

На правах рукописи



ВОЛЧЕК Татьяна Витальевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОСЛАБЛЕНИЯ
ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

**Научный
руководитель:**

Мельниченко Олег Валерьевич

доктор технических наук, профессор, кафедра «Электроподвижной состав», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой;

**Официальные
оппоненты:**

Кручек Виктор Александрович

доктор технических наук, профессор, кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС)», профессор;

Малышева Ольга Александровна

кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электротехника, электроника и электромеханика», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС), доцент.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС)».

Защита диссертации состоится «15» декабря 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.07 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ) по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С самого начала эпохи строительства железных дорог вопрос повышения скорости движения поездов на магистралях транспортной сети является актуальным. Вся история развития железнодорожного транспорта связана со стремлением обеспечить максимальные рабочие скорости движения, минимальное время в пути, увеличение пропускной способности магистралей и др.

В соответствии с отраслевым стратегическим документом «Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года», утвержденным распоряжением Правительства РФ от 19.03.2019 г. № 466-р, поставлена задача к 2025 году увеличить техническую скорость и удвоить грузооборот по сети железных дорог. Одним из способов решения поставленных задач является совершенствование электроподвижного состава.

В настоящее время на отечественных электровозах переменного тока с коллекторным приводом для дополнительного регулирования скорости движения поездов применяется режим ослабления возбуждения тяговых электродвигателей (ТЭД) за счет подключения параллельно обмотки возбуждения реостатно-контактной системы с индуктивным шунтом (штатная система). Устройство данной системы применялось ещё на первых отечественных электровозах постоянного тока и до сегодняшних дней остается без изменений. Штатная система ослабления возбуждения (ОВ) ТЭД имеет ограниченное число ступеней, что исключает возможность поддерживать максимально-допустимую скорость движения по участку, содержит электропневматические контактора, что снижает работоспособность системы. Наличие пульсации тока возбуждения ТЭД в режиме ОВ вызывает значительное повышение вихревых токов, которые образуют небалансную электродвижущую силу (ЭДС) в якорной обмотке, что уменьшает коммутационную устойчивость ТЭД. Диссертационная работа направлена на совершенствование системы ОВ ТЭД, которое позволит исключить недостатки штатной системы, что подтверждает ее актуальность.

Степень проработанности проблемы. В диссертационной работе проведен анализ научных трудов в области усовершенствования системы ОВ ТЭД электровозов. Проанализированы работы ученых и практиков, результаты исследований которых стали научной основой при выполнении диссертационной работы. Усовершенствованием системы ОВ ТЭД занимаются: проектно-конструкторское бюро локомотивного хозяйства (ПКБ ЦТ), высшие учебные заведения, такие как ПГУПС, ИрГУПС, ДВГУПС, МИИТ, ОмГУПС,

Забайкальский научно-исследовательский институт отраслевых технологий и другие.

Известно, что ранее одной из причин неудовлетворительного состояния электроподвижного состава (ЭПС) являлась полная или частичная неукomплектованность локомотивного парка индуктивными шунтами (ИШ), что приводило к неработоспособности системы ОВ ТЭД. Поэтому большинство научных работ по ее усовершенствованию направлены на исключение индуктивных шунтов из силовой цепи электровоза, при этом вопрос по обеспечению плавного регулирования тока возбуждения не был решен. Разработанные на сегодняшний день системы ОВ ТЭД с плавным регулированием тока возбуждения имеют высокие массогабаритные показатели и усложненную систему управления, что снижает их работоспособность. Недостаточно внимания уделяется электромагнитным процессам, протекающим в ТЭД электровоза, работающих в режиме ОВ, которые оказывают влияние на ресурс его работы. В связи с этим ранее предлагаемые системы ОВ ТЭД не нашли массового применения на ЭПС.

В связи с развитием микропроцессорной техники и полностью управляемых полупроводниковых приборов появляется возможность на ЭПС реализовать усовершенствованную систему ОВ ТЭД электровоза, обеспечивающую плавное регулирование тока возбуждения, снижение его пульсации, при этом иметь относительно простую конструкцию и систему управления.

Объектом исследования является система ослабления возбуждения тяговых электродвигателей электровоза.

Предметом исследования являются электромагнитные процессы ТЭД электровоза, работающего в режиме ОВ.

Целью работы является разработка схематического решения и алгоритма работы усовершенствованной системы ОВ ТЭД электровоза, позволяющей увеличить техническую скорость ЭПС за счет плавного регулирования тока возбуждения и снизить его пульсацию не менее чем на 80 %.

Для достижения данной цели в диссертационной работе поставлены следующие задачи:

- выполнить аналитическое исследование работы штатной системы ОВ ТЭД электровоза переменного тока;
- провести исследование влияния пульсации тока возбуждения на коммутационную устойчивость ТЭД;
- разработать усовершенствованную систему ОВ ТЭД на базе IGBT-транзисторов с алгоритмом управления, позволяющим плавно регулировать ток возбуждения, и снизить его пульсации не менее чем на 80 %;

- уточнить в среде *MatLab* математическую модель «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз переменного тока» для обеспечения оценки работы электровоза со штатной и предлагаемой системами ОВ ТЭД;

- провести сравнительное математическое моделирование электромагнитных процессов ТЭД электровоза переменного тока, работающего в режиме тяги с использованием штатной и предлагаемой систем ОВ;

- разработать экспериментальный стенд для исследования штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД электровоза переменного тока и провести их исследования;

- провести сравнение электромагнитных процессов ТЭД, полученных при математическом моделировании электровоза серии ЗЭС5К и на экспериментальном стенде.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- разработан и предложен алгоритм управления системой ОВ ТЭД на базе *IGBT*-транзисторов, обеспечивающий плавное регулирование тока возбуждения, за счет изменения длительности открытого состояния *IGBT*-транзисторов;

- разработан способ управления режимом ОВ ТЭД электровоза, позволяющий значительно снизить пульсацию тока возбуждения, за счет шунтирования цепи обмотки возбуждения *IGBT*-транзисторами;

- получено аналитическое выражение для определения коэффициента ОВ для системы плавного регулирования ОВ ТЭД электровоза.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- разработано схемное решение усовершенствованной системы ОВ ТЭД на базе *IGBT*-транзисторов, позволяющее исключить из силовой схемы электровоза индуктивные шунты и уменьшить количество электропневматических контакторов;

- разработано техническое решение по управлению *IGBT*-транзисторами системы ОВ ТЭД, что обеспечит повышение технической скорости ЭПС и снижение пульсации тока возбуждения не менее чем на 80 %;

- уточнена математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз переменного тока», в режиме ОВ ТЭД, реализованная в среде *MatLab*, позволяющая исследовать электромагнитные процессы, протекающие в ТЭД электровоза со штатной и предлагаемой системами ОВ;

- разработан научный экспериментальный стенд для исследования работы электровоза в режиме тяги с ослаблением возбуждения ТЭД.

Методология и методы исследований. Исследования проведены на основе теории электрических цепей, методов математического моделирования,

численных методов решения интегральных и дифференциальных уравнений. Экспериментальные исследования проводились на математической модели в среде *MatLab/Simulink*, в программном комплексе «КОРТЭС» и на экспериментальном стенде в лаборатории ИрГУПС.

