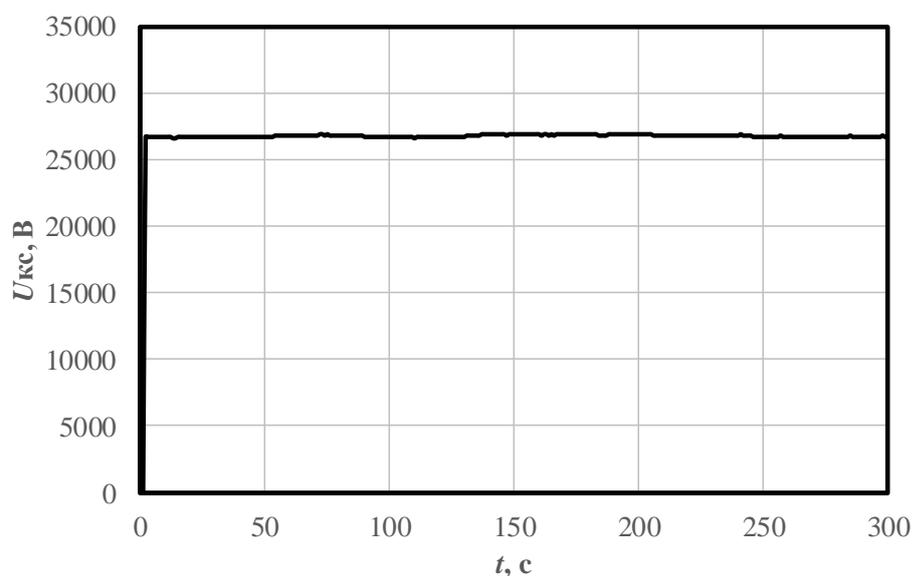


Рис. 2.13 Осциллограмма действующего значения напряжения контактной сети на испытательном полигоне

Моделирование разгона электровоза выполнялось для одного тягового двигателя на основании входных данных (сигналы контроллера машиниста и напряжение контактной сети), полученных в ходе описанной выше опытной поездки. В данном случае достаточно рассмотрения одного двигателя, т. к. в рамках опытной поездки все тяговые двигатели работали в одинаковых условиях. В ходе моделирования регистрировались: скорость движения электровоза и ток якоря

тягового двигателя. Результаты моделирования и их сравнение с данными, полученными в ходе опытной поездки, представлены на рисунке 2.14.

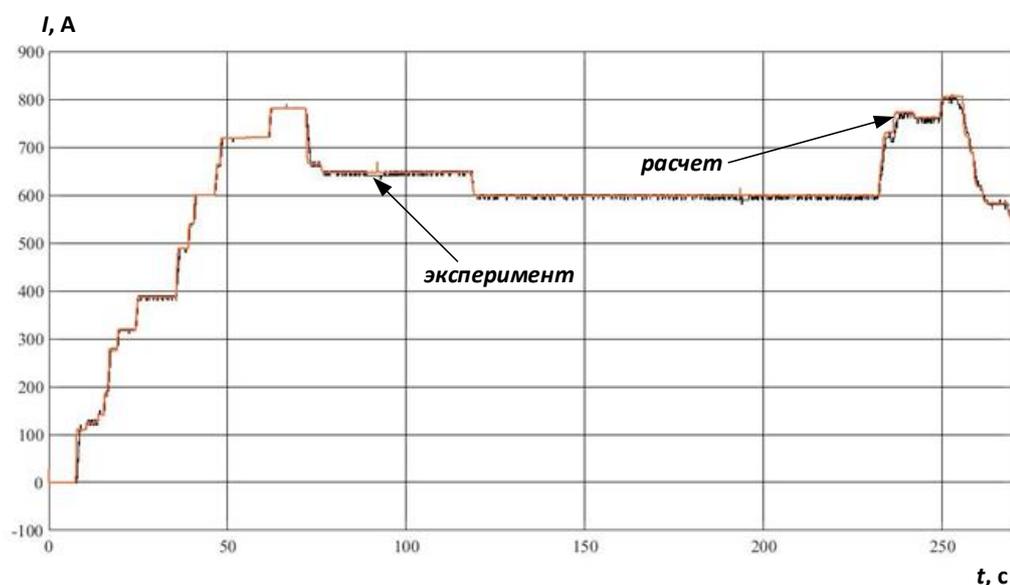


Рис. 2.14 Экспериментальная и расчетная временные диаграммы тока якоря тягового двигателя на испытательном полигоне

В связи с тем, что на испытательном полигоне ООО «ПК «НЭВЗ» действует ряд ограничений, реализация всех режимов работы в тяге (выбор всех зон регулирования напряжения и всех ступеней ослабления магнитного поля двигателя) не представляется возможной. Поэтому, в дополнение к результатам, представленным на рисунке 2.15, приведены результаты компьютерного моделирования поездки электровоза ЗЭС5К №955 на участке Иланская – Канск-Енисейский в сопоставлении с записью регистратора МСУД этой поездки.

Временная диаграмма соответствует движению электровоза с составом в условиях реальной эксплуатации. Как видно из рисунка, как и в случае экспериментальной поездки по испытательному полигону, имеет место высокая степень сходимости результатов компьютерного моделирования и записи регистратора МСУД.

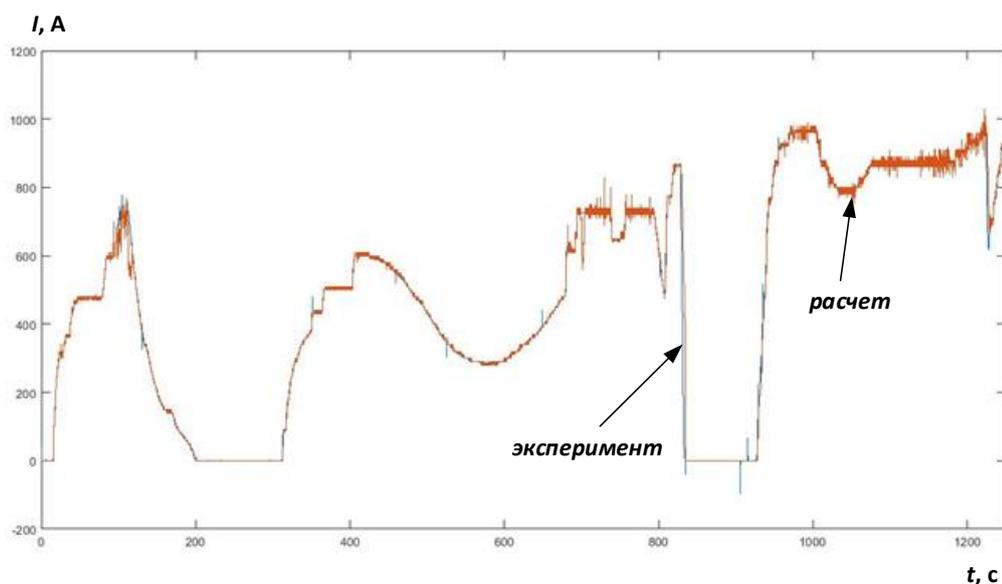


Рис. 2.15 Экспериментальная и расчетная временные диаграммы тока якоря тягового двигателя в условиях реальной эксплуатации

Из выполненной оценки адекватности математической модели тягового привода электровоза ЗЭС5К следует, что разработанная модель характеризуется высокими показателями точности расчета исследуемых электромагнитных процессов. Это подтверждено как в условиях эксперимента, поставленного на испытательном полигоне, так и в условиях реальной эксплуатации электровоза на участках железных дорог.

2.4 Математическая модель механической подсистемы тягового электропривода электровоза ЗЭС5К

Конструкция механической подсистемы тягового электропривода электровоза ЗЭС5К подробно описана в главе 1. В данной главе интерес представляет моделирование колеса электровоза как системы тел, обладающих упругими свойствами.

При разработке математической модели механической подсистемы применено программное обеспечение «Универсальный механизм» в соответствии с [2.32].

При решении задачи исследования условий на поверхностях сопряжения бандажа и колёсного центра, вызванных сборкой с натягом и приложением нормальных и касательных сил в контакте бандажа и рельса, применена следующая расчётная схема: бандаж представлен кольцом с прямоугольным радиальным сечением; коробчатый колёсный центр двумя кольцами, связанными между собой цилиндрической и конической оболочками. Расчетная схема показана на рисунке 2.16.

В связи с тем, что на решение задачи посадки бандажа на колёсный центр и контактной задачи колеса и рельса большое влияние оказывает радиальная жёсткость оболочек, их толщина должна быть подобрана так, чтобы суммарная площадь цилиндрических сечений спиц натурального колеса и оболочек были равны.

Площади поперечных сечений спиц оценены следующим образом. Площадь поперечного сечения спицы в её поперечном сечении на радиусе $r = 314$ мм составила $55,6 \text{ см}^2$, а суммарная площадь 12 спиц $F_{\text{сум}} = 667, 2 \text{ см}^2$.

Приравнивая её площади цилиндрического сечения оболочки $2\pi rh$, где r – радиус сечения, h – толщина оболочки, получаем:

$$h = F_{\text{сум}}/2\pi r = 3,38 \text{ см}$$

На радиусе $r = 420$ мм площадь поперечного сечения одной спицы составила 72 см^2 , а суммарная площадь 12 спиц $F_{\text{сум}} = 864 \text{ см}^2$. Аналогично, приравнивая её площади цилиндрического сечения оболочки, получаем толщину оболочки $h=3,27$ см.

Из условия удобства стыковки конечноэлементных сеток обода и дисков колесного центра толщина дисков (или оболочек) принята равной 32,4 мм. На поверхностях сопряжения бандажа и центра размер конечных элементов в осевом направлении принят равным 10,8 мм. При построении трёхмерной конечноэлементной модели угловой шаг принят равным 1 градусу. Тогда размер конечного элемента, расположенного на поверхности катания бандажа, в окружном направлении составил 10,9 мм.

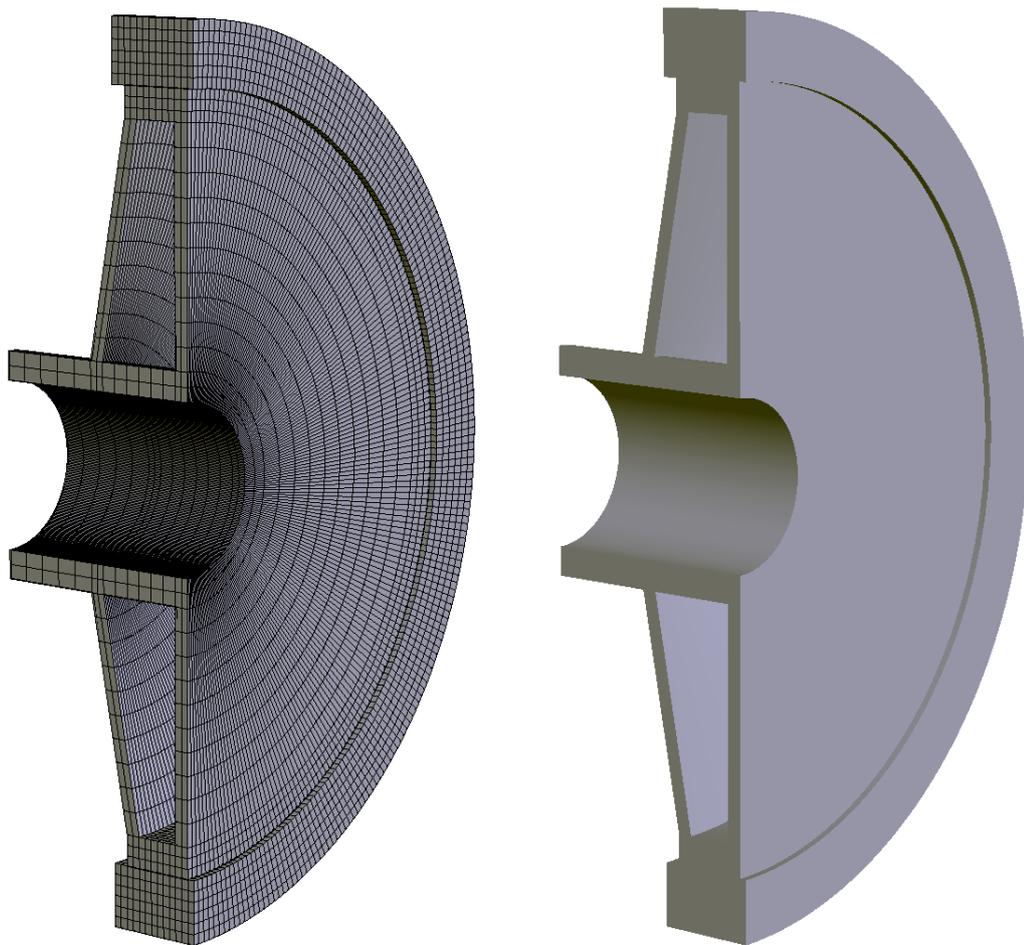


Рис. 2.16 Конечноэлементная модель колеса электровоза ЗЭС5К

Данная модель позволяет выполнять расчеты процессов силового взаимодействия колесного центра и бандажа при воздействии переходных процессов момента, рассчитанных на модели электромагнитной подсистемы. Предусмотрена возможность изменения значения натяга (что позволяет учесть воздействие температурного поля) и толщины бандажа (что позволяет учесть степень износа колеса).

2.5 Выводы по главе 2

В настоящей главе в соответствии с поставленными задачами:

- разработана математическая модель электромагнитной подсистемы, которая позволяет рассчитывать переходные процессы в тяговом приводе

электровоза, вызванные: некорректными действиями локомотивной бригады, бросками напряжения в контактной сети, нарушением скользящего контакта токоприемника и контактного провода, срывом колесной пары в боксование;

- на основании математической модели электромагнитной подсистемы построена компьютерная модель с применением программного обеспечения Matlab/SIMULINK. Компьютерная модель позволяет выполнять расчеты процессов в тяговом приводе с использованием записей реальных поездок электровоза в качестве исходных данных;

- выполнено сопоставление результатов расчета процессов в тяговом приводе, полученных на компьютерной модели с данными из опытной поездки на испытательном полигоне и из реальной эксплуатации; установлена высокая степень совпадения расчетных и экспериментальных данных, что говорит об адекватности модели электромагнитной подсистемы;

- разработана конечноэлементная модель колеса электровоза с применением программного обеспечения «Универсальный механизм»; модель позволяет исследовать проворот бандажа под воздействием переходных процессов в электромагнитной подсистеме с учетом текущего эксплуатационного состояния колеса.

ГЛАВА 3

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОДСИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ПРИВОДА

В данной главе представлены результаты моделирования переходных процессов в тяговом электроприводе, вызванных:

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

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 оценки возможности проворота бандажа.

В качестве исходных данных для моделирования (а также, для проверки адекватности результатов) использовались записи реальных поездок электровоза с составом, полученные из штатного регистратора МСУД.

Учитывая квадратичную зависимость момента тягового двигателя НБ-514 от тока цепи якоря, достоверность результатов моделирования момента проверялась сопоставлением расчетных и экспериментальных данных о токе.

Результаты исследований, представленные в данной главе опубликованы автором в [3.1 – 3.4].

3.1 Компьютерное моделирование переходных процессов в тяговом электроприводе электровоза ЗЭС5К при некорректных действиях локомотивной бригады

Под некорректными действиями локомотивной бригады понимается чрезмерно интенсивное задание тяги электровоза в процессе движения его с составом. В соответствии с имеющимися данными из эксплуатации, данный режим возникает в основном при ручном управлении электровозом. В начале движения на

подъем в условиях предварительного набора недостаточной скорости машинист увеличивает задание на ток тяговых двигателей уже на подъеме. При этом, увеличение задания тока производится достаточно резко, вызывая ударные нагрузки в тяговой передаче и колесных парах.

Следует отметить, что описанная ситуация достаточно редка, т. к. вождение грузовых поездов по участкам со сложным профилем в основном осуществляется в режимах автоведения или авторегулирования. По этой причине в настоящей работе не приводятся экспериментальные данные по некорректным действиям локомотивной бригады, а представлены только результаты моделирования.

Моделирование движения электровоза с составом выполнено для начальной скорости, составляющей 8 км/ч.

При моделировании получен переходный процесс электромагнитного момента на валу тягового двигателя, показанные на рисунке 3.1.

