

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

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

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Мельниченко Олег Валерьевич

Иркутск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СИСТЕМ ОСЛАБЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ И ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	11
1.1 Система ослабления возбуждения тяговых электрических двигателей на электровозах постоянного тока.....	11
1.2 Система ослабления возбуждения тяговых электрических двигателей на электровозах переменного тока.....	14
1.3 Система ослабления возбуждения тяговых электрических двигателей на электропоездах постоянного и переменного тока.....	18
1.4 Анализ патентов и научных трудов систем ослабления возбуждения тяговых электрических двигателей электровозов и электропоездов постоянного или переменного тока.....	21
1.5 Системы ослабления возбуждения тяговых электрических двигателей электровозов и электропоездов за рубежом.....	30
1.6 Постановка цели и задач исследования.....	33
2 РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОСЛАБЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И СПОСОБА ЕЕ УПРАВЛЕНИЯ.....	35
2.1 Штатная система ослабления возбуждения тяговых электродвигателей со ступенчатым регулированием.....	35
2.2 Исследование влияния пульсаций тока возбуждения на коммутационную устойчивость в режиме ОВ ТЭД электровоза	52
2.3 Разработка усовершенствованной системы ослабления возбуждения тяговых электродвигателей с плавным регулированием тока возбуждения.....	59

2.4 Вывод по разделу 2.....	68
3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ТЯГОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ – КОНТАКТНАЯ СЕТЬ – ЭЛЕКТРОВАЗ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ ТЯГИ ПРИ РАБОТЕ ШТАТНОЙ И ПРЕДЛАГАЕМОЙ СИСТЕМ ОСЛАБЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	
3.1 Разработка функциональной схемы электроваза переменного тока в расчете на одну тележку при работе штатной и предлагаемой систем ослабления возбуждения тяговых электрических двигателей электроваза переменного тока.....	70
3.2 Моделирование системы электроснабжения для электроваза переменного тока в среде <i>MatLab Simulink</i>	76
3.3 Математическая модель тягового трансформатора электроваза переменного тока 3ЭС5К.....	78
3.4 Математическая модель ВИП в режиме тяги на четвертой зоне регулирования электроваза 3ЭС5К.....	82
3.5 Математическая модель цепи выпрямленного тока в режиме тяги при работе штатной и предлагаемой системы ослабления возбуждения тягового электродвигателя электроваза.....	85
3.6 Разработка алгоритма управления предлагаемой системы ОВ ТЭД электроваза.....	90
3.7 Оценка адекватности электромагнитных процессов, наблюдаемых при работе электроваза и математической модели в режиме тяги.....	95

3.8 Сравнительное исследование эффективности работы электровоза в режиме тяги со штатной и предлагаемой системами ОВ ТЭД по результатам расчета на математической модели.....	98
3.9 Вывод по разделу 3.....	105
4 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРЕДЛАГАЕМОГО ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ И ЕГО ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА.....	107
4.1 Разработка научного экспериментального стенда штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД электровоза.....	107
4.2 Результаты исследования работы штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД на лабораторном стенде.....	116
4.3 Техничко-экономическая оценка внедрения предлагаемой системы ОВ ТЭД с плавным регулированием на электровоз переменного тока серии ЗЭС5К.....	122
4.3.1 Экономия денежных средств от повышения участковой скорости электровоза.....	123
4.3.2 Экономия денежных средств от повышения ресурса работы тяговых электродвигателей.....	123
4.4 Затраты на изготовление усовершенствованных систем ослабления возбуждения тяговых электрических двигателей для электровоза серии ЗЭС5К.....	126
4.5 Общая годовая экономия денежных средств от внедрения усовершенствованной системы ОВ ТЭД на электровоз переменного тока серии ЗЭС5К.....	128
4.6 Вывод по разделу 4.....	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	130
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	133

ВВЕДЕНИЕ

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 [39]. 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-контакторной 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, 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 снижало 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», работающий 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 [88].

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 диссертационной работы 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.

1 АНАЛИЗ СПОСОБОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СИСТЕМ ОСЛАБЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ И ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В настоящее время на всех отечественных электровозах с коллекторными тяговыми электрическими двигателями (ТЭД) для расширения диапазона регулирования скорости в режиме тяги используют систему регулирования ослабления возбуждения (ОВ) ТЭД [87]. Благодаря этому увеличивается пропускная способность тяговых участков железных дорог, сокращается количество электровозов в эксплуатации и локомотивных бригад, снижается программа ремонта локомотивов и т.д.

Процессам в силовых цепях электровозов в режимах ОВ ТЭД были посвящены научные труды таких ученых и специалистов, 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., Кулинич Ю.М., Власьевский С.В., Хоменко Б.И., Мазнев А.С., Евстафьев А.М., Мельниченко О.В. и другие.

ОВ ТЭД электровоза реализуется за счёт:

- выключения части витков обмотки возбуждения;
- шунтирования обмотки возбуждения резистором с индуктивным шунтом (ИШ);
- импульсного регулирования [16, 25].

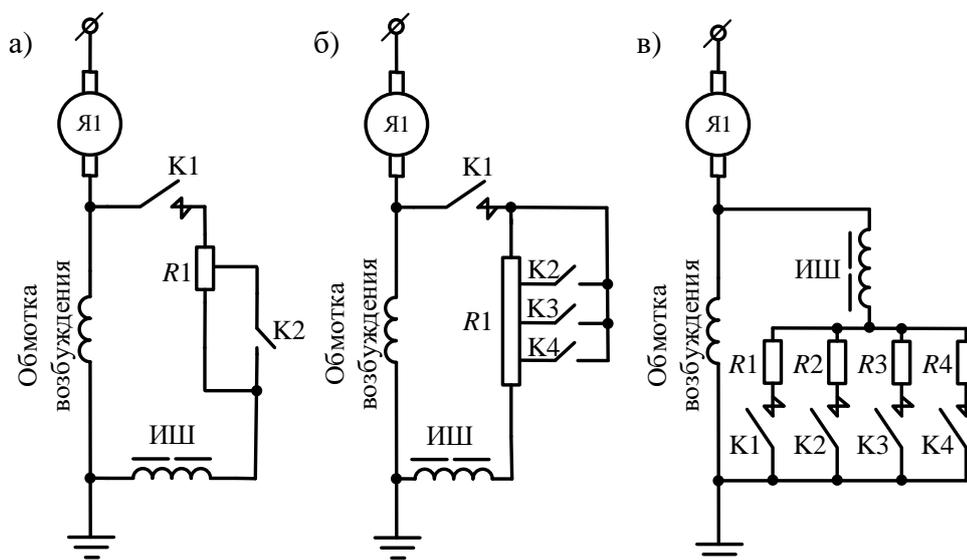
1.1 Система ослабления возбуждения тяговых электрических двигателей на электровозах постоянного тока

В ноябре 1932 года был выпущен первый советский электровоз постоянного тока серии С_с11-01 (Сурамский Советский) [90]. На всех Сурамских электровозах

(С, С_и, С_с, ВЛ19, СК, ВЛ22), выпускаемых с 1932- 1941 год и на электровозе серии ВЛ22^м, выпущенного после Великой Отечественной войны, система ОВ ТЭД имела две ступени регулирования – 67 и 50 % возбуждения, которое осуществлялось за счёт шунтирования обмотки возбуждения резистором с ИШ [16, 25]. Необходимость применения ИШ обусловлена следующими причинами: контактная сеть может быть кратковременна отключена от тяговой подстанции, также возможны отрывы токоприемника от контактного провода, при проезде нейтральной вставки (нестационарные режимы работы электровоза), после чего ТЭД вновь включаются на нормальное возбуждение. В результате этого ток в якорной обмотке резко нарастает. Однако обмотки возбуждения ТЭД обладают значительным индуктивным сопротивлением, и поэтому через резистор проходит большая часть тока, а меньшая – через обмотку возбуждения. В следствии чего со значительным запаздыванием происходит увеличение магнитного потока и электродвижущей силы в обмотке якоря относительно увеличения тока, что вызывает сильное искажение магнитного поля ТЭД под действием реакции якоря. В результате данного явления возникает искрение под щетками, что может перейти в круговой огонь. Чтобы избежать этого и обеспечить более равномерное распределение тока при неустановившихся процессах между обмотками возбуждения и резисторами, в цепь последовательно включают ИШ, который имеет индуктивное сопротивление, соизмеримое с индуктивным сопротивлением обмотки возбуждения. На рисунке 1.1, а приведена система ОВ ТЭД с двумя ступенями регулирования электровоза ВЛ22^м [109].

С 1956 года выпускались грузовые электровозы ВЛ8, ВЛ23, ВЛ10, ВЛ11 [91, 107, 108, 110]. С 1977-1980 годы выпускался двухсекционный 12-осный электровоз ВЛ15. На данных электровозах было возможно получить уже четыре ступени ОВ – 75, 55, 43 и 36 % [42, 53, 94, 95, 97] (рисунок 1.1 б). Для обеспечения первой ступени ОВ ТЭД замыкается контактор (К1), и параллельно обмотки возбуждения подключается резистор (R1). Для обеспечения второй и последующей ступени ОВ ступенями уменьшается сопротивление шунтирующего R1 с помощью

контакторов (К2-К4). Аналогичную систему ОВ ТЭД имеют современные отечественные электровозы постоянного тока (2,3)4ЭС4К и ЭП2К.



а) ВЛ22^М; б) ВЛ15; в) ЧС2^Т

Рисунок 1.1 – Система ОВ ТЭД электровозов постоянного тока

С 1959 года поставлялись в Советский Союз пассажирские электровозы ЧС1, ЧС2, ЧС3 [71, 91]. В 1975 году были выпущены первые высокоскоростные пассажирские электровозы постоянного тока ЧС200, которые впоследствии были заменены электровозами ЧС6 [79]. С 1984 года выпускались – ЧС7. На данных электровозах было возможно получить уже пять ступеней ОВ – 85; 70; 57,5; 47,5; 40 % за счет включения соответствующих резисторов (R1-R4) [71, 93]. На рисунке 1.1, в приведена система ОВ ТЭД электровоза ЧС2^Т. Алгоритм управления системой ОВ ТЭД представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Алгоритм управления штатной системой ОВ ТЭД

Режим работы электровоза	Степень регулирования	Алгоритм включения контакторов			
		К1	К2	К3	К4
Тяга	ОВ1	Вкл.	Выкл.	Выкл.	Выкл.
	ОВ2	Выкл.	Вкл.	Выкл.	Выкл.
	ОВ3	Выкл.	Выкл.	Вкл.	Выкл.
	ОВ4	Вкл.	Вкл.	Вкл.	Выкл.
	ОВ5	Вкл.	Вкл.	Вкл.	Вкл.

Количество ступеней ОВ ТЭД электровоза устанавливается расчетным путем при выполнении условия, чтобы обеспечить переход с одной ступени на другую при одинаковых колебаниях тока [87]. На электровозах постоянного тока системы ОВ ТЭД могут иметь от двух до пяти ступеней ОВ. Предельная ступень ОВ, на которой достигается максимальный процент прохождения тока возбуждения через шунтирующую цепь (глубокое ОВ), зависит от коммутационной устойчивости ТЭД, и определяется при их конструировании и испытании первых опытных образцов [87].

1.2 Система ослабления возбуждения тяговых электрических двигателей на электровозах переменного тока

В октябре 1938 года завод «Динамо» выпустил первый электровоз переменного тока ОР22-01, в котором регулирование скорости, как и на электровозах постоянного тока, может обеспечиваться за счет регулирования ОВ ТЭД [93]. Параллельно обмотки возбуждения ТЭД включался резистор постоянной шунтировки, который обеспечивал постоянное ОВ ТЭД на 10 %. Система ОВ ТЭД на первом электровозе переменного тока имела одну ступень ОВ – 50 %, которая осуществлялась переключателем обмотки возбуждения – ПШ-60. Такую же систему ОВ ТЭД имели следующие электровозы серии НО, впоследствии ВЛ61 [93].

В конце 1957 и начале 1958 года Новочеркасский электровозостроительный завод (НЭВЗ) построил два первых электровоза серии Н60 (ВЛ60), количество ступеней ОВ ТЭД увеличилось до четырёх – 75, 60, 52 и 43 %. Начиная с электровоза ВЛ60-003 было уменьшено количество ступеней ОВ с четырёх до трёх, изменено включение шунтирующих сопротивлений, а также переключатель ПШ-60 заменен индивидуальными контакторами. Электровозы ВЛ60 с ТЭД НБ-412М имели три ступени ОВ ТЭД – 64, 56 и 46 %, а с ТЭД НБ-412К – 71, 55 и 46 % [90].

С сентября 1961 года начался выпуск электровозов ВЛ80 с двигателями НБ-413, которые имели также три ступени ОВ ТЭД – 71, 58 и 50 % [90]. Начиная с № 006 выпуска 1962 года на электровоз серии ВЛ80 стали устанавливать двигатели НБ-414Б, на котором минимальное возбуждение на третьей ступени ОВ составляло 49 %. И только с 1965 года на электровозы серии ВЛ80 стали устанавливать ТЭД – НБ-418, на котором минимальное возбуждение на третьей ступени ОВ составляло – 43 % [91]. Электровозы серии ВЛ80 всех индексов имеют три ступени ОВ ТЭД – 70, 52 и 43 % возбуждения, которые обеспечиваются с помощью электропневматических контакторов, включающих параллельно обмотки возбуждения резисторы [91, 92]. Последовательно с резисторами устанавливаются ИШ. Такое устройства систем ОВ ТЭД имеют электровозы серий ВЛ85, ВЛ65, ЭП1 в/и, 2(3, 4)ЭС5К [106, 111, 112, 113] (рисунок 1.2). Отличие систем ОВ ТЭД заключается только в коэффициенте ослабления возбуждения на каждой из трёх ступеней ОВ ТЭД.

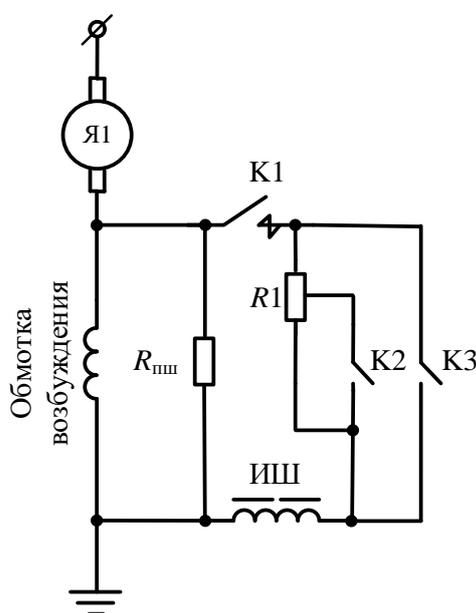


Рисунок 1.2 – Система ОВ ТЭД электровозов переменного тока серии ВЛ80в/и, ВЛ65, ВЛ85, ЭП1в/и, 2ЭС5К

Чтобы получить несколько ступеней ОВ ТЭД электровоза, необходимо изменить сопротивление шунтирующего резистора (R1) с помощью контакторов (K1 - K3). Алгоритм управления системой ОВ ТЭД представлен в таблице 1.2

Таблица 1.2 – Алгоритм управления штатной системой ОВ ТЭД

Режим работы электровоза	Степень регулирования	Алгоритм включения контакторов		
		К1	К2	К3
Тяга	ОВ1	Вкл.	Выкл.	Выкл.
	ОВ2	Вкл.	Вкл.	Выкл.
	ОВ3	Вкл.	Выкл.	Вкл.

С 1964 года начался выпуск первых пассажирских электровозов переменного тока серии ЧС4, которые имели три степени ОВ – 72,6; 53 и 44 % [90]. После испытаний первых электровозов ЧС4 были внесены ряд изменений и с 1966 года электровозы ЧС4 имеют пять ступеней ОВ – 72, 60, 51, 44 и 40 % [72, 73, 91]. Такую же систему ОВ ТЭД имеют электровозы ЧС8, выпущенные в 1983 году. На рисунке 1.3 приведена система ОВ ТЭД для электровоза ЧС4, содержащая резистор постоянной шунтировки ($R_{\text{шш}}$), три резистора ОВ ($R1-R3$) и три контактора ($K1-K3$)[16].

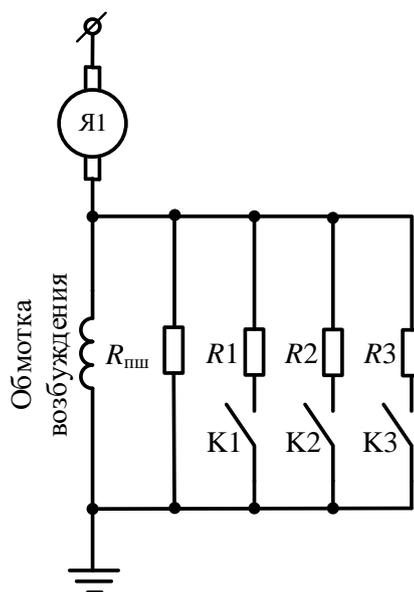


Рисунок 1.3 – Система ОВ ТЭД электровоза переменного тока ЧС4

Алгоритм управления системой ОВ ТЭД представлен в таблице 1.3 [16].

Таблица 1.3 – Алгоритм управления штатной системой ОВ ТЭД

Режим работы электровоза	Степень регулируемая	Алгоритм включения контакторов		
		К1	К2	К3
Тяга	ОВ1	Вкл.	Выкл.	Выкл.
	ОВ2	Выкл.	Вкл.	Выкл.
	ОВ3	Выкл.	Выкл.	Вкл.
	ОВ4	Вкл.	Выкл.	Вкл.
	ОВ5	Выкл.	Вкл.	Вкл.

Менее глубокое ОВ ТЭД электровозов переменного тока по сравнению с электровозами постоянного тока объясняется более сложными условиями коммутации ТЭД из-за наличия пульсирующей составляющей выпрямленного тока. Для улучшения коммутаций ТЭД электровозов переменного тока за счёт уменьшения пульсации основного магнитного потока, параллельно обмотки возбуждения включается резистор постоянной шунтировки, обеспечивающий небольшое постоянное ОВ. В этом заключается основное отличие систем ОВ ТЭД электровозов переменного тока от электровозов постоянного тока [16].

Система ОВ ТЭД на электровозах постоянного и переменного тока контакторно-реостатного типа. Недостатками данной системы ОВ ТЭД является то, что:

- ограниченное число ступеней ОВ ТЭД со ступенчатым переключением, что сопровождается бросками тока электровоза и исключает возможность поддерживать максимально-допустимую скорость движения поезда по участку;

- наличие в системе ОВ ТЭД медесодержащего ИШ, из-за значительной стоимости которого силовые цепи электровоза зачастую остаются разоборудованы, что приводит к повышению стоимости ремонта системы ОВ [12]. Соответственно, электровоз лишается возможности регулирования в широком диапазоне скоростных характеристик;

- наличие электропневматических контакторов типа ПК-356, что увеличивает массогабаритные показатели системы ОВ и снижает надежность ее работы.

1.3 Система ослабления возбуждения тяговых электрических двигателей на электропоездах постоянного и переменного тока

Для России характерна развитая система пригородных сообщений, которая реализуется в основном с использованием моторвагонных электропоездов. В 1957 году рижским заводом был выпущен первый десятивагонный электропоезд ЭР1 постоянного тока [90]. В 1962 году вместо электропоезда ЭР1 начали выпускать электропоезда ЭР2. Регулирование скорости этих электропоездов осуществлялось за счёт изменения магнитного потока в обмотки возбуждения ТЭД до 67 и 50 % возбуждения [64]. Устройство системы ОВ ТЭД было такое же, как и на первых электровоза постоянного тока (рисунок 1.1 а).

В 1959 году был выпущен электропоезд ЭР6, за ним последовал выпуск секций ЭР10 в 1960 году и в 1964 году – ЭР22 [90]. На электропоезде ЭР6 было применено четыре ступени ОВ, а на секциях ЭР10 и ЭР22 для более плавного разгона число ступеней увеличено до шести: 76, 53, 42, 36, 26 и 21 %. Для переключения секций резистора ОВ был установлен реостатный контроллер [90].

В 1974 году был выпущен первый скоростной электропоезд ЭР200 с тиристорным регулятором, который позволял плавно регулировать ОВ ТЭД и уменьшить вес тягового электрооборудования. Минимальное возбуждение ТЭД составляло 28 % [91]. Данный электропоезд служил около 25 лет, перевозя пассажиров по маршруту «Москва-Ленинград» и обратно со скоростью 200 км/ч [62]. На рисунке 1.4 приведена система ОВ ТЭД на основе тиристорного регулятора электропоезда ЭР200, которая состоит из главного тиристора ($VS1$), вспомогательного тиристора ($VS2$), коммутирующих тиристоров ($VS3-VS4$), которые поочередно обеспечивают перезаряд коммутирующего конденсатора (C_k), резистора ($R_{ш}$) и дросселя ($L_{ш}$) [42]. Существует четыре стадии работы регулятора в течение одного периода регулирования, равного 2,5 мс (при частоте 400 Гц).

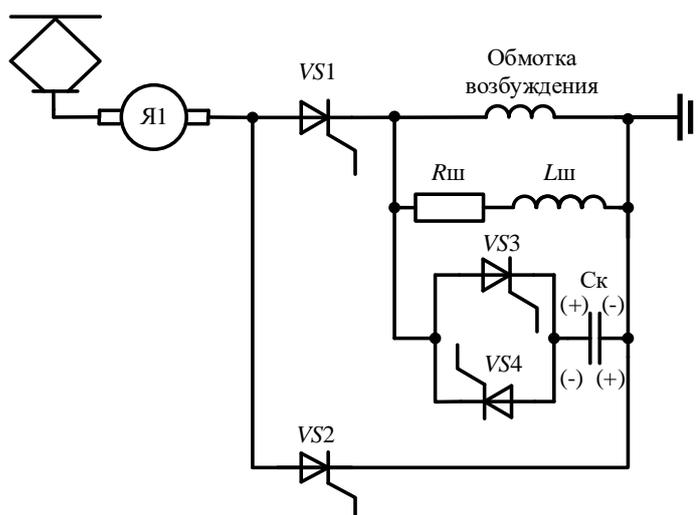


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема регулирования возбуждения в режиме тяги на электропоезде ЭР200

На первой стадии включаются тиристоры $VS1$ и $VS3$. Перед этим $VS2$ был выключен, а C_k заряжен. Включение $VS1$ и $VS3$ приведет к тому, что к $VS2$ прикладывается в обратном направлении напряжение C_k и $VS2$ выключится. Одновременно C_k перезаряжается. Во время разряда C_k через $L_{ш}$ и $R_{ш}$ ток возбуждения снижается, так как ток разряда конденсатора направлен встречно току возбуждения.

На второй стадии $VS1$ включен. Ток обмотки якоря протекает по обмотке возбуждения и по шунтирующей цепи. Идет нарастание тока возбуждения. Продолжительность второй стадии определяется временем включенного состояния $VS1$.

На третьей стадии включаются $VS2$ и $VS4$. Ток обмотки якоря переходит с тиристора $VS1$ на тиристор $VS2$. $VS1$ выключается, так как к нему прикладывается обратное напряжение на C_k . Одновременно происходит перезаряд C_k . Ток возбуждения повышается, так как направление тока разряда C_k на этой стадии совпадает с направлением тока возбуждения. Продолжительность третьей стадии регулирования определяется, как и на первой, временем переходных процессов в цепи C_k .

На четвертой стадии $VS2$ включен. Ток обмотки якоря протекает по цепи этого тиристора, которая шунтирует обмотку возбуждения. Ток обмотки

возбуждения замыкается через L_{III} и R_{III} и поэтому интенсивно уменьшается. Напряжение C_k остается неизменным, так как коммутирующие тиристоры выключены. Продолжительность четвертой стадии регулирования определяется временем включенного $VS2$.

ОВ ТЭД зависит от тока, насколько снижается тока на четвертой стадии регулирования и от относительной продолжительности включенного состояния регулятора и коэффициента заполнения импульсов. Таким образом, на электропоезде ЭР200 обеспечивает ОВ от 85 до 19 %.

Достоинством тиристорного регулятора является то, обеспечивается плавное регулирование тока возбуждения.

Недостатками данного устройства является:

- диапазон регулирования коэффициента ОВ и частота ограничивается временем выключения тиристоров [50];

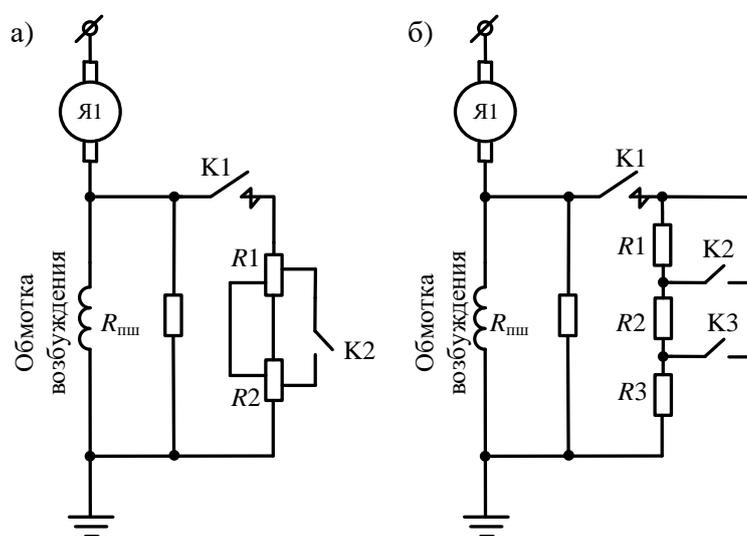
- устройство имеет низкую надёжность, так как заряд конденсатора может оказаться недостаточным для выключения тиристора во время нестационарных режимов;

- дополнительные элементы в системе ОВ увеличивают массогабаритные показатели системы.

С 1993 – 2010 год выпускались электропоезда постоянного тока серии ЭТ2, с 1996 – 2016 год – ЭД4. С 2015 года начался выпуск современных электропоездов ЭП2Д, которые являются модифицированной версией электропоездов ЭД4М. Устройство системы ОВ ТЭД на данных электропоездах аналогично электровозам постоянного тока (рисунок 1.1 в).

С 1961 года начался выпуск электропоездов переменного тока – ЭР7, ЭР9, ЭР11. ТЭД имели три режима: усиленное, нормальное и ослабленное возбуждение. Самое глубокое ОВ на электропоездах ЭР11, ЭР9 и ЭР7 составляло 23 %, 32 % и 45 % возбуждения [90-92]. Электропоезда ЭР9 серийно выпускались вплоть до 2002 года. На рисунке 1.5, а представлена система ОВ ТЭД электропоезда ЭР9 [41]. С 1996 – 2016 годы выпускались электропоезда серии ЭД9

(рисунок 1.5 б) [114]. С 2015 года начался выпуск современных электропоездов переменного тока ЭП3Д, которые являются модифицированной версией ЭД9Э.



а) ЭР9; б) ЭД9М

Рисунок 1.5 – Система ОБ ТЭД электропоезда переменного тока

Таким образом, устройство систем ОБ ТЭД на электропоездах постоянного и переменного тока с коллекторными ТЭД, которые эксплуатируются в настоящее время, контакторно-реостаного типа, как и на электровозах постоянного и переменного тока.

1.4 Анализ патентов и научных трудов систем ослабления возбуждения тяговых электрических двигателей электровозов и электропоездов постоянного или переменного тока

Известны научные труды учёных и специалистов, которые посвящены совершенствованию системы ОБ ТЭД электровозов. Целью их работы было исключить ИШ из силовой цепи электровоза в следствии их разоборудования и при этом выполнить его функцию – обеспечить надёжную защиту при нестационарных режимах работы электровоза [16]. Рассмотрим основные способы

усовершенствованных систем ОВ ТЭД, выявленных при анализе патентов и научных трудов.

В работах [49, 51, 61, 63, 76, 77, 79, 80, 81, 84] предложены устройства системы ОВ ТЭД на основе тиристоров и коммутирующего конденсатора.

Рассмотрим устройство и принцип работы предложенных систем ОВ ТЭД на примере устройства, содержащего два тиристора ($VS1$ - $VS2$), конденсатор (C_k), резисторы ($R_{шш}$, $R1$), диод (VD), предназначенный для ограничения послекоммутационного напряжения на C_k , контактора ($K1$ - $K3$), два датчика тока (ДТВ, ДТШ), предназначенные для контроля параметров шунтирующей цепи (рисунок 1.6).

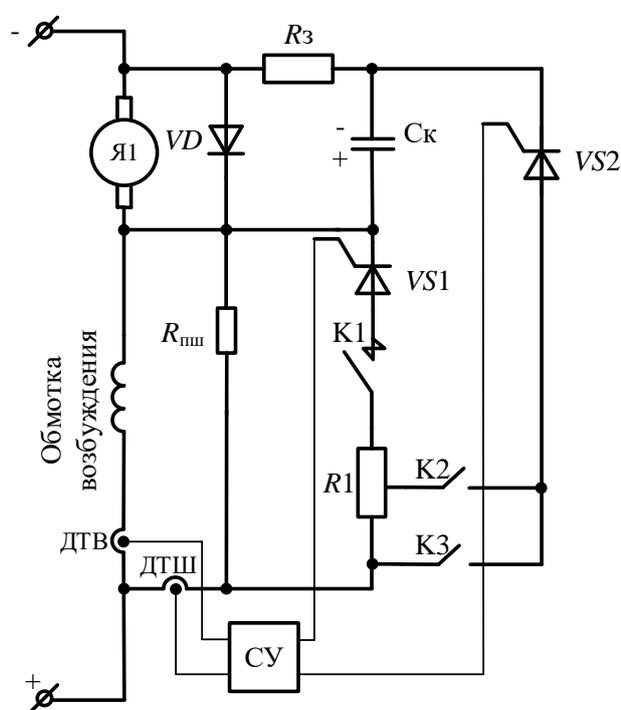


Рисунок 1.6 – Система ОВ ТЭД на однооперационных тиристорах

При включении $VS1$ параллельно обмотке возбуждения включается $R1$, обеспечивается первая ступень ОВ. Для обеспечения второй и третьей ступени ОВ ТЭД, с помощью $K2$ - $K3$ необходимо уменьшить сопротивление $R1$. При отрыве токоприёмника от контактного провода произойдёт снижение тока ТЭД, магнитного потока и ЭДС вращения, это приведёт к выключению $VS1$, и ТЭД перейдёт в режим нормального возбуждения (НВ). При набросе напряжения ток

преобразователя напряжения с гальванической развязкой 3 конденсатор начинает заряжаться через $R1$.

Достоинством систем ОВ ТЭД [49, 51, 61, 63, 79, 80, 81, 84] на основе полупроводниковых элементов и коммутирующего конденсатора является то, что исключается медесодержащий массогабаритный ИШ, при этом обеспечивается защита при нестационарных режимах работы.

Недостатками данных систем является то, что:

- заряд конденсатора во время нестационарного режима может оказаться недостаточным для выключения тиристора, поэтому такие устройства являются ненадёжными;

- ограниченное число ступеней ОВ со ступенчатым переключением, что сопровождается бросками тока электровоза и исключает возможность поддерживать максимально-допустимую скорость движения поезда по участку;

- наличие электропневматических контакторов, что увеличивает массогабаритные показатели системы ОВ и снижает надежность ее работы.

В работах [49, 50, 86] предложены устройства системы ОВ ТЭД на базе транзисторов. Рассмотрим устройство и принцип работы предложенных систем ОВ ТЭД на примере устройства, содержащего резистор постоянной шунтировки ($R_{шш}$), резистор ОВ ($R1$), три контактора ($K1-K3$), два *MOSFET*-транзистора ($VT1-VT2$) (рисунок 1.8). При включенном $VT1$ и $K1$, включается $VT2$, и параллельно обмотке возбуждения подключается $R1$, обеспечивается первая ступень ОВ ТЭД. Для обеспечения второй и третьей ступени ОВ ТЭД, с помощью $K2-K3$ необходимо уменьшить сопротивление $R1$. При увеличении тока в шунтирующей цепи и напряжения выше заданного значения, система управления отключает транзисторы и ТЭД переходят в режим НВ.

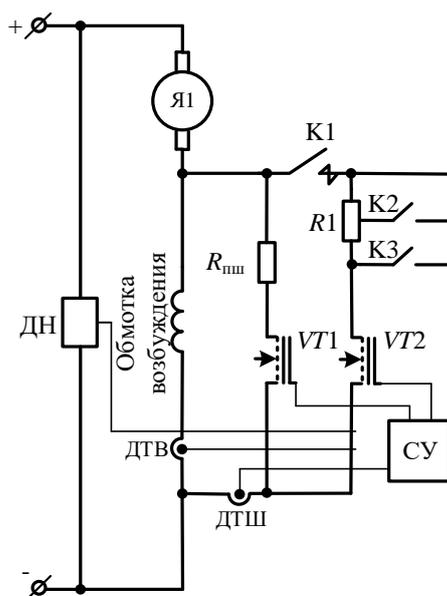


Рисунок 1.8 – Система ОВ ТЭД на базе *MOSFET*-транзисторах

Достоинством систем ОВ ТЭД [49, 50, 86] на базе транзисторов является то, что исключается медесодержащий массогабаритный ИШ, при этом обеспечивается защита при нестационарных режимах работы.

Недостатками данных устройств является:

- ограниченное число ступеней ОВ со ступенчатым переключением, что сопровождается бросками тока электровоза и исключает возможность поддерживать максимально-допустимую скорость движения поезда по участку;
- наличие электропневматических контакторов, что увеличивает массогабаритные показатели системы ОВ и снижает надежность ее работы.