Положения, выносимые на защиту:

- алгоритм управления системой ОВ ТЭД на базе *IGBT*-транзисторов, обеспечивающий плавное регулирование тока возбуждения, за счет изменения длительности открытого состояния *IGBT*-транзисторов;
- способ управления режимом ОВ ТЭД электровоза, позволяющий снизить пульсацию тока возбуждения за счет шунтирования цепи обмотки возбуждения *IGBT*-транзисторами;
- результаты моделирования электровоза переменного тока, работающего в режиме ОВ при работе штатной и предлагаемой систем, полученные на математической модели в среде *MatLab/Simulink* и экспериментальном стенде.

Достоверность научных положений и результатов. Достоверность проведенных теоретических и аналитических исследований подтверждается результатами, полученными при математическом моделировании в среде *MatLab/Simulink*, совпадением их с реальными процессами на электровозе, погрешность которых не превышает 10 %.

Апробация работы: Основные положения, результаты и выводы работы докладывались и обсуждались на всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (Иркутск, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 гг.); международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура сибирского региона» (Иркутск, 2018, 2019, 2020 гг.); молодежном конкурсе проектов «Новое звено» (Москва, 2019 г.); международной научной конференции «Инновационные технологии развития транспортной отрасли» (Хабаровск, 2019 г.); заседании секции «Локомотивное хозяйство» Научно-технического совета ОАО «РЖД» под председательством главного инженера Дирекции тяги ОАО «РЖД» О.В. Чикиркина (протокол №3 от 20.03.2020 г.); всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава» (Красноярск, 2020 г.); Седьмой международной научно-технической конференции «Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век» (Санкт-Петербург, 2020 г.).

Автор является Лауреатом конкурса «Новое звено 2019» по теме «Повышение технической скорости и снижение затрат электрической энергии при организации вождения тяжеловесных поездов» (за счет изменения схемотехнического решения системы ОВ ТЭД) по данной работе выполнена

научно-исследовательская работа по договору № 4301334 от 26.02.2021 года между ОАО «РЖД» и ФГБОУ ВО ИрГУПС.

Диссертация доложена на заседании кафедры «Электроподвижной состав» (ИрГУПС, г. Иркутск), протокол № 14 от 29.06.2021 г.

Диссертация доложена и рекомендована к защите на расширенном заседании кафедры «Электроподвижной состав» (ИрГУПС, г. Иркутск), протокол № 1 от 12.10.2021 г.

Диссертация доложена и рекомендована к защите на заседании научно-технического совета кафедры «Электропоезда и локомотивы» (РУТ (МИИТ), г. Москва), протокол № 2 от 08.02.2022 г.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 23 печатных трудах, из них семь в журналах из перечня рецензируемых изданий ВАК при Минобрнауке России, одна в изданиях, входящих в международную систему цитирования *Scopus*, получен один патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников. Объем диссертации составляет 146 страниц основного текста, 18 таблиц, 78 рисунков, список использованных источников включает 117 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, дана ее краткая характеристика.

В первом разделе работы проведен анализ существующих систем ОВ ТЭД электровозов и электропоездов постоянного и переменного тока, а также отечественных и зарубежных научных трудов в области усовершенствования данной системы. Отмечены работы ученых и специалистов мирового и российского уровня, таких как Трахтман Л. М., Тихменев Б.Н., Кучумов В.А., Захарченко Д.Д., Находкин В.В., Исаев И.П., Розенфельд В.Е., Ротанов Н.А., Иньков Ю.М., Феоктистов В.П., Курбасов А.С., Плакс А.В., Лисицин А.Л., Бурков А.Т., Гордиенко П.И., Капустин Л.Д., Савоськин А.Н., Некрасов В.И., Сидоров Н.Н., Власьевский С.В., Хоменко Б.И., Мазнев А.С., Евстафьев А.М., Мельниченко О.В. и другие. На основании анализа определена цель работы и сформулированы задачи исследования.

Во втором разделе приведены результаты исследования работы штатной системы ОВ ТЭД электровоза со ступенчатым регулированием. Штатная система ОВ ТЭД состоит из резистора ($R_{ОВ}$), сопротивление которого регулируется контакторами (К1-К3), и индуктивного шунта ($L_{шш}$) (рисунок 1, а).

Основными недостатками штатной системы ОВ ТЭД являются: ограниченное число ступеней ОВ, что исключает возможность поддерживать максимально-допустимую скорость движения поезда по участку; наличие массогабаритного медесодержащего индуктивного шунта и контакторов (в одном электровазе 3ЭС5К установлено 12 ИШ и 36 контакторов), что снижает надежность работы системы.

Потери скорости и ускорения ЭПС в режиме ОВ ТЭД возможно исключить за счет плавного регулирования тока возбуждения, когда число ступеней не ограничено. В качестве альтернативы разработана усовершенствованная система ОВ ТЭД на базе *IGBT*-транзисторов (*VT1*, *VT2*) с плавным регулированием тока возбуждения, что позволит повысить техническую скорость ЭПС (рисунок 1 б).