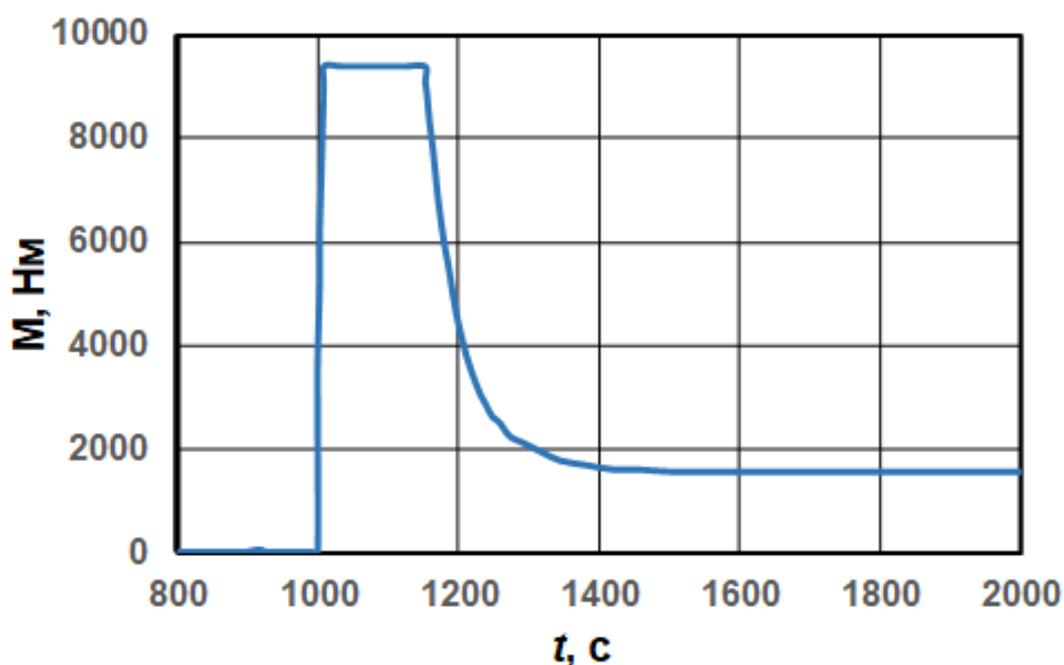


Рис. 3.1 Временная диаграмма переходных процессов момента на валу тягового двигателя при начальной скорости движения электровоза 8 км/ч

Из представленной временной диаграммы установлено, что в рассматриваемом режиме работы тягового электропривода резкое увеличение

задания тяги приводит к броску электромагнитного момента на валу тягового двигателя в 9,2 кНм.

Для определения механических нагрузок на колесе приведем полученные значения бросков электромагнитного момента к оси колесной пары по соотношению (3.1).

$$\Delta M_{\text{пр}} = \Delta M \cdot i_{\text{ред}} \quad (3.1)$$

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

$$\Delta M_{\text{пр}} = 9,2 \cdot 4,19 = 38,5 \text{ кНм}$$

3.2 Компьютерное моделирование переходных процессов в тяговом электроприводе электровоза ЗЭС5К при отрыве токоприемника от контактной сети

В данной части работы выполнено моделирование переходных процессов, вызванных отрывом токоприемника электровоза ЗЭС5К №918 (депо приписки электровоза — Тайшет) от контактного провода в условиях выполнения рейса с составом на перегоне Тайшет – Нижнеудинск. Следует отметить, что в рамках выполняемого исследования не представляет интереса причина, по которой произошел разрыв скользящего контакта токоприемника с контактной сетью.

На рисунке 3.2 показаны осциллограммы, иллюстрирующие исследуемые процессы. Электровоз с составом движется со скоростью 78 км/ч, при этом, наблюдается стабильное значение напряжения контактной сети на уровне 26,6 кВ. Напряжение тяговых двигателей перед возникновением переходного процесса составляет 910 В, при этом, одна колесная пара электровоза развивает силу тяги, составляющую 12,6 кН при токе якорной цепи тягового двигателя 340 А.

Момент отрыва токоприемника от контактной сети отмечен на рисунке 3.2 областью. Развертка данного участка осциллограммы показана на рисунке 3.3.

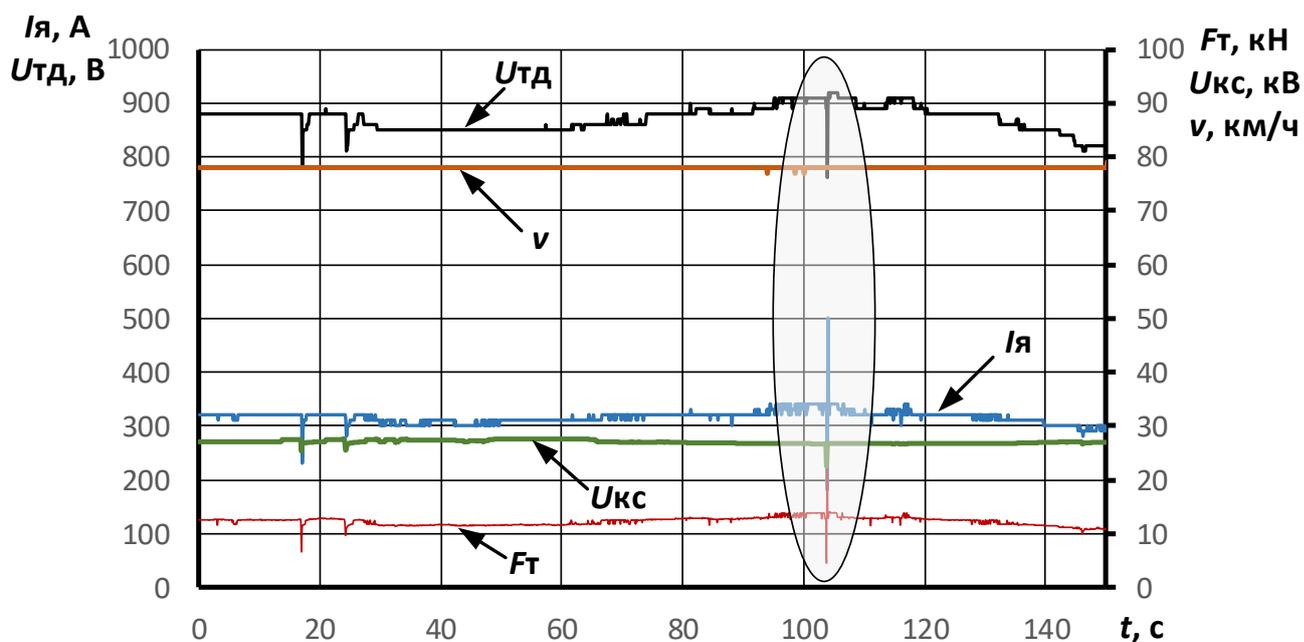


Рис. 3.2 Осциллограммы процессов в тяговом электроприводе электровоза 3ЭС5К при отрыве токоприемника от контактного провода

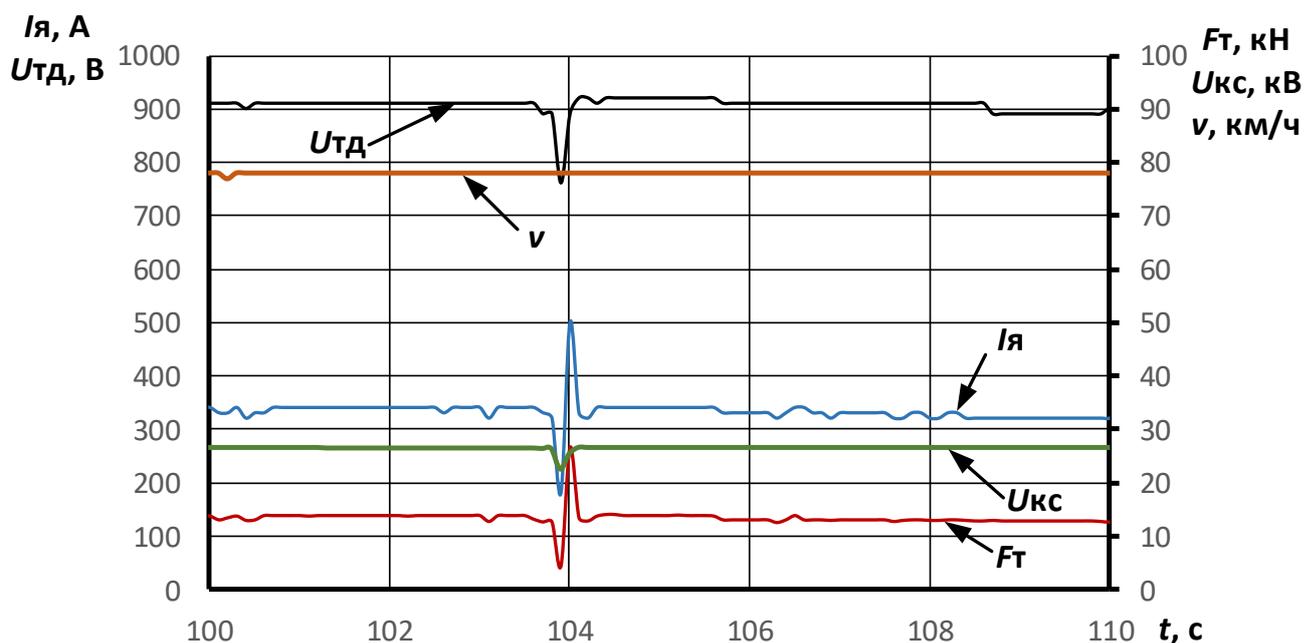


Рис. 3.3 Развертка осциллограммы процессов в тяговом электроприводе электровоза 3ЭС5К при отрыве токоприемника от контактного провода

Отрыв токоприемника характеризуется провалом напряжения на токоприемнике со значения 26,6 кВ до 22,6 кВ. При этом, наблюдается провал напряжения тягового двигателя со значения 910 В до значения 760 В. При

восстановлении скользящего контакта напряжение на токоприемнике возвращается к исходному значению, напряжение тягового двигателя принимает значение 920 В.

Значение тока тягового двигателя при отрыве токоприемника от контактного провода снижается с 340 до 180 А. При восстановлении скользящего контакта токоприемника и контактного провода происходит бросок тока со 180 до 500 А, после чего ток тягового двигателя возвращается к значению в 340 А.

При отрыве токоприемника от контактного провода происходит провал силы тяги с 12,6 кН до 4,4 кН. При восстановлении скользящего контакта происходит бросок силы тяги со значения 4,4 кН до 26,5 кН. Тот факт, что длительность переходного процесса в рассматриваемом случае составляет 0,8 с, указывает на ударный характер переходного процесса силы тяги и, соответственно, электромагнитного момента на валу тягового двигателя.

Результаты компьютерного моделирования исследуемых переходных процессов представлены на рисунках 3.4, 3.5.

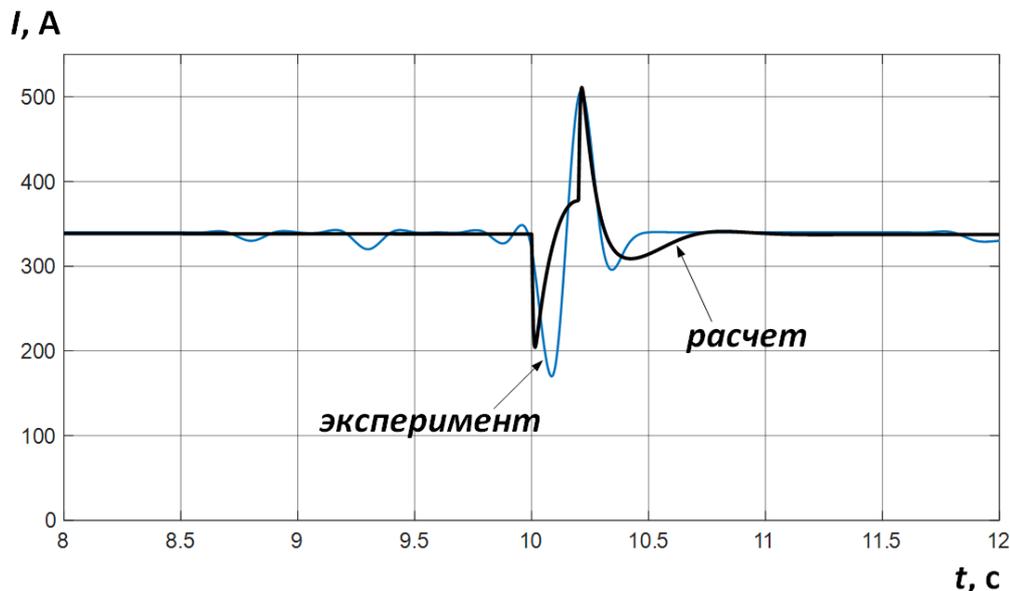


Рис. 3.4 Переходные процессы тока тягового двигателя

Сопоставление осциллограммы тока тягового двигателя из записи реальной поездки и результата моделирования, как показано на рисунке 3.4, подтверждает достоверность расчетных данных по моменту тягового двигателя.

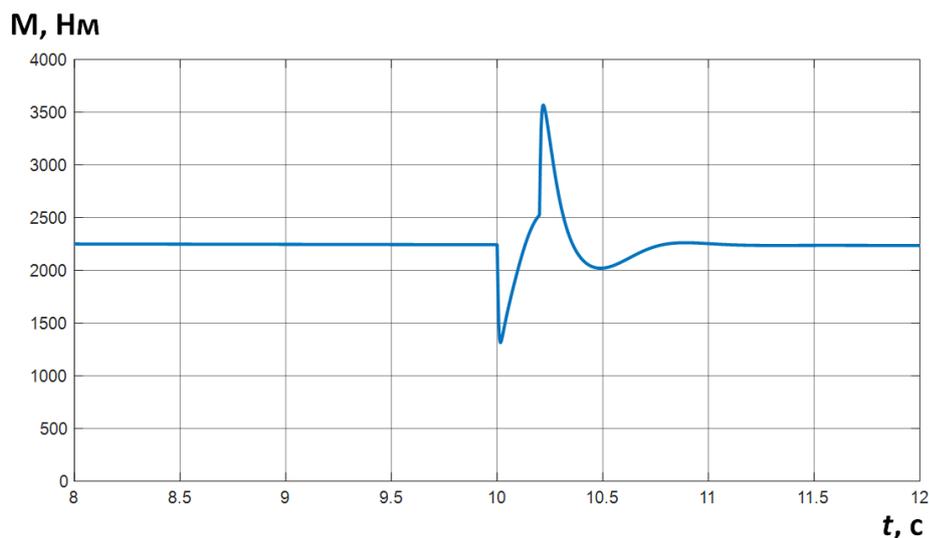


Рис. 3.5 Переходный процесс момента на валу тягового двигателя

Как видно из рисунка 3.5 бросок момента на валу тягового двигателя составляет 2,2 кНм. По соотношению (3.1) определим значение броска момента на оси колесной пары:

$$\Delta M_{\text{пр}} = 2,2 \cdot 4,19 = 9,2 \text{ кНм}$$

3.3 Компьютерное моделирование переходных процессов в тяговом электроприводе электровоза ЗЭС5К при бросках напряжения в контактной сети

В качестве исходных данных для моделирования используются записи процессов в тяговом электроприводе электровоза ЗЭС5К №918 (депо приписки – Тайшет), полученные из записи реальной поездки с составом. В рассматриваемом режиме работы движение электровоза происходит с постоянной скоростью, составляющей 39 км/ч, как показано на рисунке 3.6.

При этом, в момент времени около 150 с происходит бросок напряжения контактной сети $U_{\text{кc}}$ от 24,6 до 25,2 кВ, а затем с 25,2 до 24 кВ. Соответствующий участок записи поездки отмечен на рисунке 3.6 областью. Развертка данного участка записи показана на рисунке 3.7.