В работах [78, 82, 83] предлагаются устройства систем ОВ ТЭД, построенные на автоматическом восстановлении заданного коэффициента ОВ после нестационарного режима. Рассмотрим устройство и принцип работы предложенных систем ОВ ТЭД на примере устройства, содержащего два датчика тока ($DT1$, $DT2$), контактор ($K1$), четыре резистора ($R1-R2$) и четыре ключевых элемента ($VT1-VT4$) (рисунок 1.9). Система управления ОВ ТЭД состоит из: счётчика импульсов, который принимает импульсы управления с генератора импульсов (8) триггера и логического элемента И-НЕ (10), обрабатывает их и подает на согласующие блоки (1-4); формирователя импульсов (6); инвертора (5);

логического элемента И-НЕ (7); компаратора (9), принимающего импульсы с $DT1$ и $DT2$.

Данное устройство работает следующим образом, цепь регулирования возбуждения ТЭД подключается параллельно обмотке возбуждения ТЭД при включении $K1$, с которого на формирователь импульсов 6 подаётся импульс управления. После того как инверсный выход триггера устанавливается в «ноль», счётчик импульсов начинает счёт, на счётный вход которого подаются импульсы с генератора импульсов 8 [16]. С приходом каждого импульса состояние счётчика импульсов увеличивается на единицу. Сигналы управления со счётчика импульсов на $VT1-VT4$ поступают через согласующие блоки 1-4. Каждому состоянию счётчика импульсов соответствует комбинация включенных и выключенных $VT1-VT4$ и $R1-R4$. С увеличением значения выходов счётчика импульсов от нуля до максимальной величины (пятнадцати) общее сопротивление $R1-R4$ линейно уменьшается. Коэффициент ОВ плавно изменяется в заданном диапазоне. При достижении счётчиком импульсов значения максимальной величины, сигнал низкого уровня с его выхода через логический элемент И-НЕ 7 сбрасывает триггер, и счёт счётчиком импульсов прекращается [16].

При нестационарном режиме ток якоря растёт значительно быстрее тока возбуждения, это может привести к резкому уменьшению коэффициента ОВ ТЭД. Для ограничения ОВ ТЭД задаётся пороговая величина коэффициента ОВ. Таким образом при уменьшении коэффициента ОВ меньше заданной величины, напряжение на выходе $DT2$ будет больше напряжения на выходе $DT1$, на выходе компаратора 9 образуется сигнал низкого уровня, который через логический элемент И-НЕ 10 устанавливает выходы счётчика импульсов в логический «ноль» и через инвертор 5, инверсный выход триггера устанавливается в «ноль». ТЭД переходит в режим НВ, и процесс регулирования коэффициента ОВ циклически повторяется до окончания переходного процесса [16].

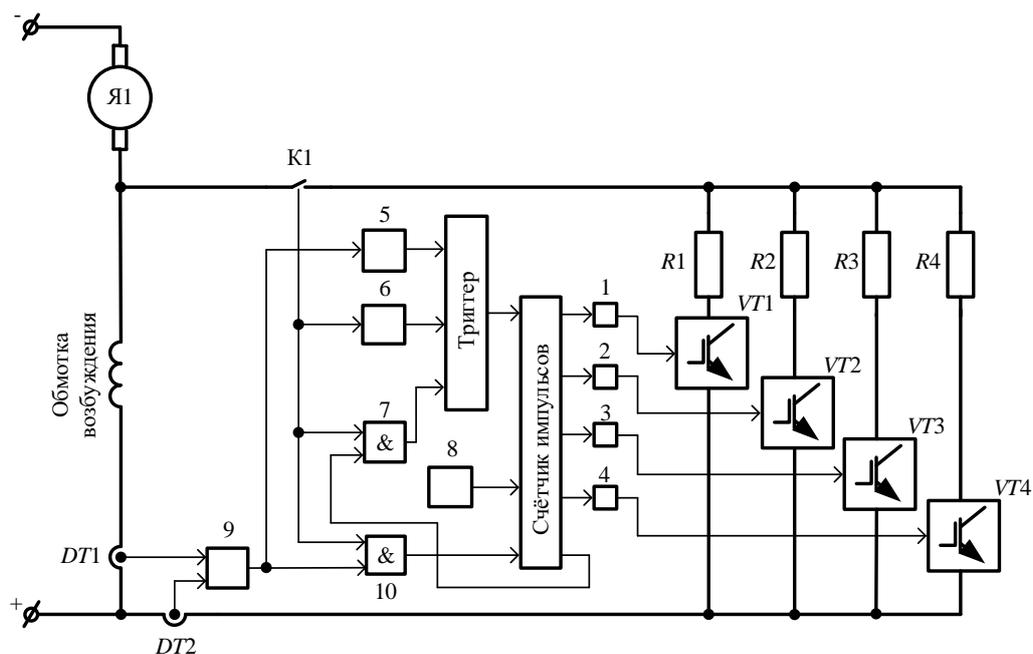


Рисунок 1.9 – Система ОВ ТЭД на основе алгоритма восстановления заданного коэффициента ОВ

Достоинствами систем ОВ ТЭД [78, 82, 83] является то, что:

- обеспечивается плавное регулирование тока возбуждения;
- исключается массогабаритный медесодержащий ИШ из силовой цепи электровоза при этом обеспечивается защита при нестационарных режимах работы.

Недостатками данных систем является то, что:

- данное устройство не способно обеспечить надёжную работу ТЭД на сложных участках рельсового пути. Так как алгоритм восстановления коэффициента ОВ построен в автоматическом режиме без участия машиниста электровоза. Поэтому, на горных перевалах, на спуске система управления ОВ ТЭД сработает на увеличение тягового усилия электровоза, что может привести к разрыву автосцепок, так как большая часть вагонов будет находиться ещё на подъёме горного перевала;
- устройство усложнено дополнительными элементами, имеет сложную систему управления, что увеличивает массогабаритные показатели устройства и снижает его надёжность.

В работах [58, 75, 85] представляется устройство для регулирования скорости ТЭД электровоза на базе импульсно-резистивного шунта ИРШ-К4. Рассмотрим устройство и принцип работы предложенных систем ОВ ТЭД на примере устройства, содержащего резистор ($R1$), реле предельного тока возбуждения ($KA1$) и два контактора ($K1, K2$) (рисунок 1.10). Устройство имеет схему управления шунтовой цепью регулирования ОВ ТЭД, содержащую контроллер машиниста (KM), который подключается к отдельному источнику питания ($G1$), промежуточные реле ($KV1, KV2, KV3$) с контактами ($KV1.1, KV2.1-KV2.2, KV3.1-KV3.2$), электропневматические контакторы первой и второй ступени ОВ ($K1, K2$), четыре разделительных диода ($VD1-VD2$), две сигнальные лампочки ($H1, H2$), которые сигнализируют машиниста о состоянии шунтовой цепи [16].

Данное устройство работает следующим образом, для включения первой ступени ОВ ТЭД необходимо замкнуть контакт $SM1$ KM , при этом создаётся цепь питания $K1$. После включения $K1$ замыкается контакт $K1.1$, и параллельно обмотке возбуждения ТЭД включается $R1$ и последовательно ему $KA1$. Так же создаётся цепь питания $H1$. Для обеспечения второй ступени ОВ необходимо замкнуть контакт $SM2$ KM , при этом создаётся цепь питания $K2$. После включения $K2$ замыкается контакт $K2.1$ и параллельно обмотке возбуждения ТЭД включается часть величины сопротивления $R1$ и последовательно ей $KA1$. Так же создаётся цепь питания $H2$ [16].

При возникновении нестационарного режима на первой ступени ОВ ТЭД в шунтирующей цепи величина тока превысит предельно заданную величину, и произойдёт срабатывание $KA1$ и замыкание его контакта $KA1.1$, который создает цепь питания $KV3$. Включившись, $KV3$ разомкнёт свои контакты $KV3.2$, тем самым $K1$ потеряет питание и разомкнёт свои контакты $K1.1$. Это приведёт к отключению шунтирующей цепи. И ТЭД перейдёт в режим НВ. При этом $H1$ гаснет [16].

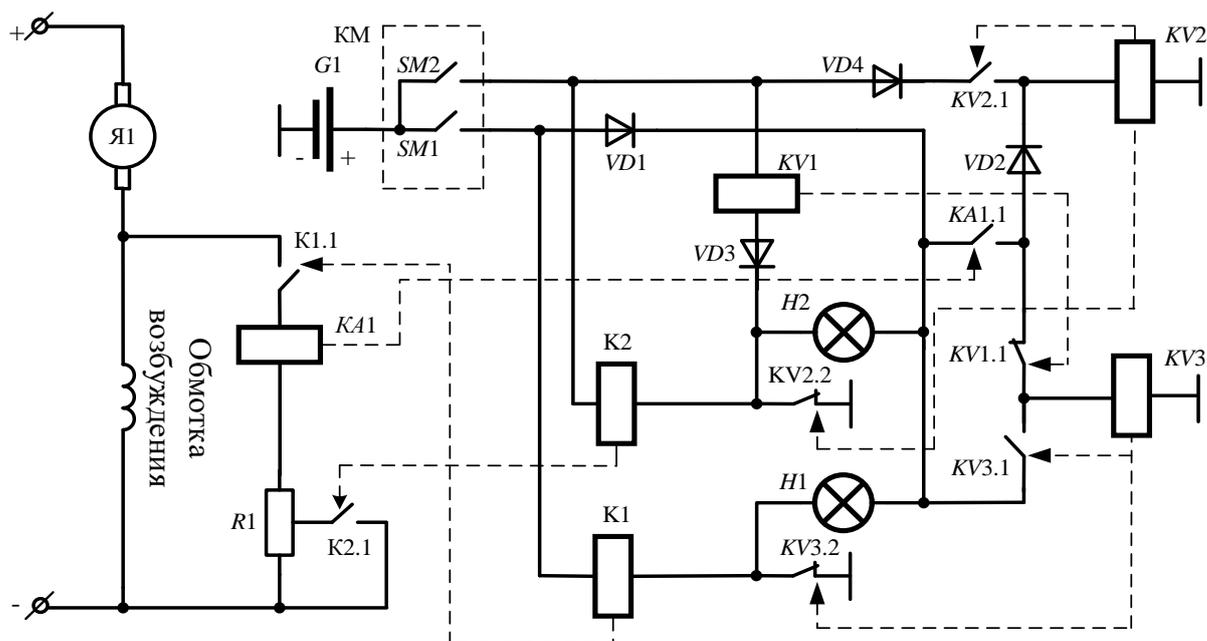


Рисунок 1.10 – Система ОБ ТЭД на основе импульсно-резистивного шунта

При возникновении нестационарного режима на второй ступени ОБ ТЭД после срабатывания $KA1$ и замыкания его контакта создаётся цепь питания на $KV2$. Включившись, $KV2$ разомкнёт свои контакты $KV2.2$, тем самым контактор $K2$ потеряет питание и разомкнёт свои контакты $K2.1$. Это приведёт к отключению отдельной части сопротивления шунтирующей цепи. При разомкнутом контакте $KV2.2$ реле $KV2$ прерывается цепь питания $KV1$, которое отключается и замыкает свои контакты $KV1.1$, тем самым замыкает цепь питания на $KV3$. Далее цикл работы устройства повторяется.

Достоинствами систем ОБ ТЭД [68, 75, 85] является то, что исключается массогабаритный медесодержащий ИШ из силовой цепи электровоза, при этом обеспечивается защита при нестационарных режимах работы.

Недостатками представленных систем является:

- ограниченное число ступеней ОБ со ступенчатым переключением, что сопровождается бросками тока электровоза и исключает возможность поддержать максимально-допустимую скорость движения поезда по участку;
- система ОБ ТЭД является релейной, что снижает надежность работы;

- устройство для управления шунтовой цепью усложнено дополнительными элементами, что увеличивает массогабаритные показатели устройства и снижает его надёжность.

1.5 Системы ослабления возбуждения тяговых электрических двигателей электровозов и электропоездов за рубежом

На железных дорогах Тайваня (*TRA*) в 70-х годах на электропоездах с коллекторными ТЭД регулирование ОВ ТЭД осуществлялось за счет отключения части витков обмотки возбуждения [115]. На рисунке 1.11 представлена упрощенная схема системы ОВ ТЭД за счет выключения витков обмотки возбуждения. Принцип работы такого способа заключается в том, что на ступени скорости с ослабленным возбуждением из общего числа витков обмотки возбуждения в результате замыкания контактора (*K1*) и размыкания контактора (*K2*) выключается некоторое количество витков (обмотки возбуждения 2) [23, 25].



Рисунок 1.11 – Система ОВ ТЭД с отключением части витков обмотки возбуждения

Недостатки такого способа заключаются в том, что необходимо одинаково изменять число витков на каждом из полюсов ТЭД, при этом усложняются межкатушечные соединения внутри остова ТЭД и практически невозможно реализовать несколько ступеней ОВ ТЭД. Поэтому данный способ не нашел широкого применения на электровозах [23, 25].

На Британской железной дороге в начале 1979 г фирмой *British Rail Engineering* выпускались электропоезда серии 314. Регулирование ОВ ТЭД

осуществлялась за счёт подключения параллельно обмотке возбуждения ИШ. На рисунке 1.12 представлена упрощенная схема системы ОВ ТЭД электропоездов серии 314 [106].

Работа этой системы осуществлялась следующим образом, за счет включения контактора (К) параллельно обмотке возбуждения подключается ИШ который за счет своего активного сопротивления обеспечивает одну ступень ОВ.

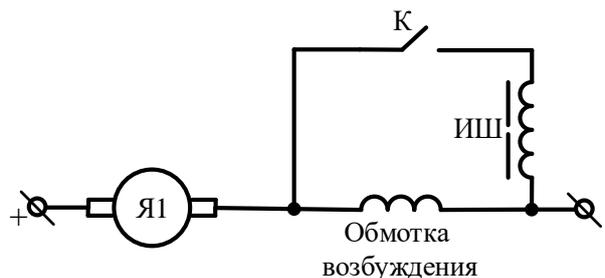


Рисунок 1.12 – Система ОВ ТЭД электропоездов серии 314

Недостатками данного устройства являются:

- имеется всего одна ступень ОВ со ступенчатым переключением, что исключает возможность поддерживать максимально-допустимую скорость движения по участку железных дорог;
- переключение с НВ на ослабленное происходит ступенчато, что сопровождается бросками тока электровоза;
- наличие массогабаритного медесодержащего ИШ увеличивает массогабаритные показатели системы ОВ ТЭД электровоза;
- наличие электропневматического контактора снижает надежность системы ОВ.

В 1972 году на французской железной дороге началась эксплуатация двух первых электровозов ВВ15000. На рисунке 1.13 представлена упрощенная схема системы ОВ ТЭД электровоза ВВ15000. Данная система устроена следующим образом, параллельно обмотке возбуждения подключены резистор постоянной шунтировки ($R_{шш}$) и импульсный тиристорный регулятор (VS), который при подаче напряжения на управляющий электрод, позволяет плавно регулировать

ОВ [43, 66, 105].

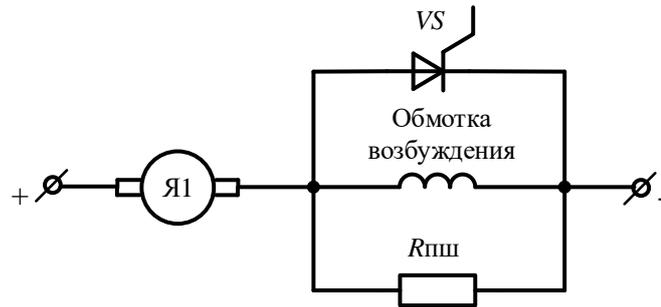


Рисунок 1.13 – Система ОВ ТЭД электровоза ВВ15000

Достоинством данной системы является, то что обеспечивается плавное регулирование тока возбуждения.

Недостатком способа является то, что снижается надёжность устройства из-за наличия контура коммутации в цепи.

На железных дорогах Бельгии (*SNCB*) в январе 1973 году выпускались электровозы, которые имели систему ОВ ТЭД с независимым возбуждением (рисунок 1.14). Обмотка возбуждения получает питание от трехфазного тиристорного моста, подключенного к вспомогательной трехфазной сети. С помощью управления тиристорным мостом, обеспечивается ОВ ТЭД [60].

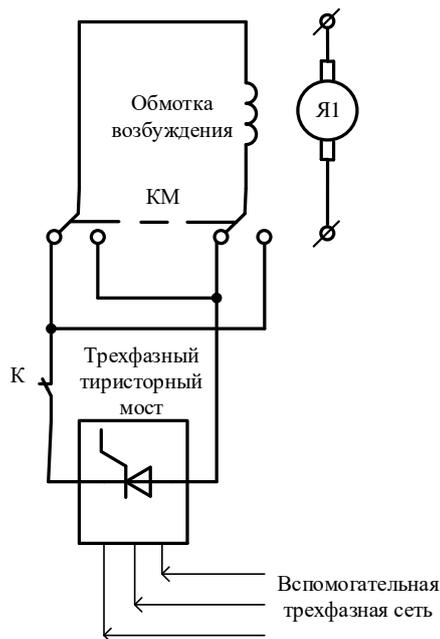


Рисунок 1.14 – Система ОВ ТЭД с независимым возбуждением

Недостатком такой системы является то, что двигатель выходит из-под контроля, если ток обмотки возбуждения падает до нуля, так как ТЭД имеет независимое возбуждение.

1.6 Постановка цели и задач исследования

В настоящее время в соответствии отраслевыми стратегическими документами поставлены задачи: увеличить техническую скорость поездов, а также надежность работы и эксплуатационный ресурс технических средств электровозов и электропоездов [8, 39, 103]. Для достижения поставленных задач необходимо усовершенствование ЭПС. Все выявленные ранее предложенные устройства систем ОВ ТЭД в настоящее время не нашли применения в следствии своих недостатков, поэтому до настоящего времени применяется система ОВ ТЭД реостатно-контакторного типа, устройство которой морально устарело и требует усовершенствования. Необходимо найти техническое решение по усовершенствованию системы ОВ ТЭД, которое позволит увеличить техническую скорость ЭПС, при этом повысит ресурс работы ТЭД, а также исключит медесодержащий ИШ и уменьшить количество контакторов.

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.

2 РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОСЛАБЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И СПОСОБА ЕЕ УПРАВЛЕНИЯ

2.1 Штатная система ослабления возбуждения тяговых электродвигателей со ступенчатым регулированием

В настоящее время на электровозах переменного тока с коллекторным приводом в режиме тяги регулирование скорости обеспечивается за счет изменения напряжения ТЭД. После того как достигнуто максимальное напряжение на 4-ой зоне регулирования выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) дальнейшая регулировка скорости осуществляется изменением магнитного потока ТЭД, за счет подключения параллельно обмоткам возбуждения системы ОВ ТЭД электровоза [87, 100, 102].

Из анализа способов и технических средств данных систем, следует, что наибольшее применение на всех современных отечественных электровозах переменного тока с коллекторными ТЭД нашла индуктивно-активная система ОВ со ступенчатым переключением с одной позиции на другую (рисунок 2.1).

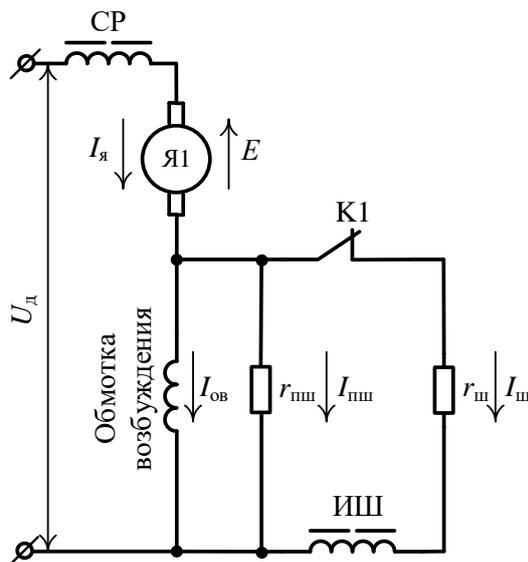


Рисунок 2.1 – Штатная система ОВ ТЭД электровоза

Согласно рисунку 2.1 опишем электромагнитные процессы ТЭД в режимах полного и ослабленного возбуждения в виде системы уравнений.

При выключенном контакторе (К1) электровоз работает в режиме НВ, тогда электромагнитные процессы ТЭД описываются следующей системой дифференциальных уравнений [87]

$$\begin{cases} U_d = C_v \Phi \cdot V + I_{\text{я}} \cdot (r_{\text{я}} + r_c) + I_{\text{в}} \cdot r_{\text{в}} + (L_{\text{я}} + L_c) \cdot \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot w_{\text{в}} \cdot \frac{d\Phi}{dt}; \\ I_{\text{в}} \cdot r_{\text{в}} - I_{\text{пш}} \cdot r_{\text{пш}} + 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot w_{\text{в}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} = 0; \\ I_{\text{я}} = I_{\text{в}} + I_{\text{пш}}; \\ \Phi = \Phi_1(t) + \Phi_2(t) = \Phi_y \left(1 - \varphi e^{-\frac{t}{\tau_{\text{вх}}}} - (1 - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau_{\text{н}}}} \right), \end{cases} \quad (2.1)$$

где U_d – выпрямленное напряжение ТЭД;

$\varphi = \frac{\Phi'_y}{\Phi_y}$ – отношение установившегося значения магнитного потока основной

волны и суммарного, который определяется по формуле (2.2);

σ – коэффициент рассеивания суммарного магнитного потока;

$w_{\text{в}}$ – число витков обмотки возбуждения;

p – число пар главных полюсов;

C_v – конструкционная постоянная ТЭД;

$I_{\text{в}}, I_{\text{я}}, I_{\text{пш}}, I_{\text{ш}}$ – токи обмотки возбуждения, обмотки якоря ТЭД, постоянной шунтировки и шунтирующей цепи соответственно;

$R_c, R_{\text{в}}, R_{\text{я}}, R_{\text{пш}}$ – сопротивления сглаживающего реактора, обмотки возбуждения, обмотки якоря ТЭД, резистора постоянной шунтировки соответственно;

$L_{\text{я}}, L_c$ – индуктивность якоря ТЭД и сглаживающего реактора.

$$\Phi_y = \frac{\Phi_{\text{н}}}{1,2} \operatorname{arctg} \left(\frac{2,6 \cdot I_{\text{в}}}{I_{\text{вн}}} \right), \quad (2.2)$$

где $I_{\text{вн}}$ – номинальный ток возбуждения ТЭД.

Учитывая вихревые токи, образовавшиеся в сплошном стальном сердечнике, магнитный поток раскладывается на ряд гармоник, поэтому Φ_1 – магнитный поток

основной гармонике; Φ_2 – суммарный магнитный поток всех высших гармоник, $\tau''_{\text{вх}}$, $\tau''_{\text{вх}}$ – их постоянные времени.

ЭДС самоиндукции обмотки якоря ТЭД ($L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dT}$) определяется магнитным потоком рассеяния ТЭД. ЭДС самоиндукции обмотки возбуждения ТЭД ($2p\sigma w_{\text{в}} \frac{d\Phi}{DT}$) определяется полным магнитным потоком [87].

При включении К1 параллельно обмотки возбуждения подключается шунтирующая цепь с резистором и ИШ, таким образом, ТЭД переходит в режим ОВ, тогда его электромагнитные процессы можно описать следующей системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} U_{\text{дн}} = C_{\nu} \Phi \cdot V + I_{\text{я}} \cdot (r_{\text{я}} + r_{\text{с}}) + I_{\text{в}} \cdot r_{\text{в}} + (L_{\text{я}} + L_{\text{с}}) \cdot \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot w_{\text{в}} \cdot \frac{d\Phi}{dt}; \\ I_{\text{в}} \cdot r_{\text{в}} - I_{\text{ш}} \cdot r_{\text{ш}} - L_{\text{ш}} \cdot \frac{dI_{\text{ш1}}}{dt} + 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot w_{\text{в}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} = 0; \\ I_{\text{в}} \cdot r_{\text{в}} - I_{\text{пш}} \cdot r_{\text{пш}} + 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot w_{\text{в}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} = 0; \\ I_{\text{я}} = I_{\text{в}} + I_{\text{пш}} + I_{\text{ш}}; \\ \Phi = \Phi_1(t) + \Phi_2(t) = \Phi_{\text{y}} \left(1 - \varphi e^{-\frac{t}{\tau_{\text{вх}}}} - (1 - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau_{\text{вх}}}} \right). \end{cases} \quad (2.3)$$

где $I_{\text{ш}}$ – ток шунтирующей цепи обмотки возбуждения;

$L_{\text{ш}}$ – индуктивность ИШ;

$R_{\text{ш}}$ – сопротивление шунтирующей цепи.

В свою очередь, ток в шунтирующей цепи равен

$$I_{\text{ш}} = (1 - \beta) \cdot I_{\text{я}}, \quad (2.4)$$

где β – коэффициент ОВ, который определяется как отношение тока возбуждения ($I_{\text{в}}$) к току якоря ТЭД ($I_{\text{я}}$) [69] или согласно рисунку 2.1

$$\beta = \frac{I_{\text{в}}}{I_{\text{я}}}, \quad \beta = \frac{r_{\text{ш}} + r_{\text{иш}}}{r_{\text{ш}} + r_{\text{иш}} + r_{\text{в}}}, \quad (2.5)$$

где $R_{\text{иш}}$ – активное сопротивление ИШ.

Как известно, система ОВ ТЭД ЭПС применяется не только для увеличения скорости движения поезда, а также и для управления силой тяги ЭПС [69]. Рассмотрим подробно, как протекают электромеханические процессы в ТЭД, работающим в режиме ОВ, согласно рисунку 2.1.

При НВ ТЭД ток якоря равен току возбуждения, если исключить то, что 3 – 4 % тока якоря проходит через резистор постоянной шунтировки ($R_{шш}$) (рисунок 2.1) [69]. Тогда, токи в ТЭД равны

$$I_{я} = I_{в} = \frac{U_{д} - C_v \Phi \cdot V}{r_{я} + R_{в}}, \quad (2.6)$$

где V – это линейная скорость движения ЭПС.

При этом сила тяги, развиваемая колесно-моторным блоком (КМБ), будет равна

$$F_{кд} = C_F \Phi I_{я} - \Delta F_{кд}, \quad (2.7)$$

где C_F – конструктивная постоянная КМБ по силе тяги;

$\Delta F_{кд}$ – сила, затрачиваемая на преодоление механических, магнитных и добавочных потерь в КМБ, которая составляет 3 % от силы $C_F \Phi I_{я}$, поэтому ей можно пренебречь [69].

Следовательно, сила тяги ЭПС определяется как

$$F_{к} = F_{кд} \cdot n_{д}, \quad (2.8)$$

где $n_{д}$ – число ТЭД локомотива.

При включении режима ОВ ТЭД электромеханические процессы, протекающие в режиме ОВ, можно разделить на два этапа:

- начальный, длительностью в несколько долей секунды, при котором изменяются только электрические величины, так как линейная скорость движения ЭПС измениться не может вследствие большой механической постоянной времени электровоза с поездом;

- последующий, гораздо большей длительностью, в течении которого изменяется скорость движения [69].

После того, как обмотка возбуждения окажется зашунтированной, ток $I_{ш}$ начнёт протекать в электрическую цепь с сопротивлениями $R_{ш}$ и $R_{шш}$. Это приведёт к снижению $I_{в}$, а его снижение приведёт к уменьшению магнитного потока и ЭДС ТЭД, которая определяется как

$$E = C_v \Phi \cdot V. \quad (2.9)$$

Однако, ток якоря начнет увеличиваться согласно выражению

$$I_{я(ОВ)} = \frac{U_{дн} - C_v \Phi_{н} \cdot V}{r_{я} + \beta \cdot r_{в}}. \quad (2.10)$$

Увеличение $I_{я}$ приведет к нарастанию $I_{ш}$ и $I_{в}$, а увеличение $I_{в}$ вызовет увеличение магнитного потока. Таким образом, на первом этапе ОВ ТЭД магнитный поток изменяется незначительно. Например, при $\beta = 0,5$, ток якоря ТЭД увеличится в два раза, а магнитный поток на 2,2 % [69]. Следовательно, после включения ОВ ТЭД (доли секунды) скорость движения и напряжение, приложенное к ТЭД не изменяются, практически и не изменяется магнитный поток, поэтому возрастание тока ТЭД в начальный момент возникает только из-за уменьшения эквивалентного сопротивления цепи обмотки возбуждения. Таким образом, увеличивается сила тяги электровоза.

На рисунке 2.2 представлены тяговые $F_k(V)$, электротяговые $V(I_d)$ характеристики ТЭД электровоза и зависимость сопротивления движения $|W|$ поезда от скорости движения. По данным характеристикам довольно просто проследить процесс изменения скорости.

Допустим, что ЭПС движется со скоростью V_1 , когда сила тяги $F_{к1} = |W_1|$. При этом сила тяги КМБ равна $F_{кд1}$. В момент подключения шунтирующей цепи к обмотке возбуждения ТЭД скорость движения ЭПС, как уже говорилось, остаётся

неизменной, значит сила сопротивления поезду $|W_1|$ остаётся неизменной. При этом ток ТЭД и сила тяги КМБ увеличиваются до значений $I_{д2}$ и $F_{кд2}$ соответственно.

Сила тяги ЭПС ($F_{к2}$) будет превышать силу сопротивления поезда ($F_{к2} > |W_1|$), это приведёт к увеличению скорости поезда. С ростом скорости сила тяги ЭПС уменьшается, а сила сопротивления поезда увеличивается. Когда сила тяги ЭПС будет равняться силе сопротивления движения ($F_{к2} = W_2$), наступит режим установившейся скорости. Ток двигателя с увеличением скорости будет уменьшаться до значения $I_{д2}$. Следовательно, ток при ОВ будет больше, чем при НВ ТЭД [69].

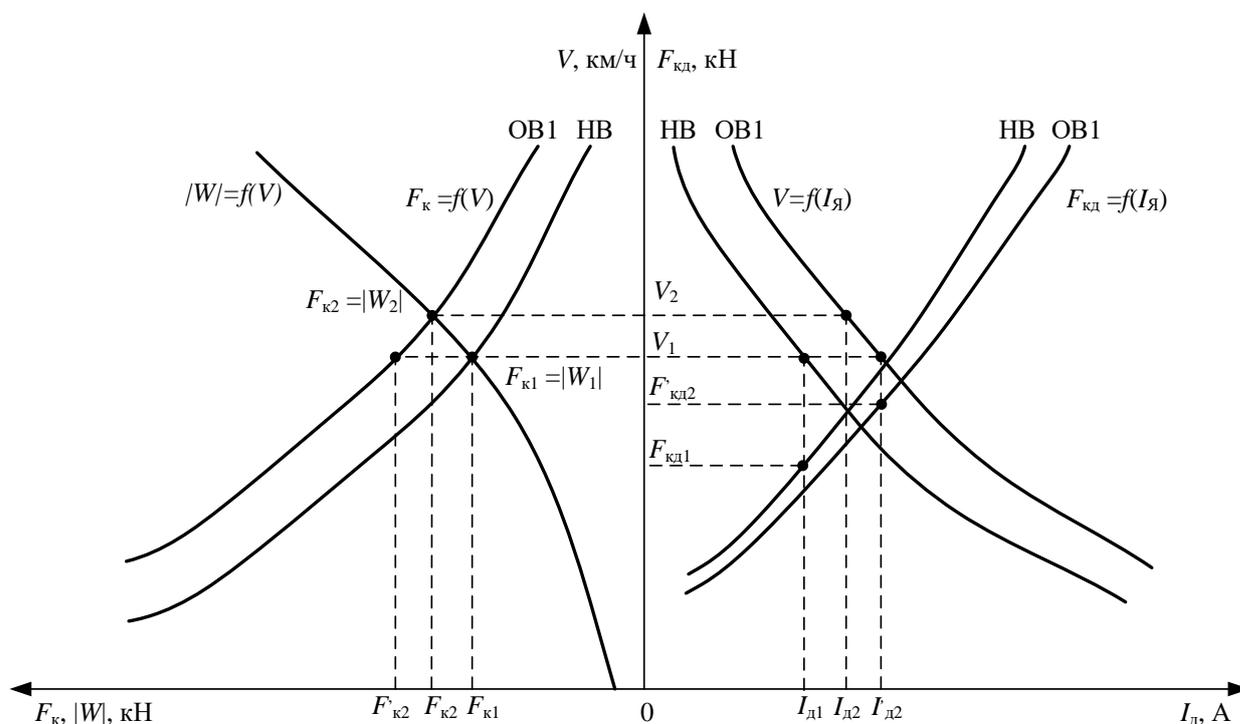


Рисунок 2.2 – Тяговые и электротяговые характеристики ТЭД электровоза при применении системы ОВ

Согласно представленному выше анализу тяговых и электротяговых характеристик, следует, что переключение с одной позиции ОВ на другую происходит ступенчато, что вызывает резкое увеличение тока ТЭД. Возникающий толчок тока сопровождается нарушением коммутации ТЭД, что приводит к искрению под щетками коллекторно-щеточного аппарата, и может стать причиной кругового огня на коллекторе [99].

Еще одним из недостатков ступенчатого переключения является то, что машинисты электровоза сталкиваются с такой проблемой как несрабатывание контактора при переключении с одной позиции на другую. Представленные недостатки можно увидеть на диаграмме тока якоря, которая получена при расшифровке данных УСАВП в депо Карасук на электровозе ВЛ80с (рисунок 2.3).