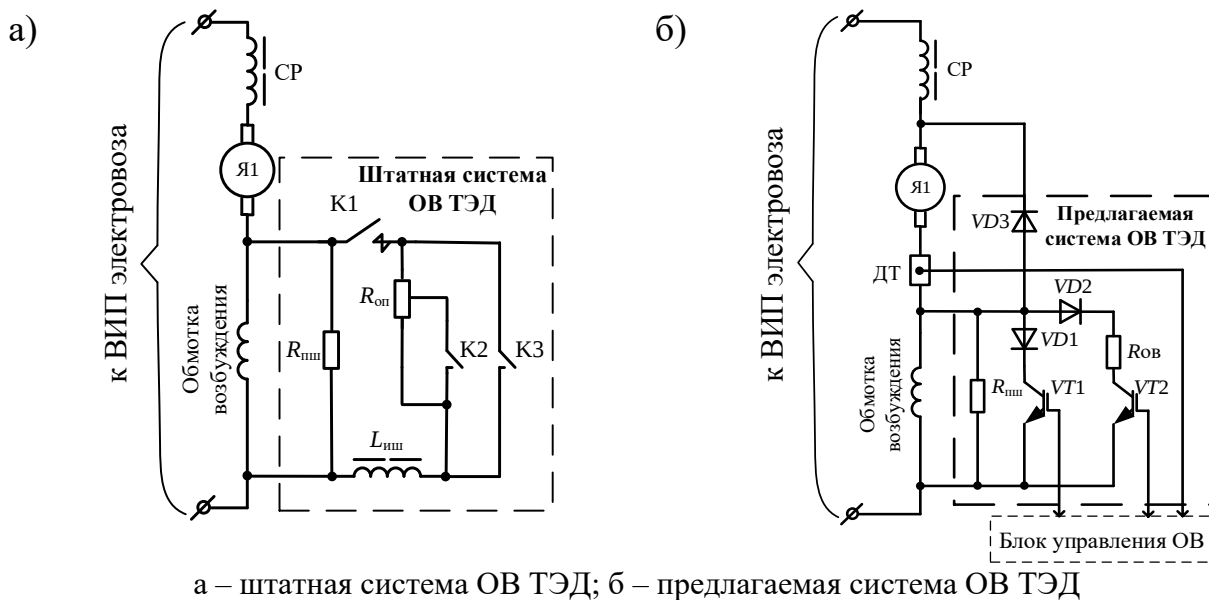


Рисунок 1 - Принципиальная электрическая схема ТЭД электроваза

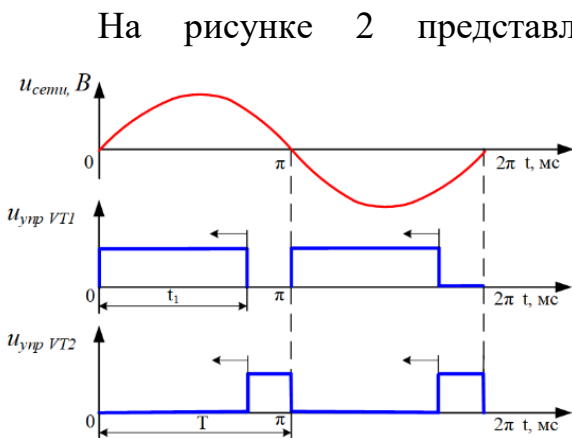


Рисунок 2 - Временная диаграмма управления *IGBT*-транзисторами предлагаемой системы ОВ ТЭД

На рисунке 2 представлена временная диаграмма управления *IGBT*-транзисторами *VT1-VT2*. Для реализации ОВ ТЭД до 43 % тока возбуждения поочередно включаются *VT1-VT2*, регулируя длительность подаваемых на них импульсов, при этом обеспечивается плавное регулирование тока возбуждения. Если время работы *VT1* составляет t_1 , то время работы *VT2* равно $T - t_1$. При возникновении нестационарного режима (проезд нейтральной вставки, отрыв токоприемника от контактной сети

и т.д.) VT1-VT2 выключаются, и ТЭД переходит в режим нормального возбуждения.

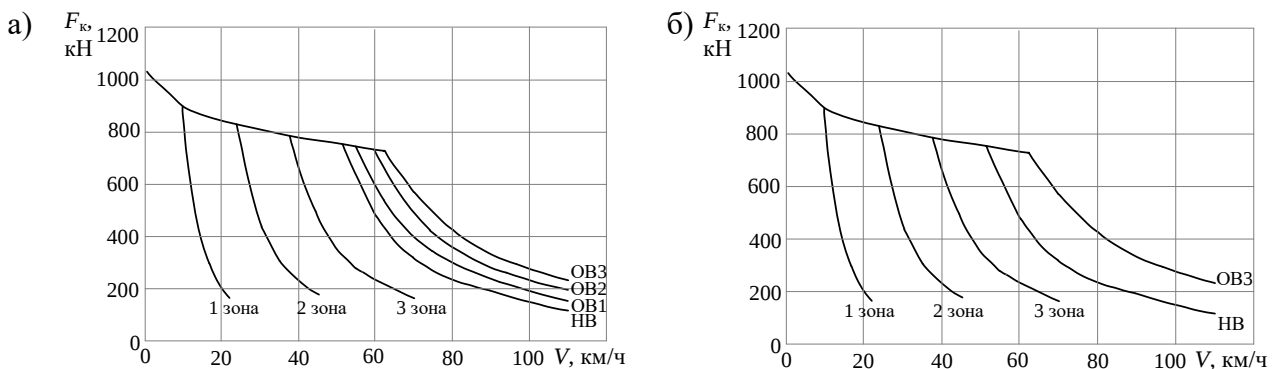
Согласно представленной временной диаграммы управления IGBT-транзисторами предлагаемой системы ОВ ТЭД получено аналитическое выражение для коэффициента ОВ

$$\beta_{\text{общ}} = \frac{I_{\text{я}} \cdot (r_{VT1} + r_{VD1}) + U_{T(VT1)} + U_{T(VD1)}}{I_{\text{я}} \cdot (r_{\text{В}} + r_{VT1} + r_{VD1})} \cdot \frac{t_1}{T} + \frac{I_{\text{я}} \cdot (r_{VT2} + r_{VD2} + r_{\text{ОВ}}) + U_{T(VT2)} + U_{T(VD2)}}{I_{\text{я}} \cdot (r_{\text{В}} + r_{VT2} + r_{VD2} + r_{\text{ОВ}})} \cdot \frac{(T - t_1)}{T},$$

где U_T – напряжение падения на IGBT-транзисторах (VT1; VT2) и диодах (VD1; VD2) соответственно рисунку 1 б, В; $I_{\text{я}}$ – ток якоря, А; r_{VT1} и r_{VD1} – дифференциальное сопротивление VT1 и VD1 соответственно, Ом; r_{VT2} , r_{VD2} , $r_{\text{ОВ}}$ – дифференциальное сопротивление VT2, VD2 и активное сопротивление резистора ОВ соответственно, Ом.

Проведено моделирование электровоза переменного тока серии ЗЭС5К со ступенчатым и плавным регулированием ОВ ТЭД на участке Зима – Иркутск-Сортировочный Восточно-Сибирской железной дороги филиала ОАО «РЖД» в программном комплексе «КОРТЭС».

На рисунке 3 а представлена тяговая характеристика электровоза ЗЭС5К с тремя ступенями ОВ. Для реализации плавного регулирования тока возбуждения в программном комплексе «КОРТЭС» на тяговой характеристике электровоза серии ЗЭС5К убраны промежуточные ступени (ОВ1, ОВ2) и задано максимальное ограничение (ОВ3) (рисунок 3 б).



а – ступенчатое регулирование ОВ ТЭД; б – моделирование плавного регулирования ОВ ТЭД
Рисунок 3 – Тяговые характеристики электровоза серии ЗЭС5К

Используя маршрутную карту вождения грузовых поездов на участке Зима – Иркутск-Сортировочный в программный комплекс «КОРТЭС» записан профиль пути с ограничениями скорости по участку. Полученные результаты моделирования позволили получить график кривых скоростей со ступенчатым и плавным регулированием ОВ на участке Кутулик-Забитуй (тягового плеча

Зима – Иркутск-Сортировочный) в зависимости от профиля пути (рисунок 4). Из представленного рисунка видно, что кривая скорости при плавном регулировании тока возбуждения ТЭД лежит выше кривой скорости при ступенчатом регулировании. Результаты моделирования показали, что плавное регулирование тока возбуждения в режиме ОВ позволит увеличить техническую скорость электровоза на данном участке не менее чем на 2,5 км/ч, что снижает время хода электровоза.