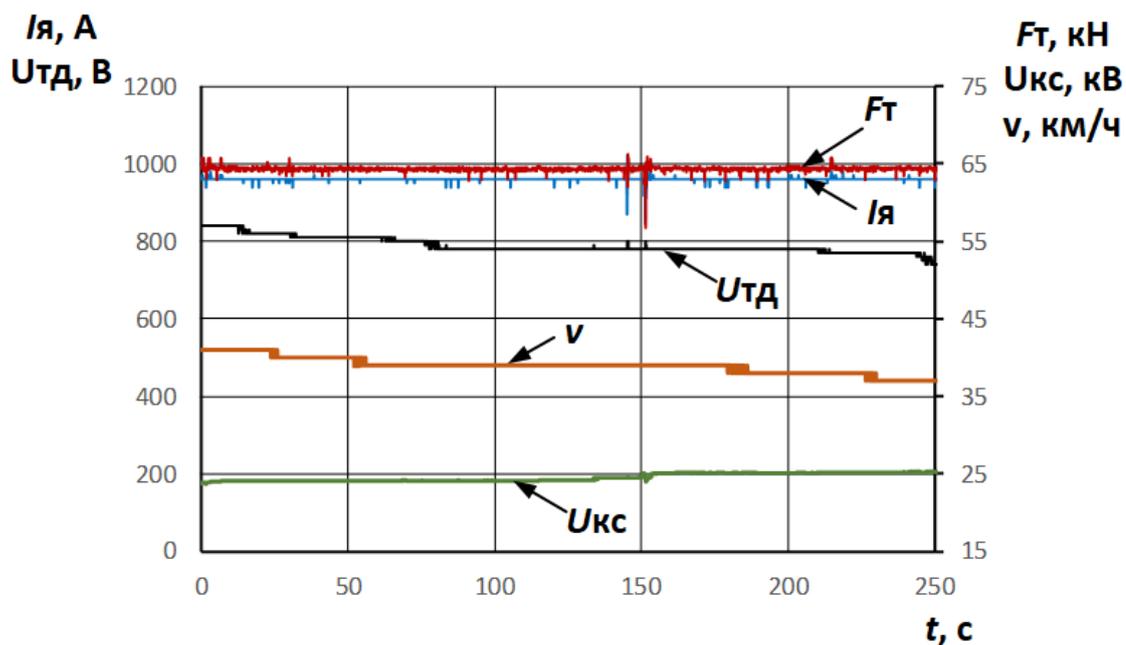


Рис. 3.6 Осциллограммы процессов в тяговом электроприводе электровоза 3ЭС5К при броске напряжения в контактной сети

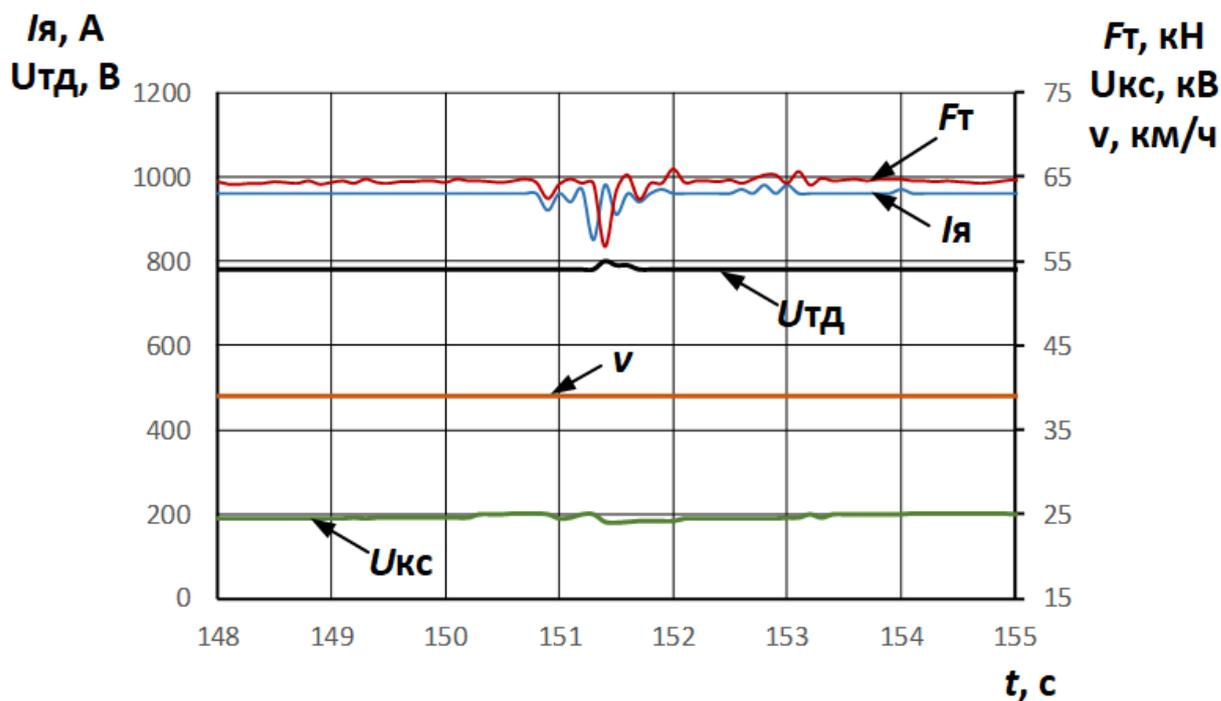


Рис. 3.7 Осциллограммы переходных процессов в тяговом электроприводе электровоза 3ЭС5К при нестационарной работе контактной сети

В соответствии с рисунком 3.7 значение реализуемой силы тяги до начала переходного процесса, вызванного скачком напряжения в контактной сети, составляет 64,3 кН. Бросок напряжения в контактной сети вызывает колебательный

переходный процесс силы тяги, в котором сила тяги в пределах одного периода затухающих колебаний изменяется от 56,7 до 65,2 кН. При этом, ток якорной цепи тягового двигателя I_d изменяется также за один период затухающих колебаний от 850 до 960 А.

Результаты компьютерного моделирования переходных процессов в тяговом электроприводе в следствие броска напряжения в контактной сети представлены на рисунках 3.8, 3.9.

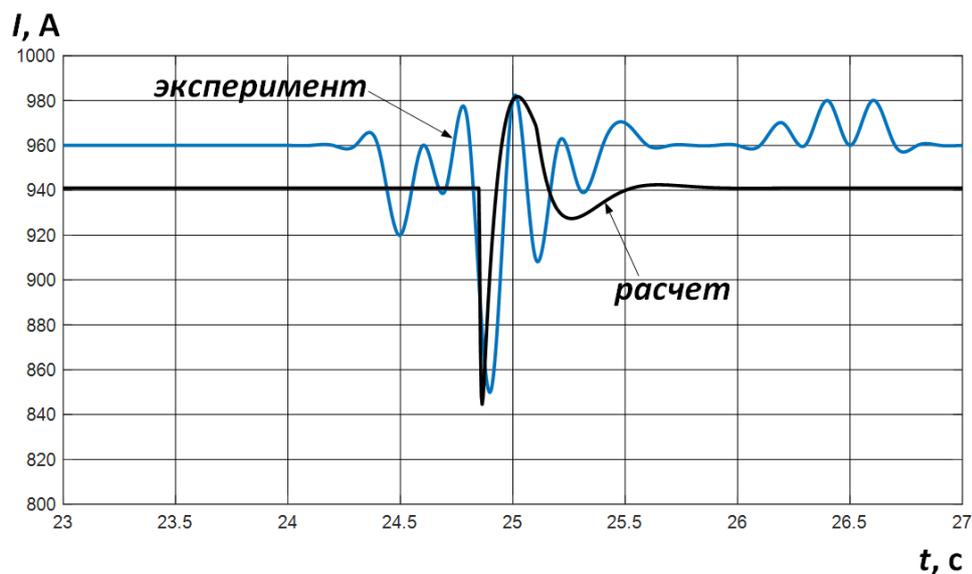


Рис. 3.8 Результат моделирования переходного процесса тока тягового двигателя электровоза 3ЭС5К при броске напряжения в контактной сети

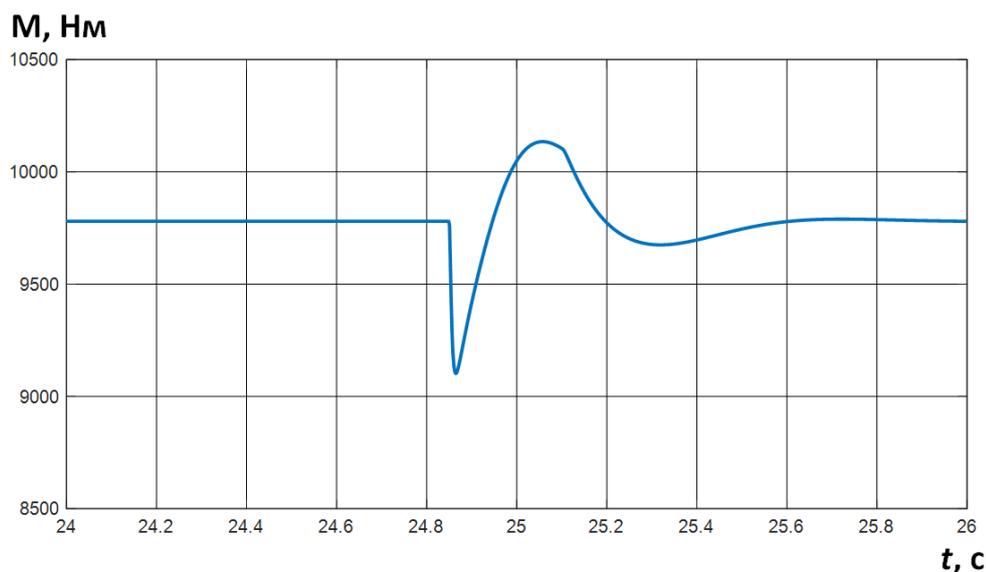


Рис. 3.9 Расчетный переходный процесс момента на валу тягового двигателя электровоза 3ЭС5К при броске напряжения в контактной сети

Сопоставление осциллограммы тока тягового двигателя из записи реальной поездки и результата моделирования, как показано на рисунке 3.9, подтверждает достоверность расчетных данных по моменту тягового двигателя.

Как видно из рисунка 3.9 бросок момента на валу тягового двигателя составляет 1,2 кНм. По соотношению (3.1) определим значение броска момента на оси колесной пары:

$$\Delta M_{\text{пр}} = 1,2 \cdot 4,19 = 5,0 \text{ кНм}$$

3.4 Компьютерное моделирование переходных процессов в тяговом электроприводе электровоза 3ЭС5К при изменении условий сцепления колес с рельсами

Моделирование переходных процессов выполнено на основании записей поездок электровоза 3ЭС5К №1090 в рамках исследовательских испытаний.

Как видно из рисунка 3.10, движение электровоза с составом происходит с постоянной скоростью, составляющей 41 км/ч.

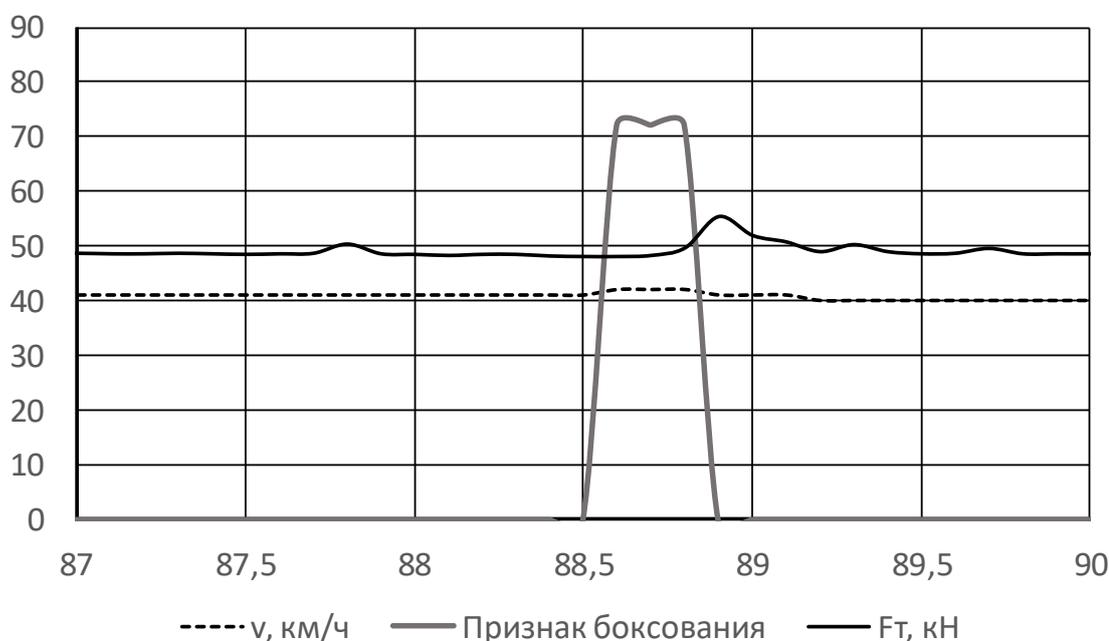


Рис. 3.10 Осциллограмма переходных процессов в тяговом электроприводе электровоза 3ЭС5К при возникновении боксования и срабатывании защиты от боксования

Срыв колесной пары в боксование происходит в момент времени 88,5 с, о чем свидетельствует появление сигнала признака боксования. При возникновении признака боксования происходит автоматическое включение подачи песка под колесную пару. При этом, скорость вращения колесной пары входит в допустимые пределы и процесс боксования прекращается. Об этом свидетельствует исчезновение сигнала признака боксования.

Исследуемая электромеханическая система реагирует на описанный процесс следующим образом. При нарушении условий сцепления колес с рельсами происходит интенсивное увеличение скорости вращения колесной пары. Это иллюстрируется на рисунке 3.10 осциллограммой линейной скорости движения.

Окончание процесса боксования сопровождается броском силы тяги, который представляет собой колебательный переходный процесс с пиковым значением (относительно установившегося значения до переходного процесса) 7,4 кН.

Как показано на рисунке 3.11 восстановление нормальных условий сцепления колес с рельсами сопровождается возникновением значительных динамических нагрузок, передаваемых в тяговую передачу электровоза.

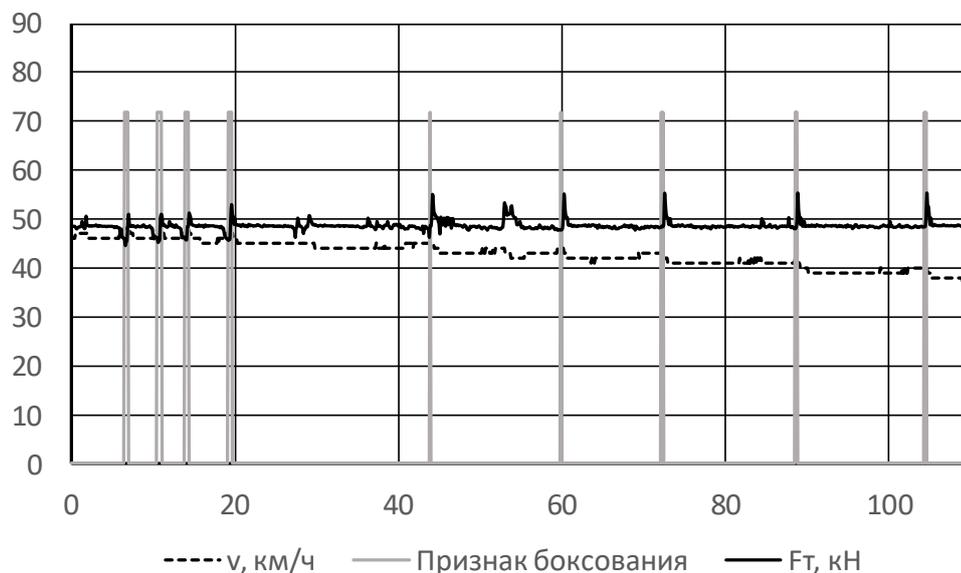


Рис. 3.11 Осциллограмма работы колесной пары электровоза 3ЭС5К при периодическом нарушении сцепления с рельсами

Следует отметить, что перечисленные показатели характеризуют переходный процесс общей продолжительностью около 0,4 с и рассматриваемый единичный срыв в боксование может являться частью последовательной серии таких кратковременных срывов сцепления колес с рельсами. Как видно из рисунка 3.11, броски силы тяги в ряде случаев имеют знакопеременный характер (относительно установившегося значения силы тяги до переходного процесса).

Результаты компьютерного моделирования переходных процессов в следствие нарушения сцепления колес с рельсами представлены на рисунках 3.12, 3.13.

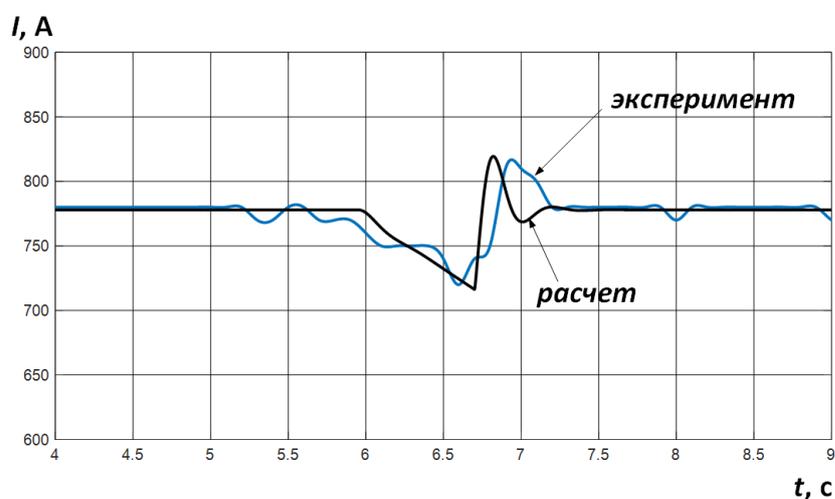


Рис. 3.12 Результат моделирования переходного процесса тока тягового двигателя электровоза 3ЭС5К при срыве колесной пары в боксование

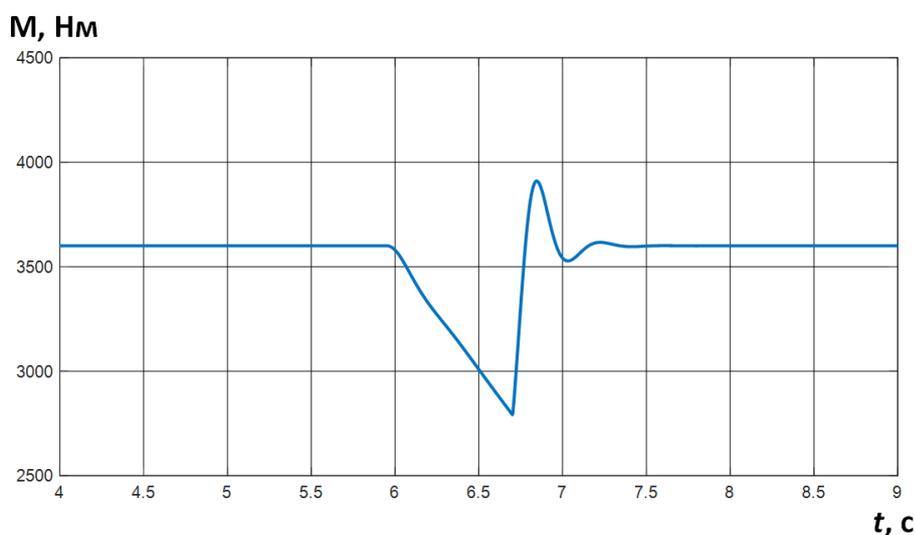


Рис. 3.13 Расчетный переходный процесс момента на валу тягового двигателя электровоза 3ЭС5К при срыве колесной пары в боксование

Сопоставление осциллограммы тока тягового двигателя из записи реальной поездки и результата моделирования, как показано на рисунке 3.13, подтверждает достоверность расчетных данных по моменту тягового двигателя.