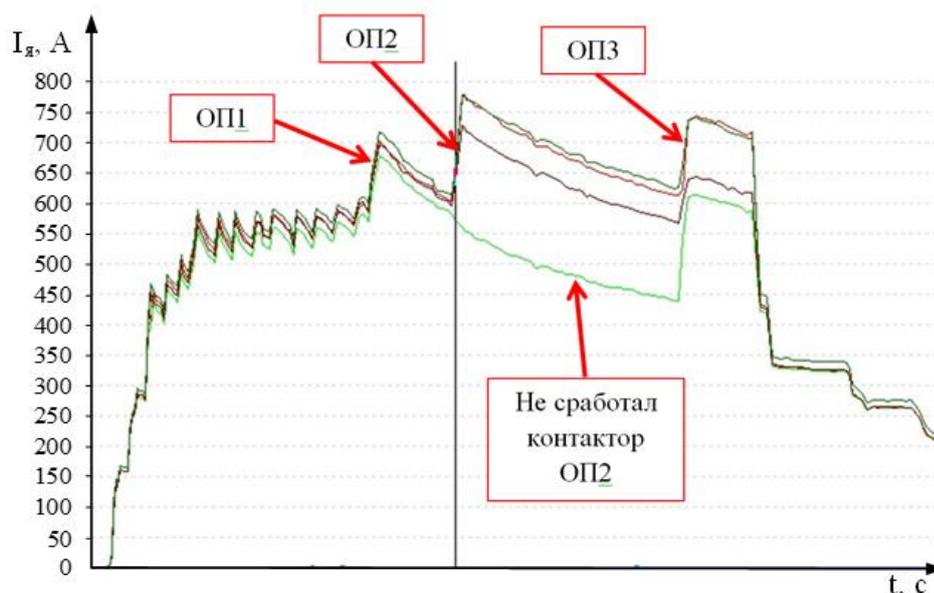


Рисунок 2.3 – Диаграмма тока якоря, полученная при расшифровке данных УСАВП в депо Карасук на электровозе ВЛ80с

Также ограниченное число позиций со ступенчатым переключением приводит поезд к потере скорости и ускорения его движения, что докажем при помощи аналитического обоснования.

Известно, что максимальная сила тяги при ступенчатом и плавном регулировании ОВ ограничена одинаковым пределом по сцеплению, при этом ускорение поезда согласно уравнению движения поезда, определяется разностью между максимальной силой тяги F_d и сопротивлением движению W

$$(1 + \gamma) \cdot m_a \cdot \frac{dV}{dt} = F_d - W = \Delta F, \quad (2.11)$$

где $(1+\gamma) \cdot m_a$ – приведенная масса поезда с учетом инерции вращающихся частей, приходящейся на движущую ось локомотива;

$\frac{dV}{dt}$ – изменение скорости движения поезда;

ΔF – изменение силы тяги ТЭД.

Подставив выражение тока ТЭД (2.7) в выражение силы тяги (2.6) получим

$$F_{\text{д}} = C_F \cdot \Phi \cdot \frac{U_{\text{д}} - C_V \cdot \Phi \cdot V}{\Sigma R} = C_F \cdot \Phi \cdot \frac{U_{\text{д}}}{\Sigma R} - \frac{C_F \cdot C_V \cdot \Phi^2}{\Sigma R} \cdot V. \quad (2.12)$$

где ΣR – сумма сопротивления выпрямленной цепи тока электровоза.

Изменение силы тяги ТЭД относительно времени, учитывая жесткость тяговой характеристики равно

$$\frac{dF_{\text{д}}}{dt} = -x \cdot \frac{dV}{dt}, \quad (2.13)$$

где x – это коэффициент, учитывающий жесткость тяговой характеристики, который равен $x = \frac{dF_{\text{д}}}{dV}$, то есть изменению силы тяги ТЭД, соответствующему изменению скорости вращения колесной пары [69].

Подставив выражение (2.13) в (2.11) получим

$$-\frac{m_a}{x} \cdot \frac{dF_{\text{д}}}{dt} = F_{\text{д}} - W, \quad (2.14)$$

или

$$T_{\text{п}} \cdot \frac{dF_{\text{д}}}{dt} + F_{\text{д}} = W, \quad (2.15)$$

где $T_{\text{п}} = \frac{m_a}{x}$ – постоянная времени разгона поезда.

В пределах одной ступени ОВ ТЭД при условии: $W = \text{const}$, $\Phi = \text{const}$, что соответствует работе ТЭД последовательного возбуждения в зоне насыщения, максимальная сила тяги $F_{\text{сц},\text{max}}$ ограничена возможностью срыва колесной пары в боксовании

$$F_{\text{д,уст.}} + \Delta F = F_{\text{сц},\text{max}}, \quad (2.16)$$

считая, что в установившемся режиме $F_{д.уст.} = W$, когда $\frac{dV}{dt} = 0$.

При начальных условиях: при $t = 0$, $F_{д.0} = W + \Delta F = F_{сц.маx}$; при $t = \infty$, $F_{д.уст} = W$. В период неизменного напряжения на ТЭД, учитывая, что тяговая характеристика имеет функцию экспоненты

$$F_{д}(t) = F_{д.уст} + \Delta F \cdot e^{-\frac{t}{T_{п}}} = W + \Delta F \cdot e^{-\frac{t}{T_{п}}}. \quad (2.17)$$

Подставив выражение (2.17) в (2.11) получим

$$m_a \cdot \frac{dV_c}{dt} = F_{д}(t) - W = W + \Delta F \cdot e^{-\frac{t}{T_{п}}} - W = \Delta F \cdot e^{-\frac{t}{T_{п}}}, \quad (2.18)$$

где $\frac{dV_c}{dt}$ – изменение скорости при ступенчатом регулировании напряжения в пределах одной ступени регулирования.

Таким образом, при штатной системе ОВ ТЭД потери ускорения определяются выражением

$$\Delta a = \frac{dV}{dt} - \frac{dV_c}{dt} = \frac{\Delta F}{m_{п}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{п}}}\right), \quad (2.19)$$

и потери скорости движения поезда

$$\Delta V = \frac{\Delta F}{m_{п}} \cdot \int \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{п}}}\right) dt. \quad (2.20)$$

После интегрирования в пределах времени выдержки (τ) на ступени регулирования получим

$$\Delta V = \frac{\Delta F}{m_{п}} \cdot \left[\tau - T_{п} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_{п}}}\right) \right]. \quad (2.21)$$

Для исключения потерь скорости необходимо выполнение условия

$$\tau - T_{\text{п}} \cdot \left(1 - e^{\frac{\tau}{T_{\text{п}}}}\right) = 0, \quad (2.22)$$

это возможно только при $\tau = 0$, что реализуется при плавном регулировании ОВ ТЭД электровоза. Так как $\tau = \frac{t_{\text{п}}}{n_{\text{р}}}$, где $t_{\text{п}}$ – это общее время пуска, $n_{\text{р}}$ – число ступеней регулирования ОВ, если $n_{\text{р}} \rightarrow \infty$, то $\tau \rightarrow 0$ [20, 42].

На рисунке 2.4 представлена тяговая характеристика электровоза 3ЭС5К с тремя ступенями ОВ ТЭД. Из анализа которой следует, что переключение с НВ на ОВ1 возможно при скорости 55 км/ч, с ОВ1 на ОВ2 при 60 км/ч, с ОВ2 на ОВ3 при 62 км/ч. Таким образом, возникают потери скорости движения ЭПС.

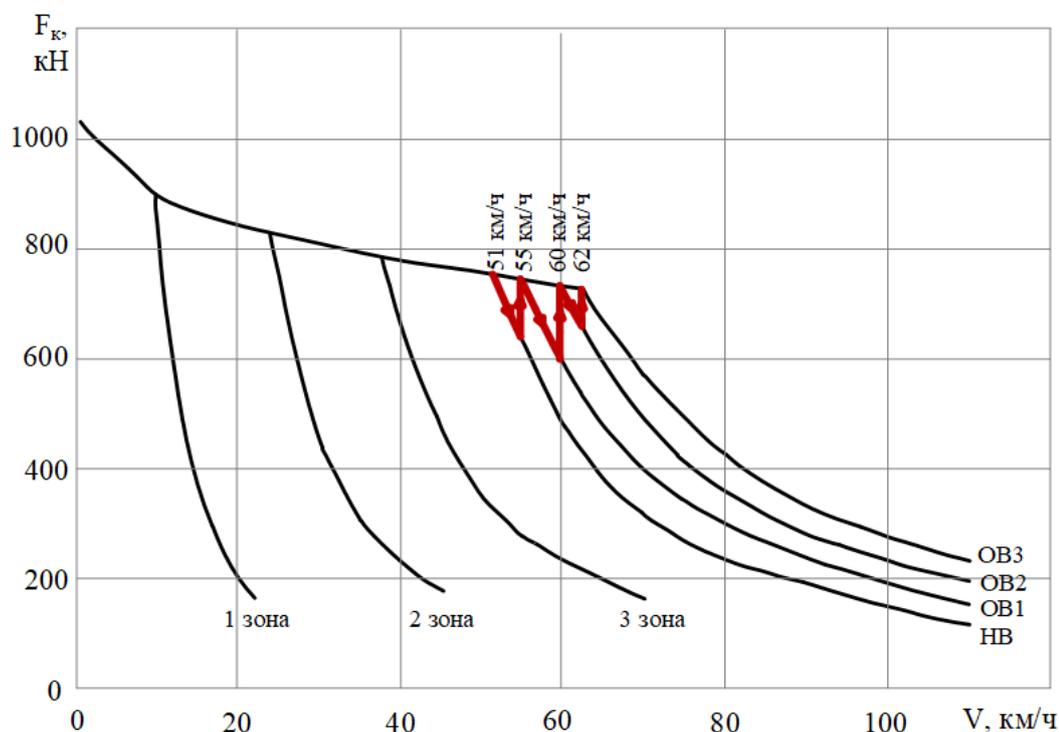


Рисунок 2.4 – Тяговая характеристика электровоза 3ЭС5К с тремя ступенями ОВ ТЭД

На рисунке 2.5 представлена тяговая характеристика электровоза 3ЭС5К с моделированием плавного регулирования ОВ ТЭД для этого на тяговой характеристике убраны промежуточные ступени (ОВ1, ОВ2) и задано максимальное ограничение (ОВ3). Анализируя данную характеристику видно, что при плавном регулировании исключаются потери скорости, так как данная тяговая

характеристика позволяет электровозу работать в области ограничения по сцеплению [21].

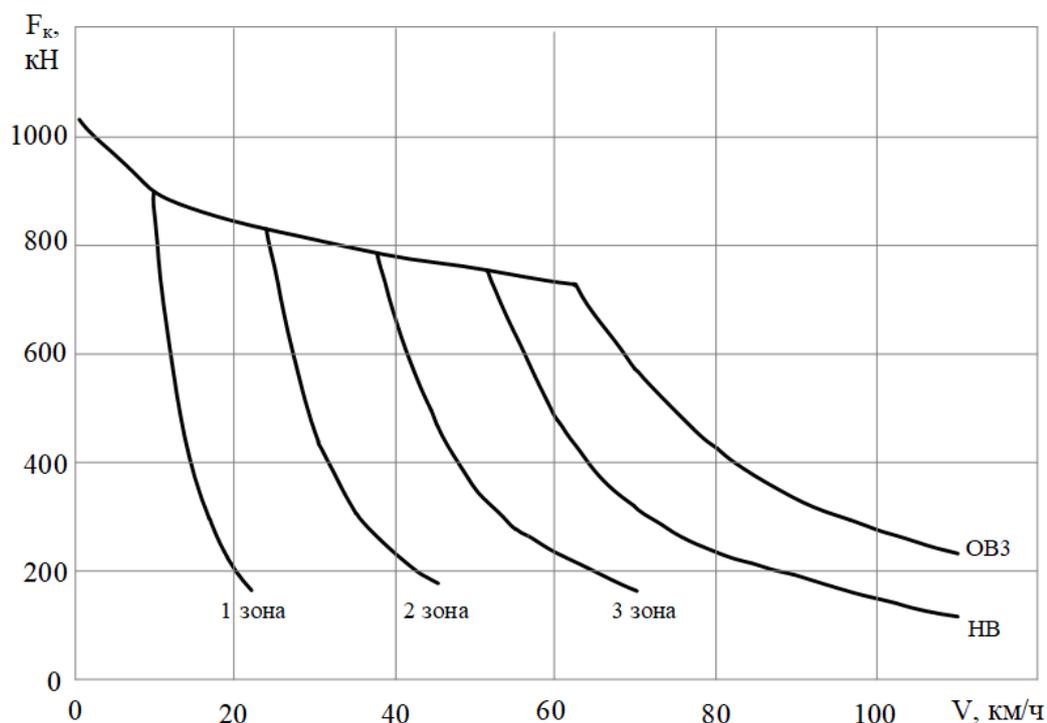


Рисунок 2.5 – Тяговая характеристика электровоза ЗЭС5К с моделированием плавного регулирования ОВ ТЭД

С помощью графического способа МПС на основании тяговых характеристик электровоза ЗЭС5К с тремя ступенями и с моделированием плавного регулирования ОВ ТЭД построена диаграмма удельных ускоряющих и замедляющих сил, на основании которой выполняется построение кривой скорости поезда для определенного профиля пути (рисунок 2.6). Построение кривой скорости для определенного профиля пути начинается с момента трогания поезда со станции А. Модель поезда представляет собой материальную точку, которая расположена в середине поезда [38, 70, 94, 88]. Анализируя которую, видим, что на равнинном участке после достижения скорости 51 км/ч скорость электровоза с плавным регулированием ОВ увеличивается стремительнее, чем у электровоза с тремя ступенями ОВ, что позволяет быстрее достигнуть максимальную скорость движения 80 км/ч. Что касается подъема, то скорость электровоза с плавным регулированием ОВ ТЭД уменьшается медленнее, чем скорость электровоза с

тремя ступенями ОВ, поэтому к концу подъема скорость ЭПС равна 62 км/ч, когда у электровоза с тремя ступенями – 51 км/ч.

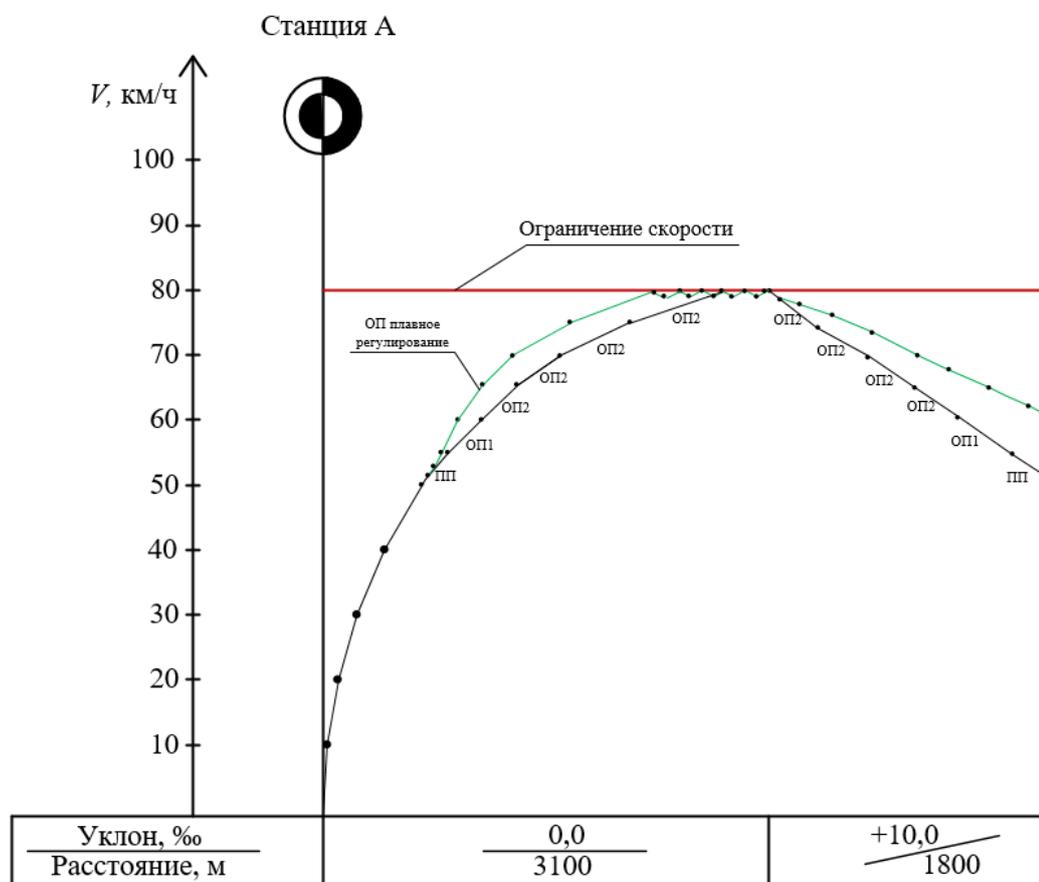


Рисунок 2.6 – Кривая скорости электровоза с тремя ступенями и плавным регулированием ОВ ТЭД

Проведено моделирование электровоза переменного тока серии ЗЭС5К со ступенчатым и плавным регулированием ОВ ТЭД на участке Зима – Иркутск-Сортировочный Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД) филиала ОАО «РЖД» в программном комплексе «КОРТЭС» [20, 21, 47].

Используя маршрутную карту вождения грузовых поездов на данном участке в программу «КОРТЭС» записан профиль пути с ограничениями скорости ($V_{огр}$) по участку. Для проведения тяговых расчетов необходимо задать характеристики электровоза серии ЗЭС5К, используя данные из руководства по эксплуатации. Характеристики электровоза для тягового и рекуперативного режима включают в себя: зависимость силы тяги/торможения от скорости движения, $F_k = f(V)$ и $B_k = f(V)$ соответственно; зависимость тока двигателя ($I_{дв}$) от скорости движения

(V), $I_{д}=f(V)$; зависимость потребляемого/рекуперированного электровозом тока от скорости, $I_{да} = f(V)$.

На рисунке 2.7 представлена тяговая характеристика электровоза ЗЭС5К с тремя ступенями ОВ ТЭД.

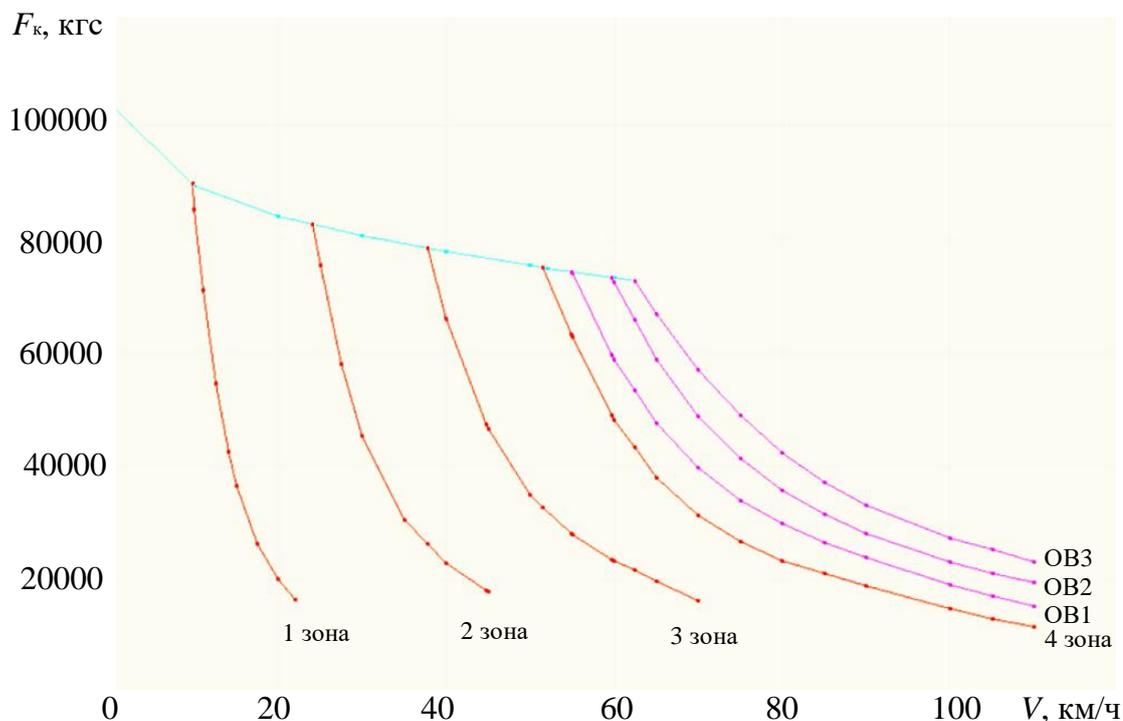


Рисунок 2.7 – Тяговая характеристика электровоза ЗЭС5К с тремя ступенями ОВ ТЭД

На рисунке 2.8 приведены результаты тяговых расчетов в программе «КОРТЭС» электровоза переменного тока ЗЭС5К со штатной системой ОВ ТЭД по участку Зима-Иркутск Сортировочный. Основные полученные показатели представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Полученные показатели электровоза ЗЭС5К со штатной системой ОВ ТЭД при следовании на участке Зима-Иркутск Сортировочный

Показатели	Параметры
Полное время хода, мин.	245,1
Время хода под током, мин.	109,9
Техническая скорость, км/ч	61,5
Максимальный ток электровоза ($I_{эл}$), А	605
Максимальный перегрев обмотки ($T_{п}$), °С	91

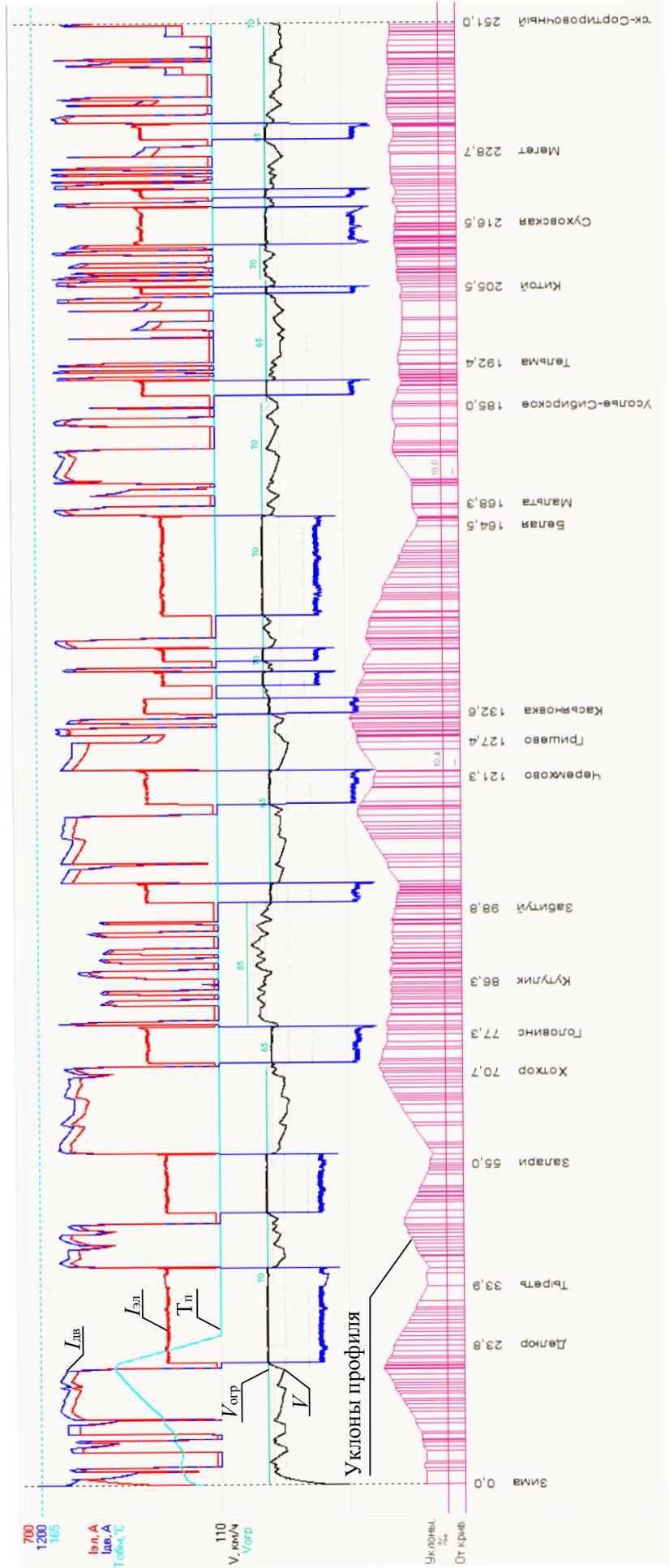


Рисунок 2.8 – Результаты тяговых расчетов в программе «КОРТАС» электролиза переменного тока ЗЭС5К с тремя ступенями ОВ ТЭД при следовании по участку Зима-Иркутск Сортировочный

Для проверки влияния плавного регулирования тока возбуждения на тяговой характеристике электровоза серии 3ЭС5К убраны промежуточные ступни (ОВ1, ОВ2) и задано максимальное ограничение (ОВ3) (рисунок 2.9).

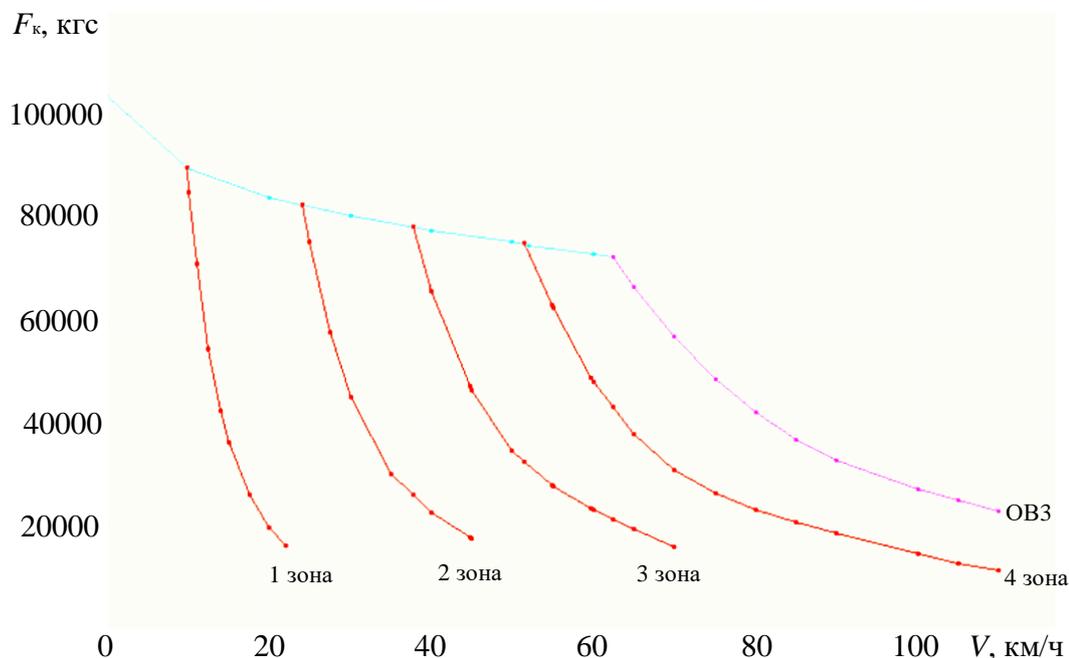


Рисунок 2.9 – Тяговая характеристика электровоза 3ЭС5К с плавным регулированием ОВ ТЭД

На рисунке 2.10 приведены результаты тяговых расчетов в программе «КОРТЭС» электровоза переменного тока 3ЭС5К с плавным регулированием ОВ ТЭД на участке Зима-Иркутск Сортировочный, основные полученные показатели представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Полученные показатели электровоза 3ЭС5К с плавным регулированием ОВ ТЭД при следовании на участке Зима-Иркутск Сортировочный

Показатели	Параметры
Полное время хода, мин.	235,2
Время хода под током, мин.	116,2
Техническая скорость, км/ч	64
Максимальный ток электровоза ($I_{эл}$), А	623
Максимальный перегрев обмотки ($T_{п}$), °С	96

Полученные результаты моделирования позволили с программного комплекса «КОРТЭС» с шагом усреднения по времени 0,25 с в программу *EXCEL* перенести координаты точек скорости от профиля пути и построить график кривых скоростей со ступенчатым и плавным регулированием ОВ ТЭД на участке Кутулик-Забитуй (тягового плеча Зима – Иркутск-Сортировочный) (рисунок 2.11).

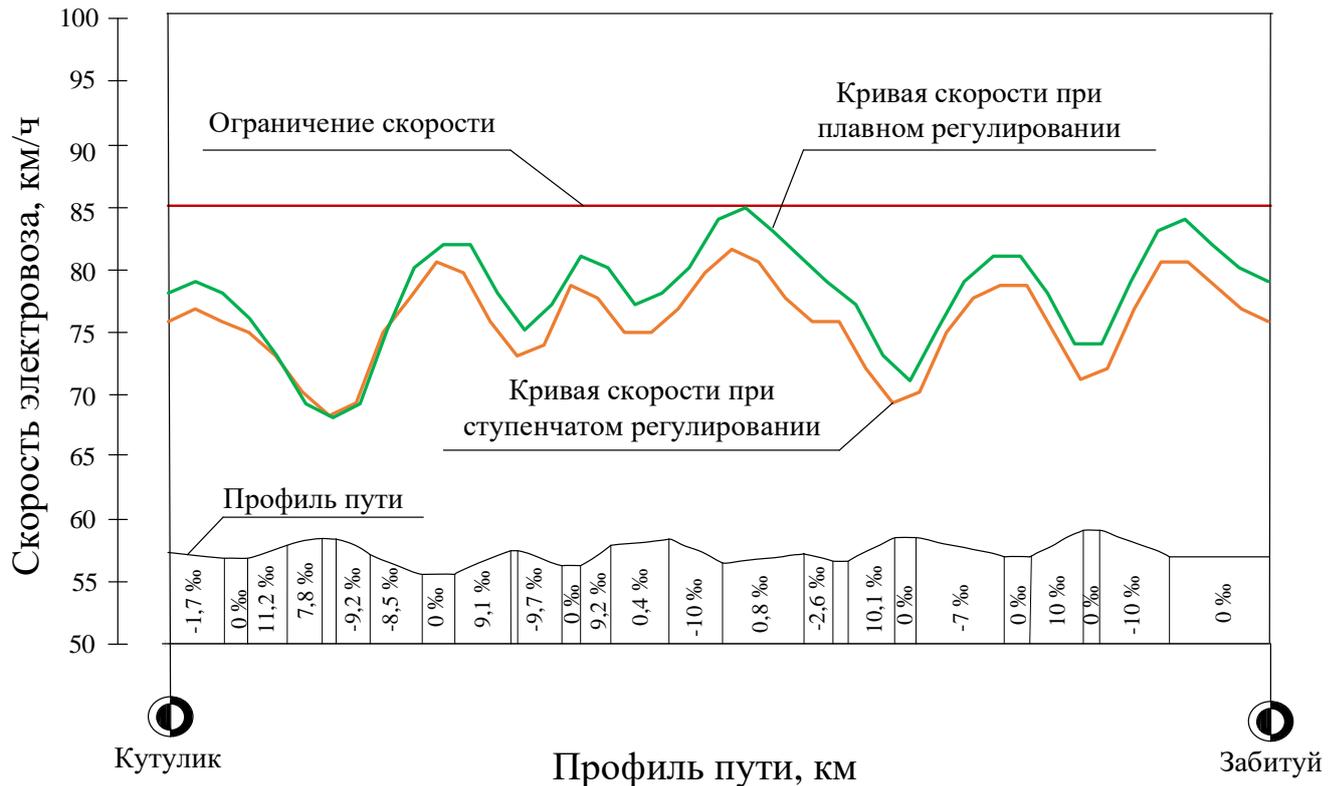


Рисунок 2.11 – Кривые скорости при ступенчатом и плавном регулировании ОВ ТЭД электровоза, полученные в программном комплексе «КОРТЭС» на участке Кутулик-Забитуй ВСЖД филиала ОАО «РЖД»

Из анализа рисунка 2.11 видно, что кривая скорости при плавном регулировании лежит выше кривой скорости при ступенчатом регулировании. По полученным результатам, можно сделать вывод, что система ОВ ТЭД с плавным регулированием тока возбуждения позволит увеличить техническую скорость электровоза не менее чем на 2,5 км/ч, что снизит время хода электровоза [33, 88].

2.2 Исследование влияния пульсаций тока возбуждения на коммутационную устойчивость ТЭД в режиме ОВ

На электровозах переменного тока со статическими выпрямителями к ТЭД подводится выпрямленный ток, пульсации которого достигают больших значений. Можно сказать, что пульсирующий ток состоит из двух токов: постоянного и переменного. Пульсирующий ток в обмотках катушек главных полюсов ТЭД создаёт пульсирующий магнитный поток, который также имеет постоянную и переменную составляющую [101, 98]. Возникающие пульсации токов и магнитного потока снижают коммутационную устойчивость ТЭД, которая характеризуется зависимостью степени искрения от величины нескомпенсированных ЭДС (Δe_p) в коммутируемых секциях якоря (рисунок 2.12).