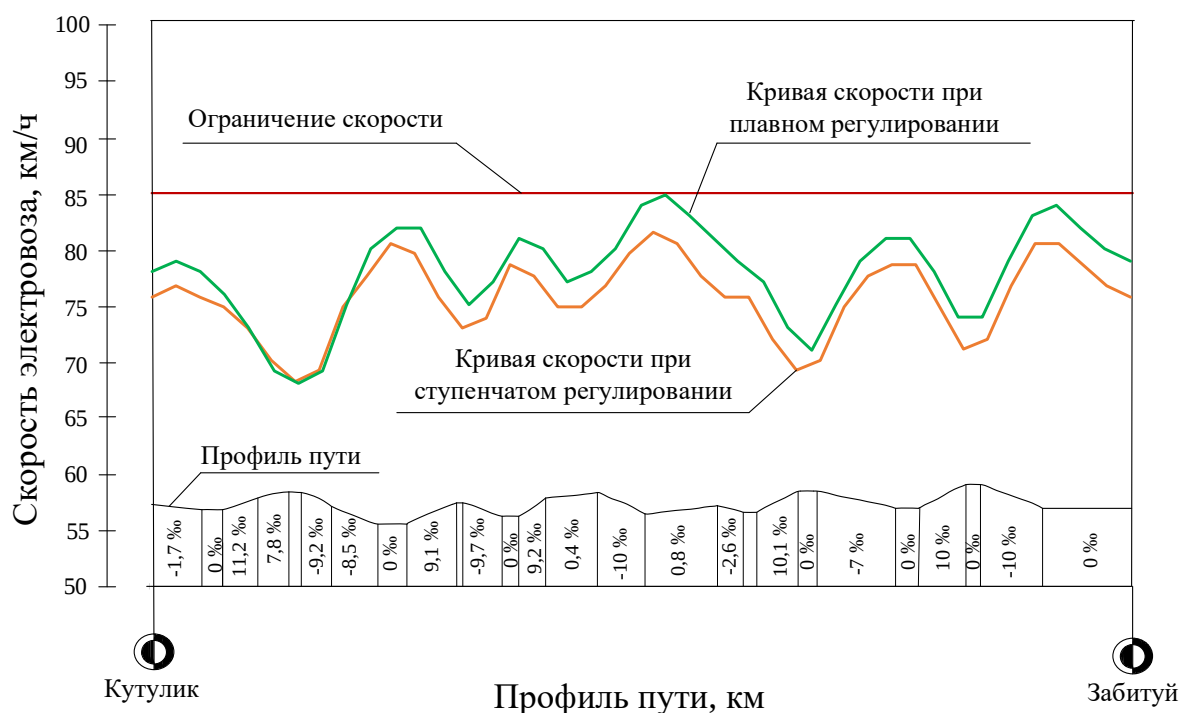
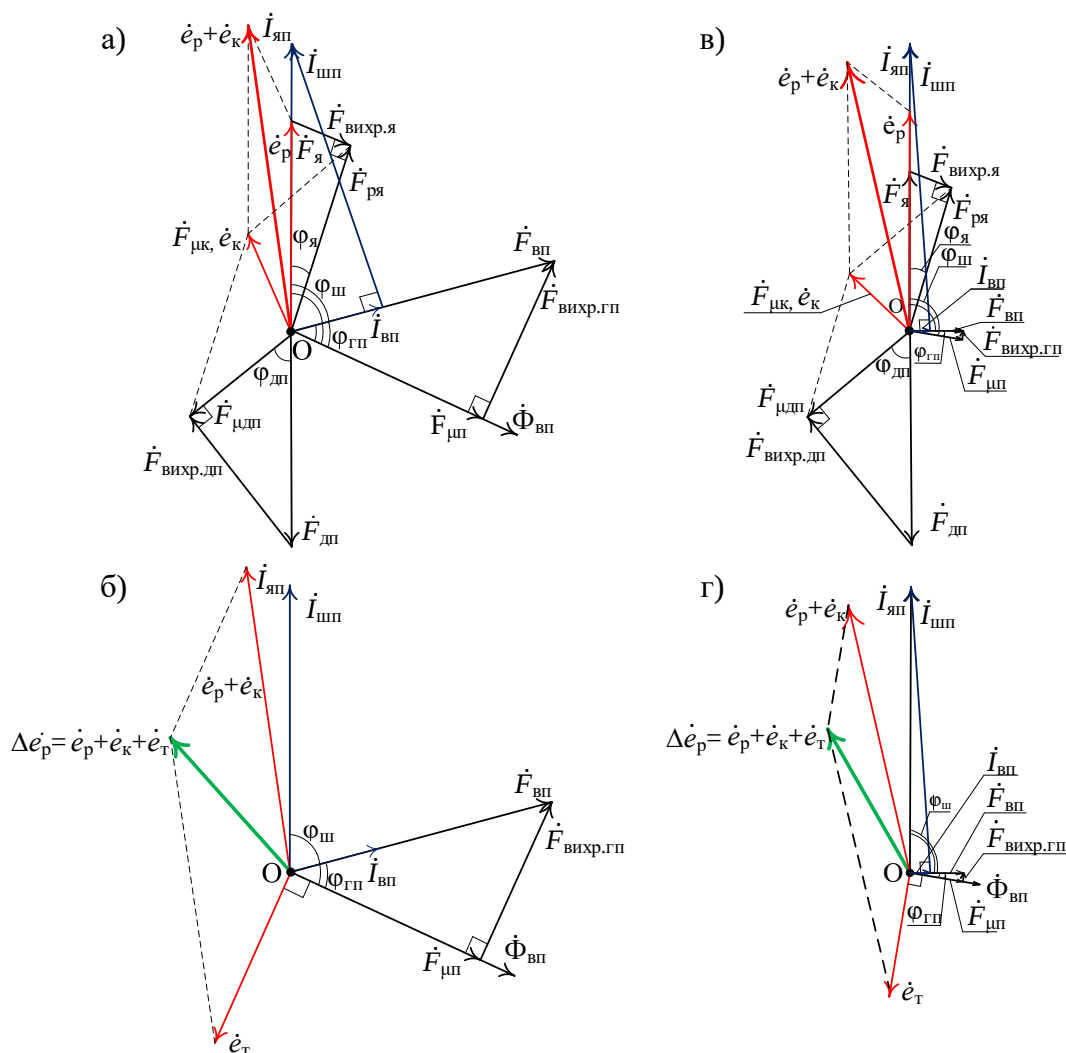


Рисунок 4 – Кривые скорости при ступенчатом и плавном регулировании ОВ ТЭД электровоза, полученные в программном комплексе «КОРТЭС» на участке Кутулик-Забитуй Восточно-Сибирской железной дороги - филиала ОАО «РЖД»

В диссертационной работе проведено исследование влияния пульсации тока возбуждения на коммутационную устойчивость ТЭД электровоза с помощью векторных диаграмм переменных составляющих магнитодвижущих сил (МДС) и электродвижущих сил (ЭДС), которые позволяют определить качественный характер их явлений. Идеальным являлось бы условие, когда для любого момента времени коммутации небалансная ЭДС (Δe_p) равнялась бы нулю, но данное условие выполнить невозможно в следствие возникновения несинусоидальных величин переменных ЭДС и наличия больших фазовых сдвигов между их основными гармониками. Причинами данных явлений являются вихревые токи, которые образуются в массивных элементах магнитопровода ТЭД, а также возникающая реакция якоря, все это приводит к значительному смещению вектора коммутирующей ЭДС (e_k), что образует

небалансную ЭДС ($\Delta \dot{e}_p$) (рисунок 5 а), которая вызывает нарушение коммутационной устойчивости ТЭД.