Как видно из рисунка 3.13 бросок момента на валу тягового двигателя составляет 1,2 кНм. По соотношению (3.1) определим значение броска момента на оси колесной пары:

$$\Delta M_{\text{пр}} = 1,2 \cdot 4,19 = 5,0 \text{ кНм}$$

3.5 Расчет момента на колесной паре при реальном режиме движения электровоза

Полученные значения бросков момента, вызванных различными воздействиями на тяговый электропривод, являются отдельно взятыми данными об электромеханических процессах. Для исследования устойчивости колесной пары к проворотам бандажей при рассматриваемых воздействиях необходимо рассчитать значения момента на колесной паре в реальном режиме эксплуатации, который наиболее характерен для появления данной неисправности.

Как было указано в главе 1 настоящей диссертационной работы, наиболее характерным режимом возникновения проворотов бандажей является бросок момента в режиме тяги после длительного фрикционного торможения. По результатам взаимодействия с локомотивными депо (Тайшет, Иланская) и электровозоремонтными предприятиями установлено, что такой режим характерен для движения электровоза в конце затяжного спуска. В этом случае при приближении к выходу из затяжного спуска машинисты нередко применяют дотормаживание пневматической тормозной системой. При этом, после выхода из затяжного спуска выполняется переход в режим тяги.

Далее при расчете рассматривается сценарий возникновения одного из исследуемых внешних воздействий сразу после перехода в режим тяги. Таким образом, итоговое значение броска момента $M_{\text{пр}}$ на колесной паре представляет

собой сумму момента, создаваемого тяговым двигателем на рассматриваемой оси штатно M_T , и броска момента ΔM . Следовательно, формула для расчета имеет вид (3.2).

$$M_{\text{пр}} = M_T + \Delta M \quad (3.2)$$

Значение момента M_T было определено из записей поездок на перегоне Камышет – Ук и в среднем за несколько рассмотренных поездок составило 23,7 кНм.

Далее приводятся расчеты момента $M_{\text{пр}}$ для всех рассматриваемых в данной главе внешних воздействий:

- некорректные действия локомотивной бригады:

$$M_{\text{пр}} = 23,7 + 38,5 = 62,2 \text{ кНм}$$

- отрыв токоприемника от контактной сети:

$$M_{\text{пр}} = 23,7 + 9,2 = 32,9 \text{ кНм}$$

- бросок напряжения в контактной сети:

$$M_{\text{пр}} = 23,7 + 5 = 28,7 \text{ кНм}$$

- срыв в боксование и восстановление сцепления колес с рельсами:

$$M_{\text{пр}} = 23,7 + 5 = 28,7 \text{ кНм}$$

Таким образом, на основе экспериментальных данных получены значения бросков момента на колесной паре при всех рассматриваемых внешних воздействиях на тяговый электропривод.

3.6 Выводы по главе 3

В настоящей главе в соответствии с поставленными задачами:

- выполнено компьютерное моделирование переходных процессов в тяговом приводе электровоза 3ЭС5К, возникающих при: некорректных действиях локомотивной бригады, кратковременном отрыве токоприемника от контактного провода, бросках напряжения в контактной сети, срыве колесной пары в боксование;

- выполнена оценка значений момента, создаваемого тяговым двигателем на колесной паре при переходных процессах;

- установлено, что во всех рассматриваемых случаях в силу малой длительности переходных процессов, нагрузки, возникающие при этом в механической части, допустимо считать ударными;

- получены исходные данные для выполнения моделирования силового взаимодействия колесного центра и бандажа электровоза.

ГЛАВА 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА СИЛОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОЛЕСНОГО ЦЕНТРА И БАНДАЖА ЭЛЕКТРОВОЗА

В настоящей главе выполнены исследования процессов силового взаимодействия колесного центра и бандажа при электромеханических переходных процессах, вызванных описанными в предыдущей главе режимами работы тягового электропривода. Представлена методика исследования устойчивости фрикционного соединения колесного центра и бандажа при воздействии электромеханических переходных процессов в функции степени износа последнего.

Результаты исследований, представленные в данной главе опубликованы автором в [4.1 – 4.4].

4.1 Постановка задачи

Перед формулировкой условия решаемой задачи следует отметить, что в процессе решения не предполагается учет влияния на прочность соединения колесного центра и бандажа воздействий на колесо, формируемых продольным и поперечным профилем пути. Такое допущение делается в связи со сложностью и комплексностью задачи исследования электромеханической природы проворотов бандажей колесных пар и, в целом, низкую степень проработки данного вопроса (с учетом представленного в главе 1 обзора научно-технических подходов к данной проблеме). Учет слишком большого количества факторов в данном случае может привести либо к искажению результатов исследований, либо к невозможности их формализации и анализа.

В связи с вышесказанным определим, что при выполнении исследований считается, что электровоз с ведомым им составом движется по участку пути, характеризующемуся прямолинейным профилем.

При постановке задачи и при построении конечноэлементной модели прессового соединения колесного центра и бандажа использованы данные по исследованиям аналогичных процессов в квазидифференциальной колесной паре, разработанной для поездов метрополитена [4.5, 4.6].

Принятая в выполняемом исследовании модель колеса электровоза представлена на рисунке 4.1. Колесная пара состоит из двух элементов: колесного центра 1 и бандажа 2, при этом, колесный центр представляет собой жесткое тело, а бандаж описывается в виде упругого элемента в соответствии со свойствами материалов, из которых данные детали изготавливаются.

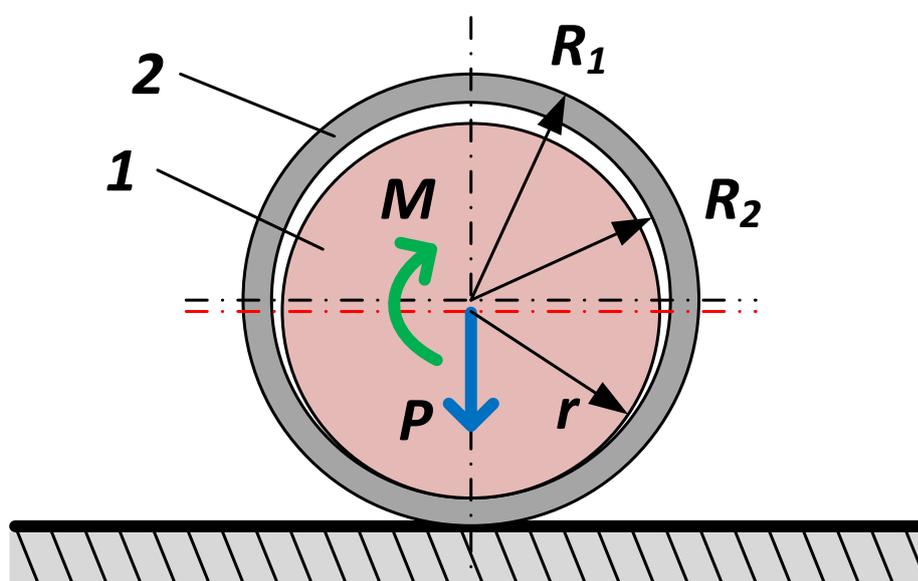


Рис. 4.1 Расчетная схема колеса электровоза 3ЭС5К

На рисунке 4.1 приняты следующие обозначения: P – вес электровоза, приходящийся на ось рассматриваемой колесной пары; M – момент, сообщаемый колесу от тягового двигателя через механическую передачу; r – радиус колесного центра; R_1 – радиус бандажа по поверхности катания; R_2 – радиус бандажа по поверхности сопряжения с колесным центром.

Целью решаемой задачи является количественная оценка условий нарушения неподвижности прессового соединения колесного центра и бандажа электровозного колеса при действии:

- постоянной вертикальной нагрузки, обусловленной весом электровоза;
- и момента, сообщаемого колесной паре от тягового двигателя через механическую передачу.

При этом, значения вращающего момента соответствуют нештатным режимам работы тягового электропривода, смоделированным в главе 3 настоящей диссертационной работы. Параметром, по которому оценивается техническое состояние бандажа является его толщина, соответствующая степени эксплуатационного износа.

При решении поставленной задачи определена несущая способность соединения колесного центра и бандажа при работе тягового электропривода в условиях внешних воздействий.

Расчет выполняется как для статического приложения крутящего момента к колесной паре, так и для случая динамического воздействия. В качестве динамического воздействия рассматривается скручивающий удар. Следует отметить, что рассматриваемые в настоящей работе воздействия от электромеханической системы на колесную пару могут быть квалифицированы как ударные воздействия в силу того, что длительность приложения данных силовых воздействий пренебрежимо мала по сравнению с инерционностью электровоза с составом, что подтверждается значением постоянной времени динамического звена, описывающего механическую часть тягового электропривода.

4.2 Аналитический расчет неподвижности соединения колесного центра и бандажа при реальных условиях эксплуатации

В данном разделе выполнен аналитический расчет исследуемого механического узла на предмет неподвижности соединения с натягом. Рассмотрено несколько режимов фрикционного торможения электровоза с составом, в том числе и аварийный режим. Расчет выполнен по стандартизированной методике [4.7].

При расчете штатных режимов фрикционного торможения в качестве участка пути, по которому происходит движение электровоза, принимается перегон Камышет – Ук, находящийся между крупными транспортными узлами Тайшет и Нижнеудинск Восточно-Сибирской железной дороги. Время прохождения данного участка на спуск, т. е. при движении в сторону станции Тайшет составляет около семи минут. Уклон рассматриваемого участка составляет в среднем 9 ‰. Эксплуатируемые на данном участке грузовые электровозы ЗЭС5К выполняют вождение поездов весом более 6500 тонн, однако, в настоящее время ведутся работы по повышению весов поездов на данном участке до 7300 тонн. Автор лично принимал участие в исследовательских испытаниях по адаптации программного обеспечения электровозов ЗЭС5К к работе с такими составами на перегоне Тайшет – Нижнеудинск.

Осциллограммы процессов при фрикционном торможении, выполняемом локомотивной бригадой вручную, показаны на рисунке 4.2.

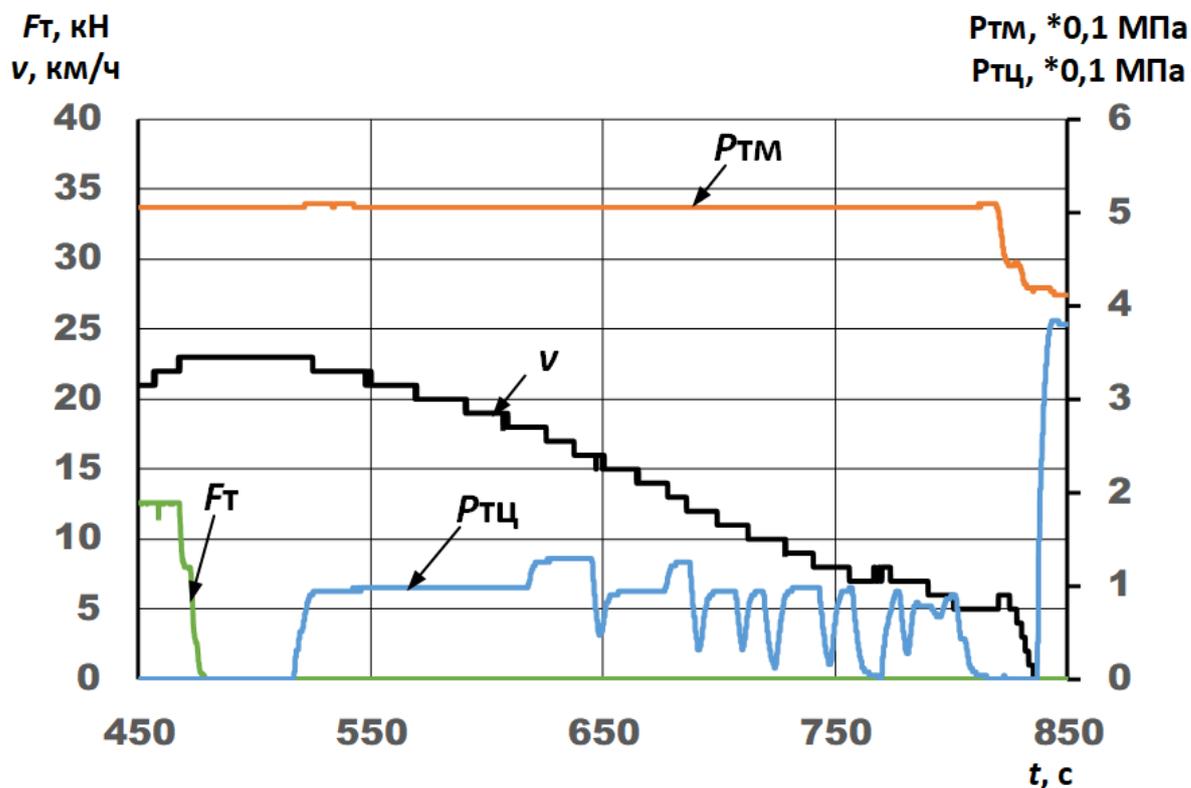


Рис. 4.2 Осциллограммы параметров работы электровоза ЗЭС5К при фрикционном торможении в ручном режиме

Как видно из рисунка 4.2, торможение в ручном режиме выполняется до полной остановки электровоза с составом. Данный режим был реализован в рамках опытной поездки на указанном выше участке, выполнялась остановка поезда при спуске с уклона.

Торможение выполняется исключительно при помощи пневматической тормозной системы, о чем свидетельствует сброс до нуля силы тяги F_T при скорости движения 23,7 км/ч. Перепады давления в тормозных цилиндрах $P_{тц}$ электровоза являются нормальным явлением при ручном торможении, т. к. выполнялась остановка поезда на конкретной координате выполняемого в процессе опытной поездки маршрута. Ведомый состав в процессе торможения находился в растянутом состоянии, о чем свидетельствует постоянство давления в тормозной магистрали $P_{тм}$.

Ниже приведен расчет несущей способности соединения колесного центра и бандажа при штатном ручном торможении до полной остановки (в соответствии с рис. 4.2) и при максимальном износе бандажа. Следует отметить, что для выполнения расчета взят участок процесса торможения, на котором тормозное усилие прикладывается непрерывно, что позволяет учесть постоянство воздействия температурного поля. Таким образом длительность процесса, применяемая при расчете, составляет 130 с.

Прочность соединения колесного центра и бандажа оценивается по значению крутящего момента, передаваемого рассматриваемым соединением от тягового двигателя в контакт «колесо-рельс», при расчетном натяге. Основное расчетное соотношение имеет вид (4.1).

Расчетный натяг бандажа на колесном центре определяется рядом факторов при изготовлении колеса и в процессе его эксплуатации, математически это описывается как алгебраическая сумма компонент натяга с учетом знака, показывающего повышение или понижение натяга:

$$\Delta_p = \Delta_m - \Delta_{см} - \Delta_{ус} \quad (4.1)$$

где: Δ_p – расчетное значение натяга бандажа на колесном центре, м; Δ_m – монтажный натяг (т. е. значение натяга, закладываемое в соединение при его сборке), м; $\Delta_{см}$ – ослабление натяга в результате смятия микронеровностей сопрягаемых поверхностей колесного центра и бандажа, м; $\Delta_{ус}$ – ослабление натяга в результате усадки сопрягаемых деталей после остывания до температуры окружающей среды, м.

Перечисленные в уравнении (4.1) компоненты ослабления натяга бандажа на колесном центре являются технологическими, т. к. проявляются непосредственно при изготовлении колесных пар. Значение расчетного натяга вследствие воздействия технологических факторов принято $\Delta_{см} = 0$ в силу незначительности его величины по сравнению с остальными компонентами алгебраической суммы. Значение технологического натяга примем максимальным в соответствии с [4.7] 1,7 мм. Значение $\Delta_{ус} = 0,2\Delta_m$.

В результате получено значение расчетного натяга:

$$\Delta_p = \Delta_m - 0,2\Delta_m = 0,8\Delta_m = 0,8 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Дальнейшее ослабление натяга бандажа на колесном центре происходит в процессе эксплуатации электровоза под воздействием температурных полей, создаваемых при фрикционном торможении и при постоянном механическом износе. Значения ослабления натяга бандажа на колесном центре в следствие воздействия температурного поля зависят от параметров режима торможения, а также, от неравномерности распределения температурного поля по длине соединения бандажа и колесного центра и от разности их температур, что описывается выражением (4.2).

$$\Delta_{осл} = \Delta_1 + \Delta_2 \quad (4.2)$$

где: Δ_1 – ослабление натяга из-за неравномерного температурного поля колеса при нагреве, м; Δ_2 – ослабление натяга из-за наличия перепада температур бандажа и колесного центра в зоне контакта, м.