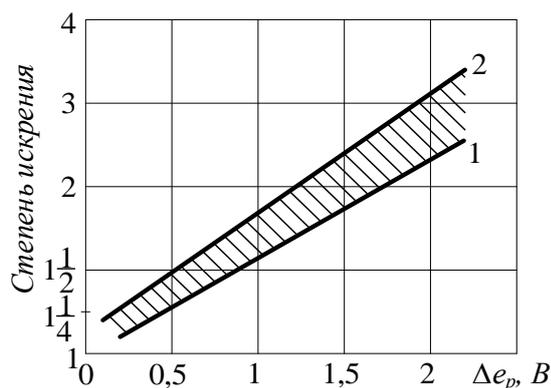


Рисунок 2.12 – Зависимость степени искрения от нескомпенсированной ЭДС в коммутируемых секциях якоря ТЭД: 1 – щетки твердые; 2 – мягкие

Идеальным являлось бы условие, когда для любого момента времени коммутации $\Delta e_p = 0$, но данное условие невозможно выполнить в следствие возникновения несинусоидальных величин переменных ЭДС и наличия больших фазовых сдвигов между их основными гармониками [46, 48, 68, 98].

Определить Δe_p аналитически довольно трудно [56], но по экспериментальным исследованиям некоторых авторов [4, 57] для обеспечения оптимальной коммутации было определено значение нескомпенсированной ЭДС в пределах 0,3 - 0,6 В [98]. Причинами нарушения коммутационной устойчивости

полная переменная составляющая МДС добавочного полюса ($\dot{I}_{\text{яп}\omega_{\text{дп}}}$) должна быть противоположна $\dot{I}_{\text{яп}}$ [1, 48]. В связи с наличием вихревых токов в элементах магнитопровода, $\dot{F}_{\text{ря}}$ и $\dot{F}_{\text{мдп}}$ отстают от токов, их вызывающих, на угол магнитного запаздывания $\varphi_{\text{я}}$ и $\varphi_{\text{дп}}$ соответственно [1]. Таким образом, $\dot{I}_{\text{яп}\omega_{\text{дп}}}$ раскладывается на две составляющих: переменную составляющую МДС добавочного полюса ($\dot{F}_{\text{мдп}}$) и МДС вихревых токов ($\dot{F}_{\text{вихр.дп}}$), которая располагается под углом 90° к $\dot{F}_{\text{мдп}}$ [48]. Таким образом, $\dot{I}_{\text{яп}\omega_{\text{дп}}} = \dot{F}_{\text{мдп}} + \dot{F}_{\text{вихр.дп}}$. Аналогично определяется переменная составляющая МДС реакции якоря $\dot{F}_{\text{я}} = \dot{F}_{\text{ря}} - \dot{F}_{\text{вихр.я}}$. При сложении векторов $\dot{F}_{\text{ря}}$ и $\dot{F}_{\text{мдп}}$ определим направление вектора компенсирующей переменной составляющей МДС добавочного полюса ($\dot{F}_{\text{мк}}$), который сонаправлен с $\dot{e}_{\text{кп}}$. При сложении $\dot{e}_{\text{к}}$ и $\dot{e}_{\text{р}}$ получим вектор небалансной ЭДС $\Delta\dot{e}_{\text{р}}$ без учета трансформаторной ЭДС.

Для получения полной картины явлений, связанных с переменными составляющими ЭДС в ТЭД необходимо учесть трансформаторную ЭДС $\dot{e}_{\text{т}}$, которая возникает в коммутируемых секциях якоря при пульсации тока возбуждения и определяется по выражению

$$e_{\text{т}} = -\omega_{\text{в}} \frac{d}{dt} [\Phi K_{\text{пф}} \sin(2\omega_{\text{в}} t + \varphi_{\mu})] \approx -\omega_{\text{в}} 2\omega_{\text{в}} \Phi K_{\text{пф}} \cos(2\omega_{\text{в}} t + \varphi_{\mu}), \quad (2.23)$$

где φ_{μ} – угол фазового сдвига составляющей магнитного потока относительно переменной составляющей тока;

$K_{\text{пф}}$ – коэффициент пульсации магнитного потока, который зависит от пульсации тока возбуждения (рисунок 2.14) и определяется по формуле (2.24) [87, 97].

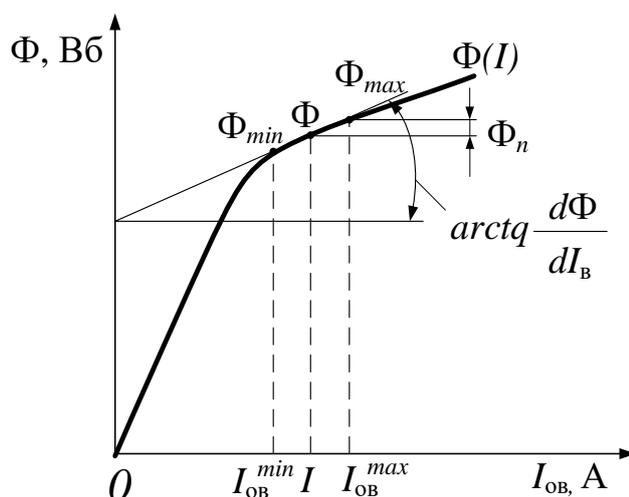


Рисунок 2.14 – Зависимость магнитного потока от тока возбуждения ТЭД электровоза

Коэффициент пульсации магнитного потока определяется по выражению

$$K_{\Phi} \approx K_{\Phi I_B} \cdot K_{св} \cdot \frac{I_B}{\Phi} \cdot \frac{d\Phi}{dI_B}, \quad (2.24)$$

где $K_{\Phi I_B}$ – коэффициент пульсации тока возбуждения;

$K_{св}$ – коэффициент снижения переменного магнитного потока вихревыми токами. При нешихтованных магнитопроводах $K_{св} \approx 0,22 \div 0,34$, а при шихтованных – $K_{св} \approx 0,5 \div 0,73$ [40, 45, 46, 48, 55, 56].

Для снижения пульсаций магнитного потока обмотки возбуждения ТЭД на электровозах переменного тока используют резистор постоянной шунтировки ($R_{шш}$) (рисунок 2.1) [40, 46, 87, 101]. При его использовании большая часть переменной составляющей тока возбуждения пройдет именно по шунтирующей цепи, так как шунтирующий резистор имеет незначительное активное сопротивление по сравнению с обмоткой возбуждения ТЭД [31]. Таким образом, удастся значительно снизить пульсацию тока возбуждения (ΔI_B) (рисунок 2.15).

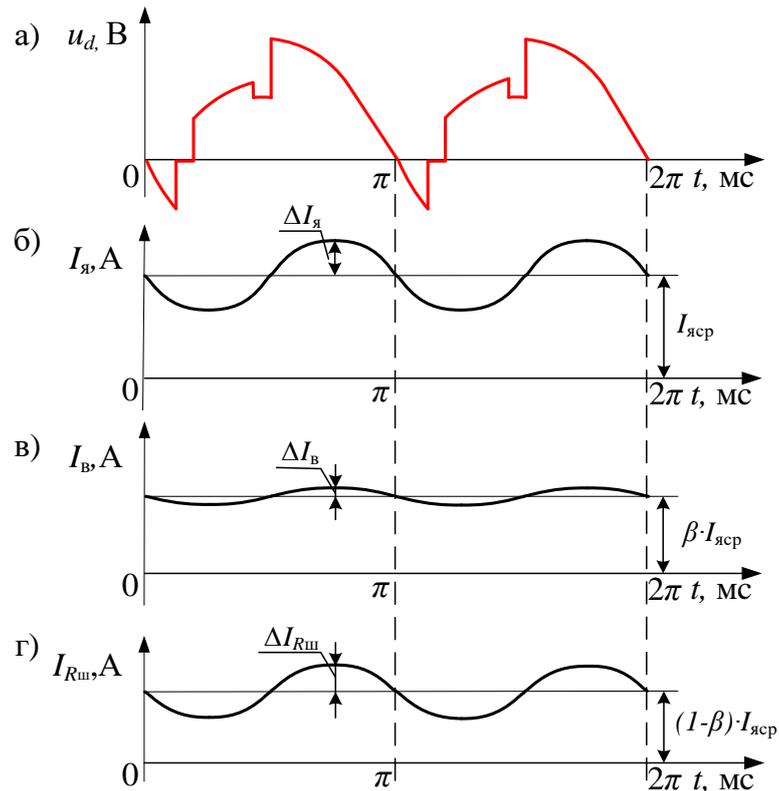


Рисунок 2.15 – Диаграмма пульсаций напряжения, токов якоря, возбуждения и шунтирующей цепи обмотки возбуждения ТЭД электровоза переменного тока

Постоянная составляющая тока в обмотке возбуждения ТЭД $I_{ов}$ и коэффициент возбуждения β_{nn} по переменной составляющей при работе электровоза определяются по выражениям

$$I_{в} = I_{я} \cdot \beta, \quad (2.25)$$

$$\beta_{nn} = \frac{r_{пш}}{\sqrt{(r_{пш} + r_{в})^2 + x_{в}^2}}, \quad (2.26)$$

где $x_{в}$ – реактивное сопротивление обмотки возбуждения, учитывая что частота пульсации тока в ней равна удвоенной частоте основной гармонике напряжения сети, $x_{в} = 4\pi f_c L_{в}$.

При этом коэффициент пульсации магнитного потока определяется как

$$K_{пф} \approx K_{пI_{в}} \cdot K_{св} \cdot \frac{I_{в}}{\Phi} \cdot \frac{d\Phi}{dI_{в}} \cdot \frac{\beta_{пш}}{\beta_{п}}. \quad (2.27)$$

В первых ТЭД всемирно пытались как можно больше уменьшить $K_{пф}$, для того чтобы подавить образующуюся трансформаторную ЭДС. Таким образом, было подобрано такое сопротивление резистора постоянной шунтировки, что в номинальном режиме работы электровоза $K_{пф} \approx 0,0031$, при этом $0,86 < \beta < 0,90$, а трансформаторная ЭДС примерно равнялась 0,25 от переменной составляющей реактивной ЭДС.

Таким образом, было решено увеличить сопротивление шунтирующего резистора обмотки возбуждения ТЭД при котором $\beta \approx 0,97$, так как это позволяет приблизить величину \dot{e}_t к \dot{e}_p и улучшить ее фазу, в результате чего достигается лучшая взаимная компенсация переменных ЭДС [10, 19, 32]. Но следует помнить, что переменные ЭДС имеют различные законы изменения с нагрузкой ТЭД и при регулировании частоты его вращения, поэтому эффективная компенсация переменных ЭДС достигается только в узком диапазоне режимов, близких к режиму, для которого настроена система.

При включении режима ОВ ТЭД электровоза, как известно, параллельно обмотки возбуждения подключается резистор и ИШ, для сохранения неизменного подобранного фазового соотношения ЭДС на всех ступенях ОВ ТЭД соотношение индуктивностей шунта ($L_{иш}$) и обмотки возбуждения должно быть постоянным, что практически неосуществимо, поэтому сохранить подобранную фазу переменных ЭДС при $\beta = 0,97$ в режиме ОВ ТЭД практически невозможно [4].

На рисунке 2.16 представлена векторная диаграмма переменных ЭДС в ТЭД с учетом трансформаторной ЭДС. Как известно, при наличии резистора постоянной шунтировки, а также в режиме ОВ ТЭД переменная составляющая тока возбуждения ($\dot{I}_{вп}$) отстает от переменной составляющей тока якоря ($\dot{I}_{яп}$) на угол шунтирования ($\varphi_{ш}$), который меняется за счет изменения величины шунтирующего обмотку возбуждения сопротивления определяется согласно выражению

$$\varphi_{ш} = \arctg K_{ш} \cdot \frac{x_B}{r_B}, \quad (2.28)$$

где $K_{ш}$ – коэффициент шунтировки, который определяется

$$K_{ш} = \frac{1}{\beta} - 1. \quad (2.29)$$

Таким образом, $\dot{I}_{яп}$ равен сумме токов в обмотке возбуждения и шунтирующей цепи $\dot{I}_{яп} = \dot{I}_{вп} + \dot{I}_{шп}$. Направление вектора переменной составляющей магнитного потока главных полюсов $\dot{\Phi}_{вп}$ определяется положением вектора МДС намагничивания ($\dot{F}_{мп}$), с которым $\dot{\Phi}_{вп}$ совпадает по фазе. В следствие наличия вихревых токов в главных полюсах вектор $\dot{F}_{мп}$ отстает от $\dot{I}_{вп}$ на угол магнитного запаздывания $\varphi_{гп}$, таким образом, $\dot{F}_{мп} = \dot{I}_{вп}\omega_B - \dot{F}_{вихр.гп}$. Фазовый сдвиг \dot{e}_T от $\dot{\Phi}_{вп}$ составляет 90° [4, 98]. После построения вектора \dot{e}_T построим векторную диаграмму рисунка 2.13, и получим вектор небалансной ЭДС, который равен $\Delta\dot{e}_p = \dot{e}_k + \dot{e}_p + \dot{e}_T$ (рисунок 2.16).

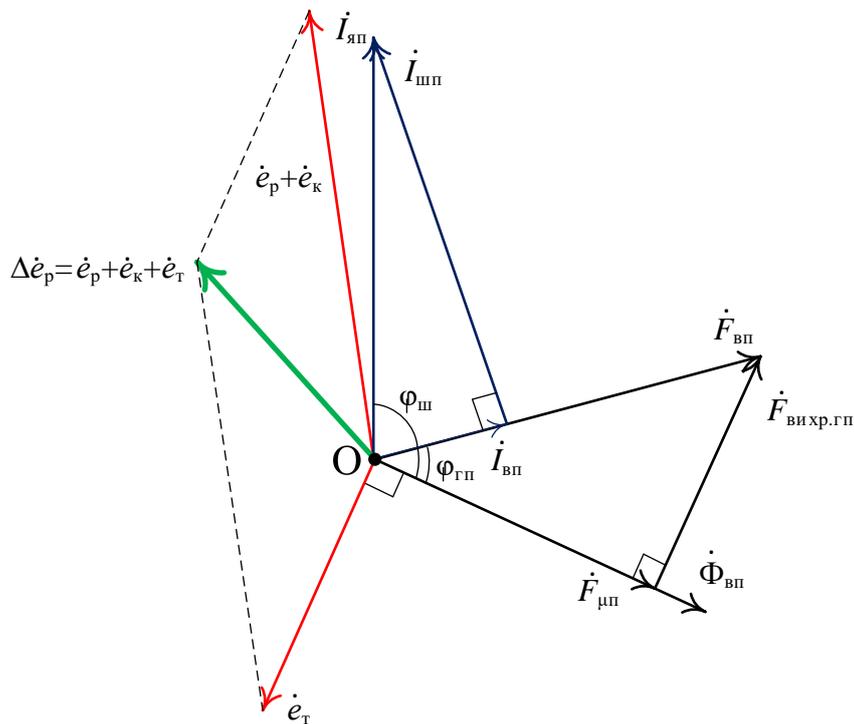


Рисунок 2.16 – Векторная диаграмма переменных составляющих ЭДС в ТЭД с учетом трансформаторной ЭДС в режиме ОБ ТЭД

По диаграммам рисунков 2.13 и 2.16 можно сделать вывод, что вихревые токи, которые образуются в массивных элементах магнитопровода ТЭД, а также возникающая реакция якоря приводят к значительному смещению вектора

коммутирующей ЭДС, что образует небалансную ЭДС, которая вызывает нарушение коммутационной устойчивости ТЭД. Одним из способов улучшения коммутационной устойчивости ТЭД в режиме ОВ ТЭД может являться уменьшение пульсации тока возбуждения, что позволит снизить пульсацию магнитного потока главных полюсов, а, следовательно, реакцию якоря и влияние вихревых токов в обмотке возбуждения, которые противодействуют созданию благоприятной фазы трансформаторной ЭДС.

2.3 Разработка усовершенствованной системы ослабления возбуждения тяговых электродвигателей с плавным регулированием тока возбуждения

На основании выше изложенных недостатков штатной индуктивно-активной системы ОВ ТЭД со ступенчатым регулированием предлагается усовершенствованная система ОВ ТЭД на базе современной электроники (*IGBT*-транзисторов) с плавным регулированием тока возбуждения. На рисунке 2.17 представлена цепь выпрямленного тока с предлагаемой системой ОВ ТЭД электровоза [23-24, 26-30, 35-36, 74, 117]. Система ОВ ТЭД включает последовательно включенные диоды (*VD1*, *VD2*) и *IGBT*-транзисторы (*VT1*, *VT2*). Управление *VT1-VT2* осуществляется блоком управления ОВ, который по сигналу датчика тока якоря (ДТ), размещенного в цепи якорной обмотки ТЭД и служащих для измерения тока протекающего в цепи, определяет режимы работы (тяга/боксование), после этого подает сигналы управления *IGBT*-транзисторам, обеспечивающим ОВ ТЭД электровоза. Подключенный к положительной шине питания ТЭД диод (*VD3*) предназначен для защиты *IGBT*-транзисторов от выбросов напряжения при коммутации индуктивной нагрузки. При включении режима рекуперативного торможения, шунтирующая цепь ОВ отключается за счет контактора (*K1*). Также для синхронизации блока управления ОВ с контактной сетью в обмотку собственных нужд силового трансформатора включен датчик напряжения.

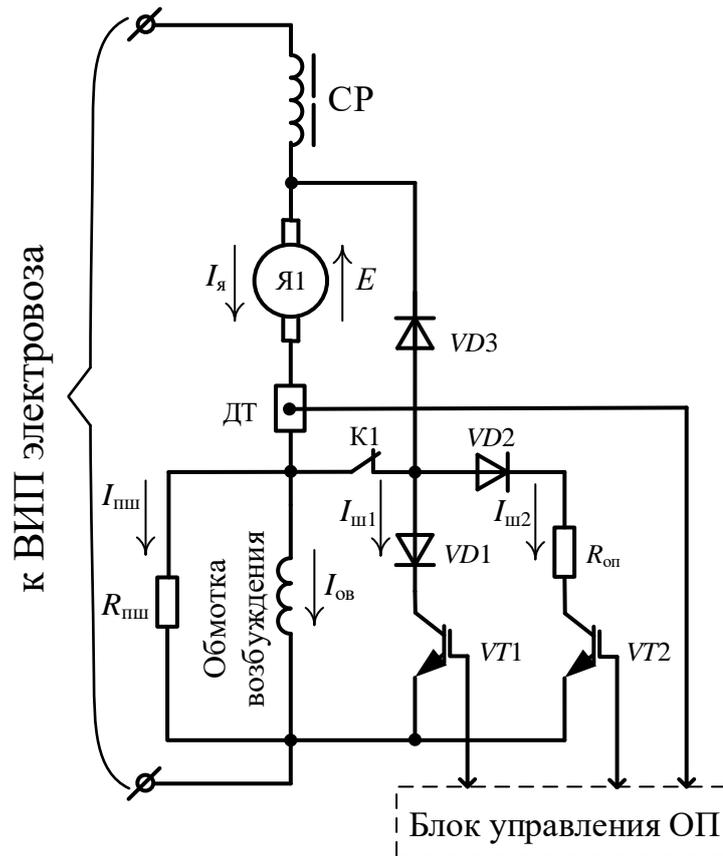


Рисунок 2.17 – Цепь выпрямленного тока с предлагаемой системой ОВ ТЭД

Принцип работы предлагаемого устройства заключается в том, что для реализации ОВ ТЭД до 43 % тока возбуждения поочередно включаются $VT1-VT2$, регулируя длительность подаваемых на них импульсов, обеспечивается плавное регулирование тока возбуждения (рисунок 2.18 *e*). При возникновении нестационарного режима $VT1-VT2$ выключаются, и ТЭД переходит в режим нормального возбуждения.

На рисунке 2.18 представлен алгоритм управления $IGBT$ -транзисторами $VT1-VT2$ [17, 30]. Если время работы $VT1$ составляет t_1 , то время работы $VT2$ равно $T-t_1$.

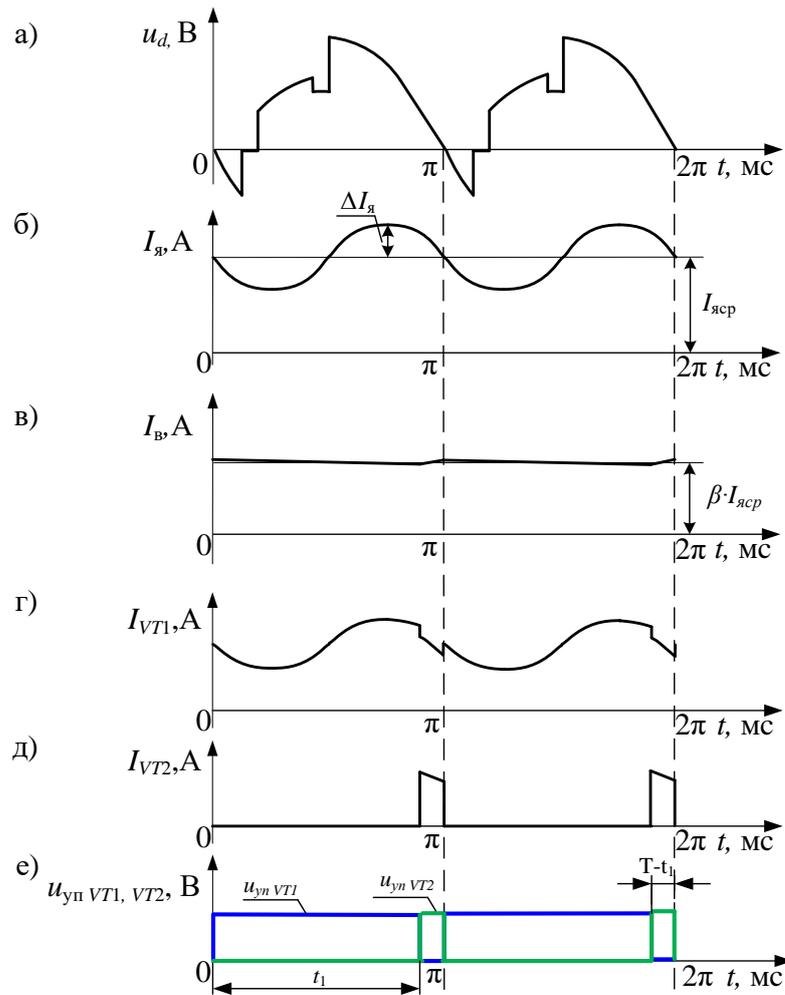


Рисунок 2.18 – Алгоритм управления предлагаемой системой ОВ ТЭД

Для данного алгоритма управления получено выражение для коэффициента возбуждения для плавного регулирования ОВ.

Падение напряжения на обмотке возбуждения равно падению напряжения на шунтирующих транзисторах $VT1$ и $VT2$

$$I_B \cdot r_B = I_{ш1} \cdot \sum r_{ш1} + U_{T(VT1)} + U_{T(VD1)} = I_{ш2} \cdot \sum r_{ш2} + U_{T(VT2)} + U_{T(VD2)}. \quad (2.30)$$

где U_T – напряжение падения на $IGBT$ -транзисторах ($VT1$; $VT2$) и диодах ($VD1$; $VD2$), В;

$I_{ш1}, I_{ш2}$ – токи шунтирующей цепи, А;

$\sum r_{ш1}$ – сопротивление шунтирующей цепи, состоящей из сопротивления $VT1$ (r_{VT1}) и $VD1$ (r_{VD1}), $\sum r_{ш1} = r_{VT1} + r_{VD1}$, Ом;

$\sum r_{ш2}$ – сопротивление шунтирующей цепи, состоящей из сопротивления $VT2$ (r_{VT2}), $VD2$ (r_{VD2}) и резистора ослабления возбуждения ($r_{об}$),
 $\sum r_{ш2} = r_{VT2} + r_{VD2} + r_{об}$, Ом.

Так как ток в шунтирующих цепях, согласно алгоритму работы предлагаемой системы ОБ ТЭД, проходит не одновременно, то

$$I_B = I_A - I_{ш1} \text{ и } I_B = I_A - I_{ш2}. \quad (2.31)$$

Рассмотрим первую шунтирующую цепь, когда $I_B = I_A - I_{ш1}$. Тогда

$$I_B \cdot r_B = I_A \cdot \sum r_{ш1} - I_B \cdot \sum r_{ш1} + U_{T(VT1)} + U_{T(VD1)},$$

$$\frac{I_B}{I_A} \cdot (r_B + \sum r_{ш1}) = \sum r_{ш1} + \frac{U_{T(VT1)}}{I_A} + \frac{U_{T(VD1)}}{I_A},$$

так как $\beta = \frac{I_B}{I_A}$, то

$$\beta_1 = \frac{I_A \cdot \sum r_{ш1} + U_{T(VT1)} + U_{T(VD1)}}{I_A \cdot (r_B + \sum r_{ш1})} = \frac{I_A \cdot r_{VT1} + I_A \cdot r_{VD1} + U_{T(VT1)} + U_{T(VD1)}}{I_A \cdot (r_B + r_{VT1} + r_{VD1})}$$

Рассмотрим вторую шунтирующую цепь, когда $I_B = I_A - I_{ш2}$. Тогда

$$I_B \cdot r_B = I_A \cdot \sum r_{ш2} - I_B \cdot \sum r_{ш2} + U_{T(VT2)} + U_{T(VD2)},$$

$$\frac{I_B}{I_A} \cdot (r_B + \sum r_{ш2}) = \sum r_{ш2} + \frac{U_{T(VT2)}}{I_A} + \frac{U_{T(VD2)}}{I_A},$$

$$\beta_2 = \frac{I_A \cdot \sum r_{ш2} + U_{T(VT2)} + U_{T(VD2)}}{I_A \cdot (r_B + \sum r_{ш2})} = \frac{I_A \cdot r_{VT2} + I_A \cdot r_{VD2} + I_A \cdot r_{об} + U_{T(VT2)} + U_{T(VD2)}}{I_A \cdot (r_B + r_{VT2} + r_{VD2} + r_{об})}. \quad (2.32)$$

Тогда коэффициент ОБ ТЭД согласно алгоритму работы *IGBT*-транзисторов равен

$$\beta_{\text{общ}} = \beta_1 \cdot \frac{t_1}{T} + \beta_2 \cdot \frac{(T-t_1)}{T}, \quad (2.33)$$

или

$$\beta_{\text{общ}} = \frac{I_{\text{я}}(r_{VT1}+r_{VD1})+U_{\text{T}}(VT1)+U_{\text{T}}(VD1)}{I_{\text{я}}(r_{\text{Б}}+r_{VT1}+r_{VD1})} \cdot \frac{t_1}{T} + \frac{I_{\text{я}}(r_{VT2}+r_{VD2}+r_{\text{ОБ}})+U_{\text{T}}(VT2)+U_{\text{T}}(VD2)}{I_{\text{я}}(r_{\text{Б}}+r_{VT2}+r_{VD2}+r_{\text{ОБ}})} \cdot \frac{(T-t_1)}{T}. \quad (2.34)$$

Электромагнитные процессы ТЭД при работе предлагаемой системы ОВ ТЭД согласно алгоритму работы (рисунок 2.18) можно описать следующими системами дифференциальных уравнений

при t_1

$$\begin{cases} U_{\text{Б}} = C_{\text{В}} \Phi \cdot V + I_{\text{я}} \cdot (r_{\text{я}} + r_{\text{с}}) + I_{\text{Б}} \cdot r_{\text{Б}} + (L_{\text{я}} + L_{\text{с}}) \cdot \frac{dI_{\text{я}}}{dt_1} + 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot w_{\text{Б}} \cdot \frac{d\Phi}{t_1}; \\ I_{\text{Б}} \cdot r_{\text{Б}} - I_{\text{ш1}} \cdot r_{\text{ш1}} + U_{\text{T}}(VT1) + U_{\text{T}}(VD1) + 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot w_{\text{ОБ}} \cdot \frac{d\Phi}{t_1} = 0; \\ I_{\text{Б}} \cdot r_{\text{Б}} - I_{\text{пш}} \cdot r_{\text{пш}} + 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot w_{\text{Б}} \cdot \frac{d\Phi}{dt_1} = 0; \\ I_{\text{я}} = I_{\text{ОБ}} + I_{\text{ш1}} + I_{\text{пш}}; \\ \Phi = \Phi_1(t_1) + \Phi_2(t_1) = \Phi_y \left(1 - \varphi e^{-\frac{t_1}{\tau_{\text{ВХ}}}} - (1 - \varphi) e^{-\frac{t_1}{\tau_{\text{ВХ}}}} \right), \end{cases} \quad (2.35)$$

при $T-t_1$

$$\begin{cases} U_{\text{Б}} = C_{\text{В}} \Phi \cdot V + I_{\text{я}} \cdot (r_{\text{я}} + r_{\text{с}}) + I_{\text{Б}} \cdot r_{\text{Б}} + (L_{\text{я}} + L_{\text{с}}) \cdot \frac{dI_{\text{я}}}{d(T-t_1)} + 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot w_{\text{Б}} \cdot \frac{d\Phi}{d(T-t_1)}; \\ I_{\text{Б}} \cdot r_{\text{Б}} - I_{\text{ш2}} \cdot r_{\text{ш2}} + U_{\text{T}}(VT2) + U_{\text{T}}(VD2) + 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot w_{\text{ОБ}} \cdot \frac{d\Phi}{d(T-t_1)} = 0; \\ I_{\text{Б}} \cdot r_{\text{Б}} - I_{\text{пш}} \cdot r_{\text{пш}} + 2 \cdot p \cdot \sigma \cdot w_{\text{Б}} \cdot \frac{d\Phi}{d(T-t_1)} = 0; \\ I_{\text{я}} = I_{\text{ОБ}} + I_{\text{пш}} + I_{\text{ш2}}; \\ \Phi = \Phi_1(T-t_1) + \Phi_2(T-t_1) = \Phi_y \left(1 - \varphi e^{-\frac{(T-t_1)}{\tau_{\text{ВХ}}}} - (1 - \varphi) e^{-\frac{(T-t_1)}{\tau_{\text{ВХ}}}} \right). \end{cases} \quad (2.36)$$

По протекающему току и напряжению шунтирующей цепи обмотки возбуждения ТЭД электровоза выбраны транзисторы типа СМ1400НА-24S и диоды типа RM1400НА-24S. На рисунках 2.19 и 2.20 приведены выходные характеристики полупроводниковых приборов, анализируя которые, можно сделать вывод о том, что дифференциальное сопротивление полупроводниковых

приборов не превышает 0,001 Ом, что значительно меньше сопротивления шунтирующей цепи штатной системы ОВ ТЭД электровоза.

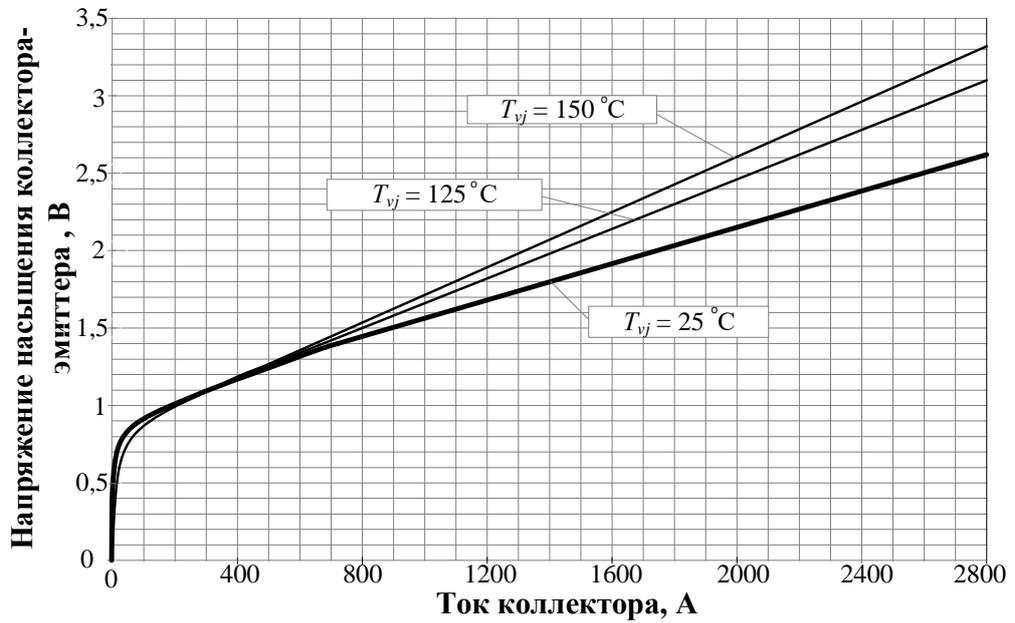


Рисунок 2.19 – Характеристика напряжения насыщения коллектора-эмиттера транзистора

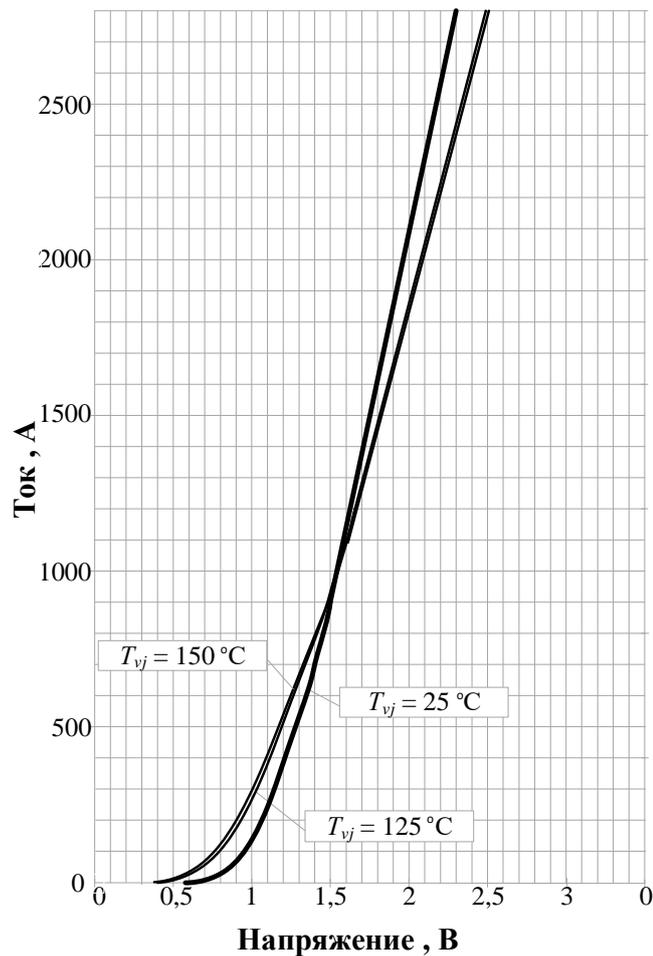


Рисунок 2.20 – Выходная характеристика диода

Переменная составляющая тока возбуждения ТЭД при работе шунтирующей цепи с транзистором $VT1$ при полном его открытии практически равна нулю, согласно выражению [101]

$$I_{пв} = \frac{r_{ш}}{\sqrt{r_{ш}^2 + x_B^2}} I_{пя}, \quad (2.37)$$

где $I_{пя}$ – переменная составляющая тока якоря ТЭД, 148 А при пульсации тока $\pm 24\%$ в номинальном режиме;

x_B – индуктивное сопротивление ОБ, 3,28 Ом.

$$I_{пв} = \frac{0,002}{\sqrt{0,002^2 + 3,38^2}} 148 = 0,09 \text{ А.}$$

Поэтому в следствии незначительного сопротивления данных полупроводниковых приборов по сравнению с сопротивлением обмотки возбуждения вся переменная составляющая тока возбуждения пройдет по шунтирующей цепи (рисунок 2.18 з, д).