для штатной системы ОВ ТЭД определение $\Delta \dot{e}_p$: а – без учета $\dot{e}_T$; б – с учетом $\dot{e}_T$;
 для предлагаемой системы ОВ ТЭД определение $\Delta \dot{e}_p$: в – без учета $\dot{e}_T$; г – с учетом $\dot{e}_T$

Рисунок 5 – Векторные диаграммы переменных составляющих МДС и ЭДС в ТЭД электровоза

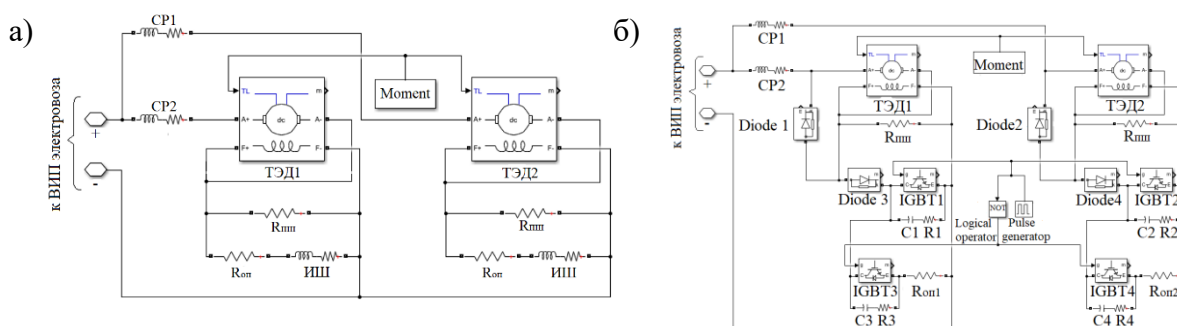
Одним из способов улучшения коммутационной устойчивости ТЭД в режиме ОВ ТЭД является уменьшение пульсации тока возбуждения, что позволяет снизить пульсацию магнитного потока главных полюсов, а, следовательно, реакцию якоря и влияние вихревых токов в главных полюсах, которые противодействуют созданию благоприятной фазы трансформаторной ЭДС ($\dot{e}_T$) (рисунок 5 в, г).

В разработанной системе ОВ ТЭД шунтирующая цепь на базе *IGBT*-транзисторов имеет незначительное активное сопротивление по сравнению с обмоткой возбуждения, поэтому большая часть переменной составляющей тока возбуждения проходит именно по ней, что позволяет значительно снизить пульсации тока возбуждения ТЭД не менее чем на 80 %.

В свою очередь, снижение пульсации тока возбуждения ТЭД приведет к уменьшению векторов $\dot{I}_{вп}$, $\dot{F}_{вп}$, $\dot{F}_{мп}$ и угла магнитного запаздывания $\varphi_{гп}$ не менее чем на 80 % (рисунок 5 а). Реакция якоря ТЭД зависит от МДС главных полюсов, следовательно, ее снижение приведет и к уменьшению реакции якоря. Снижение модуля вектора $\dot{F}_{ря}$ улучшит фазу $\dot{e}_к$, следовательно, уменьшит модуль вектора $\dot{e}_к + \dot{e}_р$ по сравнению с вектором, построенным на рисунке 5 а. Снижение угла магнитного запаздывания $\varphi_{гп}$ позволит $\dot{e}_т$ принять благоприятную фазу по сравнению с фазой, представленной на векторной диаграмме (рисунок 5 б) и снизить его величину (рисунок 5 г).

Таким образом, при сравнении векторных диаграмм переменных ЭДС (рисунки 5 б и г), видно, что благодаря снижению пульсации тока возбуждения на 80 % при работе предлагаемой системы ОВ ТЭД по сравнению со штатной системой снижается модуль вектора небалансной ЭДС $\Delta \dot{e}_р = \dot{e}_к + \dot{e}_р + \dot{e}_т$, что улучшает коммутационную устойчивость ТЭД электровоза.

Третий раздел посвящен математическому моделированию электромагнитных процессов работы ТЭД электровоза переменного тока серии ЗЭС5К в режимах нормального и ослабленного возбуждения с использованием штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД. При уточнении математической модели учитывался опыт исследований таких ведущих российских ученых как: д-р. техн. наук, профессор А.Н. Савоськин, д-р. техн. наук, профессор С.В. Власьевский, д-р. техн. наук, профессор Ю.М. Кулинич. Блок-схема ТЭД электровоза переменного тока со штатной и предлагаемой системами ОВ ТЭД, разработанные в среде *MatLab Simulink*, представлены на рисунке 6.



а – штатная система ОВ ТЭД; б – предлагаемая система ОВ

Рисунок 6 – Блок-схема ТЭД электровоза переменного тока серии ЗЭС5К, разработанного в среде *MatLab Simulink*

Для реализации предлагаемого технического решения согласно рисунку 1 б разработан алгоритм управления IGBT-транзисторами, который обеспечивает плавное регулирование тока возбуждения (рисунок 7).