В свою очередь каждая из задействованных в выражении (4.2) компонент определяется по эмпирическим соотношениям (4.3).

$$\Delta_1 = 0,33 \cdot 10^{-7} \frac{\alpha_R \beta \varepsilon_{\text{нер}} S h}{B H D \sqrt{t}} \cdot (1 - e^{-0,03\sqrt{t}}) \cdot D_2 \quad (4.3)$$

$$\Delta_2 = \alpha' D_2 R q$$

где: α_R - коэффициент, учитывающий часть выделяющегося при торможении тепла, поступающего в колесо, который зависит от типа и количества колодок на колесе ($\alpha_R = 0,7$ в соответствии с [4.8]); β - коэффициент нагрева бандажа; $\varepsilon_{\text{нер}}$ - коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева колеса ($\varepsilon_{\text{нер}} = 0,5$ в соответствии с [4.5]); h - разность уровней пути, который поезд проходит за время торможения ($h = 32$ м в соответствии с величиной уклона рассматриваемого участка пути), м; t - время торможения, с; S - вертикальная нагрузка на колесо, кН ($S = 117,5$ кН, в соответствии с паспортными данными электровоза 3ЭС5К); α' - коэффициент линейного расширения бандажной стали, $1/^\circ\text{C}$ ($\alpha' = 11,6 \cdot 10^{-6}$); R - контактное термическое сопротивление, град/кВт; D - номинальный посадочный диаметр, м; D_2 - внешний диаметр бандажа, м; B - длина соединения с натягом в осевом направлении, м; H - текущее значение толщины бандажа, м.

Коэффициент нагрева бандажа определяется по соотношению (4.4). Время торможения принято равным 300 с.

$$\beta = 1 - e^{-\frac{145 \cdot H}{\sqrt{t}}} = 1 - e^{-\frac{145 \cdot 0,043}{\sqrt{130}}} = -0,7278 \quad (4.4)$$

Показатель экспоненты в выражении для расчета контактного термического сопротивления определяется по соотношению (4.5).

$$x = \frac{10^{-3} \cdot t}{370 \cdot \Delta_p} = \frac{10^{-3} \cdot 300}{370 \cdot 1,28 \cdot 10^{-3}} = 0,2672 \quad (4.5)$$

Тормозная мощность, реализуемая на одном колесе, определяется по формуле (4.6).

$$W_T = \varphi_K \cdot K \cdot v = 0,16 \cdot 35 \cdot 6,38 = 35,7 \text{ кВт} \quad (4.6)$$

где: φ_K – коэффициент трения тормозных колодок о поверхность катания колеса ($\varphi_K = 0,16$ в соответствии с [2.1, 2.3]), K – сила нажатия одной тормозной колодки на колесо ($K = 35$ кН в соответствии с технической документацией на электровоз ЗЭС5К [2.14 – 2.18]); v – скорость движения электровоза в момент начала торможения, м/с.

Текущее значение теплового потока, поступающего в колесо, определяется по формуле (4.7):

$$q = \frac{W_T \cdot \alpha_R}{\pi \cdot D \cdot H} = \frac{35,7 \cdot 0,7}{\pi \cdot 1,164 \cdot 0,043} = 159,2 \text{ кВт/м}^2 \quad (4.7)$$

Значение контактного термического сопротивления при длительном фрикционном торможении определяется по формуле:

$$\begin{aligned} R &= R_0 \left(\frac{H_0}{H} \right)^{1,75} \cdot \left(\frac{q_0}{q} \right) \cdot (1 - e^{-x}) = \\ &= 1 \cdot \left(\frac{0,09}{0,043} \right)^{1,75} \cdot \left(\frac{88,5}{159,2} \right) \cdot (1 - e^{-0,2672}) = 0,4745 \text{ град/кВт} \end{aligned}$$

где: R_0 – коэффициент пропорциональности ($R_0 = 1$ в соответствии с [4.7]); H_0 – значение толщины нового бандажа, м; q_0 – критическое значение поступающей в

колесо части теплового потока, генерируемого на единице площади поверхности бандажа в момент срыва посадки, кВт/м² ($q_0 = 88,5$ кВт/м² в соответствии с [4.7]).

Ослабление натяга в следствие воздействия температурных полей определяется по соотношениям:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{осл}} &= 0,33 \cdot 10^{-7} \frac{\alpha_R \beta \varepsilon_{\text{неп}} Sh}{BHD\sqrt{t}} \cdot (1 - e^{-0,03\sqrt{t}}) \cdot D_2 + \alpha' D_2 Rq = \\ &= 0,33 \cdot 10^{-7} \frac{0,7 \cdot (-0,7278) \cdot 0,5 \cdot 117,5 \cdot 32}{0,14 \cdot 0,043 \cdot 1,07 \cdot \sqrt{130}} (1 - e^{-0,03\sqrt{130}}) 1,156 + \\ &+ 11,6 \cdot 10^{-6} \cdot 1,156 \cdot 0,4745 \cdot 159,2 = 0,0008 \text{ м} \end{aligned}$$

Относительное ослабление натяга определяется по формуле (4.8).

$$\delta = \frac{\Delta_{\text{осл}}}{\Delta_p} \cdot 100\% = \frac{0,0008}{0,0013} \cdot 100\% = 62\% \quad (4.8)$$

Максимальный крутящий момент, передаваемый соединением колесного центра и бандажа в соответствующем рассматриваемому режиму техническом состоянии (или несущая способность соединения), определяется по методике расчета соединения с натягом по цилиндрической поверхности [1.16 – 1.18].

Расчет коэффициентов C_1 и C_2 :

$$C_1 = \frac{1 + \left(\frac{D_1}{D}\right)^2}{1 - \left(\frac{D_1}{D}\right)^2} - \mu_1 = \frac{1 + \left(\frac{0,235}{1,07}\right)^2}{1 - \left(\frac{0,235}{1,07}\right)^2} - 0,3 = 0,8014$$

$$C_2 = \frac{1 + \left(\frac{D_2}{D}\right)^2}{1 - \left(\frac{D_2}{D}\right)^2} + \mu_2 = \frac{1 + \left(\frac{1,156}{1,07}\right)^2}{1 - \left(\frac{1,156}{1,07}\right)^2} + 0,3 = 13,2612$$

где: D_1 – диаметр ступицы колесного центра, м; μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона для материалов колесного центра и бандажа.

Расчет контактного давления в соединении бандажа и колесного центра:

$$p = \frac{\Delta_p - \Delta_{осл}}{D \cdot \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}\right)} = \frac{0,0005}{1,07 \cdot \left(\frac{0,8014}{2,1 \cdot 10^5} + \frac{13,2612}{1,79 \cdot 10^5}\right)} = 6,03 \text{ МПа}$$

где: E_1, E_2 – модули упругости для материалов колесного центра и бандажа, соответственно.

Максимальный крутящий момент, передаваемый соединением колесного центра и бандажа в рассматриваемом случае (коэффициент $\frac{1}{2}$ введен в выражение, т. к. расчет выполняется для одного колеса):

$$M = \frac{\pi f B D^2 p}{K_3} = \frac{3,14 \cdot 0,05 \cdot 0,1 \cdot 1,07^2 \cdot 6,03 \cdot 10^6}{2} = 27148 \text{ Нм} = 27,1 \text{ кНм}$$

где: f – коэффициент трения в контакте колесного центра и бандажа; K_3 – коэффициент запаса, закладываемый в конструкцию колеса.

Аналогичным образом выполнены расчеты ослабления натяга для аварийного режима работы механической части тягового электропривода, заключающегося в самопроизвольном наполнении тормозных цилиндров и прижатии тормозных колодок, при этом, тяговые двигатели электровоза продолжают работать в тяге. В качестве примера из практики эксплуатации электровозов можно привести возникновение проворотов бандажей сразу на нескольких колесных парах у электровоза ЗЭС5К №724, эксплуатируемого на Дальневосточной железной дороге. В результате некорректной работы системы

управления и ошибочных действий локомотивной бригады (в части непринятия мер по принудительному отпуску тормозов) электровоз двигался с прижатыми тормозными колодками в режиме тяги со скоростью 77 км/ч, общее время движения в описанном режиме составило 1 ч 16 мин (4560 с).

Расчет был выполнен для двух случаев: электровоз оборудован колесами с новыми бандажами; бандажи на колесных парах электровоза предельно изношены.

Следует отметить, что при выполнении расчета для случая с предельно изношенными бандажами установлено, что результат расчета при указанной длительности фрикционного взаимодействия не соответствует действительности. В результате данного расчета получено трехкратное ослабление натяга, что на практике привело бы разрушению колес на ходу, чего не произошло в соответствии с описанием аварийного режима работы. Поэтому, для максимального приближения результатов расчета к реальной эксплуатации было уменьшено значение времени фрикционного взаимодействия тормозных колодок и поверхности катания колеса. Установлено, что снятие натяга происходит через 4 минуты (240 с).

Результаты выполненных расчетов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты аналитического расчета ослабления 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

4.3 Компьютерное моделирование процессов силового взаимодействия в соединении колесного центра и бандажа с применением программного комплекса «Универсальный механизм»

При исследовании выполнен расчет максимального момента, который способно передавать фрикционное соединение колесного центра и бандажа, в исследуемых состояниях, расчет которых выполнен в п.4.2 настоящей работы.

Учитывая тот факт, что программный комплекс Универсальный механизм не имеет в настоящее время инструментария для решения задач с учетом воздействия температурных полей, для учета температурных воздействий в исследуемых режимах использованы данные об относительном ослаблении натяга из табл. 4.1.

В результате выполненного моделирования силового взаимодействия колесного центра и бандажа при *штатном фрикционном торможении при предельно изношенном состоянии бандажей* установлена зависимость максимального момента M_0 , который способно передавать соединение от коэффициента трения f_0 по поверхности сопряжения. Результаты моделирования представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 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

Распределение контактного напряжения по поверхности соединения колесного центра и бандажа проиллюстрировано рисунком 4.3.

По результатам моделирования силового взаимодействия колесного центра и бандажа *при длительном движении электровоза в режиме тяги с прижатыми тормозными колодками и при новом бандаже* установлена зависимость максимального момента, который способно передавать соединение от коэффициента трения по поверхности сопряжения. Результаты моделирования представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 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

Распределение контактного напряжения по поверхности соединения колесного центра и бандажа проиллюстрировано рисунком 4.4.

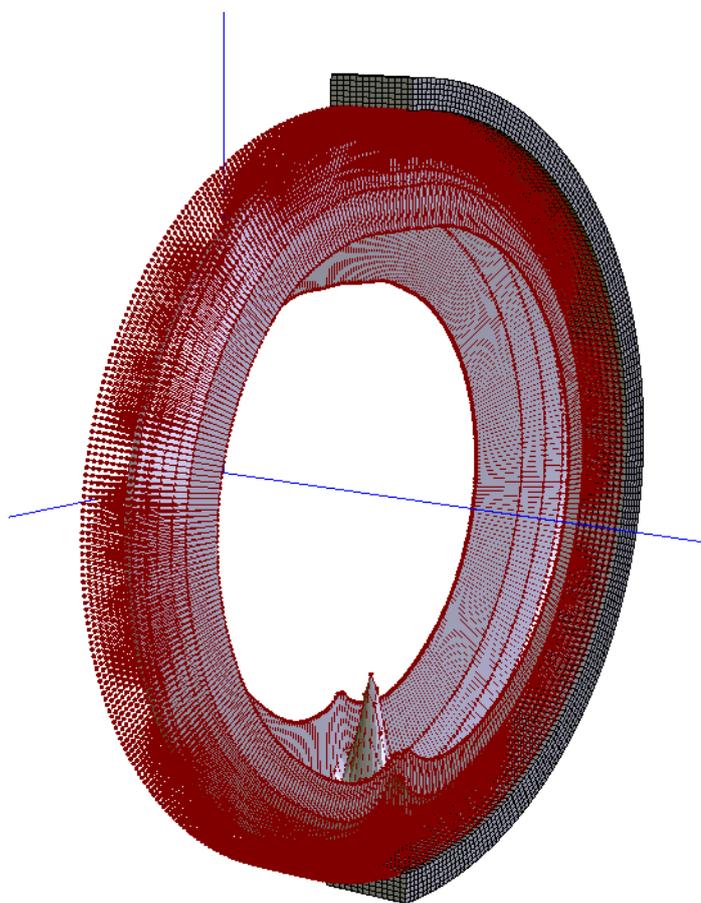


Рис. 4.3 Пространственное распределение контактного напряжения по поверхности соединения колесного центра и бандажа при температурном ослаблении натяга 62 % и предельно изношенном бандаже

По результатам моделирования силового взаимодействия колесного центра и бандажа при длительном движении электровоза в режиме тяги с прижатыми

тормозными колодками и при предельно изношенном бандаже установлена зависимость максимального момента, который способно передавать соединение от коэффициента трения по поверхности сопряжения. Результаты моделирования представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 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

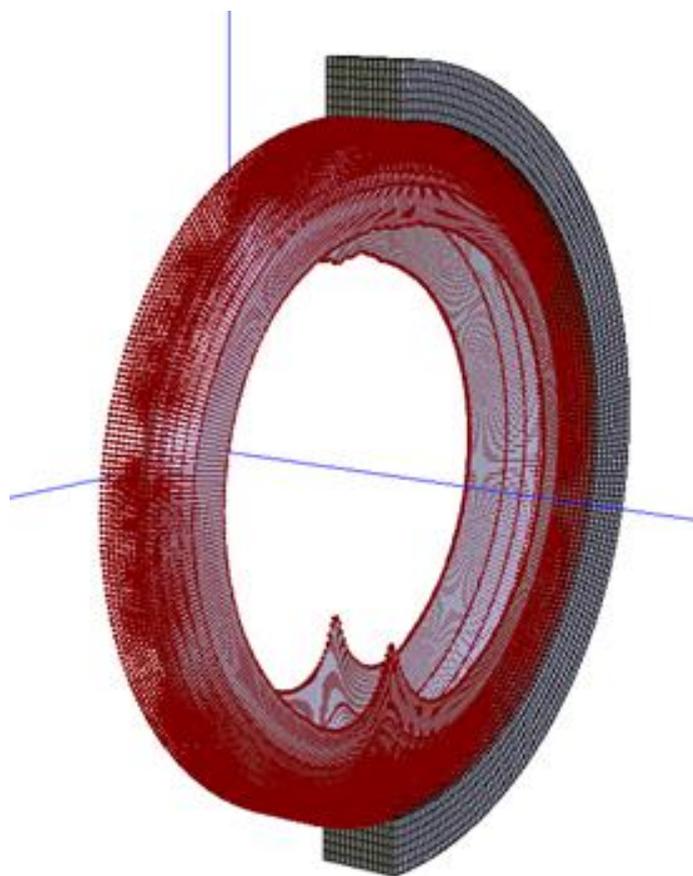


Рис. 4.4 Пространственное распределение контактного напряжения по поверхности соединения колесного центра и бандажа при температурном ослаблении натяга 83 % и новом бандаже

Распределение контактного напряжения по поверхности соединения колесного центра и бандажа проиллюстрировано рисунком 4.5.

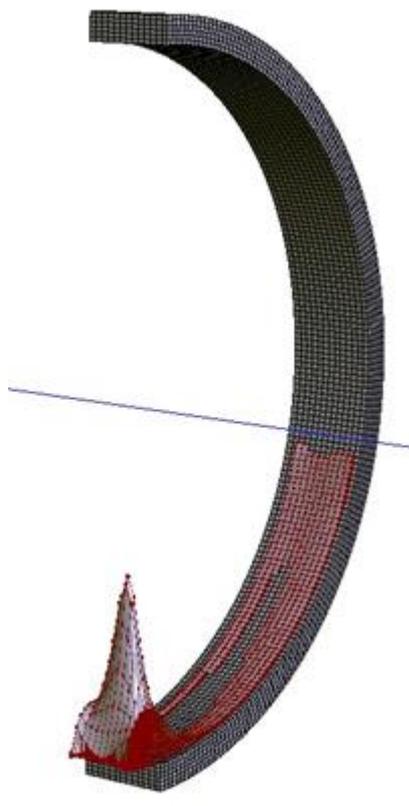


Рис. 4.5 Пространственное распределение контактного напряжения по поверхности соединения колесного центра и бандажа при температурном ослаблении натяга 112 % и предельно изношенном бандаже

Как видно, из представленных данных, помимо режимов, вызывающих различные по интенсивности температурные поля и технического состояния бандажа, выполнялось варьирование коэффициента трения 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 бросков 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. Как указано в [1.16 – 1.18], 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.

4.4 Совершенствование конструкции грузовых электровозов серии «Ермак» для повышения надежности

В настоящем разделе подведен итог выполненных исследований надежности грузового электровоза переменного тока 3ЭС5К.

Как показывает выполненный анализ конструкции колеса бандажного типа для отечественных электровозов различных поколений, конструкция остается практически неизменной на протяжении 70 лет. При этом, заложенные в конструкцию значения прочности и несущей способности к настоящему времени исчерпали свой запас по отношению к передаваемым от тягового электропривода значениям мощности и момента. В современных электровозах серии 2,3,4ЭС5К мощность на одну ось составляет порядка 1 МВт. У внедряемых в настоящее время электровозов серии 2,3ЭС5С в полчасовом режиме составляет 1,3 МВт на одну ось.