Шунтирующая цепь с транзистором $VT2$ имеет резистор ОБ ($R_{об}$) с сопротивлением 0,1 Ом, при работе данной цепи переменная составляющая тока возбуждения при полном его открытии согласно формуле (2.46) может достигать

$$I_{пов} = \frac{0,1002}{\sqrt{0,1002^2 + 3,38^2}} 148 = 4,39 \text{ А.}$$

Согласно алгоритму работы предлагаемой системы ОБ ТЭД электровоза, шунтирующие цепи с транзисторами $VT1$ - $VT2$ работают одновременно. В следствии того, что время работы шунтирующей цепи с транзистором $VT2$ при ОБ

ТЭД от 70 – 43 % составляет не более 10 % всего полупериода, переменная составляющая тока возбуждения ТЭД не успевает возрасти до 4,39 А.

Таким образом, можно сказать что коэффициент относительной пульсации тока возбуждения ΔI_v при работе предлагаемой системы ОВ ТЭД на базе *IGBT*-транзисторов не превысит 1 % (рисунок 2.18 в). Согласно протоколу ЭМ-03-2007 «Квалификационные испытания тягового двигателя пульсирующего тока типа НБ-514б» относительная пульсация тока возбуждения составляет 8 %, следовательно, предлагаемая система ОВ ТЭД позволит снизить пульсацию тока возбуждения не менее чем на 80 %, что позволит увеличить коммутационную устойчивость ТЭД электровоза.

На рисунках 2.21 и 2.22 представлены преобразованные векторные диаграммы переменных составляющих ЭДС и МДС в ТЭД при работе усовершенствованной системы ОВ ТЭД электровоза.

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 2.21). 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 2.13.

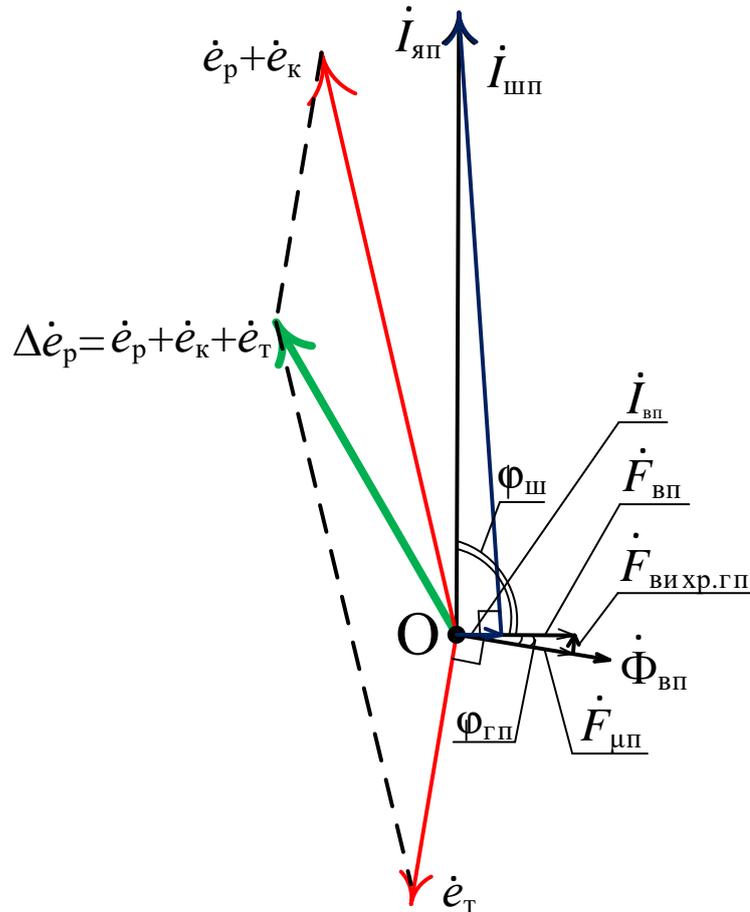


Рисунок 2.22 – Векторная диаграмма переменных составляющих ЭДС в ТЭД в режиме ОВ ТЭД с применением предлагаемой системы ОВ

Таким образом, при сравнении векторных диаграмм переменных ЭДС (рисунки 2.13, 2.16 и 2.21, 2.22), 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 $\Delta e_p = e_k + e_p + e_t$, что улучшает коммутационную устойчивость ТЭД электровоза [19, 22].

2.4 Выводы по разделу 2

1 Выявлено, что ступенчатое регулирование ОВ ТЭД вызывает потери скорости и ускорения, которые можно исключить при плавном регулировании, что позволяет сделать современная полностью управляемая база силовой электроники.

2 При моделировании электровоза ЗЭС5К с плавным регулированием ОВ ТЭД на участке Зима – Иркутск-Сортировочный ВСЖД филиала ОАО «РЖД» получено, что плавное регулирование тока возбуждения позволит повысить техническую скорость ЭПС не менее чем на 2,5 км/ч.

3 Исследовано влияние пульсаций тока возбуждения на коммутационную устойчивость ТЭД электровоза. Построены векторные диаграммы переменных составляющих МДС и ЭДС в ТЭД, позволяющие оценить их качественную характеристику.

4 Разработана усовершенствованная система ОВ ТЭД на базе *IGBT*-транзисторов с алгоритмом управления, позволяющим плавно регулировать ток возбуждения, что позволит увеличить скорость движения ЭПС, а также снизить пульсацию тока возбуждения не менее чем на 80 %, что уменьшит величину небалансной ЭДС, а, следовательно, улучшит коммутационную устойчивость ТЭД.

3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ТЯГОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ – КОНТАКТНАЯ СЕТЬ – ЭЛЕКТРОВОЗ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ ТЯГИ ПРИ РАБОТЕ ШТАТНОЙ И ПРЕДЛАГАЕМОЙ СИСТЕМ ОСЛАБЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

3.1 Разработка функциональной схемы электровоза переменного тока в расчете на одну тележку при работе штатной и предлагаемой систем ослабления возбуждения тяговых электрических двигателей электровоза переменного тока

В современном мире математическое моделирование получило широкое распространение. Оно позволяет повысить эффективность инженерных разработок за счет ускоренного процесса разработки сложных физических моделей, а также при экономии времени и материальные затраты на экспериментальный подход получить результаты для аналитического обоснования идеи. Система *Matlab Simulink* занимает одной из основных мест среди существующих программных обеспечений. Пакет *Simulink*, интегрированный в *Matlab*, содержит библиотеку необходимых блоков для моделирования электрических принципиальных схем [104]. Поэтому данная система была использована для исследования электромагнитных процессов в системе «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз».

В разработку математической модели «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» огромный вклад внесли такие учёные как А.Н. Савоськин, С.В. Власьевский, Ю.М. Кулинич, Б.И. Косарев. Именно эти работы взяты за основу, рассматриваемой в данной диссертационной работе, математической модели.

Основной частью математической модели системы «Тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз», работающая в режиме ОВ ТЭД является математическая модель электровоза. Протекание переходных процессов механической части электровоза, который представляет собой систему «экипаж – тяговый привод – колесо – рельс», занимает значительно большее время по сравнению со временем протекания электромагнитных процессов в ТЭД. Исходя из этого, в данной работе воздействие механической системы электровоза на электрическую не учитывалось, поэтому модель механической части электровоза не использовалась [11].

Математическая модель электровоза переменного тока представляет комплексную систему, которая состоит из нескольких взаимодействующих между собой подсистем [65]. За основу силовой электрической схемы в математической модели взята силовая электрическая схема электровоза переменного тока серии ЗЭС5К, работающего в тяговом режиме при работе ОВ ТЭД [106].

На рисунке 3.1 изображена функциональная схема математической модели подсистемы «Электровоз», работающая в тяговом режиме с использованием штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД. Схема включает в себя тяговый трансформатор (ТТ), за прототип которого принят ОНДЦЭ-4350/25-У2, питающийся от контактной сети напряжением 25 кВ; выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП) типа ВИП-4000М, сглаживающий реактор РС-19 и ТЭД типа НБ-514Б, а также блоки измерения, к которым относят датчики токов якоря и возбуждения (ДТЯ, ДТВ), датчик скорости (ДС) [106].

Управление ВИП осуществляется с помощью контроллера машиниста (КМЭ) или автоматически (в режиме автоведения) путем изменения углов открытия тиристорov ВИП, за счёт задания скорости и тока. Сигналы от КМ подаются на БУ электровоза. Информация об углах коммутации на БУ поступает от датчиков углов коммутации (Т21 и Т22), о значениях токов якоря и возбуждения – от датчиков тока (ДТЯ и ДТВ), которые формируют напряжения, пропорциональные токам якоря и возбуждения ТЭД. На БУ от датчиков скорости (ДС) поступает сигнал

СФИ ВИП питается от обмотки собственных нужд (ОСН) 380 В ТТ. БУ обеспечивает плавное четырехзонное регулирование напряжения на ТЭД.

После полного открытия тиристорov на четвертой зоне регулирования дальнейшее увеличение скорости достигается ОВ ТЭД. Блок ОВ в штатном режиме включает в себя резистор ОВ, ИШ и контактора, которые управляются БУ. При работе штатной системы ОВ ТЭД включается контактор (К1). При предлагаемом способе блок ОВ включает в себя *IGBT*-транзисторы, которые управляются БУ ОВ ТЭД. При работе предлагаемой системы К1 выключается, включается К2 (рисунок 3.1).

На основании функциональной схемы электровоза 3ЭС5К, разработана схема упрощенного представления системы «Тяговая подстанция - контактная сеть - электровоз», которая включает схемы замещения системы электроснабжения, тягового трансформатора (ТТ), ВИП на IV зоне регулирования и ТЭД, работающего в режиме ОВ со штатной системой (рисунок 3.2). Работой контакторов ОВ (К1-К3) управляет микропроцессорная система управления диагностикой (МСУД) автоматически или с помощью кнопок монитора блока индикации. При этом блок ввода - вывода (БВВ-041) МСУД подаёт питание на электропневматические вентили, соответствующих контакторов ОВ.

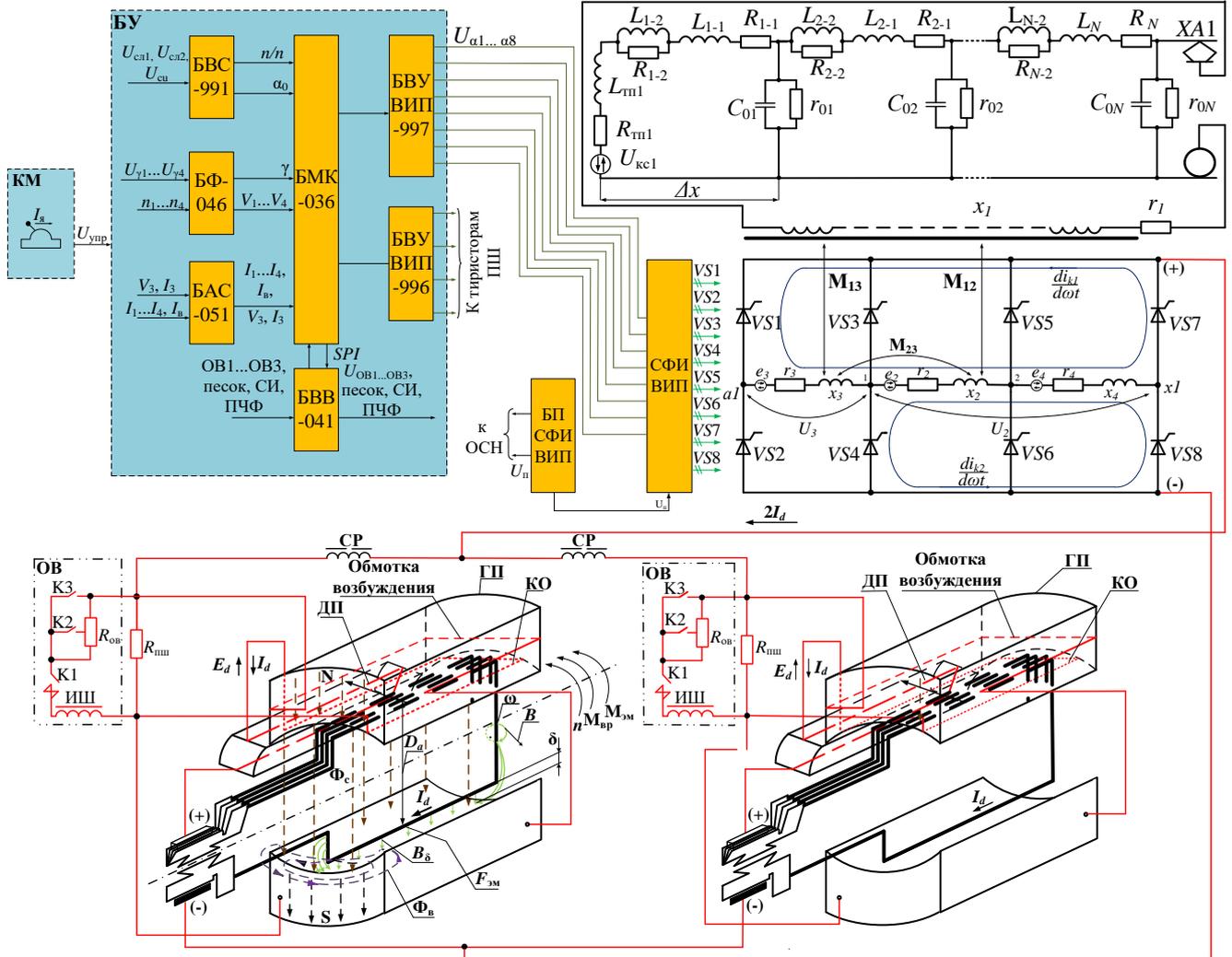


Рисунок 3.2 – Упрощенное представление системы «Тяговая подстанция-контактная сеть - электровоз» с использованием штатной системы ОВ ТЭД в расчете на одну тележку

На рисунке 3.3 представлена схема упрощенного представления системы «Тяговая подстанция-контактная сеть-электровоз» с использованием предлагаемой системы ОВ ТЭД в расчете на одну тележку [30]. Регулирование ОВ ТЭД осуществляется за счет управления IGBT-транзисторами (VT1-VT4). Для этого в МСУД добавлены следующие блоки:

- блок аналоговых сигналов (БАС), предназначенный для согласования по уровню сигналов аналоговых датчиков тока цепи выпрямленного тока и напряжения;
- блок выходных усилителей для VT1-VT4, предназначен для усиления сигналов управления модулями IGBT, поступающими от блока микроконтроллеров (БМК) до величины, необходимой для работы драйверов;

- IGBT драйвера (*IGBT1 – IGBT4*), представляющие собой усилители мощности импульсов и предназначенные для непосредственного управления *VT1-VT4*.

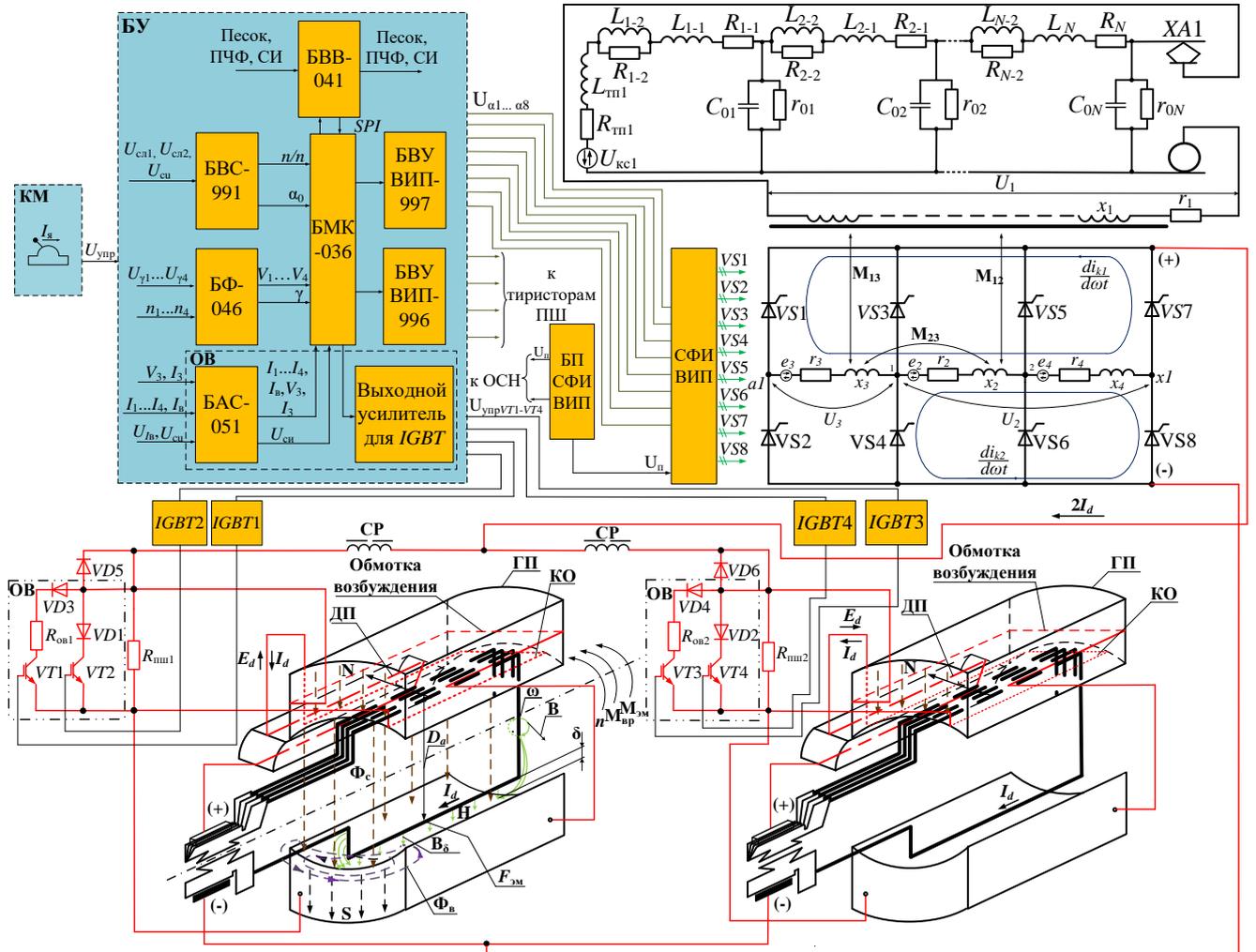


Рисунок 3.3 – Упрощенное представление системы «Тяговая подстанция-контактная сеть-электровоз» с использованием предлагаемой системы ОВ ТЭД в расчете на одну тележку

Таким образом, МСУД автоматически или с помощью кнопок монитора блока индикации о включении соответствующей ступени ОВ ТЭД переходит на обработку подпрограммы ОВ. Результаты обработки данных ($U_{ОВ1...ОВ3}$) выдаются через блок выходных усилителей на драйвера *VT1-VT4*.

3.2 Моделирование системы электроснабжения для электровоза переменного тока в среде *MatLab Simulink*

Модель участка тяговой сети некоторой длиной Δx представлена в виде последовательно соединенных Г-образных конечных элементов, которые представляют схему замещения участков контактной сети длиной 400 м. Данная модель предложена профессором МИИТа Б.И. Косаревым, на основании выполнения параметрического синтеза нелинейной схемы замещения контактной сети, учитывающей влияние поверхностного эффекта, которому обусловлено изменение активного сопротивления и индуктивности линии в зависимости от частоты [2, 5, 6, 7, 9, 67, 96].

Уравнения для расчёта значений активной и индуктивной составляющей схемы имеют вид

$$\begin{cases} r_p(\omega) = r_{1-1} + \frac{r_{1-2}\omega^2 L_{1-2}^2}{r_{1-2}^2 + \omega^2 L_{1-2}^2} \\ L_p(\omega) = L_{1-1} + \frac{r_{1-2} L_{1-2}}{r_{1-2}^2 + \omega^2 L_{1-2}^2} \end{cases} \quad (3.1)$$

Значения элементов схемы замещения участка тяговой сети для участка длиной 400 м были получены при многокритериальной оптимизации искомых параметров, представленных в работе [116]

$$L_{1-1}=2,48 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}, R_{1-1}=5,31 \cdot 10^{-2} \text{ Ом};$$

$$L_{1-2}=4,4 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}, R_{1-2}=0,47 \text{ Ом};$$

$$C_0=11,6 \text{ нФ}, R_0=1/g_0=2,4 \cdot 10^6 \text{ Ом}.$$

Последовательно включенные: идеальный источник ЭДС ($e_{\text{тп}}$), активное сопротивление ($R_{\text{тп}}$) и индуктивность ($L_{\text{тп}}$) представляют собой модель тяговой подстанции [116].

Величина ЭДС определяется согласно выражению

$$e_{\text{ТП}} = E_{\text{ТП}} \sqrt{2} \sin 2\pi f t, \quad (3.2)$$

где f – частота питающей ЭДС, равная 50 Гц;

$E_{\text{ТП}}$ – действующее значение ЭДС тяговой подстанции, В.

Величина $E_{\text{ТП}}$ принимается на 10 % больше номинального значения данной величины $E_{\text{ТП}} = 1,1E_{\text{ТП.ном}}$, таким образом $E_{\text{ТП}} = 1,1 \cdot 25000 = 27500$ В. Параметры тяговой подстанции при питании от трансформатора мощностью 40 МВА с индуктивным сопротивлением $X_{L\text{ТП}} = 3,8$ Ом при частоте 50 Гц равны $L_{\text{ТП}} = 67,662$ мГн, $R_{\text{ТП}} = 0,2$ Ом [3, 54].

В работе моделируется участок фидерной зоны двухстороннего питания, который состоит из 100 конечных элементов, каждый из которых имитирует 400 м контактной сети, расстояние между тяговыми подстанциями составляет 40 км. Принимается, что электровоз максимально удален от тяговой сети (середина фидерной зоны). На рисунке 3.4 представлена блок-схема фидерной зоны с двухсторонним питанием и включением электровоза, выполненная в редакторе *Simulink*.

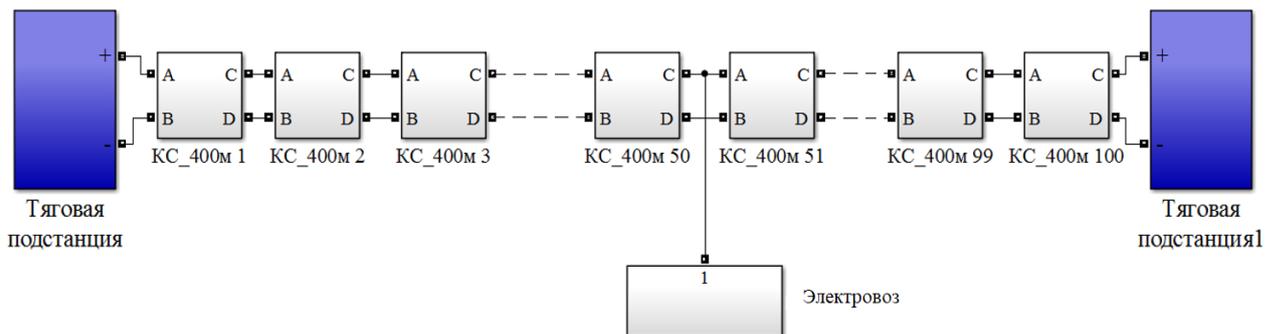


Рисунок 3.4 – Блок-схема фидерной зоны с двухсторонним питанием и включением электровоза, выполненная в редакторе *Simulink*

3.3 Математическая модель тягового трансформатора электровоза переменного тока ЗЭС5К

При построении математической модели тягового трансформатора электровоза ЗЭС5К используются параметры трансформатора типа ОНДЦЭ-4350/25 [106].

Схема замещения ТТ электровоза представляет собой многообмоточную систему с магнитными связями. При этом распределёнными параметрами ёмкостей обмоток пренебрегаем, а распределённые параметры индуктивностей обмоток для каждого интервала времени работы ТТ считаем сосредоточенными и постоянными [11].

При работе ТТ на четвертой зоне регулирования ВИП электромагнитные процессы, согласно рисункам 3.2 и 3.3 описываются следующей системой дифференциальных уравнений [89]

$$u_1 = i_1 \cdot r_1 + L_{1\sigma} \cdot \frac{di_1}{dt} + w_1 \cdot \frac{d\Phi_0}{dt}, \quad (3.3)$$

$$u_2 = i_2 \cdot (r_2 + r_4) + (L_{2\sigma} + L_{4\sigma}) \cdot \frac{di_2}{dt} + (w_2 + w_4) \cdot \frac{d\Phi_0}{dt}, \quad (3.4)$$

$$u_3 = i_3 \cdot r_3 + L_{3\sigma} \cdot \frac{di_3}{dt} + w_3 \cdot \frac{d\Phi_0}{dt}, \quad (3.5)$$

где u_1, u_2, u_3 – напряжения первичной и соответствующих вторичных обмоток ТТ;

I_1, I_2, I_3 – токи первичной и соответствующих вторичных обмоток ТТ;

R_1, R_2, R_3, R_4 – активные сопротивления первичной и соответствующих вторичных обмоток ТТ;

$L_{1\sigma}, L_{2\sigma}, L_{3\sigma}, L_{4\sigma}$ – индуктивности рассеяния первичной и вторичных обмоток ТТ;

w_1, w_2, w_3, w_4 – число витков первичной и вторичных обмоток ТТ;

Φ_0 – основной магнитный поток в магнитопроводе ТТ.

На IV зоне регулирования вторичная обмотка ТТ (a1-1) с напряжением U_3 имеет активное сопротивление R_3 , индуктивное L_3 с числом витков w_3 . Что касается

вторичной обмотки ТТ (1-х1) с напряжением U_3 ее активное сопротивление складывается из $(R_2 + R_4)$, индуктивное из $(L_2 + L_4)$ с числом витков $(w_2 + w_4)$.

Согласно теории электромагнитных процессов, происходящих в ТТ, основной магнитный поток в его магнитопроводе создается совместным действием МДС первичной и вторичных обмоток [37, 59]. Следовательно, основной магнитный поток магнитопровода Φ_0 , определяется по формуле

$$\Phi_0 = \frac{i_1 w_1 + i_2 w_2 + i_3 w_3 + i_4 w_4}{R_\mu} = \lambda_\mu (i_1 w_1 + i_2 (w_2 + w_4) + i_3 w_3), \quad (3.6)$$

где R_μ – магнитное сопротивление ТТ;

λ_μ – магнитная проводимость магнитопровода ТТ.

Согласно второму закону Кирхгофа для магнитных цепей, подставив выражение (3.6) в уравнения (3.3 - 3.5), получим систему дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные переходные процессы ТТ электровоза

$$u_1 = i_1 r_1 + (L_{1\sigma} + w_1^2 \lambda_\mu) \frac{di_1}{dt} + w_1 (w_2 + w_4) \lambda_\mu \frac{di_2}{dt} + w_1 w_3 \lambda_\mu \frac{di_3}{dt}, \quad (3.7)$$

$$u_2 = i_2 r_2 + ((L_{2\sigma} + L_{4\sigma}) + (w_2 + w_4)^2 \lambda_\mu) \frac{di_2}{dt} + (w_2 + w_4) w_1 \lambda_\mu \frac{di_1}{dt} + (w_2 + w_4) w_3 \lambda_\mu \frac{di_3}{dt}, \quad (3.8)$$

$$u_3 = i_3 r_3 + (L_{3\sigma} + w_3^2 \lambda_\mu) \frac{di_3}{dt} + w_3 w_1 \lambda_\mu \frac{di_1}{dt} + w_3 (w_2 + w_4) \lambda_\mu \frac{di_2}{dt}, \quad (3.9)$$

где $w_1^2 \lambda_\mu = M_{11}$ – взаимная индуктивность первичной обмотки ТТ;

$(w_2 + w_4) w_1 \lambda_\mu = M_{11} \frac{1}{K_{T12}} = M_{12}$, $w_1 w_3 \lambda_\mu = M_{11} \frac{1}{K_{T13}} = M_{13}$ – взаимные индуктивности между первичной и соответствующими вторичными обмоткам ТТ;

$(w_2 + w_4) w_3 \lambda_\mu = M_{11} \frac{1}{K_{T12}} \cdot \frac{1}{K_{T13}} = M_{23}$ – взаимная индуктивность между вторичными обмотками ТТ, где K_{T12} , K_{T13} – коэффициенты трансформации ТТ между первичной и соответствующей вторичной обмоткой, $K_{T12} = \frac{w_1}{w_2}$, $K_{T13} = \frac{w_1}{w_3}$;

$w_2^2 \lambda_\mu = M_{11} \frac{1}{K_{T12}^2} = M_{22}$, $w_3^2 \lambda_\mu = M_{11} \frac{1}{K_{T13}^2} = M_{33}$ – взаимные индуктивности

обмоток ТТ;

$L_{1\sigma} + M_{11} = L_1$ – полная индуктивность первичной обмотки ТТ;

$L_{2\sigma} + M_{22} = L_2$, $L_{3\sigma} + M_{33} = L_3$, $L_{4\sigma} + M_{44} = L_4$ – полные индуктивности соответствующих вторичных обмоток ТТ.

Используя принятые обозначения и проведя соответствующие преобразования уравнений (3.7 – 3.9) получим следующую систему уравнений [14, 15]

$$u_1 = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt}, \quad (3.10)$$

$$u_2 = M_{12} \frac{di_1}{dt} + i_2 r_2 + (L_2 + L_4) \frac{di_2}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt}, \quad (3.11)$$

$$u_3 = M_{13} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_2}{dt} + i_3 r_3 + L_3 \frac{di_3}{dt}, \quad (3.12)$$

Систему уравнений (3.7) – (3.9) записывается в матричной форме

$$\begin{vmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_1 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} \\ M_{12} & L_2 & M_{23} \\ M_{13} & M_{23} & L_3 \end{vmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{vmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{vmatrix}. \quad (3.13)$$

Для ТТ типа ОНДЦЭ-4350/25 параметры модели имеют следующие значения

$$R = \begin{vmatrix} 0.556 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0007855 & 0 \\ 0 & 0 & 0.001571 \end{vmatrix},$$

$$M = \begin{vmatrix} 29.176 & 0.367 & 0.734 \\ 0.367 & 0.0046314 & 0.00925 \\ 0.734 & 0.00925 & 0.0092628 \end{vmatrix}.$$

По главным диагоналям матрицы R расположены значения активных сопротивлений, а в матрице M – полных индуктивностей обмоток ТТ. Слева и справа от главной диагонали матрицы M представлены значения взаимных индуктивностей между обмотками ТТ.

Модель ТТ реализуется при помощи блока *Multi-Winding Transformer* пакета *Simulink*, моделирующего однофазный многообмоточный ТТ (рисунок 3.5). В его блоке учитывается нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника.