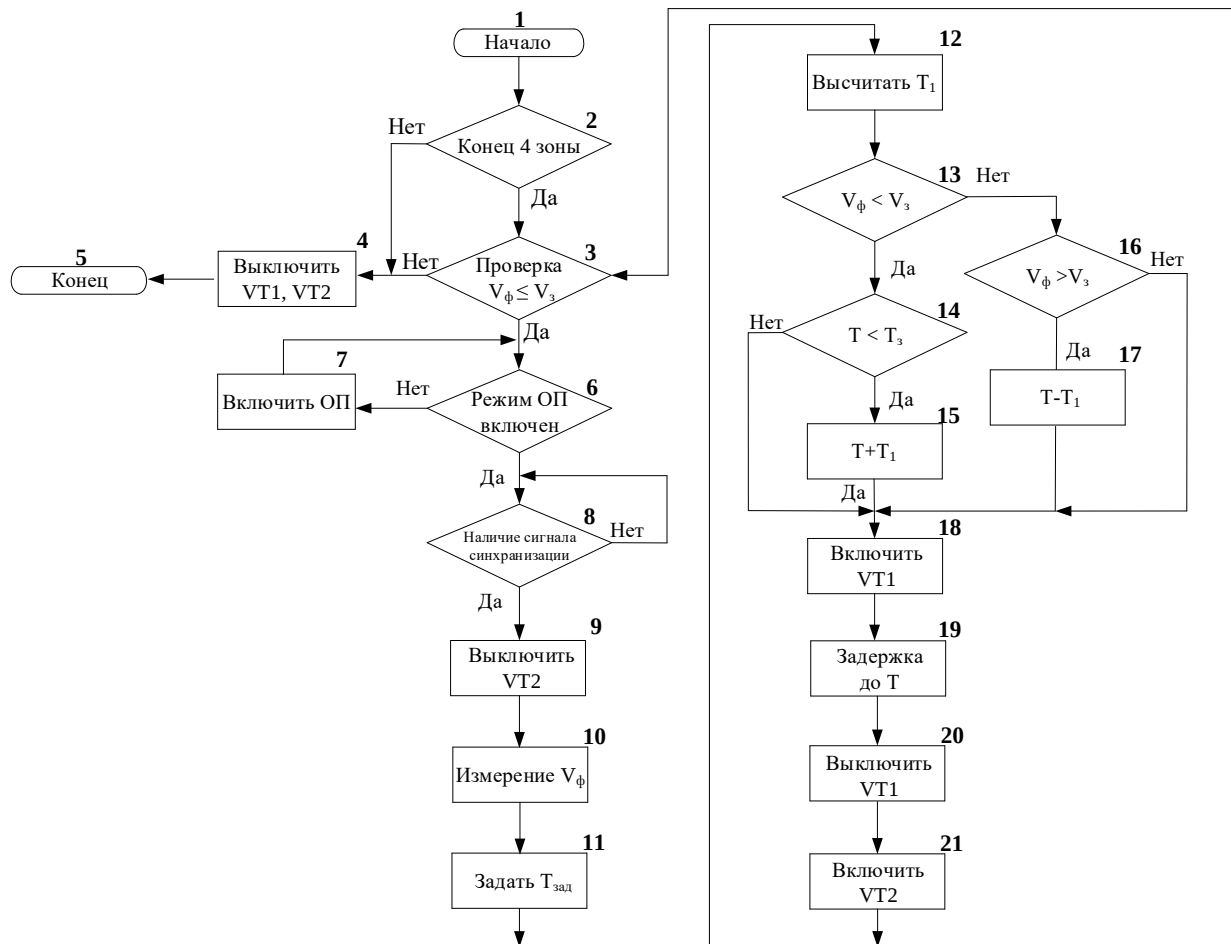
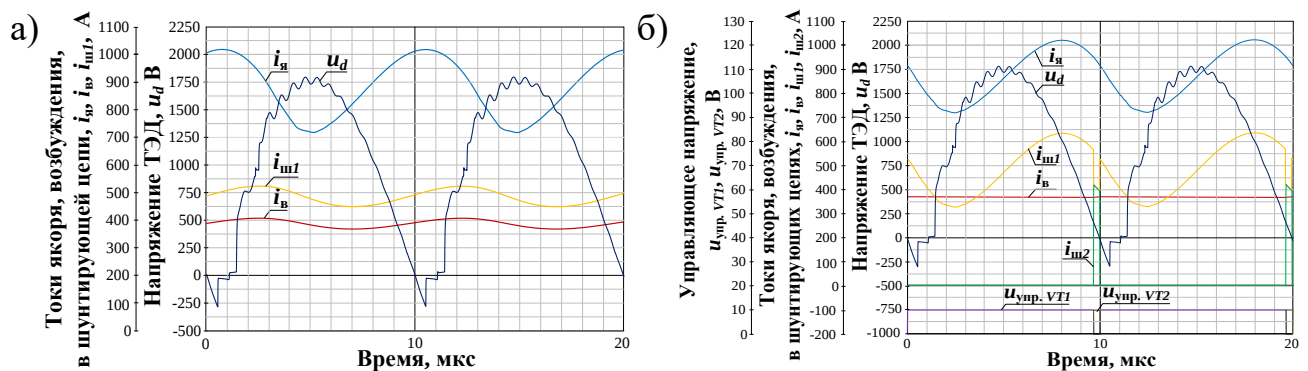


Рисунок 7 - Алгоритм работы предлагаемой системы ОБ ТЭД электровоза на базе IGBT-транзисторов

На рисунке 8 а, б представлены диаграммы выпрямленного напряжения ТЭД и токов якоря, шунтирующей цепи, возбуждения для штатной и предлагаемой систем ОБ ТЭД электровоза на примере третьей ступени регулирования при $\beta = 0,43$.



а – для штатной системы ОБ ТЭД; б – для предлагаемой системы ОБ ТЭД электровоза

Рисунок 8 - Диаграммы выпрямленного напряжения u_d ТЭД и токов якоря i_a , шунтирующей цепи i_{m1} , возбуждения i_b для штатной системы ОБ ТЭД на третьей ступени регулирования

На основании данных, полученных на математической модели электровоза ЗЭС5К в среде *MatLab Simulink* на рисунке 9 построена зависимость коэффициента пульсации тока возбуждения ТЭД от коэффициента ОВ при работе штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД. Из анализа которой можно сделать вывод, что относительная пульсация тока возбуждения при предлагаемой системе по отношению к штатной системе ОВ ТЭД снижается в среднем на 80 %.

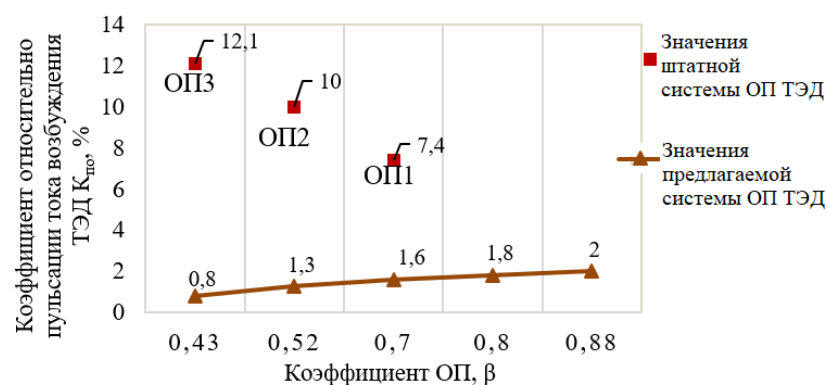
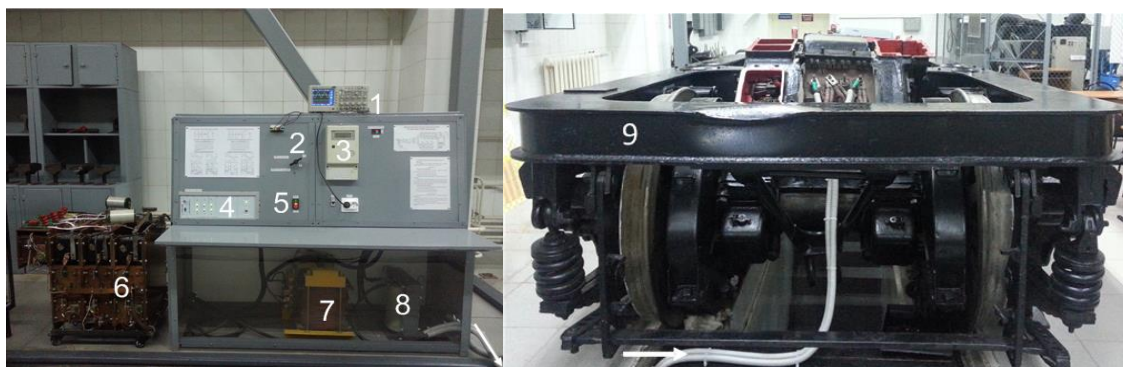