Современные тенденции грузоперевозок по железной дороге заключаются в переориентировании грузопотоков в азиатский регион, что создает повышенную нагрузку на функционирующие в данном направлении магистрали: Транссибирскую и Байкало-Амурскую. Данные магистрали характеризуются сложным профилем пути, т. к. проходят по географическим регионам со сложным рельефом местности. При этом, в указанных условиях переориентации направления грузопотоков, по этим магистралям в значительной степени выполняется вождение поездов повышенного веса и длины.

С точки зрения ремонта и технического обслуживания устранение проворота бандажа требует вывода электровоза из эксплуатации на длительное время. Это сопровождается финансовыми издержками и негативно влияет на рентабельность перевозок. С точки зрения безопасности движения поездов последствия проворота бандажа в виде осевого смещения бандажа могут спровоцировать сход поезда с рельсового полотна. При этом, последствия могут быть не только в части повреждения парка подвижного состава, но и более масштабные, при транспортировании, например, различных химикатов или нефтепродуктов.

По результатам выполненных исследований установлено, что совершенствование технологии изготовления, контроля качества и технического состояния бандажных колес не является достаточной мерой для решения проблемы проворотов бандажей. А в случае вождения поездов повышенного веса и длины по участкам пути со сложным профилем данные меры практически неэффективны.

На основании представленных данных для повышения рентабельности, безопасности, надежности и ритмичности грузоперевозок необходимо создание специализированного исполнения электровозов серии 2,3,4ЭС5К для работы на участках пути со сложным профилем.

Специализированное исполнение электровозов серии 2,3,4ЭС5К обладает следующими характеристиками:

- применение в механической части цельнокатаных колес вместо бандажных; это значительно повысит пробеги между обточками (как показывает эксплуатация имеющегося на сегодняшний день подвижного состава с цельнокатаными колесами – ЭП20 и 2ЭС5);
- построение структуры тягового электропривода по принципу поосного регулирования силы тяги с реализацией независимого возбуждения тяговых двигателей; применение такого схемотехнического решения позволит значительно улучшить тяговые характеристики электровоза;

Преимуществами предлагаемого решения с точки зрения реализации являются:

- работа является актуальной с точки зрения реализации программы импортозамещения, т. к. в настоящее время в Российской Федерации освоены технологии производства вагонных цельнокатаных колес и цельнокатаных колес для пассажирских электровозов (компании ЕВРАЗ и Объединенная металлургическая компания); следует отметить, что в конструкции электровозов ЭП20 и 2ЭС5 применяются цельнокатаные колеса зарубежного производства, что в условиях санкций вносит серьезные риски в вопросы эксплуатации и технического обслуживания данного электроподвижного состава;

- разработка нового исполнения электровоза будет выполняться на основе выпускаемой серийно и находящейся в эксплуатации модели электровоза, что значительно упростит опытно-конструкторскую разработку.

4.5 Выводы по главе 4

В настоящей главе в соответствии с поставленными задачами:

- определена несущая способность соединения колесного центра и бандажа колесной пары электровоза 3ЭС5К двумя способами: аналитическим расчетом и при помощи компьютерной модели, реализующей расчет методом конечных элементов;

- определена степень ослабления натяга бандажа на колесном центре для реальных эксплуатационных режимов (как штатных, так и аварийных);

- установлены пределы значений параметров воздействий (момент тягового двигателя, длительность воздействия температурного поля) и показателей технического состояния колеса (степень эксплуатационного износа бандажа), при совокупности которых возможен проворот бандажа;

- обоснована необходимость и представлены направления совершенствования конструкции электровозов серии 2,3,4ЭС5К для работы на участках пути со сложным профилем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получено научное обоснование того, что проворот бандажа является следствием электромеханических переходных процессов в тяговом электроприводе в совокупности с температурными воздействиями и степенью износа бандажа. Данные результаты получены при помощи разработанной математической модели тягового электропривода и методики исследования надежности локомотивных колес.

Показана целесообразность разработки колесных пар специализированного исполнения – с цельнокатаными колесами – для электровоза 2,3,4ЭС5К при вождении тяжеловесных поездов на сложном профиле пути (Восточный полигон).

В настоящей диссертационной работе достигнуты следующие результаты:

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

- 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.

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.

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).

В части необходимости и перспективы применения тяговых приводов с цельнокатаными колесами результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть распространены на грузовые тепловозы с электрической передачей.

Рекомендации к внедрению результатов диссертационной работы в эксплуатации и проектировании электровозов, а также, в исследованиях электромеханических процессов в электроприводах иных областей применения оформлены соответствующими актами (приложения В, Г, Д).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

К главе 1

- 1.1 Веригин, О.С. Исследование проблемы проворотов бандажей колесных пар современных магистральных электровозов / О. С. Веригин, А. А. Зарифьян // Труды РГУПС. – 2019. - №4 – С. 39 – 41
- 1.2 Веригин, О.С. Анализ статистики проворотов бандажей колесных пар магистральных электровозов / О. С. Веригин, А. А. Зарифьян // Вестник РГУПС. – 2019. – №4. – С. 49 – 54.
- 1.3 Дрягилев, А.Е. Анализ неисправностей механической части электровозов 2ЭС6 // Известия Транссиба. – 2014. – №2(18). – С. 18–23.
- 1.4 Калинин, В.К. Электровозы и электропоезда. – М.: Транспорт, 1991. – 480 с.
- 1.5 Дубровский, З.М. Грузовые электровозы переменного тока: Справочник /З. М. Дубровский, В. И. Попов, Б. А. Тушканов // М.: Транспорт, 1991. – 471 с.
- 1.6 Электровоз ВЛ8. Руководство по эксплуатации. М.: Транспорт, 1982. с. 320.
- 1.7 Дубровский, З.М. Электровозы ВЛ60К и ВЛ60П/К. Руководство по эксплуатации /З. М. Дубровский, Л. М. Лорман // М.: Транспорт, 1993. – 400 с.: ил., табл.
- 1.8 Пассажирский электровоз ЧС2Т. Под общей редакцией А. Л. Лисицына /А. Л. Лисицын, А. С. Никитин, Д. И. Моховиков и др. // М., «Транспорт», 1979, с. 288.
- 1.9 Электровоз ВЛ22М. Инструкционная книга. М.: Трансжелдориздат, 1961. 255 с.
- 1.10 Электровоз ВЛ85: Руководство по эксплуатации/ Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкарева, Л. А. Позднякова и др. // М.: Транспорт, 1992. – 480 с.: ил., табл.
- 1.11 Электровозы ВЛ10 и ВЛ10У. Руководство по эксплуатации. Под редакцией О. А. Кикнадзе. – М.: Транспорт, 1981. – 519 с.
- 1.12 Карасев, И. И. Машинисту об электровозе ЧС7 / И. И. Карасев, Л. П. Ратомский // М.: Транспорт, 1994. – 223 с.: ил., табл.

- 1.13 Бородин, А.В. Анализ прочности соединения «колесный центр – бандаж колеса тепловоза» / А. В. Бородин, Г. П. Здор, Л. В. Ярышева // Известия Транссиба. – 2012. – №1(9). – С. 8–12.
- 1.14 Буйносов, А.П. Методы повышения ресурса колесных пар тягового подвижного состава / А. П. Буйносов – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2010. – 224 с.
- 1.15 Кузмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / Под ред. В.Д. Кузьмича. – М.: Издательство «Маршрут», 2005. – 448 с.
- 1.16 Иванов М.Н. Детали машин: Учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. – 5-е изд. перераб. – М.: Высш. шк., 1991. – 383 с.
- 1.17 Гузенков П.Г. Детали машин: Учеб. пособие для студентов вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1982. – 351 с.
- 1.18 Иосилевич Г.Б. Детали машин: Учебник для студентов машиностроит. спец. вузов. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
- 1.19 Меланин, В.М. Моделирование нестационарного температурного поля, формирующегося в элементах колеса при торможении // Транспорт Российской Федерации – СПб.: ИД Т-ПРЕССА, 2012. – №5 – С.73 – 76.
- 1.20 Колесников В. И. Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах, Наука, М., 2003, 279 с
- 1.21 Буйносов А.П., Шепелева И.О. Модель теплового процесса упрочнения стали бандажей колесных пар электровозов при нагреве равномерно распределенными источниками // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 4. – С. 150–157.
- 1.22 Буйносов А.П., Шепелева И.О. Моделирование упрочнения стали бандажей при термообработке колесных пар электровозов // Научно - технический вестник Поволжья. – 2015. – № 2. – С. 86–89.
- 1.23 Буйносов А.П., Шепелева И.О. Термоупрочнение гребней бандажей колесных пар железнодорожного транспорта // В сборнике: Научные преобразования в эпоху

глобализации. Сборник статей Международной научно - практической конференции. – Уфа, 2015. – С. 26–31.

1.24 Александров В. М., Коваленко Е. В. Задачи механики сплошных сред со смешанными граничными условиями, Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., М., 1986, 336 с.

1.25 Смоленцев К.В. Использование подрезиненных колес для вагонов метрополитена. В сб. Роль инноваций в трансформации современной науки: сборник статей Международной 140 научно - практической конференции (15 января 2016 г., г. Тюмень). / в 3 ч. Ч.2. – Уфа: АЭТЕРНА, 2016. – С. 70–76.

1.26 Сычева А.Д. Исследование прорезиненных составного и цельнокатаного колес вагона трамвая «Татра». В сб. Внедрение результатов инновационных разработок: проблемы и перспективы: сборник статей Международной научно - практической конференции (18 января 2016 г., г. Пенза). В 2 ч. Ч.1 – Уфа: МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2016. – С. 45–50.

1.27 Зино И. Е., Тропп Э. А. Асимптотические методы в задачах теплопроводности и термоупругости, Ленингр. ун-т, Л., 1978, 224 с

1.28 Магистральные электровозы. Электрические аппараты, полупроводниковые преобразователи, системы управления// В. И. Бочаров, Н. М. Васько, А. Г. Вольвич, О. Н. Жулев и др.// Под ред. В. И. Бочарова, Б. А. Тушканова. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 384 с.: ил.

1.29 Буйносов А.П., Денисов Д.С. О некоторых причинах образования дефектов бандажей колесных пар электровозов 2ЭС10 «Гранит» // Научно - технический вестник Поволжья. – 2013. – № 4. – С. 113–115.

1.30 Буйносов А.П., Денисов Д.С. Сравнительный анализ износа бандажей колесных пар электровозов 2ЭС10 и ВЛ11 // Научно - технический вестник Поволжья. – 2015. – № 1. – С. 47–49

1.31 Буйносов А.П., Денисов Д.С. Сравнительный анализ износа колесных пар электровозов 2ЭС10 с различной маркой бандажей // Научно - технический вестник Поволжья. – 2014. – № 6. – С. 84–86

1.32 Денисов Д.С. Причины образования дефектов на бандажах колесных пар электровозов 2ЭС10 // В сборнике: Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава материалы Второй Всероссийской научно - технической конференции с международным участием. Министерство транспорта Российской Федерации, Федеральное агентство железнодорожного транспорта, ОАО «Российские железные дороги», Омский государственный университет путей сообщения. – 2013. – С. 14–18.

1.33 Буйносов А.П., Денисов Д.С. Влияние глубины маркировки бандажей на надежность колесных пар электровозов 2ЭС10 // Научно - технический вестник Поволжья. – 2013. – № 6. – С. 170–173.

1.34 Обрывалин, А.В. Повышение прочности соединения «бандаж – колесный центр» вследствие равномерного распределения объема материала бандажа / А. В. Обрывалин, В. В. Дюндин // Известия Транссиба. – 2016. – №4(28). – С. 24–30.

1.35 Буйносов, А.П. Влияние шероховатости посадочных поверхностей на надежность соединения «бандаж - обод» и ресурс колесных пар тягового подвижного состава // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2009. - №3-4. – С. 77 – 86.

1.36 Исаев, И.П. Влияние шероховатости посадочных поверхностей на надежность сочленения «бандаж-обод» / И. П. Исаев, А. В. Горский, А. А. Воробьев, А. П. Буйносов//Вестник ВНИИЖТ. 1991. № 1. С. 27–29.

1.37 Ушкалов, В.Ф. Прогнозирование динамических качеств грузового локомотива и износа его колес с разными профилями бандажей / В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрый, И. Ю. Малышева, И. В. Подбельников, Н. В. Безрукавый // Техн. механика. – 2013. – №1. – С. 3–16.

1.38 Буйносов А.П., Стаценко К.А. Повышение ресурса колесных пар электровозов технологическими методами: монография. – Саарбрюккен: Изд - во «LAP LAMBERT Academic Publishing», 2012. – 215 с.

- 1.39 Шишов, А.А. Технологические аспекты повышения надежности железнодорожных колес / А. А. Шишов, А. Н. Никулин, А. В. Сухов, Г. А. Филиппов // Сталь. – 2007. – № 9. – С. 84–86.
- 1.40 Горский А.В., Буйносов А.П., Наговицын В.С., Клинский В.С. Экономичная обточка // Локомотив. 1992. № 4. — С. 26–27. ISSN 0869-8147
- 1.41 Буйносов, А.П. Повышение ресурса бандажей колесных пар электровозов в результате изменения технологии их обточки. Автоматизация и современные технологии, 1992, № 8, с. 23—25
- 1.42 Стаценко, К.А. Повышение долговечности колесных пар электровозов технологическими методами: автореф. канд. техн. наук: 05.22.07 / К. А. Стаценко; Уральский государственный университет путей сообщения. – Екатеринбург, 2004. – 24 с.
- 1.43 Толстов, В.П. Разработка способов улучшения эксплуатационных характеристик бандажей колесных пар электровозов: автореф. канд. техн. наук: 05.22.07 / В. П. Толстов; Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2000. – 26 с.
- 1.44 Богданов, А.Ф. Восстановление профиля поверхности катания колесных пар без выкатки / А. Ф. Богданов, И. А. Иванов, П. М. Терехов // Бюл. результатов науч. исследований. – 2014. – Вып. 1 (10). – С. 58–68.
- 1.45 Буйносов А.П., Умылин И.В. Оптимизация процесса обточки бандажей колесных пар локомотивов // Научно - технический вестник Поволжья. – 2015. – № 3. – С. 101–104.
- 1.46 Иванов, П.П. Эффективный способ поверхностного упрочнения железнодорожных колес /П. П. Иванов, Э. Х. Исакаев, В. И. Изотов, Г. А. Филиппов, А. С. Тюфтяев // Сталь. – 2000. – № 1. – С. 63–66.
- 1.47 Антиповский, С.В. Технология плазменного упрочнения гребней колесных пар / С. В. Антиповский, А. С. Тюфтяев // Сварочное производство. – 2009. – № 6. – С. 45–48.

- 1.48 Антиповский, С.В. Плазменное упрочнение как способ увеличения ресурса колесных пар / С. В. Антиповский, Э. Х. Исакаев, В. Ю. Тараканов, А. С. Тюфтяев, А. Э. Яблонский // Локомотив. – 2009. – № 6. – С. 26–27.
- 1.49 Буйносов А.П., Шепелева И.О. Увеличение ресурса колесных пар электровозов за счет плазменного упрочнения гребней бандажей // Научно - технический вестник Поволжья. – 2013. – № 6. – С. 182–185.
- 1.50 Орлова, А.М. Библиографические исследования вопросов интенсивности износа и механизмов образования усталостного выкрашивания рабочей поверхности обода в зависимости от типа подвижного состава, осевой нагрузки, рельефа и профиля пути (прямые, кривые, подъемы и уклоны), скоростей движения и пробега. Постановка задач для расчетных и экспериментальных исследований для профиля ГОСТ 10791: отчет по теме 80, ч. 1 / А. М. Орлова, А. А. Воробьев. – СПб.: ПГУПС, 2014. – 165 с
- 1.51 Воробьев, А.А. Методика расчета размера контактно-усталостных повреждений железнодорожного колеса по результатам, полученным на модельных роликах / А. А. Воробьев, А. Н. Иванов, С. В. Урушев, О. А. Конограй, И. В. Федоров // Бюл. результатов науч. исследований. – 2018. – Вып. 1. – С. 18–24.
- 1.52 Буйносов, А.П. Выбор профиля поверхности катания бандажей колесных пар электровозов ВЛ11 / А. П. Буйносов, В. А. Тихонов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. - №2(14). – 2012. – С. 46 – 60.
- 1.53 Буйносов, А.П., Худояров, Д.Л., Пышный, И.М. Выбор профиля поверхности катания бандажей колесных пар промышленных тепловозов // Транспорт Урала. 2011. № 1 (28). — С. 64–69. ISSN 1815-9400
- 1.54 Горский А.В., Буйносов А.П. Влияние профиля на ресурс бандажа // Локомотив. 1990. № 6.— С. 27-28. ISSN 0869-8147
- 1.55 Иванов, И.А. К вопросу о перспективах использования бандажных колесных пар повышенной твердости / И. А. Иванов, В. С. Кушнер, А. А. Воробьев, Н. Ю. Шадрин, П. Г. Сорокин // Новые материалы и технологии в машиностроении. – Брянск: БГИТА, 2007. – № 7. – С. 39–43.