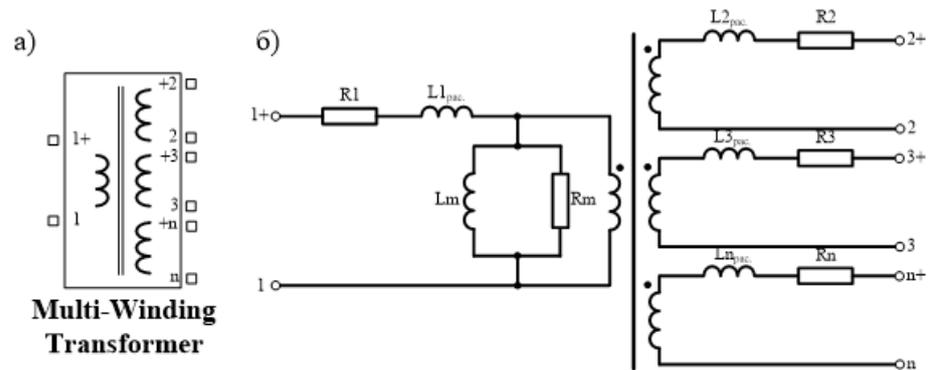


Рисунок 3.5 – Пиктограмма (а) и схема модели многообмоточного трансформатора (б) в библиотеке *Simulink*

В модели ТТ параметры схемы замещения задаются в относительных величинах, расчёт которых производится согласно паспортным данным выбранного прототипа ТТ.

Блок-схема модели ТТ, разработанная в пакете *Simulink*, показана на рисунке 3.6.

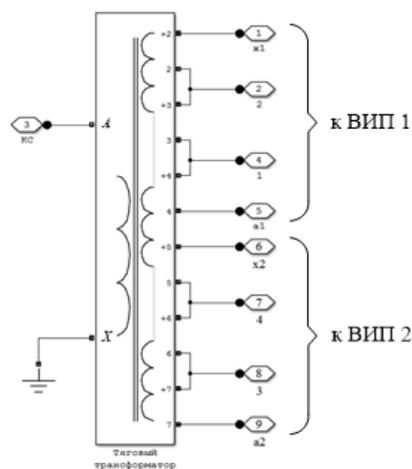


Рисунок 3.6 – Блок-схема тягового трансформатора Ондцэ-4350/25 электровоза ЗЭС5К в пакете *Simulink*

Номинальные действующие напряжения обмоток ТТ приведены в [106] и

имеют следующие значения:

$$U_1 (\text{вывод } A-X) = 25 \text{ кВ};$$

$$U_2 (\text{вывод } aI-xI) = 1260 \text{ В};$$

$$U_2 (\text{вывод } 2-xI) = 630 \text{ В};$$

$$U_2 (\text{вывод } I-xI) = 945 \text{ В}.$$

3.4 Математическая модель ВИП в режиме тяги на четвертой зоне регулирования электровоза 3ЭС5К

На электровозе переменного тока для преобразования переменного тока и обеспечения плавного регулирования напряжения на ТЭД используется ВИП, который имеет четыре зоны регулирования. ОВ ТЭД применяется, когда достигнуто максимальное напряжение на ТЭД, т.е. в конце четвертой зоны регулирования [89].

На рисунках 3.2 и 3.3 изображен ВИП при работе на 4-ой зоне регулирования с интервалами коммутации в большом контуре, когда ток коммутации $I_{к1}$ замыкается по цепи: плечо $VS1$, секции $aI-1$, $1-2$, $2-xI$, плечо $VS7$ и в малом контуре, когда ток коммутации $I_{к2}$ замыкается по цепи: плечо $VS4$, секция $1-2$, $2-xI$, плечо $VS8$, [14, 15].

Согласно второму закону Кирхгофа, уравнение электрического равновесия в каждом контуре коммутации будет выглядеть как [7]

$$e = \frac{U_1}{K_T} = X_K \frac{di_k}{d\omega t}, \quad (3.14)$$

где e – ЭДС, наводимая в витках секции вторичной обмотки основным магнитным потоком ТТ;

U_1 – напряжение первичной обмотки ТТ;

K_T – коэффициент трансформации ТТ между первичной и секцией вторичной обмотки, находящейся в короткозамкнутом контуре коммутации;

X_K – эквивалентное индуктивное сопротивление обмоток ТТ в процессе

коммутации ВИП, приведённое к виткам одной или нескольких секций вторичной обмотки. Каждая малая секция обмотки ТТ имеет напряжение холостого хода (ХХ) 315 В и индуктивное сопротивление $X_2=X_3=X_{секц}$. Большая секция имеет напряжение равное сумме витков двух малых секций 630 В, а индуктивное сопротивление определяется как $X_4 = 2X_{секц}$.

Значения K_T и X_K для большого контура коммутации

$$K_{T1(2+3+4)} = \frac{U_1}{e_2+e_3+e_4} = 19,84,$$

$$X_{K(2+3+4)} = \frac{X_1}{K_{T1(2+3+4)}^2} + X_2 + X_3 + X_4 = \frac{X_1}{19,84^2} + 4X_{секц} = \frac{X_1+1574,52X_{секц}}{393,63}, \quad (3.15)$$

$$\frac{di_{k1}}{d\omega t} = \frac{e_2+e_3+e_4}{X_{K(2+3+4)}} = \frac{U_1}{K_{T1(2+3+4)}X_{K(2+3+4)}} = \frac{19,84U_1}{X_1+1574,52X_{секц}}. \quad (3.16)$$

Для малого контура коммутации

$$K_{T1(2+4)} = \frac{U_1}{e_2+e_4} = 26,4,$$

$$X_{K(2+4)} = \frac{X_1}{K_{T1(2+4)}^2} + X_2 + X_4 = \frac{X_1+2090,88X_{секц}}{696,96}, \quad (3.17)$$

$$\frac{di_{K2}}{d\omega t} = \frac{26,4U_1}{X_1+2090,88X_{секц}}. \quad (3.18)$$

Рассмотрим систему уравнений, которые описывают процессы коммутации в двух контурах, для нахождения выражений для $dI_k/d\omega t$

$$e_3 = \frac{di_{k1}}{d\omega t} X_{K3}, \quad (3.19)$$

$$e_2 = \left(\frac{di_{k1}}{d\omega t} + \frac{di_{k2}}{d\omega t} \right) X_{K2}, \quad (3.20)$$

$$e_4 = \left(\frac{di_{k1}}{d\omega t} + \frac{di_{k2}}{d\omega t} \right) X_{K4}. \quad (3.21)$$

После преобразований системы уравнений (3.19 – 3.21) будут выглядеть в общем виде выражения для производных токов коммутации в контурах

$$\begin{aligned} \frac{dI_{k1}}{d\omega t} &= \frac{e_3}{X_{K3}}, \\ \frac{dI_{k2}}{d\omega t} &= \frac{X_{K3}e_2 - X_{K2}e_3}{X_{K2}X_{K3}}. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Блок-схема ВИП, выполненная в редакторе *Simulink*, представлена на рисунке 3.7.

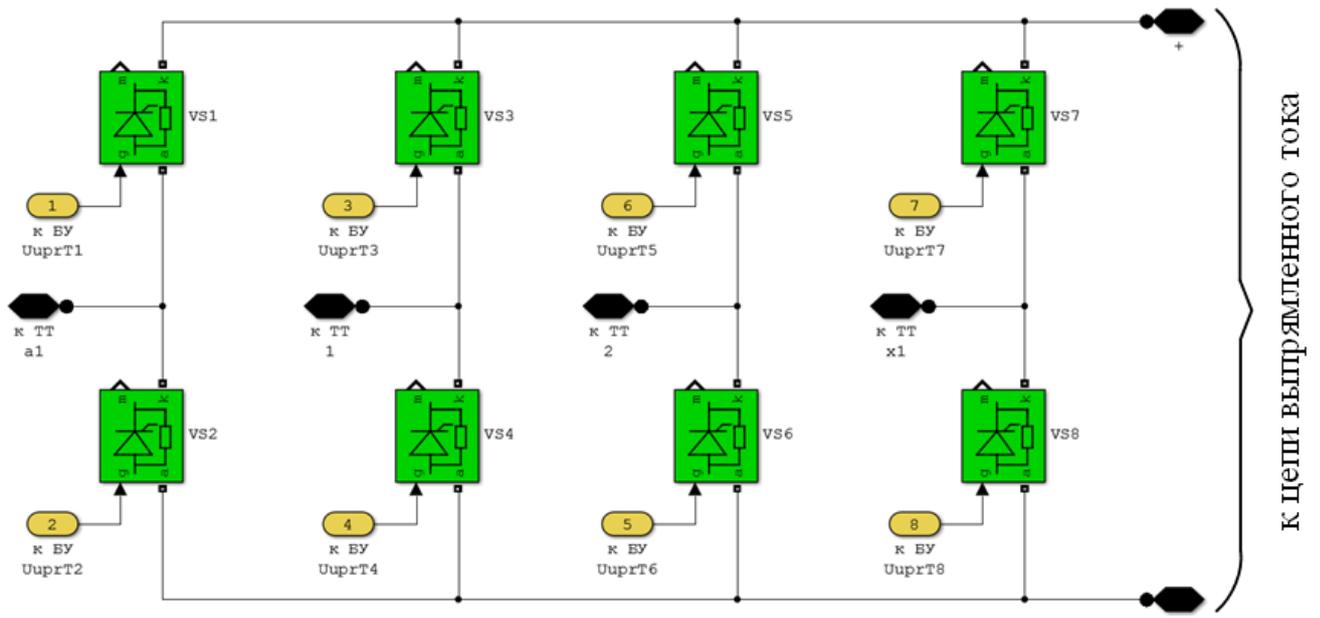


Рисунок 3.7 – Блок-схема ВИП в редакторе *Simulink*

В модели в качестве прототипа использовались тиристоры марки Т353-800, применяющиеся на ЭПС переменного тока.

3.5 Математическая модель цепи выпрямленного тока в режиме тяги при работе штатной и предлагаемой систем ослабления возбуждения тягового электродвигателя электровоза

Цепь выпрямленного тока, питающиеся от ВИП, состоит из двух параллельно включенных ТЭД со сглаживающим реактором (СР) [106].

Для получения электромагнитных процессов в ТЭД, которые соответствуют процессам на электровозе ЗЭС5К, модель ТЭД должна учитывать то, что ТЭД электровозов работают в пределах всей магнитной характеристики, включая зону насыщения, поэтому зависимость магнитного потока от тока является нелинейной. Индуктивность обмоток ТЭД также является переменной величиной (динамическая индуктивность), которая зависит от тока, протекающего по ним. В модели размагничивающее действие реакции якоря принимается скомпенсированным включением компенсационной обмотки и добавочных полюсов ТЭД. Механические процессы в модели тягового привода не учитываются, так как скорость электровоза за время расчета не успевает существенно измениться [4, 11, 44, 95].

Цепь выпрямленного тока при создании математической модели заменяется эквивалентной схемой, содержащей эквивалентные индуктивность L_d и активное сопротивление R_d ТЭД, которые определяются по следующим выражениям

$$L_{d\delta} = L_{CP} + \frac{1}{2} (L_{\text{я}} + L_{\text{ДП}} + L_{\text{КО}} + L_{\text{В}}), \quad (3.23)$$

$$R_{d\delta} = R_{CP} + \frac{1}{2} (R_{\text{я}} + R_{\text{ДП}} + R_{\text{КО}} + R_{\text{В}}), \quad (3.24)$$

где L_{CP} , R_{CP} – индуктивность и активное сопротивление СР;

$L_{\text{я}}$, $L_{\text{В}}$, $R_{\text{я}}$, $R_{\text{В}}$ – индуктивность и активное сопротивление ОЯ и обмотки возбуждения;

$L_{\text{ДП}}$, $R_{\text{ДП}}$ – индуктивность и активное сопротивление дополнительных полюсов;

$L_{\text{КО}}$, $R_{\text{КО}}$ – индуктивность и активное сопротивление компенсационной обмотки

ТЭД.

По данным [106], значения активных сопротивлений обмоток ТЭД НБ-514Е составляют:

- ЯО $R_d = 0,0237$ Ом (с учётом обмоток ДП и КО);
- обмотки возбуждения $R_e = 0,0069$ Ом.

В модели динамическая индуктивность определяется выражением [3]

$$L_{dэ} = L_d(i_d) + \frac{dL_d(i_d)}{di_d}. \quad (3.25)$$

В данной работе при разработке модели ТЭД применялись экспериментальные кривые магнитной характеристики и динамической индуктивности обмоток в соответствии с квалификационным испытанием ТЭД пульсирующего тока (протокол ЭМ-14-85) (рисунок 3.8 и 3.9).

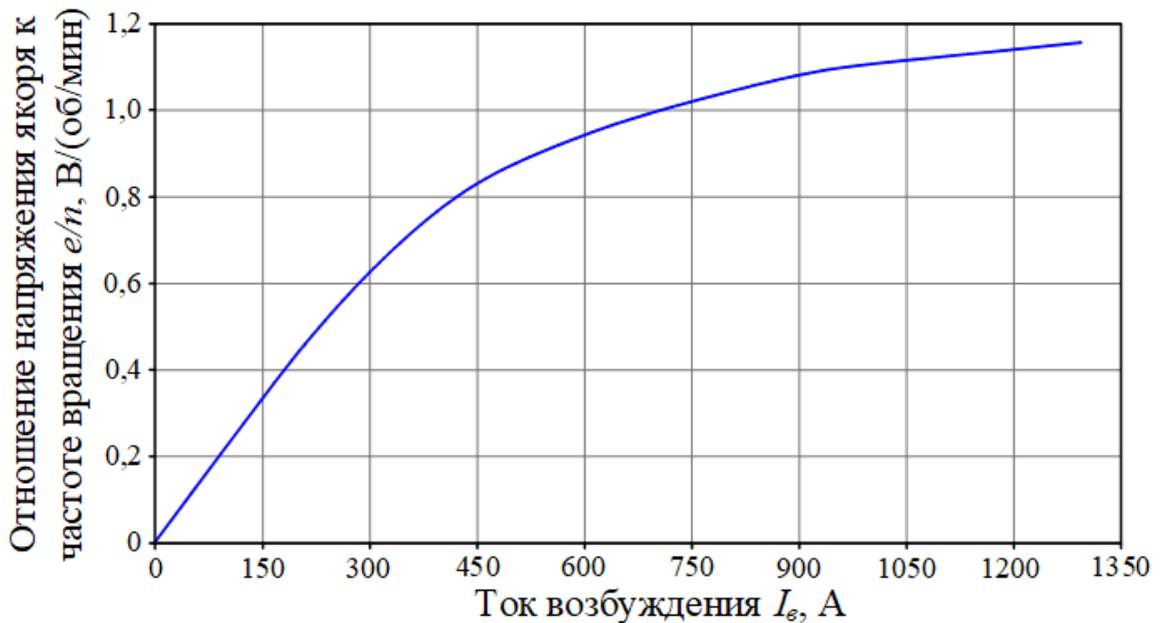


Рисунок 3.8 – Магнитная характеристика ТЭД

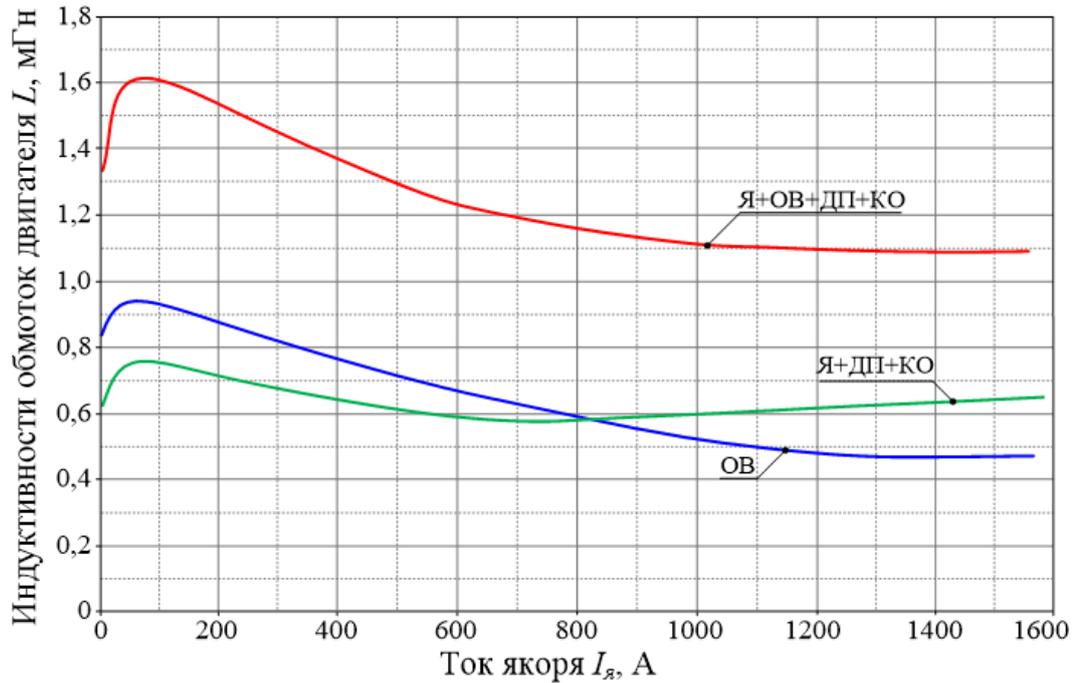


Рисунок 3.9 – Зависимость индуктивности обмоток ТЭД от величины тока якоря

Электромагнитные процессы в цепи выпрямленного тока описываются уравнениями 2.1 и 2.3.

Магнитная индуктивность L_{μ} определяется геометрическими размерами двигателя, электропроводностью остова и сердечника главных полюсов.

На основании выше описанных особенностей ТЭД, профессором ДВГУПС Ю.М. Кулиничем в пакете ORCAD была разработана модель ТЭД, которая учитывает нелинейность магнитной характеристики, динамическую индуктивность и вихревые токи. В работе [4] данная модель реализована в пакете *Simulink* и сравнивается с моделью машины постоянного тока *DC Machine*, имеющейся в библиотеке *SimPowerSystems*. Обе модели отражают переходные процессы, протекающие в ТЭД, погрешность которых не превышает допустимой величины. Поэтому в диссертационной работе использовалась модель двигателя постоянного тока из библиотеки *SimPowerSystems* пакета *Simulink*, так как *DC Machine* имеет значительное преимущество. Имеется возможность реализовать работу ТЭД в режиме тяги с применением штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД.

На рисунке 3.10 изображена блок-схема ТЭД со штатной системой ОВ

электровоза переменного тока, разработанная в среде *MatLab Simulink*, согласно рисунку 3.2 [18]. Параллельно обмотки возбуждения ТЭД устанавливаются резистор постоянной шунтировки ($R_{\text{шш}}$) и резистор ОВ ($R1$) с ИШ (ИШ1). Изменяя сопротивление резистора ($R1$), получаем три ступени ОВ ТЭД.

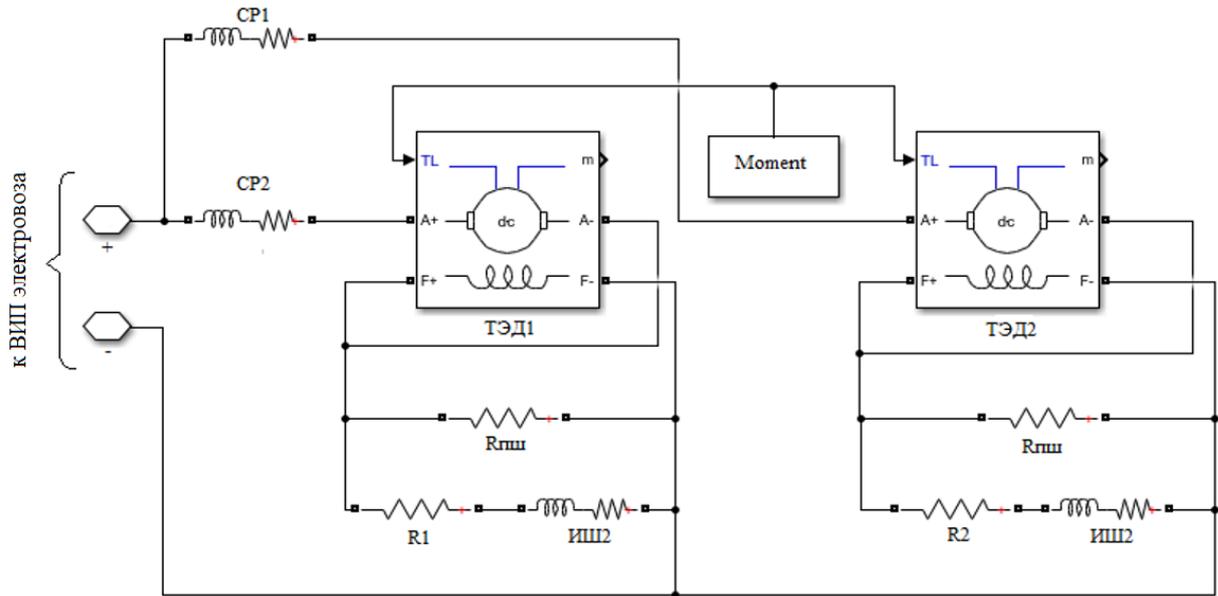


Рисунок 3.10 – Блок-схема ТЭД со штатной системой ОВ электровоза переменного тока в среде *MatLab Simulink*

На рисунке 3.11 изображена блок-схема ТЭД с предлагаемой системой ОВ электровоза, согласно рисунку 3.3, разработанная в среде *MatLab Simulink* [18]. Параллельно обмотке возбуждения ТЭД подключается диод (*Diode 3*) и *IGBT*-транзистор (*IGBT 1*). К положительной шине питания ТЭД подключается диод (*Diode 1*), который необходим для защиты транзистора. Для реализации ОВ ТЭД с помощью импульсного генератора (*Pulse Generator*), регулируется величина открытия *IGBT 1*. Параллельно *IGBT1* подключается последовательно включенные резистор ($R_{\text{оп1}}$) и *IGBT*-транзистор (*IGBT 3*), на который с помощью блока (*Logical Operator*) подаются управляющие сигналы в тот момент, когда *IGBT 1* выключен. Таким образом осуществляется ОВ ТЭД от 90 % до 43 %.

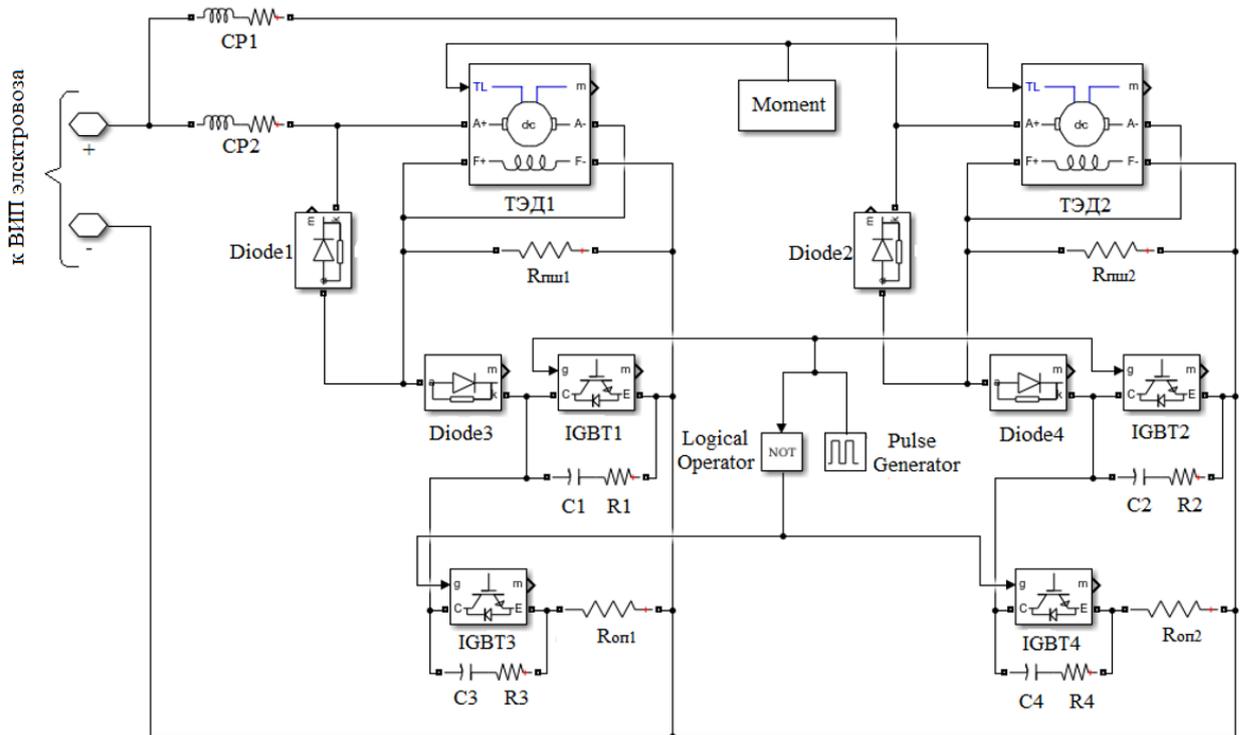


Рисунок 3.11 – Блок-схема ТЭД с предлагаемой системой ОБ электровоза переменного тока в среде *MatLab Simulink*

Модель *IGBT*-транзистора состоит из последовательно включенных резистора $R_{он}$, индуктивности $L_{он}$, источника постоянного напряжения V_f и ключа *SW* (рисунок 3.12). Блок логики управляет работой ключа. Включение прибора происходит в случае, если напряжение коллектор-эмиттер положительно и больше, чем V_f и на затвор транзистора подан положительный сигнал ($g > 0$). Выключение прибора происходит при уменьшении сигнала на затворе до нуля ($g = 0$). При отрицательном напряжении коллектор-эмиттер транзистор находится в выключенном состоянии.

В качестве прототипа транзисторов в модели использовались приборы марки *CM1400HA-24S*.

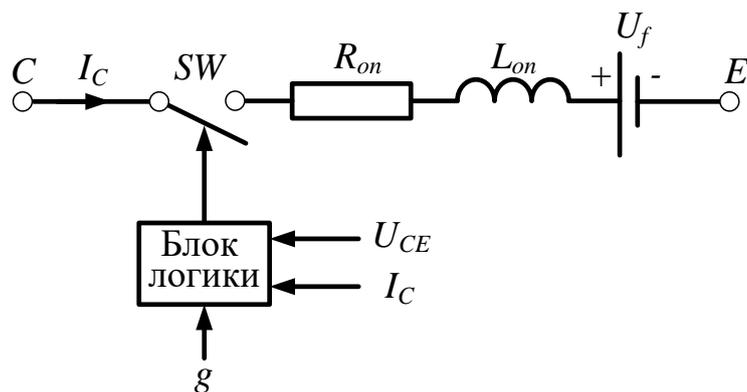


Рисунок 3.12 – Модель *IGBT*-транзистора

На электровозе 3ЭС5К, который выбран в качестве прототипа, используется сглаживающий реактор (РС-19), представляющий активно-индуктивную нагрузку [101]. Индуктивность $СР$, как и индуктивность ТЭД, зависит от протекающего тока в цепи, поэтому является динамической. В работе [4] было доказано, что при изменении тока от 0 до 1300 А индуктивность остается практически неизменной. Поэтому было принято индуктивность $СР$ считать постоянной величиной. Параметры $СР$ типа РС-19 [106]:

- активное сопротивление $R_{CP} = 0,0182$ Ом;
- индуктивность $L_{CP} = 11,7$ мГн.

3.6 Разработка алгоритма управления предлагаемой системы ОВ ТЭД электровоза

Для разработки алгоритма работы предлагаемой системы ОВ ТЭД необходимо провести анализ полученных результатов при ее моделировании. В таблицах 3.1-3.4 приведены результаты моделирования предлагаемой системы ОВ ТЭД согласно рисунку 3.3.

Таблица 3.1 – Результаты моделирования предлагаемой системы ОВ ТЭД при сопротивлении резистора ($R_{об1,2}$) шунтирующей цепи $R = 0,05$ Ом

Ширина импульса IGBT-транзистора (V_{T2}, V_{T4})	Ток якоря, А	Ток возбуждения, А	Коэффициент ОВ, %	Коэффициент абсолютной пульсации тока возбуждения, А	Коэффициент относительной пульсации тока возбуждения, %
50	880	748	85	8	1
60	880	748	85	8	1
70	880	748	85	8	1
80	880	744,5	84,6	8	1
90	880	741,8	84,3	8	1
100	880	736,5	83,7	8	1
110	880	728,6	82,8	8	1
115	880	722,5	82,1	8	1
120	880	711,9	80,9	8	1
125	880	695,2	79	8	1
130	880	676,7	76,9	8	1
135	880	657,4	74,7	8	1
140	880	633,6	72	8	1
144	880	616	70	8	1
150	880	572	65	8	1
155	880	533,3	60,6	7	1
163	880	457,6	52	6	1
170	880	378,4	43	4	1

Таблица 3.2 – Результаты моделирования предлагаемой системы ОВ ТЭД при сопротивлении резистора ($R_{об1,2}$) шунтирующей цепи $R = 0,1$ Ом

Ширина импульса IGBT-транзистора (V_{T2}, V_{T4})	Ток якоря, А	Ток возбуждения, А	Коэффициент ОВ, %	Коэффициент абсолютной пульсации тока возбуждения, А	Коэффициент относительной пульсации тока возбуждения, %
50	880	779,7	88,6	15	2
60	880	779,7	88,6	15	2
70	880	778,8	88,5	15	2
80	880	778,8	88,5	15	2
90	880	776,2	88,2	15	2
100	880	771,8	87,7	15	2
110	880	765,6	87	14	2
115	880	761,2	86,5	14	2
120	880	756,8	86	13	2
125	880	750,6	85,3	13	2
130	880	744,5	84,6	12	2
135	880	739,2	84	12	2
140	880	726,9	82,6	11	2

Продолжение таблицы 3.2

Ширина импульса IGBT-транзистора (VT2, VT4)	Ток якоря, А	Ток возбуждения, А	Коэффициент ОВ, %	Коэффициент абсолютной пульсации тока возбуждения, А	Коэффициент относительной пульсации тока возбуждения, %
150	880	677,6	77	10	1
158	880	616,0	70	8	1
165	880	528,0	60	6	1
170	880	457,6	52	5	1
174	880	378,4	43	4	1

Таблица 3.3 – Результаты моделирования предлагаемой системы ОВ ТЭД при сопротивлении резистора ($R_{об1,2}$) шунтирующей цепи $R = 0,15$ Ом

Ширина импульса IGBT-транзистора (VT2, VT4)	Ток якоря, А	Ток возбуждения, А	Коэффициент ОВ, %	Коэффициент абсолютной пульсации тока возбуждения, А	Коэффициент относительной пульсации тока возбуждения, %
50	880	796,4	90,5	15	2
60	880	796,4	90,5	15	2
70	880	796,4	90,5	15	2
80	880	795,5	90,4	15	2
90	880	793,8	90,2	15	2
100	880	789,4	89,7	15	2
110	880	782,3	88,9	14	2
115	880	778,8	88,5	14	2
120	880	773,5	87,9	13	2
125	880	768,2	87,3	13	2
130	880	762,1	86,6	12	2
135	880	755,0	85,8	12	2
140	880	747,1	84,9	11	1
145	880	737,4	83,8	10	1
150	880	724,2	82,3	9	1
155	880	691,7	78,6	9	1
160	880	647,7	73,6	8	1
163	880	616,0	70	8	1
168	880	545,6	62	7	1
172	880	457,6	52	6	1
176	880	378,4	43	4	1

Таблица 3.4 – Результаты моделирования предлагаемой системы ОВ ТЭД при сопротивлении резистора ($R_{об1,2}$) шунтирующей цепи $R = 0,2$ Ом

Ширина импульса IGBT-транзистора (V_{T2}, V_{T4})	Ток якоря, А	Ток возбуждения, А	Коэффициент ОВ, %	Коэффициент абсолютной пульсации тока возбуждения, А	Коэффициент относительной пульсации тока возбуждения, %
50	880	807,0	91,7	20	2
60	880	807,0	91,7	20	2
70	880	807,0	91,7	20	2
80	880	806,1	91,6	15	2
90	880	803,4	91,3	15	2
100	880	799,9	90,9	15	2
110	880	793,8	90,2	14	2
115	880	789,4	89,7	14	2
120	880	784,1	89,1	13	2
125	880	778,8	88,5	13	2
130	880	772,6	87,8	12	2
135	880	765,6	87	12	2
140	880	756,8	86	11	1
145	880	748,0	85	10	1
150	880	739,2	84	9	1
155	880	721,6	82	9	1
160	880	677,6	77	8	1
165	880	616,0	70	8	1
170	880	542,1	61,6	7	1
173,5	880	457,6	52	6	1
176,5	880	378,4	43	4	1

Из анализа таблиц 3.1 – 3.4 следует, что обеспечивается плавное регулирование тока возбуждения ТЭД. Выбираем сопротивление шунтирующего резистора ($R_{об1,2}$) 0,1 Ом. Таким образом при включении предлагаемой системы ОВ ТЭД плавное регулирование тока возбуждения начинается с коэффициента ОВ 88,6 %.

Алгоритм работы основной программы представлен на рисунке 3.13.