Рисунок 9 - Зависимость коэффициента относительной пульсации тока возбуждения от коэффициента ОВ ТЭД электровоза, полученная при математическом моделировании электровоза переменного тока серии ЗЭС5К в среде *MatLab Simulink*

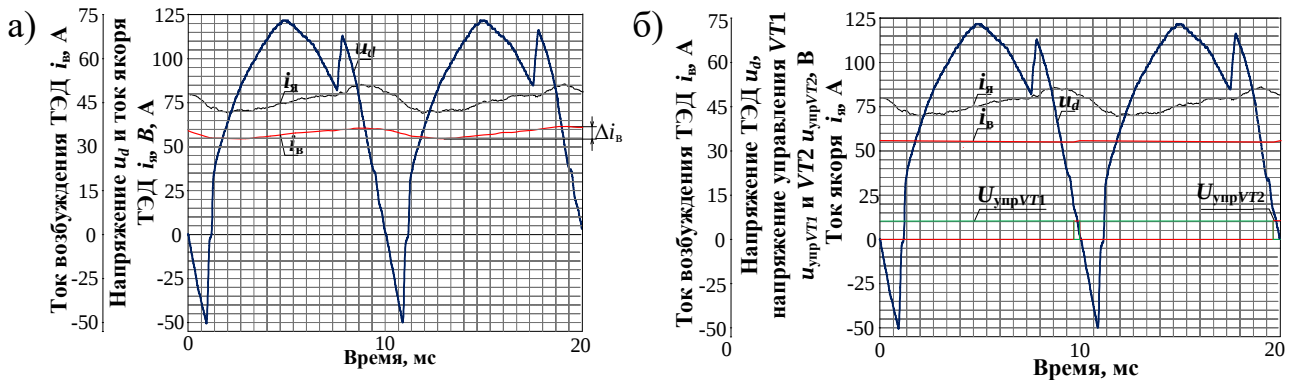
В четвертом разделе приведены результаты экспериментальных исследований физической модели штатной и предлагаемой систем ОВ. Для проведения эксперимента на базе кафедры «Электроподвижной состав» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» разработан научный экспериментальный стенд штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД электровоза, в качестве нагрузки которого используется колесно-моторный блок (КМБ) с ТЭД типа НБ-514 (рисунок 10).



1 - осциллограф; 2 - пакетный переключатель SB1; 3 - счетчик СЭТ-1М.01; 4 - БУ;
5 - кнопка пуск/стоп; 6 - ВВП; 7 - имитатор тягового трансформатора; 8 - сглаживающий реактор; 9 - КМБ с ТЭД НБ-514

Рисунок 10 - Общий вид стенда в лаборатории ИрГУПС

По результатам лабораторных исследований доказана плавность регулирования тока возбуждения, а также получены электромагнитные процессы работы ТЭД электровоза в режиме ОВ со штатной и предлагаемой системами ОВ ТЭД, из анализа которых выявлено, что усовершенствованная система ОВ ТЭД обеспечивает снижение пульсации тока возбуждения на 80 %, результаты осциллограмм представлены на рисунках 11 а, б.



а – для штатной системы ОВ ТЭД; б – для предлагаемой системы ОВ ТЭД электровоза

Рисунок 11 - Диаграмма выпрямленного напряжения u_d , токов якоря i_a и возбуждения i_b ТЭД на третьей ступени регулирования

Проведена оценка адекватности временных диаграмм токов и напряжения в ТЭД электровоза, полученных на математической модели, реальным процессам на электровозе и в контактной сети. Относительная погрешность при оценке длительности сетевой коммутации составила 8,6 %, при фазовой коммутации 5,6 %, величина относительной пульсации 9 %, что не превышает допустимую погрешность при проведении математического моделирования в 10 %.

В главе произведен расчет технико-экономических показателей при внедрении предлагаемой системы ОВ ТЭД на электровоз переменного тока серии ЗЭС5К. Годовая экономия денежных средств от модернизированного электровоза серии ЗЭС5К составит 1095,85 тыс. руб., а срок окупаемости составит не более 1,42 года.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Выполнен анализ технических решений по совершенствованию системы ОВ ТЭД электровозов и электропоездов постоянного и переменного тока который показал, что большинство научных работ направлены на исключение индуктивных шунтов из силовой цепи электровоза, при этом вопрос по

обеспечению плавного регулирования тока возбуждения не был решен на сегодняшний день.

2 Разработана усовершенствованная система ОВ ТЭД на базе *IGBT*-транзисторов, позволяющая исключить индуктивный шунт и уменьшить количество электропневматических контакторов из силовой цепи электровоза, что составило на один электровоз переменного тока серии ЗЭС5К 12 ИШ и 24 контактора.

3 Разработан алгоритм управления предлагаемой системой ОВ ТЭД, позволяющий плавно регулировать ток возбуждения, за счет изменения длительности подаваемых импульсов на *IGBT*-транзисторы, что позволило повысить скорость движения поезда, и снизить пульсацию тока возбуждения ТЭД не менее чем на 80 %.

4 Проведено аналитическое исследование штатной системы ОВ ТЭД электровоза со ступенчатым регулированием и предлагаемой системы ОВ ТЭД с плавным регулированием тока возбуждения в программном комплексе «КОРТЭС» которое показало, что предлагаемая система ОВ ТЭД позволяет увеличить техническую скорость поезда в среднем на 2,5 км/ч.

5 Уточнена математическая модель «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз переменного тока» для режима тяги при работе со штатной и предлагаемой системами ОВ ТЭД в среде *MatLab Simulink*, что позволило провести сравнительное математическое моделирование полученных электромагнитных процессов ТЭД, которое доказало, что предлагаемая система обеспечивает плавное регулирование тока возбуждения, а также снижает не менее чем на 80 % его пульсацию.

6 Выполнено построение векторных диаграмм переменных составляющих МДС и ЭДС в ТЭД, которые доказывают, что снижение пульсации тока возбуждения в режиме ОВ позволяет снизить небалансную ЭДС, тем самым увеличивает коммутационную устойчивость ТЭД, что в целом продлевает его ресурс работы.

7 Разработан экспериментальный стенд штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД электровоза переменного тока, на котором получены диаграммы токов и напряжения ТЭД, работающего в режиме ОВ.

8 Рекомендуются применение усовершенствованной системы ОВ ТЭД на базе *IGBT*-транзисторов на ЭПС с коллекторным электроприводом. Проведена технико-экономическая оценка проекта, годовая экономия денежных средств от модернизированного электровоза серии ЗЭС5К составит 1095,85 тыс. руб., при сроке окупаемости не более 1,42 лет.

9 Перспективой дальнейшей разработки темы является оценка энергоэффективности предлагаемой системы ОВ ТЭД на базе

IGBT-транзисторов и исследование алгоритма управления на предмет снижения потребления электроэнергии ЭПС в режиме ОВ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, включенных в перечень, утвержденный ВАК:

1 **Волчек, Т.В.** Анализ способов и технических средств систем ослабления поля тяговых электрических двигателей электровозов постоянного и переменного токов / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, А.О. Линьков. // Вестник ИрГТУ / Иркутский гос. техн. ун-т. – 2019. – № 3. – С. 531 – 542.