- 1.56 Буйносов, А.П. Наноматериал увеличит срок службы бандажей колесных пар / А. П. Буйносов, В. А. Тихонов // Научное обозрение. 2011. № 5. С. 266–274.
- 1.57 Буйносов, А.П. Наноматериал увеличивает ресурс бандажей колесных пар электроподвижного состава / А. П. Буйносов, Н. Г. Фетисова // Машиностроение. – 2014, №2, с. 59 – 64.
- 1.58 Буйносов, А.П. Результаты применения нанопористового антифрикционного покрытия на повышение ресурса колесных пар промышленных электровозов / А. П. Буйносов, И. М. Пышный // Научно-технический вестник Поволжья, 2012, № 6, с. 155—158
- 1.59 Штеле Е.А, Шилер В.В. Демченко В.О. Эффективность использования колесных пар с гибкими независимо вращающимися бандажами // Экономика железных дорог. - №7. – 2014. – С. 45 – 53.
- 1.60 Шилер, В.В. Метод расчета пространственного напряженно-деформированного состояния гибкого бандажа // Омский научный вестник – Омск: ФГБОУ ВО ОмГУПС, 2012. - №2(110) – С.116 – 119.
- 1.61 Шилер, В.В. Методика оценки контактных напряжений в системе «гибкий бандаж – рельс» // Известия Транссиба – Омск: ФГБОУ ВО ОмГУПС, 2012. - №2(10) – С.58 – 63.
- 1.62 Кильдибеков, А.Б. Математическая модель динамического взаимодействия колесной пары с гибкими бандажами и рельсовой колеи / А. Б. Кильдибеков, В. В. Шилер, А. В. Шилер // Известия ПГУПС – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2013. - №3 – С.79 – 90
- 1.63 Шилер, В.В. Исследование динамических свойств колесной пары с гибкими независимо вращающимися бандажами / В. В. Шилер, П. А. Шипилов, А. В. Шилер // Известия Транссиба – Омск: ФГБОУ ВО ОмГУПС, 2011. - №4(8) – С.69 – 75
- 1.64 Буйносов, А.П. Создан прибор неразрушающего магнитного контроля / А. П. Буйносов, Л. А. Кирель, В. С. Наговицин // Локомотив, 2000, № 6, с. 24—25.
- 1.65 Буйносов, А.П. Новый измерительный прибор / А. П. Буйносов, М. Н. Трофимов, И. С. Цихалевский // Локомотив, 1998, № 6, с. 40—41.

- 1.66 Буйносов А.П., Денисов Д.С. О разработке прибора неразрушающего метода контроля бандажей колесных пар локомотивов // Научно - технический вестник Поволжья. – 2014. – № 4. – С. 69–72.
- 1.67 Буйносов, А.П. Автоматизированные системы для контроля геометрических параметров колесных пар / А. П. Буйносов, К. А. Стаценко, Н. Г. Фетисова // Сб. науч. тр. Уральского государственного университета путей сообщения, 2008, № 68, с. 19—31.
- 1.68 Беломытцев В. Автоматизированный комплекс контроля колесных пар «Пеленг-автомат» / В. Беломытцев // Современные технологии автоматизации. – М.: СТА-Пресс, 2004. – № 3. – С. 42–46.
- 1.69 Буйносов А.П., Мишин Я.А. Анализ использования вибродиагностического комплекса ОМСД - 02 в ремонтном локомотивном депо // Научно - технический вестник Поволжья. – 2013. – № 5. – С. 126–129.
- 1.70 Буйносов А.П., Денисов Д.С. Разработка диагностического комплекса при техническом обслуживании электровозов на ПТОЛ // Научно - технический вестник Поволжья. – 2015. – № 2. – С. 79–81.
- 1.71 Воробьев, А.А. Прогнозирование ресурса и совершенствование технологии ремонта колес железнодорожного подвижного состава: автореф. дис. д-ра техн. наук, специальность: 05.22.07 / А. А. Воробьев. – СПб.: ПГУПС, 2018. – 32 с.
- 1.72 Иванов, И.А. К вопросу о влиянии структуры поверхности слоя на эксплуатационные свойства железнодорожного колеса / И. А. Иванов, С. И. Губенко, А. А. Воробьев // Транспорт Урала. – Екатеринбург: УрГУПС, 2010. – № 2 (25). – С. 56–60.
- 1.73 Сахаров Р.А., Ким К.К., Урушев С.В. Анализ остаточного технического ресурса железнодорожных колес // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 437–442. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-437-442
- 1.74 Буйносов А.П., Денисов Д.С. Повышение долговечности бандажей колесных пар электровозов автоматизированными методами // В сборнике: Наука и

современность. Сборник статей Международной научно - практической конференции. – Уфа, 2015. – С. 61 – 66.

1.75 Кротов, С.В. Определение вертикальных динамических сил, действующих на колесо в контакте с рельсом / С. В. Кротов, Д. П. Кононов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2015. – Вып. 3 (44). – С. 70–76.

1.76 Бороненко Ю.П., Рахимов Р.В., Григорьев Р.Ю., Попов В.В. Анализ методов силового воздействия подвижного состава на путь и систем технического контроля колес при движении поезда // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 324–344. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-324-344

1.77 Ромен, Ю.С. Определение сил взаимодействия в системе колесо–рельс на основании измерения напряжений в шейке рельса / Ю. С. Ромен, О. А. Суслов, А. А. Баляева // Вестн. ВНИИЖТ. – 2017. – Т. 76. – № 6. – С. 354–361.

1.78 Бромберг, Е.М. Взаимодействие пути и подвижного состава / Е. М. Бромберг, М. Ф. Вериги, В. Н. Данилов, М. А. Фришман. – М.: Трансжелдориздат, 1956. – 280 с.

1.79 Xiufang Jia, Zhe Liu Modeling and Simulation for the AC-DC Electric Locomotive// International Conference on Civil, Materials and Environmental Sciences (CMES 2015), p. 128 – 130

1.80 Zhang Jinsi. Computer Simulation of Traction Load Process and Its Behaviour[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1986.4

1.81 Li Shuhui, Zhang Jinsi, Li Qunzhan. Traction Operation Simulation of SS3 Electric Locomotive[J]. Journal of the China Railway Society, 1993.6

1.82 Zhao Juan, Li Jianhua, Huang Yongning. Simulation Model of SS3B Electric Locomotive Based on MATLAB/SIMULINK[J] Electric Drive For Locomotive, 2002, 10(6): 25-26, 42

1.83 Liu Youmei. SS6B Electric Locomotive[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003

- 1.84 R.J. Hill, J. Lamacq Railway traction vehicle electromechanical simulation using SIMULINK// Transactions on the Built Environment vol 18, © 1996 WIT Press, www.witpress.com, ISSN 1743-3509
- 1.85 Caglar Uyulan, Metin Gokasan & Seta Bogosyan Modeling, simulation and slip control of a railway vehicle integrated with traction power supply//Cogent Engineering (2017), 4: 1312680
- 1.86 Chen, Y., Dong, H., Lu, J., Sun, X., & Guo, L. (2016). A supertwisting-like algorithm and its application to train operation control with optimal utilization of adhesion force. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 17, 3035–3044. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2016.2539361>
- 1.87 Davila, J., Fridman, L., & Levant, A. (2005). Second-order sliding-mode observer for mechanical systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 50, 1785–1789. <http://dx.doi.org/10.1109/tac.2005.858636>
- 1.88 Kiencke, U., & Nielsen, L. (2000). Automotive control systems. Berlin: Springer-Verlag.
- 1.89 Wickens, A. H. (1986). Non-linear dynamics of railway vehicles. Vehicle System Dynamics, 15, 289–301
- 1.90 Xiaofeng Jiang, Zhengyou He, Haitao Hu, Yangfan Zhang Analysis of the Electric Locomotives Neutral-section Passing Harmonic Resonance// Energy and Power Engineering, 2013, 5, 546-551 doi:10.4236/epe.2013.54B104 Published Online July 2013
- 1.91 Y. S. Li, “Mechanism Analysis on the Overvoltage of Articulated Phase Insulator,” ChengDu: South West JiaoTong University, 2008.
- 1.92 F. L. Zhou, Q. Z. Li, J. M. He, ect. “Research on Simulation, Practical Measurement and Mechanism of Locomotive Overvoltage and Passing Neutral-section Based on Probability,” Electric Drive for Locomotives, Vol. 6, 2008, pp. 13-16
- 1.93 N. Li, “Research on Electromagnetic Transient Process of Electric Locomotive System,” Beijing: Beijing Jiaotong univerisity, 2010.

- 1.94 Shubhra (MIEEE, LMIETE) MATLAB/Simulink Based Model for 25 kV AC Electric Traction Drive// International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181 Vol. 3 Issue 5, May – 2014
- 1.95 Krishnan R., Electric Motor Drives (Modelling, Analysis, and Control)
- 1.96 Hoang Le-Huy, 2001, Modelling and simulation of electrical drives using MATLAB/Simulink and Power System Block set, Proceedings of the Industrial Electronics Society, 2001, IECON '01, The 27th Annual Conference of the IEEE, Vol.3, pp.1603-1611
- 1.97 Shenoy U.J., Senior Member, IEEE, Sheshakri K.G., Parthasarathy K., Senior Member, IEEE, H.P. Khincha, Senior Member, IEEE, D.Thukaram, Senior Member, IEEE, Matlab/PSB based modelling and simulation of 25 kV AC Railway Traction System - A particular Reference to Loading and Fault Conditions
- 1.98 Electrical Drives and Traction Lecture Notes//Veer Surendra Sai University of Technology, Odisha, Burla, India
- 1.99 Fu Zhang, R.G. Longoria, R. Thelen, D. Wardell A Simulation-Based Design Study for a Locomotive Electric Power System//ELECTRIMACS 2002, Montreal, Canada, August 18-22, 2002
- 1.100 J.R. Smith and A. F. Stronach, "The Simulation of Small Marine Systems Incorporating Gas-Turbine and Diesel Prime Movers," IEE Colloquium on Control in the Marine Industry, pp. 6/1 –6/21, 1988.
- 1.101 M. Steinbuch, "Dynamic Modeling of a Generator/rectifier System" IEEE Tran. on Power Electronics, Vol. 7, No.1, pp.212-223, Jan, 1992.
- 1.102 M.M. Rahimian, H. A. Toliyat and T. A. Lipo, "A Comprehensive Analysis of a Locomotive Traction System Including Main Alternator, Bridge Rectifier, Contactor, and DC Traction Motors, " in Proceedings of Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1995. Part 1, Vol.1, pp. 118 –124, 1995.
- 1.103 F. Hardan, J.A. Mbleijs, R. Jones and P. Bromley, " Bi-directional Power Control for Flywheel Energy Storage System with Vector Controlled Induction Machine Drive, " in Proceedings of Powe Electronics and Variable Speed Drives. pp. 477 –482, 1998.

- 1.104 Senini S., Flinders F. and Oghanna W.: Dynamic simulation of wheel-rail interaction for locomotive traction studies. 1993 Joint IEEE/ASME Railroad Conference, Pittsburgh PA, 6-8 April 1993, pp. 27-34.
- 1.105 Taufiq J.A.: Evaluating the step response of a traction VSI drive. 3rd International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, London, 13-15 July 1988, pp. 340-342
- 1.106 Taufiq J.A., Xiaoping J., Allan J. and Burdett S.: A simple method of calculating inverter DC side current harmonics. 3rd European Power Electronics Conference, Aachen, 9-12 October 1989, pp. 93-96.
- 1.107 Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов: Монография/ Ю. А. Бахвалов, Г. А. Бузало, А. А. Зарифьян, П. Ю. Петров и др.; под ред. А. А. Зарифьяна. – М.: Маршрут, 2006. – 374 с.
- 1.108 Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом/ Ю. А. Бахвалов, А. А. Зарифьян, В. Н. Кашников и др.; Под ред. Е. М. Плохова. – М.: Транспорт, 2001 – 286 с.
- 1.109 Z. Li. Wheel-Rail Contact and Its Application to Wear Simulation. Doctoral Thesis proposal, Delft university of Technology, (2002). ISBN 90-407-2281-1.
- 1.110 R. Enblom. On simulation of uniform wear and profile evolution in the wheel-rail contact, Doctoral Thesis KTH, Stockholm, Sweden (2006).
- 1.111 J.A. Williams, Wear modelling, analytical, computing and mapping: a continuum mechanics approach. Wear, 225–229 (1999) pp. 1–17.

К главе 2

- 2.1 Основы тягового электропривода. Часть II/ В. И. Бочаров, А. Г. Вольвич, В. А. Малютин, В. Г. Щербаков. – Ростов н/Д.: Изд-во Рост. Ун-та, 1997. – 496 с.
- 2.2 Автоматическое регулирование сил тяги и торможения электроподвижного состава/ Тулупов В. Д., М.: Транспорт, 1976, 368 с.

- 2.3 Режимы работы магистральных электровозов/ О. А. Некрасов, А. Л. Лисицын, Л. А. Мугинштейн, В. и. Рахманинов; Под ред. О. А. Некрасова. М.: Транспорт, 1983. – 231 с.
- 2.4 Магистральные электровозы. Электрические аппараты, полупроводниковые преобразователи, системы управления/ В. И. Бочаров, Н. М. Васько, А. Г. Вольвич, О. Н. Жулев и др.// Под ред. В. И. Бочарова, Б. А. Тушканова. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 384 с.
- 2.5 Fu Zhang, R.G. Longoria, R. Thelen, D. Wardell A Simulation-Based Design Study for a Locomotive Electric Power System//ELECTRIMACS 2002, Montreal, Canada, August 18-22, 2002
- 2.6 H. Peng, H.Chen, Y. Zeng et al., “Simulation of adhesion control method based on differential acceleration,” Electric Drive for Locomotives, no. 2, pp. 26-27, 2010
- 2.7 Q. Ren, Design and simulation of heavy haul locomotives and trains, [Master thesis], Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 2014
- 2.8 M. Spiryagin, P. Wolfs, C. Cole, and V. Spiryagin, Design and Simulation of Heavy Haul Locomotives and Trains, CRC Press, Florida, FL, USA, 2016
- 2.9 Y. Yao, H.-J. Zhang, Y.-M. Li, and S.-H. Luo, “The dynamic study of locomotives under saturated adhesion,” Vehicle System Dynamics, vol. 49, no. 8, pp. 1321–1338, 2011
- 2.10 Веригин, О.С. 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 Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 20–22 апреля 2020 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2020. – С. 289-293.
- 2.11 Веригин, О.С. О возможности повышения энергетической эффективности грузовых электровозов семейства «Ермак» / А. А. Зарифьян, О. С. Веригин, А. Ш. Мустафин, Т. З. Талахадзе // Современное развитие науки и техники : Сборник научных трудов Всероссийской национальной научно-практической конференции,

Ростов-на-Дону, 01–03 декабря 2020 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2020. – С. 114-118.

2.12 Веригин, О.С. Математическое описание тяговых электроприводов современных электровозов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями / О. С. Веригин // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 20–22 апреля 2020 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2020. – С. 70-74.

2.13 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.

2.14 О. С. Веригин 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.

2.15 ИДМБ.661142.009 РЭ1 Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Электрические схемы.

2.16 ИДМБ.661142.009 РЭ3 Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) Руководство по эксплуатации. Книга 3. Описание и работа. Электрические машины.

2.17 ИДМБ.661142.009 РЭ4 Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) Руководство по эксплуатации. Книга 4. Описание и работа. Электрические аппараты и оборудование.

2.18 ИДМБ.661142.009 РЭ5 Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) Руководство по эксплуатации. Книга 5. Описание и работа. Электронное оборудование.

2.19 ИДМБ.661142.009 РЭ6 Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) Руководство по эксплуатации. Книга 6. Описание и работа. Механическая часть.

- 2.20 Теория локомотивной тяги/ В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров; под ред. И. П. Исаева. – М.: Транспорт, 1995. – 294 с.
- 2.21 Постол, Б.Г. Тяга поездов: учеб. Пособие / Б. Г. Постол, Е. Н. Кузьмичев. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2011. – 74 с., ил.
- 2.22 Розенфельд, В.Е. Электрические железные дороги / В. Е. Розенфельд, Н. Н. Сидоров, С. Е. Кузин // Государственное транспортное железнодорожное издательство. – М.: 1951 – 536 с.
- 2.23 Вольдек, А.И. Электрические машины. Учебник для электротехнических специальностей вузов. – 3-е изд., перераб. – Ленинград: Энергия. Ленингр. Отделение, 1978. – 832 с.: ил.
- 2.24 Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с., ил.
- 2.25 Кулик, Ю.А. Электрические машины. Учеб. Пособие для вузов. М.: «Высш школа», 1971, 456 с.
- 2.26 Петров, Г.Н. Электрические машины. В 3-х ч. Ч. 3. Коллекторные машины постоянного и переменного тока. Изд. 2-е, переработ. и доп. М.: Энергия, 1968, 224 с.
- 2.27 Герман-Галкин, С.Г. Matlab&Simulink: проектирование мехатронных систем на ПК: учебное пособие для студентов высших учебных заведений/ С. Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург: Корона.Век, 2011. – 367 с.: ил.
- 2.28 Топчеев, Ю.И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1989. – 752 с.: ил.
- 2.29 Анучин, А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов: для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника»/А. С. Анучин. – Москва: Изд. Дом МЭИ, 2015. – 371 с.: ил.
- 2.30 Терехов, В.М. Системы управления электроприводов: учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности 140604 «Электропривод и автоматика пром. установок и технол. комплексов» направления подгот. дипломир. специалистов

140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии»/ В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. – Москва: Academia, 2005. – 299 с., ил.