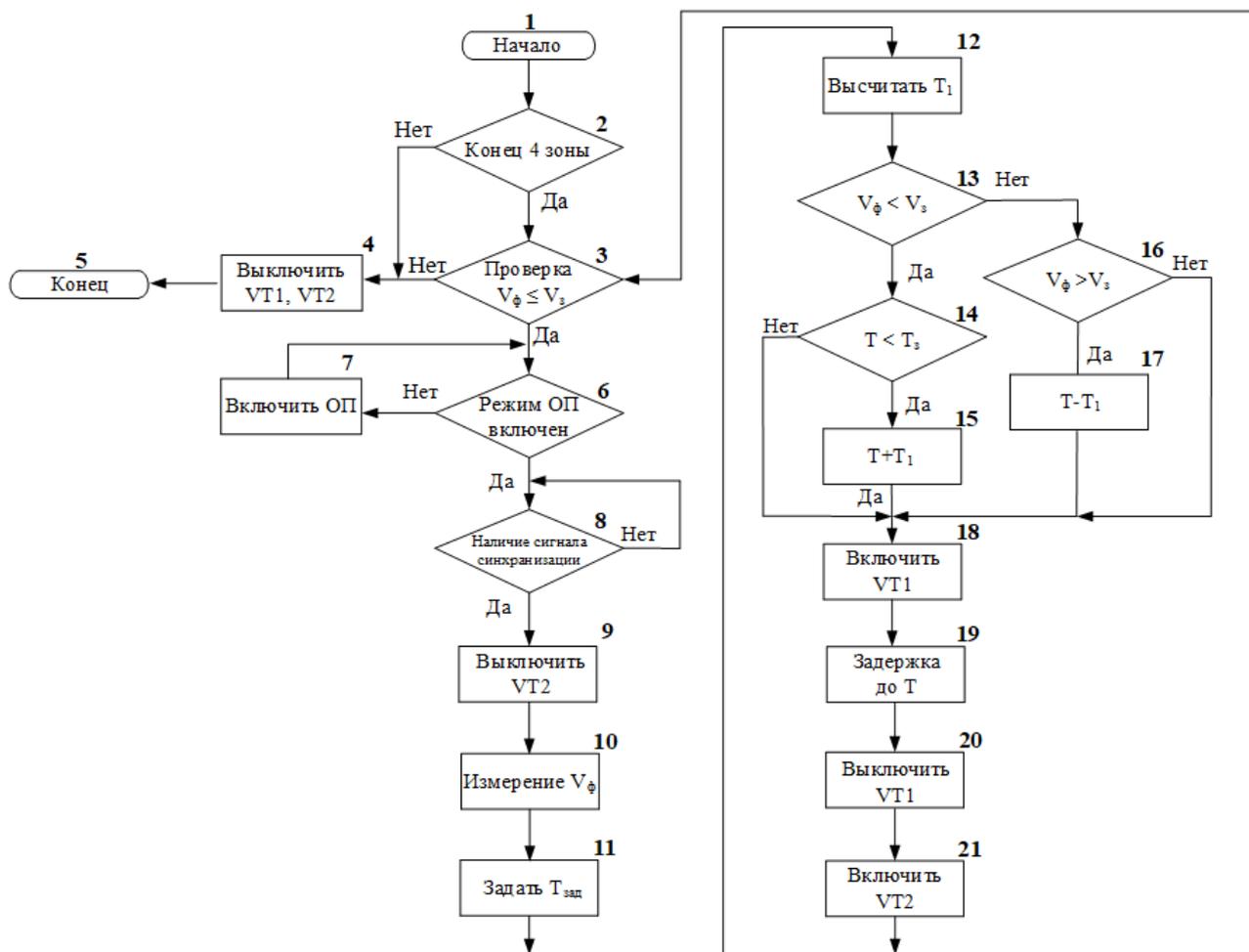


Рисунок 3.13 – Алгоритм работы предлагаемой системы ОБ ТЭД электровоза

Работа программы начинается с проверки конца 4 зоны регулирования напряжения ВИП (блок 2) и выполнения условия фактическая скорость (V_{ϕ}) движения электровоза меньше или равна заданной скорости (V_3) (блок 3). При несоблюдении этого условия происходит отключение транзисторов шунтировки (блок 4) и окончание работы программы (блок 5). Если условие выполняется, то включается режим ОБ (блок 6). Если режим ОБ не включен, то принудительный сбор схемы ОБ (блок 7) и далее по алгоритму. По приходу сигнала «*Sinhro*», который формируется в момент перехода сетевого напряжения через ноль ($Sinhro = 1$ - есть переход, $Sinhro = 0$ - нет перехода) (блок 8), длительность $Sinhro = 500$ мкс, выключается транзистор $VT2$ (блок 9). В блоке 10 измеряется фактическая скорость движения поезда, относительно которой задаётся

длительность работы транзистора $VT1$ (блок 11). В блоке 12 высчитывается единица увеличения длительности импульса (T_1), которая равна одной сотой T_3 . Если $V_\phi < V_3$ (блок 13) и длительность импульса открытого состояния (T) транзистора $VT1$ меньше, чем его заданная длительность (блок 14), то к T добавляется T_1 (блок 15). Далее включается транзистор $VT1$ (блок 18). Если же условие блока 14 не выполняется, то транзистор ($VT1$) включается (блок 18). Если условие блока 13 не выполняется, и при этом $V_\phi > V_3$ (блок 16), то от T вычитается T_1 (блок 17). Далее включается транзистор $VT1$ (блок 18) и задаётся длительность импульса до открытого его состояния (блок 19). Транзистор $VT1$ выключается (блок 20). Транзистор $VT1$ включается (блок 21) и далее алгоритм повторяется.

3.7 Оценка адекватности электромагнитных процессов, наблюдаемых при работе электровоза и математической модели в режиме тяги

Результаты математического моделирования принято считать адекватными, если они сопоставимы с данными, полученными на реальном электровозе. Так как в настоящее время предлагаемая система ОВ ТЭД электровоза не используется, то принято сравнить электромагнитные процессы ТЭД в режиме НВ. При одинаковых условиях работы результаты математического моделирования электровоза в режиме тяги были сопоставимы с полученными в результате экспериментальных исследований работы электровоза на участке Иркутск-Сортировочный – Большой Луг – Андриановская (Отчет №-ТЕЛ.094-01-2019 Тягово-энергетических испытаний по определению возможности вождения грузовых контейнерных поездов составностью до 350 осей тягой электровозами серии ЗЭС5К на участке Мариинск Красноярской ж.д. – Тайшет Восточно-Сибирской ж.д. – Карымская Забайкальской ж.д. – Хабаровск Дальневосточной ж.д. – Уссурийск Дальневосточной ж.д. в четном и нечетном направлении, согласно телеграфного указания № исх-2414 от 11.02.2019 ЦЗ-ЦТ

О.С. Валинского) электромагнитными процессами ТЭД.

Для сравнения был выбран режим тяги электровоза со следующими параметрами работы:

- расстояние от электровоза до тяговой подстанции 20 км;
- угол регулирования 92 эл.град.;
- 3,5 зоны регулирования напряжения ВИП электровоза в режиме тяги.

Критериями сравнения полученных результатов на математической модели и в ходе эксплуатационных испытаний электровоза, были выбраны следующие параметры: относительная пульсация тока ВИП, длительность сетевой γ и фазовой γ_p коммутации.

На рисунках 3.14 и 3.15 приведены диаграммы мгновенных значений тока и напряжения ВИП.

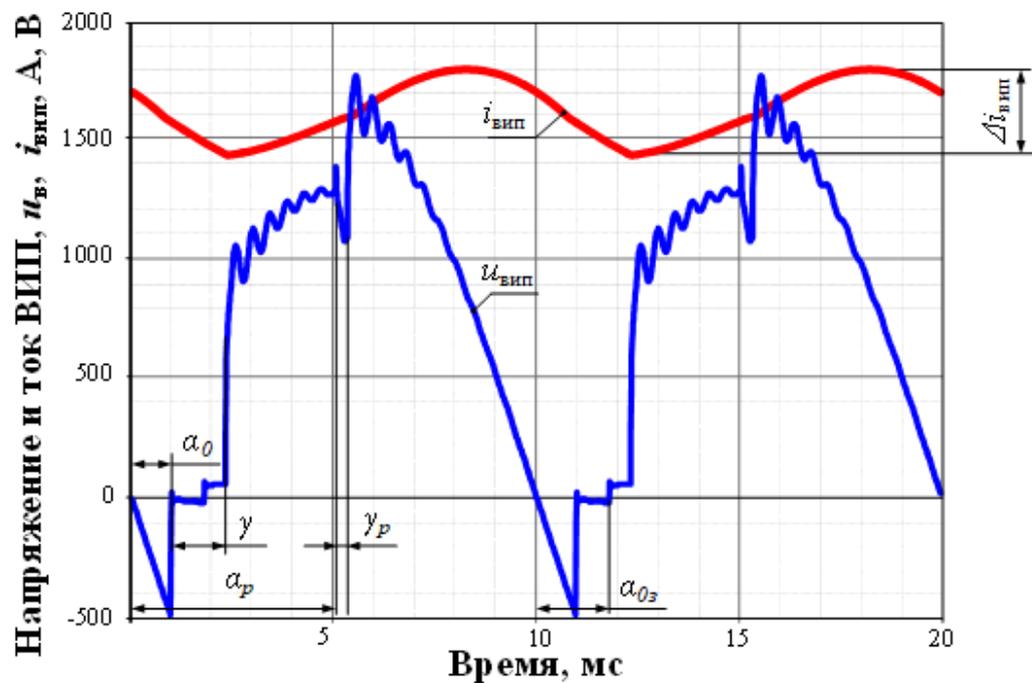


Рисунок 3.14 – Диаграмма мгновенных значений выпрямленного напряжения и тока ВИП, полученная в ходе математического моделирования электровоза

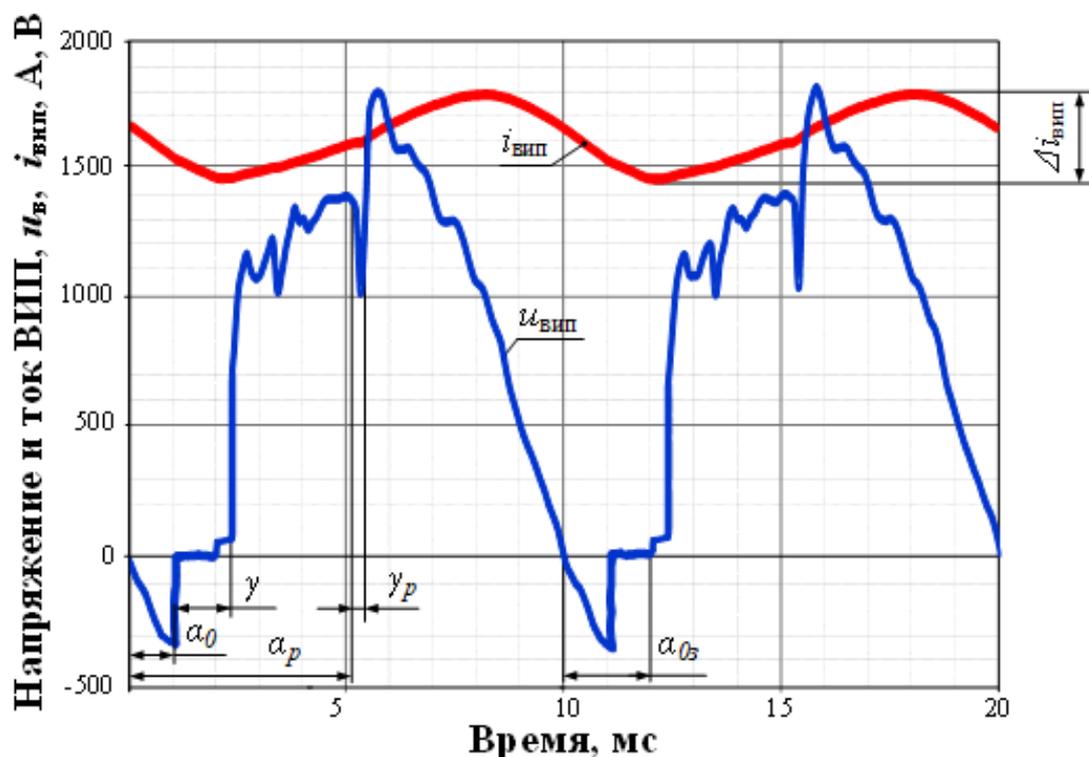


Рисунок 3.15 – Диаграмма мгновенных значений выпрямленного напряжения и тока ВИП, полученная в ходе эксплуатационных исследований электровоза

В таблице 3.5 представлены полученные данные при оценке результатов.

Таблица 3.5 – Сравнение значений, полученных при математическом моделировании и эксперименте

Параметр	Математическое моделирование	Эксплуатационные испытания	Относительная погрешность, %
$I_{\text{ВИП}}$, А	1640	1612	1,7
α_0 , эл. град.	18	19	5,3
α_p , эл. град.	92	92	0
γ , эл. град.	24	23	4,3
γ_p , эл. град.	5,1	5,5	7,2
$\Delta I_{\text{ВИП}}$, отн.ед.	0,24	0,22	9

Анализируя полученные результаты таблицы 3.5, можно сделать вывод, что погрешность полученных электромагнитных процессов при проведении математического моделирования не превышает 10 %.

Таким образом, разработанная математическая модель является адекватной для проведения исследований электромагнитных процессов работы электровоза в режиме тяги.

3.8 Сравнительное исследование эффективности работы электровоза в режиме тяги со штатной и предлагаемой системами ОВ ТЭД по результатам расчета на математической модели

При сравнении показателей модели электровоза, работающего в режиме тяги со штатной и предлагаемой системами ОВ ТЭД, задаются одинаковые параметры. Сравнение производится при одинаковом токе якоря и коэффициенте ОВ ТЭД ($K_{об}$). Принято считать, что на фидерной зоне участка контактной сети нет других электровозов. Для сравнительного анализа работы электровоза в режиме тяги со штатной и предлагаемой системами ОВ ТЭД принимается коэффициент относительной пульсации тока возбуждения электровоза $K_{оп}$. Расчет всех показателей производится автоматически с помощью стандартных блоков *Simulink MatLab* на ЭВМ.

На рисунках 3.16 – 3.18 представлены электромагнитные процессы для трёх ступеней штатной системы ОВ ТЭД электровоза 3ЭС5К при $I_{я} = 880$ А.

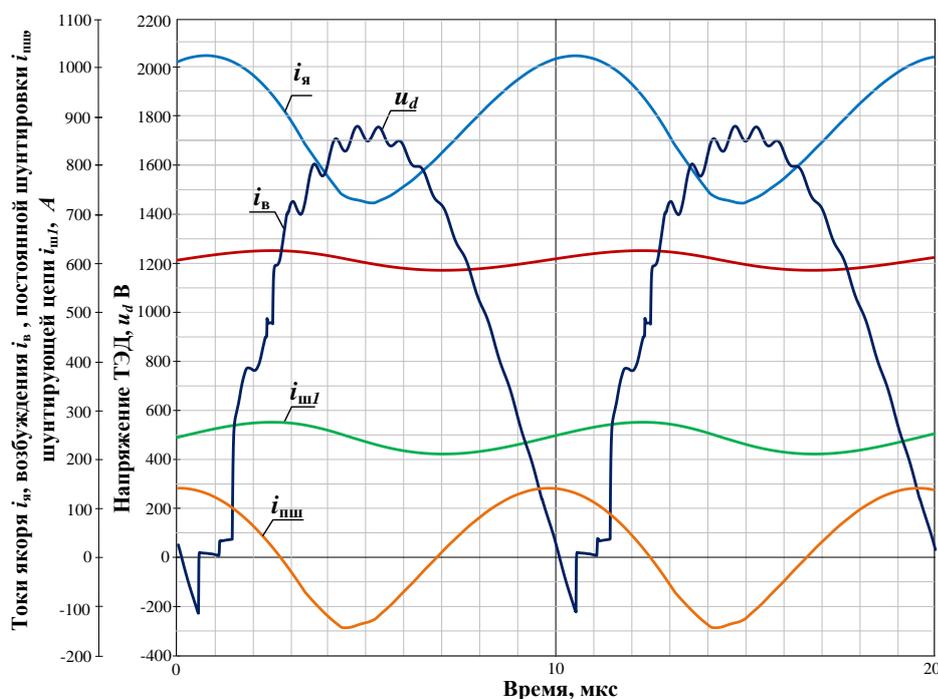


Рисунок 3.16 – Диаграммы выпрямленного напряжения u_d ТЭД, токов якоря $i_я$, постоянной шунтировки $i_пш$, шунтирующей цепи $i_шл$ и возбуждения $i_в$ для штатной системы ОВ ТЭД при работе на первой ступени регулирования

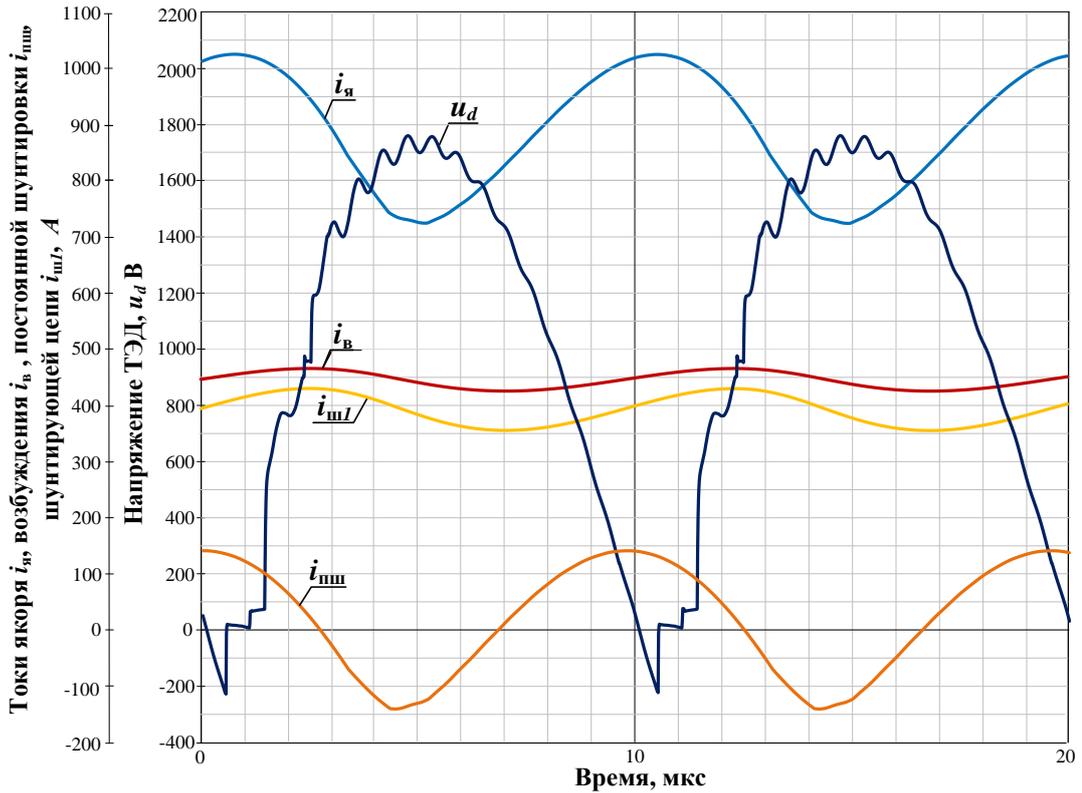


Рисунок 3.17 – Диаграммы выпрямленного напряжения u_d ТЭД, токов якоря $i_я$, постоянной шунтировки $i_пш$, шунтирующей цепи $i_шл$ и возбуждения $i_в$ для штатной системы ОВ ТЭД при работе на второй ступени регулирования

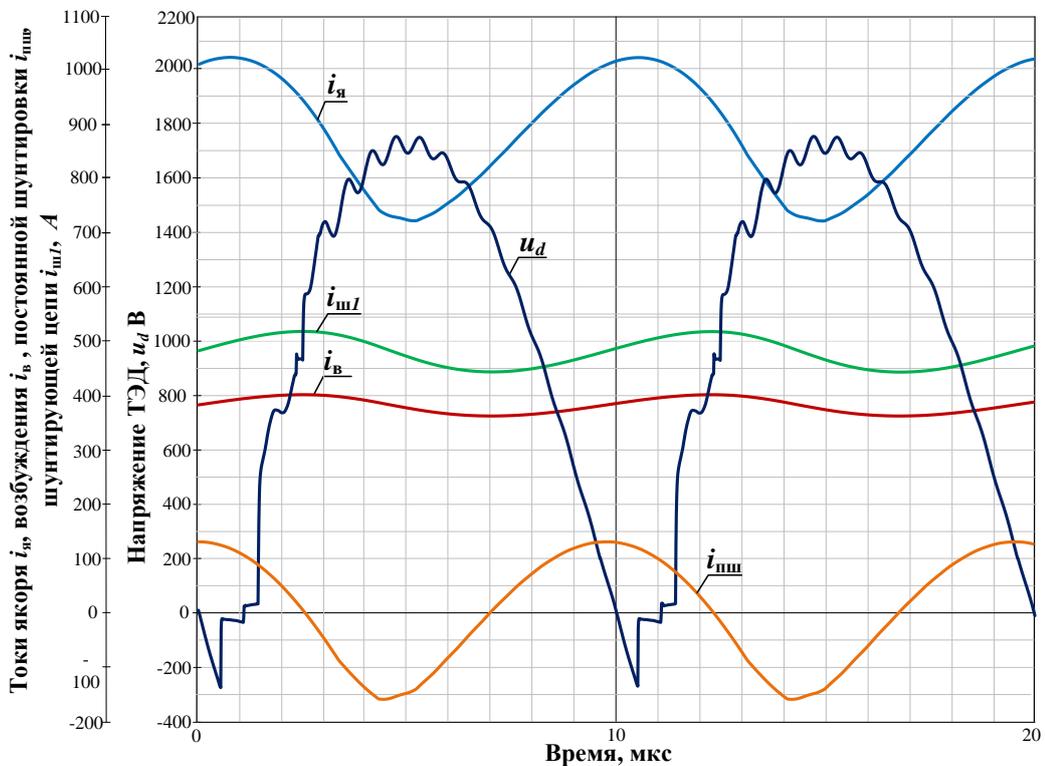


Рисунок 3.18 – Диаграммы выпрямленного напряжения u_d ТЭД, токов якоря $i_я$, постоянной шунтировки $i_пш$, шунтирующей цепи $i_шл$ и возбуждения $i_в$ для штатной системы ОВ ТЭД при работе на третьей ступени регулирования

На рисунках 3.19 – 3.24 представлены электромагнитные процессы предлагаемой системы ОВ ТЭД электровоза ЗЭС5К, показывающие плавность регулирования тока возбуждения.

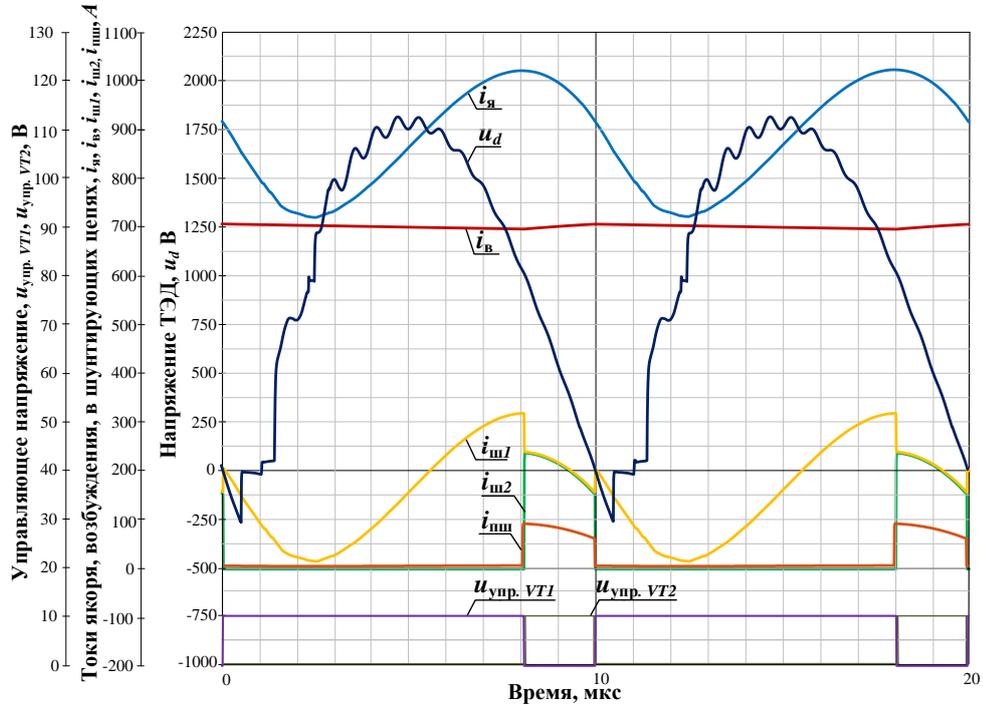


Рисунок 3.19 – Диаграммы выпрямленного напряжения u_d ТЭД, токов якоря i_a , шунтирующих цепей $i_{ш1}$, $i_{ш2}$, постоянной шунтировки $i_{пш}$ и возбуждения i_b для предлагаемой системы ОВ ТЭД при $\beta = 80\%$

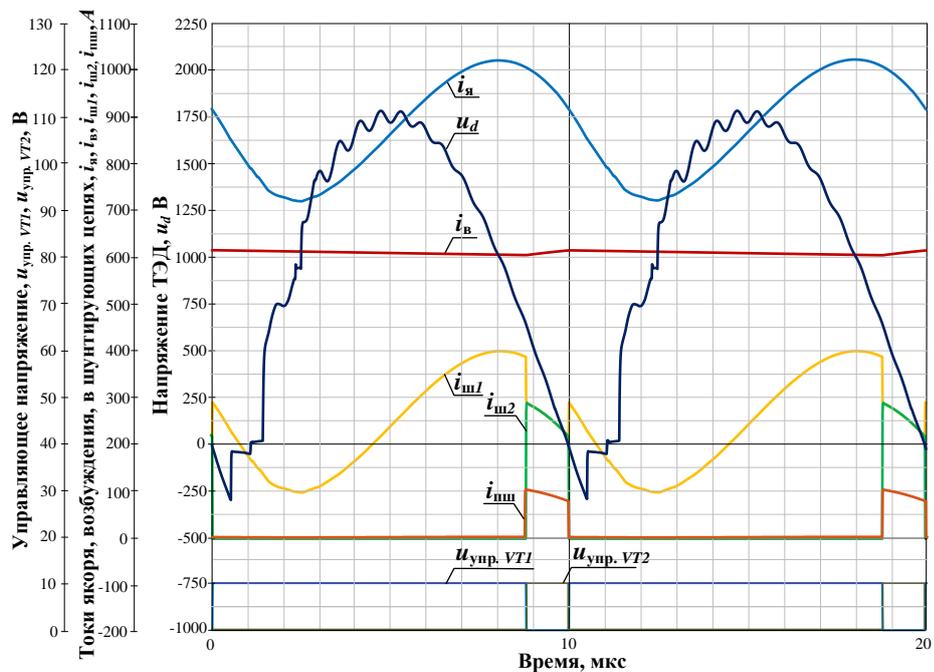


Рисунок 3.20 – Диаграммы выпрямленного напряжения u_d ТЭД, токов якоря i_a , шунтирующих цепей $i_{ш1}$, $i_{ш2}$, постоянной шунтировки $i_{пш}$ и возбуждения i_b для предлагаемой системы ОВ ТЭД при $\beta = 70\%$

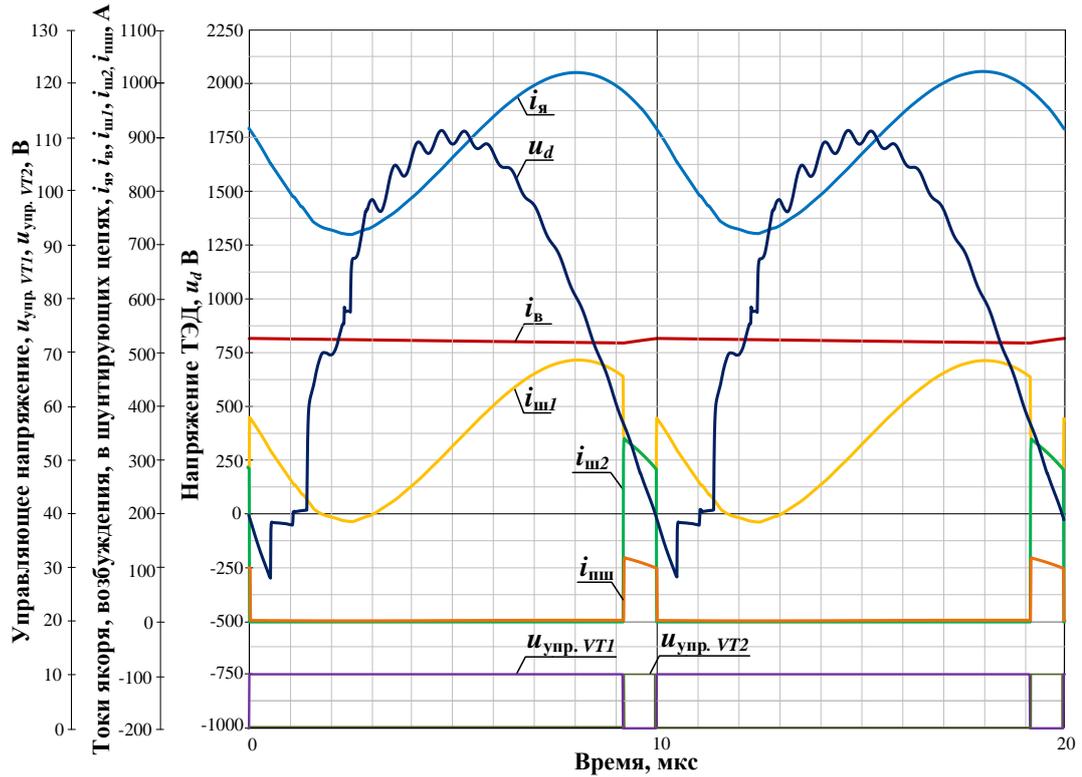


Рисунок 3.21 – Диаграммы выпрямленного напряжения u_d ТЭД и токов якоря i_a , шунтирующих цепей $i_{ш1}$, $i_{ш2}$, постоянной шунтировки $i_{шш}$ и возбуждения i_b для предлагаемой системы ОВ ТЭД при $\beta = 60\%$

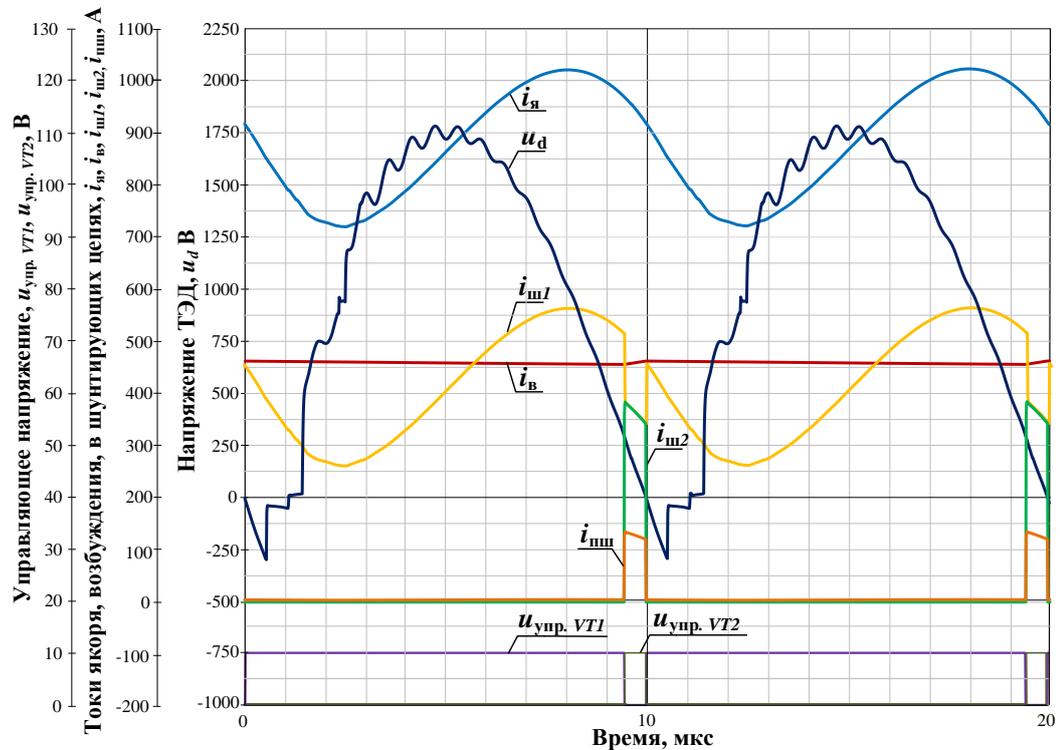


Рисунок 3.22 – Диаграммы выпрямленного напряжения u_d ТЭД и токов якоря i_a , шунтирующих цепей $i_{ш1}$, $i_{ш2}$, постоянной шунтировки $i_{шш}$ и возбуждения i_b для предлагаемой системы ОВ ТЭД при $\beta = 52\%$

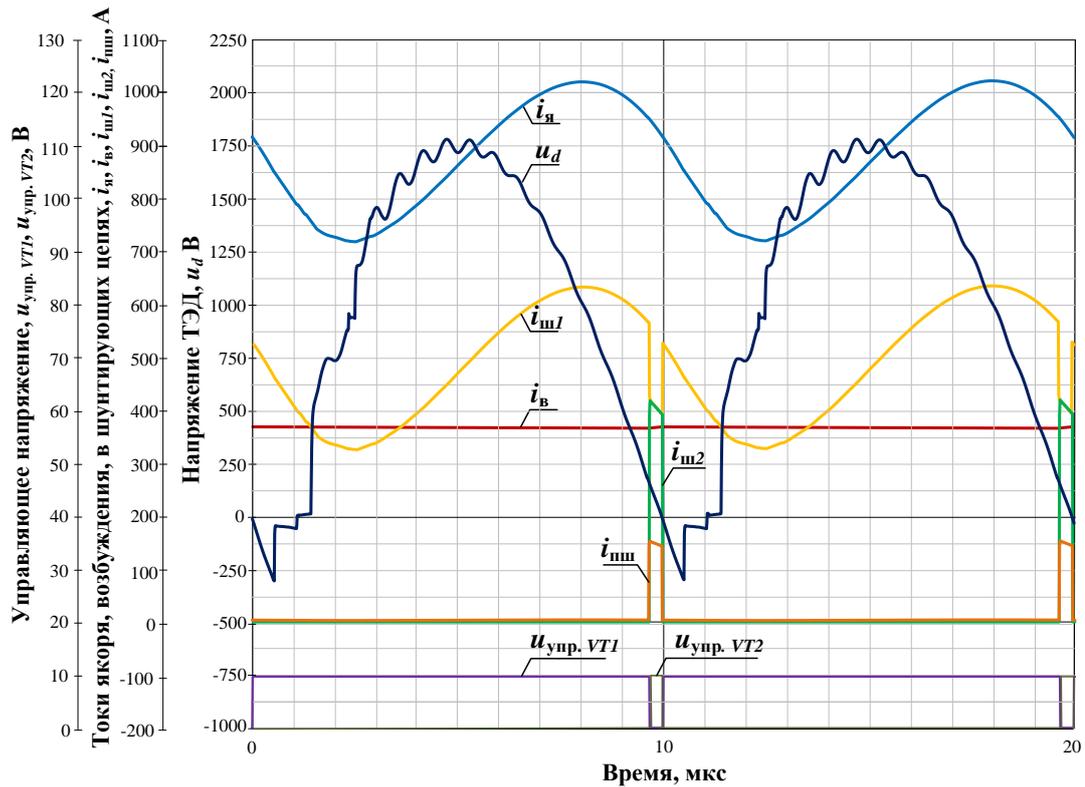


Рисунок 3.23 – Диаграммы выпрямленного напряжения u_d ТЭД и токов якоря i_a , шунтирующих цепей $i_{ш1}$, $i_{ш2}$, постоянной шунтировки $i_{шш}$ и возбуждения i_b для предлагаемой системы ОВ ТЭД при $\beta = 43 \%$

На рисунках 3.24 – 3.26 приведены диаграммы выпрямленного напряжения u_d ТЭД, токов якоря i_a и возбуждения для штатной $i_b_{штат}$ и предлагаемой $i_b_{предл}$ систем ОВ ТЭД электровоза переменного тока. За счет того, что полупроводниковые приборы имеют незначительное активное сопротивление, по сравнению с сопротивлением обмотки возбуждения ТЭД, переменная составляющая тока возбуждения пройдет именно по шунтирующей цепи. Таким образом, пульсации тока возбуждения при предлагаемой системе ОВ ТЭД практически равны нулю [18, 22].