2 **Волчек, Т.В.** Разработка способа и устройства для снижения пульсации тока возбуждения тягового электродвигателя электровоза в режиме ослабления поля / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, А.О. Линьков. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – 2019. – № 3. – С. 163 – 171.

3 **Волчек, Т.В.** Математическое моделирование энергоэффективной системы ослабления поля тяговых электрических двигателей электровозов переменного тока / А.О. Линьков. // Известия Транссиба. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2020. – № 3. – С. 2 – 14.

4 **Волчек, Т.В.** Возникновение трансформаторной эдс в секциях якоря тягового электродвигателя электровоза переменного тока в режимах полного и ослабленного поля и пути ее снижения / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко, А.О. Линьков, С.Г. Шрамко. // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения / Ростовский гос. ун-та путей сообщения. – 2020. – № 1. – С. 41 – 48.

5 **Волчек, Т.В.** Повышение технической скорости электроподвижного состава за счет обеспечения плавного регулирования тока возбуждения тяговых электродвигателей / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, В.С. Томилов. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – 2020. – № 3. – С. 166 – 172.

6 **Волчек, Т.В.** Влияние плавного и ступенчатого регулирования ослабления возбуждения тяговых электродвигателей электровозов на скорость движения электроподвижного состава // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2021. – №2(50). – С. 99-105.

7 **Волчек, Т.В.** Повышение коммутационной устойчивости коллекторных тяговых электродвигателей электровозов за счет снижения пульсации тока возбуждения // Вестник Уральского государственного

университета путей сообщения / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2021. – №4(52). – С. 97-102.

Статья в издании, входящем в международную систему цитирования Scopus:

8 **Volchek, T. V.** *Proposals for Introduction of Modern Power Semiconductor Devices Into Converter-Fed Commutator Motor Locomotives of Russian Railways.* / T.V. Volchek, Tomilov V.S., Barinov I.A. // *Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. опубли. в IEEE Xplore Digital Library.*

Зарегистрированные объекты интеллектуальной собственности:

9 Патент № 2700243, Российская Федерация, МПК В60L 9/08, В60L 15/08, Н02Р 7/10. Устройство ослабления магнитного поля тягового электродвигателя электровоза переменного тока: № 2018144993: заявл. 19.12.2018: опубликован 13.09.2018. / **Волчек Т.В.**, Мельниченко О.В., Портной А.Ю., Шрамкой С.Г., Линьков А.О., Яговкин Д.А. заявитель ОАО «РЖД».

Публикации в других изданиях:

10 **Волчек, Т.В.** Повышение энергетических показателей магистрального грузового электровоза переменного тока в режиме тяги за счет применения безиндуктивных шунтов / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко. // *Наука и молодежь: Сборник трудов третьей всерос. науч.-практ. конф.* / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск. – 2017. – С. 36 – 39.

11 **Волчек, Т.В.** Усовершенствование системы ослабления поля тяговых электродвигателей современных отечественных электровозов переменного тока / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко. // *«Science and Practice: New Discoveries»*: сборник тр. третьей междунаро. науч. конф. / Чехия, Карловы Вары. – 2017 г. – С. 96 – 102.

12 **Волчек, Т.В.** Анализ способов и технических средств ослабления поля тяговых электродвигателей электровозов переменного тока / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко, А.О. Линьков, С.В. Власьевский // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы девятой междуна. науч.-практ. конф.* / ИрГУПС. – 2018. – С. 411 – 415.

13 **Волчек, Т.В.** Усовершенствование системы ослабления поля тяговых электродвигателей за счёт применения безиндуктивных шунтов / Т.В. Волчек, В.С. Томилов, О.В. Мельниченко. // *Наука и молодежь: Сборник трудов четвертой всерос. науч.-практ. конф.* / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск. – 2018. – С. 140 – 143.

14 **Волчек, Т.В.** Снижение затрат электрической энергии на тягу поездов при использовании системы ослабления поля тяговых электрических двигателей электровоза переменного тока / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко, С.Г.

Шрамко, А.О. Линьков // *«Resonances science»*: сборник тр. третьей международ. научн.- практ. конф. / Чехия, Карловы Вары. – 2018. – С. 81 – 87.

15 **Волчек, Т.В.** Устройства для расширения области скоростных характеристик электроподвижного состава / Т.В. Волчек, С.Е. Письменных, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко // *«Scientific Research»*: сборник трудов четвертой международ. научн.-практ. конф. / Чехия, Карловы Вары. – 2018. – С. 101 – 109.

16 **Волчек, Т.В.** Интервальное прогнозирование количества исследований, связанных с системой ослабления поля тяговых электрических двигателей электровазов / Т.В. Волчек. // Наука и молодежь: Сборник трудов пятой всерос. науч.- практ. конф. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск. – 2019. – С. 544 – 549.

17 **Волчек, Т.В.** Современный подход к регулированию ослабления поля тяговых электродвигателей электровазов переменного тока / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко. // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона / Дальневосточный университет путей сообщения. Хабаровск. – 2019. – №3. – С. 23 – 25.

18 **Волчек, Т.В.** Повышение ресурса работы коллекторно-щеточного аппарата за счет усовершенствованной системы ослабления поля тяговых электродвигателей электроваза / Т.В. Волчек, В.С. Томилов, О.В. Мельниченко // «Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава» сборник трудов всерос. науч.- практ. конф. с международ. участием / Дорожный центр внедрения Красноярской жд. – Красноярск. – 2020. – С. 172 – 176.

19 **Волчек, Т.В.** Влияние пульсации тока возбуждения на процесс коммутации в коллекторных тяговых двигателях электроваза в режимах полного и ослабленного поля / Т.В. Волчек, И.К. Воробьев В.С., Томилов и др. // Наука и молодежь: Сборник трудов шестой всерос. науч.- практ. конф. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск. – 2020. – С. 660 – 664.

20 **Волчек, Т.В.** Повышение эффективности эксплуатации электровазов переменного тока при плавном регулировании тока возбуждения тяговых электродвигателей / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко // Молодая наука Сибири: [Электронный ресурс] – № 4 (10). – 2020.

21 **Волчек, Т.В.** Экспериментальные исследования усовершенствованной и штатной системы ослабления поля тяговых электродвигателей электровазов переменного тока / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век. Сборник материалов VII Междун. научно-техн. конф., Санкт-Петербург. – 2020 г. – С. 127-134.

22 **Волчек, Т.В.** Усовершенствованная система ослабления поля тяговых двигателей электровозов переменного тока / А.О. Линьков, О.В. Мельниченко // Журнал «Локомотив». – 2021. – №2 (770). – С. 14-26.

23 **Волчек, Т.В.** Усовершенствование системы ослабления возбуждения тяговых электродвигателей электровозов переменного тока за счет применения силовой электроники / ОБРАЗОВАНИЕ – НАУКА – ПРОИЗВОДСТВО: материалы V Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Чита. – 2021. – С. 20-25.

Волчек Татьяна Витальевна

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОСЛАБЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____ 2022 г.
Усл. печ. л. – 1,25

Заказ № _____

Формат 60х90/16
Тираж 80 экз.