2.31 Тихменев, Б. Н. Подвижной состав электрических железных дорог. Том 3. Электрическая часть / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман // Государственное транспортное железнодорожное издательство. – М.: 1951 – 475 с.

2.32 Сакало, В.И Контактные задачи железнодорожного транспорта / В. И. Сакало, В. С. Коссов // М.: Машиностроение, 2004. – 496 с.

К главе 3

3.1 А. А. Зарифьян Исследование проворотов бандажей колесных пар современных магистральных электровозов / О. С. Веригин, А. А. Зарифьян // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. - №4. – 38 – 40.

3.2 Веригин, О.С. 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: сборник статей международной научной конференции, Рост. гос. ун-т путей сообщения, Ростов н/Д, 2021, с. 117 – 124 DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_117.

3.3 А. А. Зарифьян Моделирование тягового электропривода электровоза ЗЭС5К 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.

3.4 А. А. Зарифьян 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. – 130 с.

К главе 4

- 4.1 Веригин, О.С. 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.
- 4.2. А. М. Иванишкин Особенности применения системы управления тормозами поездов повышенной длины и веса на электровозах 2ЭС5К (3ЭС5К) / О. С. Веригин, А. М. Иванишкин // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2014. - № 1(67). – С. 90 – 106.
- 4.3. В. В. Никонов Перспективы и особенности применения отечественных силовых агрегатов на IGBT-транзисторах для повышения тягово-энергетических показателей электровозов 2ЭС5К (3ЭС5К, 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.
- 4.4 А. А. Зарифьян Влияние электромеханических процессов на надежность колесных пар электровозов / А. А. Зарифьян, О. С. Веригин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. - №4. – 29 – 34.
- 4.5 Винник, Л.В. Проблемы механики рельсового транспорта с новыми конструкциями колесных пар / Л. В. Винник. - Москва: Академия, 2005 (Иваново : Иван. обл. тип.). - 719 с.: табл., ил.
- 4.6 Гундрорва, Н.И. Методы дискретного моделирования фрикционных контактных систем упругих тел и их применения в задачах строительной механики: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.17. – Воронеж. – 1999. – 172 с., ил.
- 4.7 ГОСТ 33783-2016 «Колесные пары железнодорожного подвижного состава. Методы определения показателей прочности»

4.8 ГОСТ 11018-2011 «Колесные пары тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия»

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Конструкция и основные технические характеристики колесных пар электровозов

Конструкция колесной пары современного магистрального электровоза показана на рисунке А.1.

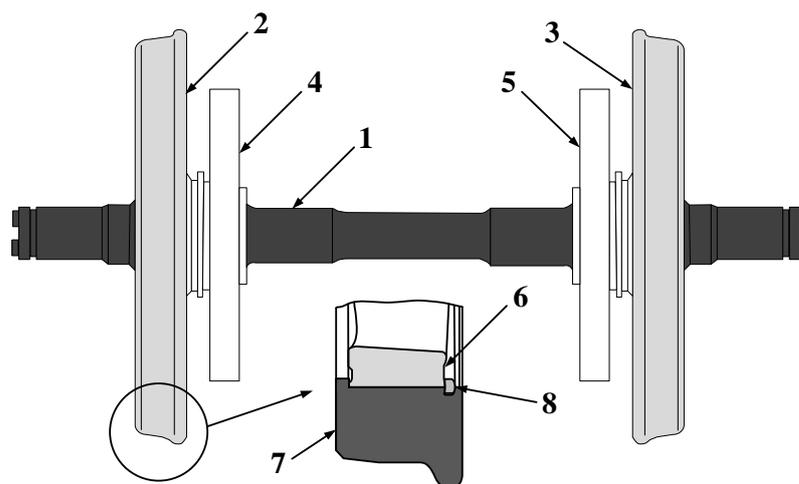


Рис. А.1 Конструкция колесной пары современного магистрального грузового электровоза

Представленная на рисунке А.1 колесная пара предназначена для эксплуатации в составе магистрального грузового электровоза с опорно-осевым подвешиванием тягового двигателя и двусторонней опорно-осевой зубчатой механической передачей. На ось колесной пары 1 при помощи посадки с натягом устанавливаются колеса 2, 3. Колесо магистрального электровоза представляет собой сборочную единицу, состоящую из колесного центра 6, на который, также, посадкой с натягом устанавливается зубчатое колесо тягового редуктора 4, 5 и бандаж 7, который фиксируется кольцом 8, предназначенным для предотвращения сползания бандажа с колесного центра в процессе движения.

Основные технические характеристики колесной пары приведены в таблице А.1

Таблица А.1 Основные технические характеристики колесной пары

Наименование характеристики	Значение
Номинальный диаметр колеса по кругу катания, мм	1250
Ширина между внутренними торцами бандажей, мм	1440
Ширина бандажа, мм	140
Толщина нового бандажа по кругу катания, мм	90
Толщина изношенного бандажа по кругу катания, мм	45

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Основные технические характеристики электрооборудования электровоза ЗЭС5К

Таблица Б.1 Основные технические характеристики дросселя помехоподавления ДП-011

Наименование характеристики	Численное значение
Номинальное напряжение изоляции, кВ	25
Номинальный ток продолжительного режима, А	650
Пусковой ток, А	300
Индуктивность, мкГн	250
Электрическое сопротивление катушки постоянному току, Ом	0,0061
Масса, кг	38

Таблица Б.2 Основные технические характеристики тягового трансформатора ОНДЦЭ-4350/25

Наименование характеристики	Численное значение
Номинальная мощность трансформатора, кВА	4350
Номинальная частота питающей сети, Гц	50
Потери короткого замыкания, кВт	56,8
Суммарные потери, кВт	60,5
Ток холостого хода, %	0,8
Номинальная мощность сетевой обмотки, кВА	4345
Номинальное напряжение сетевой обмотки, кВ	25
Максимальное напряжение сетевой обмотки, кВ	29

Продолжение таблицы Б.2

Номинальный ток на вводах сетевой обмотки, А	173,8
Номинальная мощность тяговых обмоток, кВА	2x2016
Номинальное напряжение на зажимах тяговых обмоток, В	
a1-x1, a2-x2	1260
a1-2, 2-x1, a2-4, 4-x2	630
a1-1, 1-2, a2-3, 3-4	315
Номинальный ток тяговых обмоток, А	1600
Номинальная мощность обмотки собственных нужд, кВА	201
Номинальное напряжение на зажимах обмотки собственных нужд, В	a4-x4 225 x4-6 405
Номинальный ток обмотки собственных нужд, А	500
Номинальная мощность обмотки питания цепей возбуждения тяговых двигателей, кВА	112
Номинальное напряжение на зажимах обмотки питания цепей возбуждения тяговых двигателей, В	a3-5 135 5-x3 135
Номинальный ток на зажимах обмотки питания цепей возбуждения тяговых двигателей, А	a3, x3 650 5 900
Номинальный ток обмотки отопления, А	-
Масса, кг	8250

Таблица Б.3 Основные параметры тягового преобразователя ВИП-4000М

Наименование характеристики	Численное значение
Номинальное входное напряжение, В	1570

Продолжение таблицы Б.3

Номинальная входная частота, Гц	50
Номинальное выходное напряжение, В	1400
Номинальный выходной ток, А	3150
Номинальная выходная активная мощность, кВт	4000
Параметры импульсов управления на входе системы формирования импульсов (резистор 68 Ом)	
Амплитуда напряжения, В	15
Амплитуда тока, А	0,2
Длительность импульса, мкс	30
Скорость нарастания тока, А/мкс	0,1
Параметры импульсов на выходах блоков управления силового блока	
Амплитуда напряжения основного импульса, В	10
Амплитуда напряжения форсажного импульса, В	20
Длительность импульса по основанию, мкс	850
Параметры импульсов на резисторах 3,3 Ом в цепях управления силовых тиристоров	
Амплитуда напряжения основного импульса, В	7

Таблица Б.4 Основные технические характеристики сглаживающего реактора РС-19

Наименование характеристики	Численное значение
Ток продолжительного режима, А	2500
Масса, кг	1270

Таблица Б.5 Основные технические характеристики тягового двигателя НБ-514

Наименование характеристики	Численное значение
Номинальная мощность, кВт	765
Номинальное напряжение, В	1000
Номинальный ток якоря, А	810
Номинальная частота вращения, об/мин	940
Активное сопротивление обмоток, Ом	
якорь	0,0112
главные полюса	0,0069
добавочные полюса и компенсационная обмотка	0,0125
Масса, кг	4300

Таблица Б.6 Основные технические характеристики панели резисторов ослабления тока возбуждения РОВ-21

Наименование характеристики	Значение характеристики
Электрическое сопротивление секций при номинальном токе, Ом	
Р0-Р3	0,294±0,0147
Р3-Р2	0,0039±0,0002
Р2-Р1	0,017±0,00085
Р2-Р4	0,058±0,0029
Номинальный ток секций, А	
Р0-Р3	210
Р3-Р2	550
Р2-Р1	325
Р2-Р4	220

Таблица Б.7 Основные технические характеристики индуктивного шунта ИШ-009

Наименование характеристики	Значение характеристики
Номинальный ток, А	520
Электрическое сопротивление, Ом	0,0066

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт рассмотрения результатов диссертационной работы ООО «Производственная компания «Новочеркасский электровозостроительный завод» (ООО «ПК «НЭВЗ»)

Общество с ограниченной ответственностью
«Производственная компания «Новочеркасский электровозостроительный завод»
ООО «ПК «НЭВЗ»

346413, Россия, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Машиностроителей, 7-а
Тел.: 8 (8635) 29-22-00

УТВЕРЖДАЮ
Технический директор
В. В. Кинжигазиев



АКТ

рассмотрения результатов диссертационной работы
Веригина Олега Сергеевича

на тему «Влияние электромеханических процессов в тяговом электроприводе на
надежность и долговечность колесных пар магистрального электровоза»

Комиссия в составе:

Председатель: В. В. Кинжигазиев – технический директор ООО «ПК «НЭВЗ»

Члены комиссии:

А.С. Баранов – главный конструктор ООО «ПК «НЭВЗ»

В. Л. Задорожный – главный специалист по электровозам переменного тока
ООО «ПК «НЭВЗ»

К.И. Симонов – ведущий эксперт ООО «ПК «НЭВЗ»

составила настоящий акт о том, что предложенные Веригиным Олегом Сергеевичем в диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.9.3 результаты научных исследований проблемы проворота бандажей колесных пар электровозов 2,3,4ЭС5К и рекомендации по повышению надежности указанных электровозов актуальны и востребованы в деятельности ООО «ПК «НЭВЗ» по следующим показателям:

1. В диссертационной работе решена актуальная задача по исследованию надежности колесных пар магистральных грузовых электровозов в части влияния электромеханических переходных процессов на возникновение проворотов бандажей. Актуальность рассматриваемого вопроса обусловлена тем, что конструкция электровозных колес бандажного типа не претерпела принципиальных изменений за последние 60 лет при кратном увеличении передаваемых тяговых усилий.

2. По результатам выполненных исследований рекомендовано создание специализированного исполнения электровоза серии 2,3,4ЭС5К с цельнокатанными колесами и поосным регулированием силы тяги. Данное исполнение электровоза предназначено для вождения поездов на железнодорожных полигонах со сложным профилем пути.

3. Работы по созданию отечественного грузового электровоза с цельнокатанными колесами актуальны с точки зрения реализации программ импортозамещения.

4. Результаты моделирования и методика исследования надежности колес в части проворотов бандажей применимы для анализа конкретных случаев отказа, в том числе и на

других серия электровозов переменного тока, выпускаемых ООО «ПК «НЭВЗ» (ЭП1М, ЭП1П, 2,3ЭС5С).

По итогам рассмотрения результатов диссертационной работы комиссия рекомендует вышеуказанные решения к применению при создании перспективных серий грузовых электровозов для обеспечения длительного срока службы колес и снижения затрат на техническое обслуживание локомотивов.

СОГЛАСОВАНО

Главный конструктор ООО «ПК «НЭВЗ»



А.С. Баранов

Главный специалист по электровозам
переменного тока ООО «ПК «НЭВЗ»



В. Л. Задорожный

Ведущий эксперт ООО «ПК «НЭВЗ»



К.И. Симонов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт рассмотрения результатов диссертационной работы АО «Системы управления и приборы» (АО «СУП»)

Акционерное общество «Системы управления и приборы»

(АО «СУП»)

ул. Обручевых 7, 194064, г. Санкт-Петербург, тел./факс: +7 (812) 320-23-93

УТВЕРЖДАЮ

Директор обособленного
подразделения

Ю. Г. Белогорцев

АКТ

рассмотрения результатов диссертационной работы

Веригина Олега Сергеевича

на тему «Влияние электромеханических процессов в тяговом электроприводе на надежность и долговечность колесных пар магистрального электровоза»

Комиссия в составе:

Председатель: Ю. Г. Белогорцев – директор обособленного подразделения.

Члены комиссии: В. А. Храпковский – главный конструктор по ПО, А. В. Соколов – главный конструктор по силовым преобразователям.

составила настоящий акт о том, что предложенные Веригиным Олегом Сергеевичем в диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.9.3 решения по моделированию электромеханических переходных процессов в электроприводах рассмотрены и признаны востребованными в работах АО «СУП», связанных с созданием электропроводов, по следующим показателям:

1. В диссертации решена задача исследования надежности механической части тягового электропривода магистрального электровоза ЗЭС5К. Объектом исследований является устойчивость фрикционного соединения колесного центра и бандажа под влиянием электромеханических переходных процессов, вызванных внешними возмущающими воздействиями:

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

2. В диссертации разработана методика математического моделирования переходных процессов в системе «тиристорный преобразователь – тяговый электродвигатель» с учетом нелинейных свойств обмоток электродвигателя, реакторного оборудования и т. д.

3. Математическая модель предусматривает компьютерную реализацию в широкой номенклатуре программного обеспечения, в том числе и отечественной разработки. При моделировании в качестве исходных данных применяются реальные внешние воздействия на исследуемую электромеханическую систему, представленные в виде временных таблиц, полученных экспериментальным путем. Это позволяет учитывать в расчетах реальные условия эксплуатации создаваемого электропривода.

По итогам рассмотрения результатов диссертационной работы комиссия рекомендует вышеуказанные решения к применению в проектно-конструкторских разработках АО «СУП» для исследования динамики проектируемых электроприводов, синтеза систем управления электроприводами и применения результатов моделирования при разработке программного обеспечения для управляющих устройств электроприводов.

Главный конструктор по ПО

В. А. Храпковский

Главный конструктор по
силовым преобразователям

А. В. Соколов

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акт рассмотрения результатов диссертационной работы Северо-Кавказской дирекцией тяги Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД»



ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ДИРЕКЦИЯ ТЯГИ
СЕВЕРО-КАВКАЗСКАЯ ДИРЕКЦИЯ ТЯГИ

пл. Привокзальная, 1/2, г. Ростов-на-Дону, 344001
тел.: (863) 259-53-09, факс: (863) 259-53-09, e-mail: SekrT@skzd.rzd

_____ г.

№ _____

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель начальника
Северо-Кавказской дирекции тяги
Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД»
Мыльников В. Б.



_____ г.

АКТ

рассмотрения результатов диссертационной работы

Веригина Олега Сергеевича

на тему «Влияние электромеханических процессов в тяговом электроприводе
на надежность и долговечность колесных пар магистрального электровоза»

Комиссия в составе:

Председатель: В.Б. Мыльников – первый заместитель начальника
Северо-Кавказской дирекции тяги Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД»

Член комиссии: М.В. Петросян – начальник технического отдела
Северо-Кавказской дирекции тяги Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД»

составила настоящий акт о том, что предложенные Веригиным Олегом
Сергеевичем в диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата

технических наук по специальности 2.9.3 результаты научных исследований проблемы проворота бандажей колесных пар электровозов 2,3,4ЭС5К и рекомендации по повышению надежности указанных электровозов актуальны и востребованы в деятельности ООО «ПК «НЭВЗ» по следующим показателям:

1. Создание специализированного исполнения электровоза серии 2,3,4ЭС5К с цельнокатаными колесами и поосным регулированием силы тяги для вождения поездов на железнодорожных полигонах со сложным профилем пути позволит значительно повысить показатели надежности подвижного состава.

2. Представленные в диссертационной работе данные о режимах работы тягового электропривода электровоза 3ЭС5К, приводящих к возникновению проворотов бандажей, указывают на необходимость более тщательного контроля за исполнением локомотивными бригадами указаний по применению электрического и фрикционного торможения.

По итогам рассмотрения результатов диссертационной работы комиссия рекомендует вышеуказанные решения к применению при создании перспективных серий грузовых электровозов и при эксплуатации парка тягового подвижного состава.

СОГЛАСОВАНО

Начальник технического отдела
Северо-Кавказской дирекции тяги
Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД»



М.В. Петросян