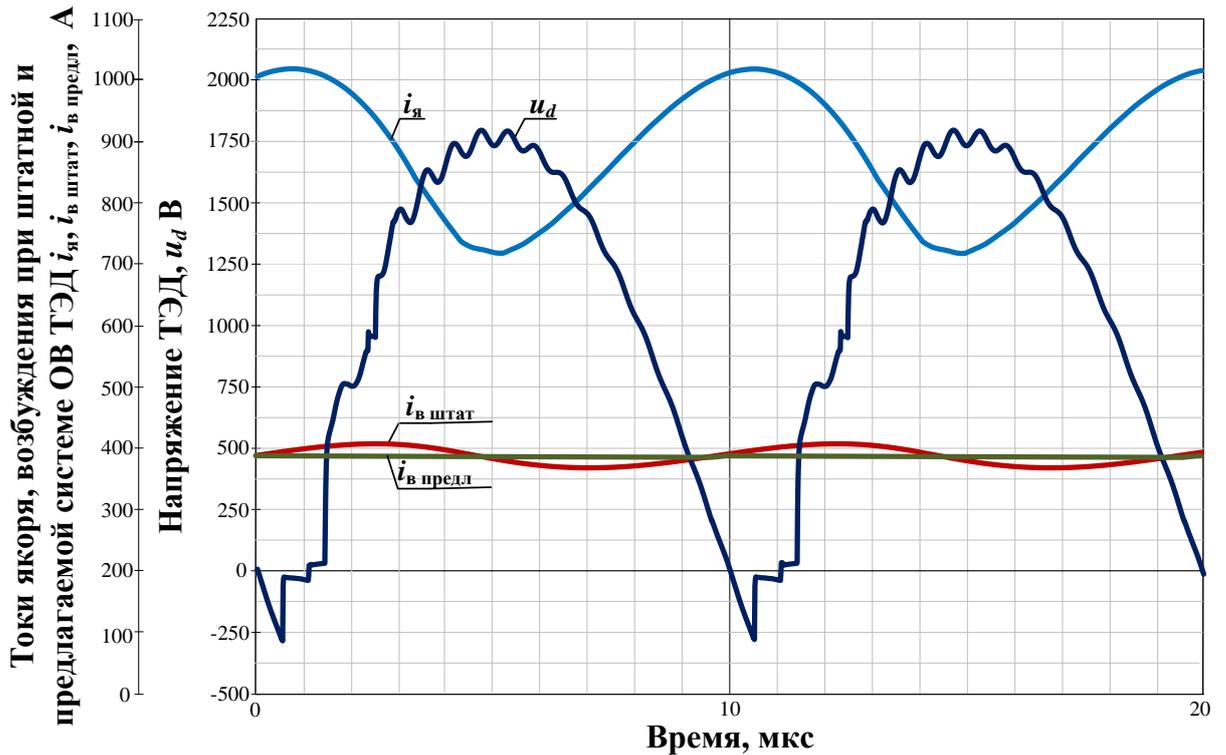


Рисунок 3.24 – Диаграммы выпрямленного напряжения u_d ТЭД, тока якоря $i_{я}$ и токов возбуждения для штатной $i_{в штат}$ и предлагаемой системы ОВ ТЭД $i_{в предл}$ при работе на третьей ступени регулирования ($\beta = 43 \%$)

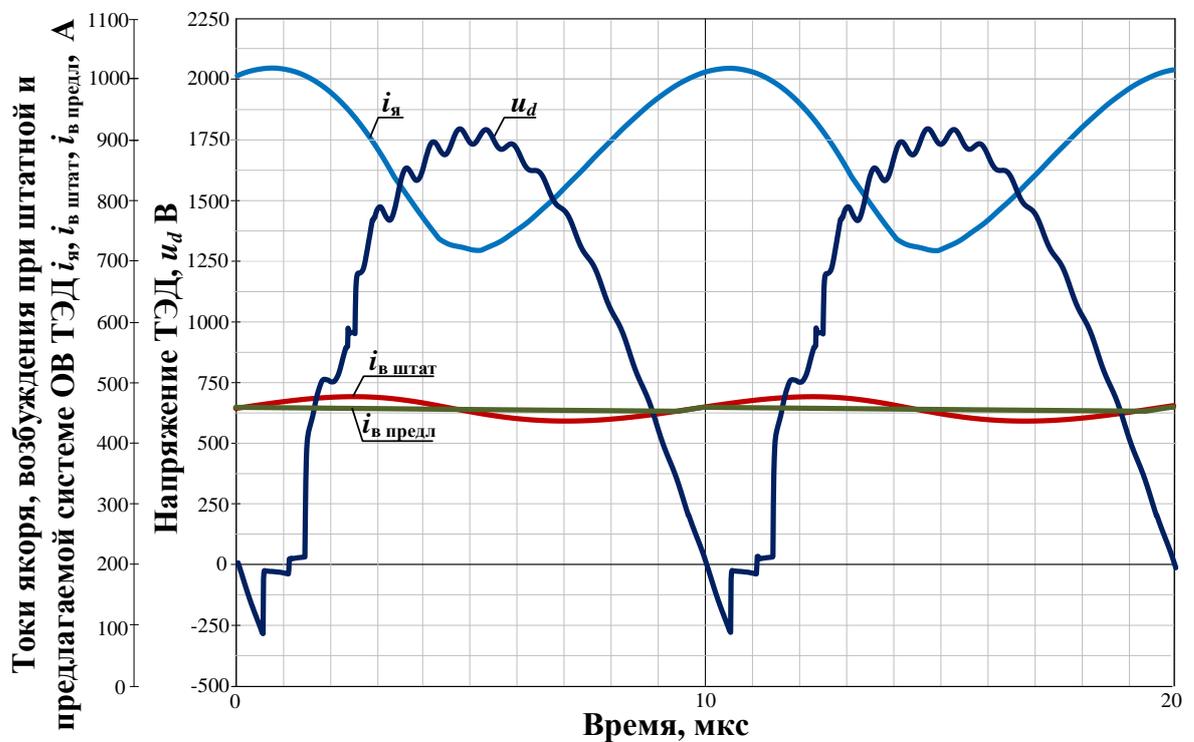


Рисунок 3.25 – Диаграммы выпрямленного напряжения u_d ТЭД, тока якоря $i_{я}$ и токов возбуждения для штатной $i_{в штат}$ и предлагаемой системы ОВ ТЭД $i_{в предл}$ при работе на второй ступени регулирования ($\beta = 52 \%$)

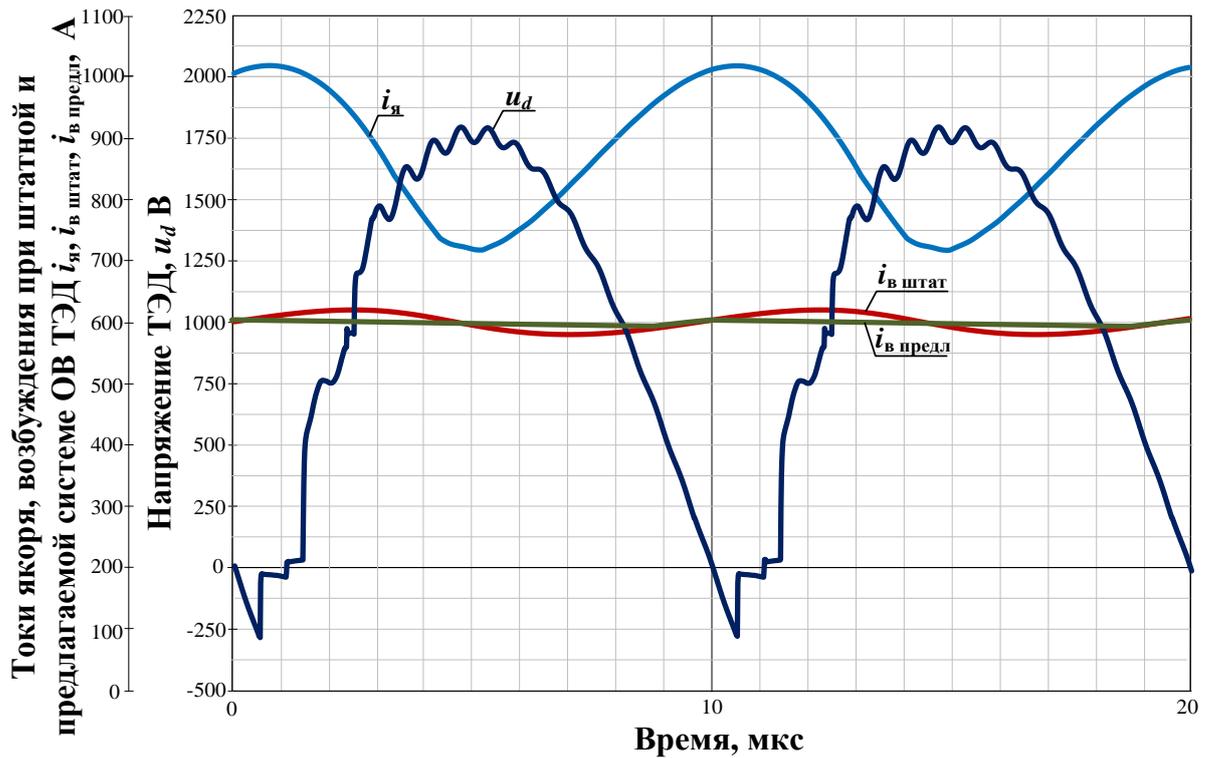


Рисунок 3.26 – Диаграммы выпрямленного напряжения u_d ТЭД, тока якоря $i_я$ и токов возбуждения для штатной $i_{в штат}$ и предлагаемой системы ОВ ТЭД $i_{в предл}$ при работе на первой ступени регулирования ($\beta = 70\%$)

Анализируя полученные в среде *MatLab Simulink* электромагнитные процессы ТЭД электровоза ЗЭС5К, работающего в режиме ОВ со штатной и предлагаемой системами (рисунки 3.24 – 3.26) получены коэффициенты относительной пульсации тока возбуждения при одинаковых параметрах токов якоря и возбуждения для трех ступеней ОВ (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Результаты математического моделирования работы электровоза в режиме тяги со штатной и предлагаемой системой ОВ ТЭД электровоза

Ступень регулирования	Коэффициент ОВ ТЭД ($K_{ОВ}$), %	$I_я$, А	$I_в$, А	Коэффициент относительной пульсации	
				Штат. ОВ ТЭД	Предл. ОВ ТЭД
				$K_{оп}$, %	$K_{оп}$, %
ОВ1	70	880	616	7	1
ОВ2	52	880	458	8,6	0,7
ОВ3	43	880	378	11	0,5

На основании полученных данных таблицы 3.6 построена зависимость коэффициента пульсации тока возбуждения ТЭД от коэффициента ОВ при работе штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД (рисунок 3.27).

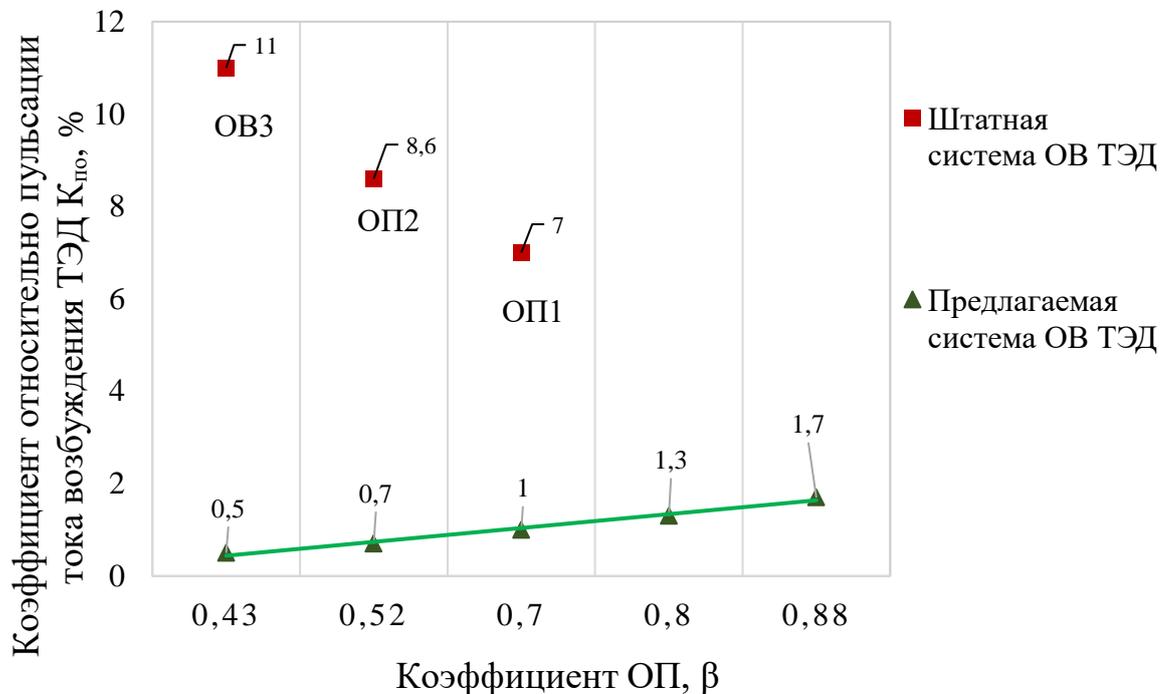


Рисунок 3.27 – Зависимость коэффициента относительно пульсации тока возбуждения от коэффициента ОВ ТЭД электровоза, полученная в среде *MatLab Simulink*

Анализируя рисунок 3.27, можно сделать вывод, что $K_{по}$ при предлагаемой системе ОВ ТЭД по отношению к штатной снижается в среднем не менее чем на 80 %.

3.9 Выводы по разделу 3

1 Разработаны функциональные схемы силовой цепи электровоза ЗЭС5К, работающего в режиме тяги с использованием штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД в расчете на одну тележку, на основании которых уточнена математическая модель электровоза переменного тока ЗЭС5К, работающего в режиме тяги с использованием штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД.

2 Разработан алгоритм управления предлагаемой системы ОВ ТЭД электровоза, обеспечивающий плавное регулирование тока возбуждения.

3 При работе предлагаемой системы ОВ ТЭД электровоза переменного тока коэффициент относительной пульсации тока возбуждения снижается в среднем на 80 % относительно штатной системы ОВ ТЭД, что снизит пульсацию магнитного потока в остове двигателя, а, следовательно, уменьшатся вихревые токи в главных полюсах, что повысит ресурс работы ТЭД.

4 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРЕДЛАГАЕМОГО ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ И ЕГО ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

Для подтверждения достоинств предлагаемой системы ОВ ТЭД электровоза, которые получены при проведении математического моделирования, разработан экспериментальный стенд, который позволяет при одинаковых условиях работы получить электромагнитные процессы ТЭД, работающего со штатной и предлагаемой системой ОВ ТЭД, и сравнить их.

4.1 Разработка научного экспериментального стенда штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД электровоза

На базе кафедры «Электроподвижной состав» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» проведены экспериментальные исследования разработанного макета системы ОВ ТЭД электровоза. Для этого использован стенд, имитирующий работу ВИП в тяговом режиме в качестве нагрузки которого используется КМБ с ТЭД типа НБ-514 с его доработкой, обеспечивающей работу стенда в режиме ОВ [34, 116].

Соответствие между параметрами разработанной физической модели и реального электровоза определялось через коэффициенты подобия, которые определялись по предложенной методике С.А. Петрова [67]. Основными физическими параметрами, характеризующими электромагнитные процессы в разработанной модели, являются:

U_1 – напряжение холостого хода (ХХ) на входе тягового трансформатора (ТТ);

I_1 – ток в первичной обмотке ТТ;

S_2 – мощность ТТ электровоза;

U_2 – напряжение ХХ вторичной обмотки ТТ электровоза;

I_2 – ток вторичной обмотки ТТ электровоза;

L_d – индуктивность цепи выпрямленного тока;

R_d – активное сопротивление цепи выпрямленного тока,

U_d – напряжение ТЭД на четвертой зоне регулирования ВИП;

I_d – номинальный ток ТЭД.

Примем обозначение натуральных параметров элементов индексом «Н» и приведём систему уравнений для масштабных коэффициентов

$$\left. \begin{aligned} m_{U1} &= \frac{U_{1H}}{U_1}; & m_{I1} &= \frac{I_{1H}}{I_1}; & m_{S2} &= \frac{S_{2H}}{S_2}; \\ m_{U2} &= \frac{U_{2H}}{U_2}; & m_{I2} &= \frac{I_{2H}}{I_2}; & m_{R_d} &= \frac{R_{dH}}{R_d}; \\ m_{L_d} &= \frac{L_{dH}}{L_d}; & m_{R_s} &= \frac{R_{sH}}{R_s}; & m_{U_d} &= \frac{U_{dH}}{U_d}; \\ & & & & m_{I_d} &= \frac{I_{dH}}{I_d} \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Определяющей величиной является время t , благодаря его масштабного коэффициента учитывается отношение времени протекания электромагнитных процессов в физической модели и в реальном электровозе

$$m_t = \frac{t_H}{t}. \quad (4.2)$$

Рассматриваемая система имеет три независимые основные физические величины, поэтому для определения всех масштабных коэффициентов необходимо задаться тремя коэффициентами подобия: 1 – коэффициент времени m_t ; 2 – коэффициент входного напряжения m_{U1} ; 3 – коэффициент тока вторичной обмотки ТТ электровоза m_{I2} .

Так как частота сетевого напряжения, питающего физическую модель, совпадает с частотой в контактной сети ($f_c = 50$ Гц), то $m_t = 1$.

Напряжение питания модели принимаем $U_1 = 380$ В, а напряжение в реальной тяговой сети $U_{1H} = 27$ кВ, таким образом $m_{U1} = 27 \cdot 10^3 / 380 = 71,05$.

Ток вторичной обмотки (I_2) ТТ физической модели принимаем равным 70 А. За прототип принимается электровоз переменного тока серии ЗЭС5К. Примем, что

ток вторичной обмотки ТТ реального электровоза I_2 равен суммарному току всех ТЭД

$$I_2 = I_{\Sigma \text{ТЭД}} = n_{\text{дв}} \cdot I_{\text{н}}, \quad (4.3)$$

где $n_{\text{дв}}$ – количество ТЭД на секции электровоза 3ЭС5К, $n_{\text{дв}} = 4$;

$I_{\text{н}}$ – номинальный (продолжительный) ток ТЭД, $I_{\text{н}} = 810$ А.

Учитывая принятые данные, масштабный коэффициент тока вторичной обмотки ТТ электровоза равен

$$m_{I2} = \frac{4 \cdot 810}{70} = 46,29.$$

Напряжение ТЭД на четвертой зоне регулирования на физической модели $U_d = 90$ В, а напряжение ТЭД на электровозе серии 3ЭС5К на четвертой зоне регулирования $U_{1H} = 1240$ В, получим масштабный коэффициент напряжения ТЭД на четвертой зоне регулирования $m_{U1} = 1240 / 90 = 13,78$.

Остальные зависимые масштабные коэффициенты определяются по выражениям

$$\begin{aligned} m_{U2} &= \frac{U_{2H}}{U_2} = \frac{U_{1H}}{K_{TH}} / \frac{U_1}{K_T} = m_{U1} \frac{K_T}{K_{TH}}; \\ m_{I1} &= \frac{I_{1H}}{I_1} = \frac{I_{2H}}{K_{TH}} / \frac{I_2}{K_T} = m_{I2} \frac{K_T}{K_{TH}}; \\ m_{Ld} &= \frac{L_{dH}}{L_d} = \frac{t_H U_{2H}}{I_{2H}} / \frac{t U_2}{I_2} = \frac{m_t m_{U2}}{m_{I2}}; \\ m_{Rd} &= \frac{R_{dH}}{R_d} = \frac{U_{2H}}{I_{2H}} / \frac{U_2}{I_2} = \frac{m_{U2}}{m_{I2}}; \\ m_{S2} &= \frac{U_{1H} I_{1H}}{U_1 I_1} = m_{U1} m_{I1}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

где K_T – коэффициент трансформации трансформатора модели электровоза, равный $K_T = U_1 / U_2 = 380 / 195 = 1,95$;

K_{TH} – коэффициент трансформации ТТ электровазона серии ЗЭС5К, равен отношению действующего напряжения первичной обмотки трансформатора к напряжению его вторичной обмотки $K_{TH} = U_{1H} / U_{2H} = 27000 / 1230 = 21,95$.

Подставив численные значения в формулы (4.4) получено: $m_{U2} = 6,3$; $m_{I1} = 4,15$; $m_{Ld} = 0,135$; $m_{Rd} = 0,135$; $m_{S2} = 295,56$. В таблице 4.1 представлены параметры элементов модели, которые определялись с помощью полученных масштабных коэффициентов и параметров реальной системы.

Таблица 4.1 – Расчётные параметры модели

Определяемый параметр	Реальная система	Масштаб	Модель
L_d , Гн	0,00695	0,135	0,0515
R_d , Ом	0,0376	0,135	0,279
S_2 , ВА	$4,78 \cdot 10^6$	295,56	16172

Разработанная система работает адекватно, если критерии подобия Π_i системы одинаковы при любых процессах (*idem*) [13]. Для физической модели выделим основной критерий подобия, относящийся к цепи выпрямленного тока

$$\Pi_1 = \frac{L_d}{R_d t} = idem. \quad (4.5)$$

Масштаб время t в формуле (4.5) равен единицы, поэтому им можно пренебречь.

Согласно формуле (4.5), необходимо, чтобы выполнялись условия

$$\frac{L_d}{R_d t} = \frac{L_{dH}}{R_{dH} t_H}. \quad (4.6)$$

Подставив численные значения в формулу (4.6), получим

$$\frac{0,00695}{0,0376} = 0,185 \approx \frac{0,0515}{0,279} = 0,184.$$

Разница коэффициентов подобия, относящихся к цепи выпрямленного тока не превышает 2 %. Таким образом, можно сделать вывод о том, параметры физической модели подобны параметрам системы электровоза.

Изготовлен макет штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД, который подключается параллельно обмотке возбуждения, и предназначен для имитации работы ТЭД в режиме ОВ. Стенд позволяет исследовать режим ОВ ТЭД электровоза с использованием штатной и предлагаемой системы ОВ ТЭД с различными алгоритмами управления, производить измерения выпрямленного напряжения и тока нагрузки, получить электромагнитные процессы работы ТЭД, работающего в режиме ОВ. На рисунке 4.1 представлена функциональная схема экспериментального стенда работы КМБ электровоза в режиме ОВ, который включает в себя две различные системы ОВ ТЭД, выбор которых осуществляется с помощью контакторов (К2.1, К2.2 и К3.1, К3.2) [34].

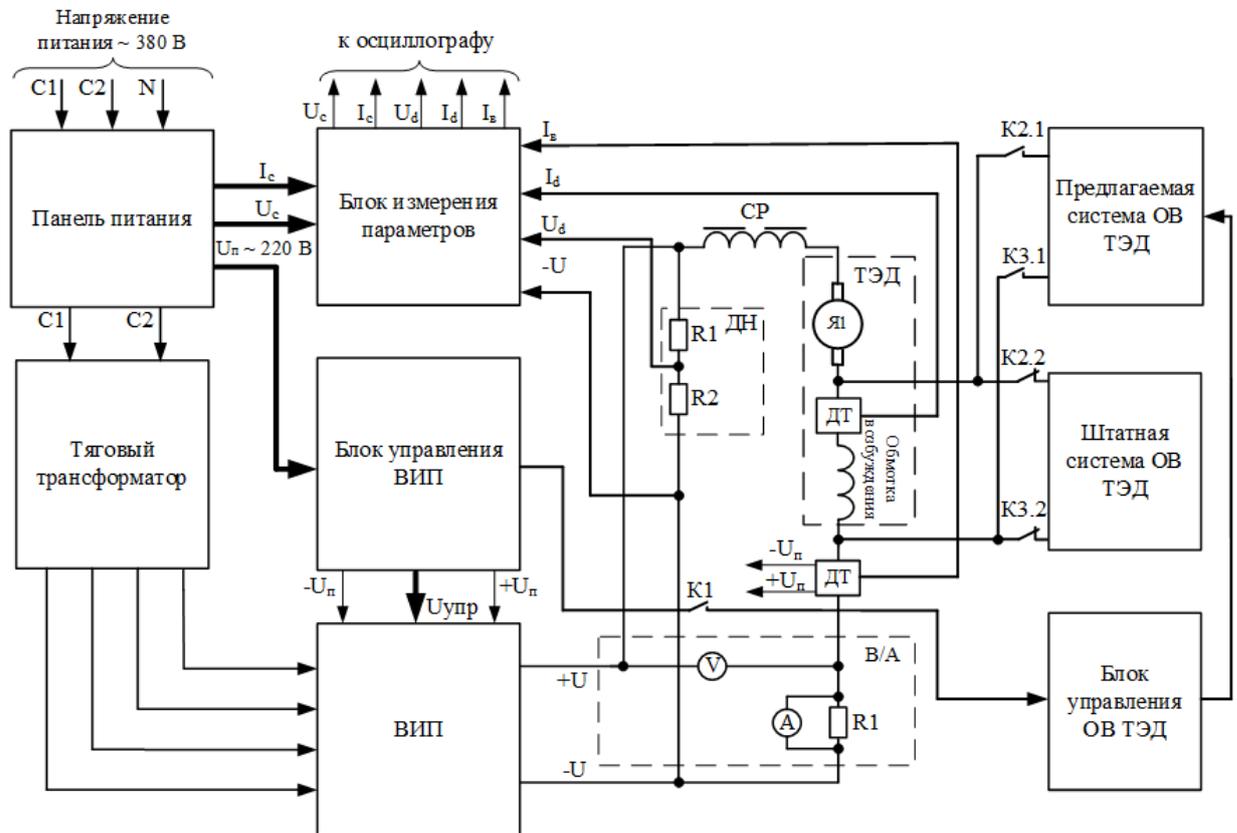


Рисунок 4.1 – Функциональная схема экспериментального стенда работы КМБ электровоза в режиме ОВ

Экспериментальный стенд состоит из следующих основных элементов:

- панель питания, обеспечивающая питание элементов стенда;
- модель ТТ, которая служит для понижения напряжения питания и имитации работы электровоза;
- ВИП с его блоком управления, который служит для преобразования однофазного переменного тока в постоянный и плавного регулирования напряжения ТЭД;
- СР, служащий для снижения пульсации выпрямленного тока в цепи ТЭД;
- тележки электровоза ВЛ85, на которой установлено два ТЭД серии НБ-514 с последовательно соединёнными обмотками якоря и возбуждения;
- датчиков тока (ДТ), предназначенных для преобразования входного тока в пропорциональный выходной ток, необходимый для получения значения тока возбуждения и якоря ТЭД;
- цифрового вольтметра/амперметра (В/А), предназначенного для отображения параметров напряжения и тока ТЭД;
- блока измерения параметров, который необходим для получения информации о происходящих электромагнитных процессах;
- делитель напряжения (ДН), который служит для получения значения напряжения ТЭД.

На рисунке 4.2 изображена электрическая функциональная силовая схема физической модели, работающего в режимах полного и ослабленного возбуждения со штатной и предлагаемой системами, на которой содержатся следующие элементы: X1 – клеммная рейка, подключающая стенд к сети; VS1-VS8 – плечи ВИП; K1 – контактор электромагнитный; ТН – трансформатор напряжения; ТТ – трансформатор тока; СЭТ – счетчик электроэнергии; Т1 – тяговый трансформатор типа ОСЗМ-16 380/65В; А и V – амперметр и вольтметр; SF1 – электрический автомат; X2, X3 – розетки ~ 220 В [34].

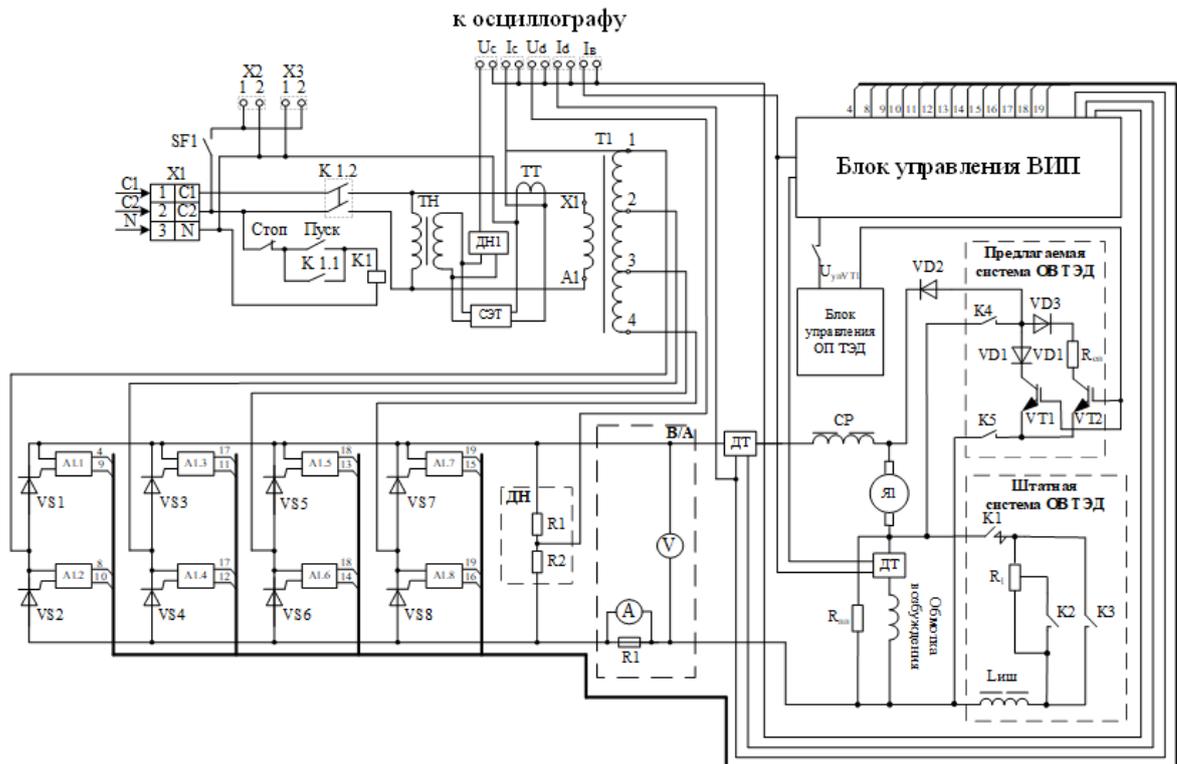
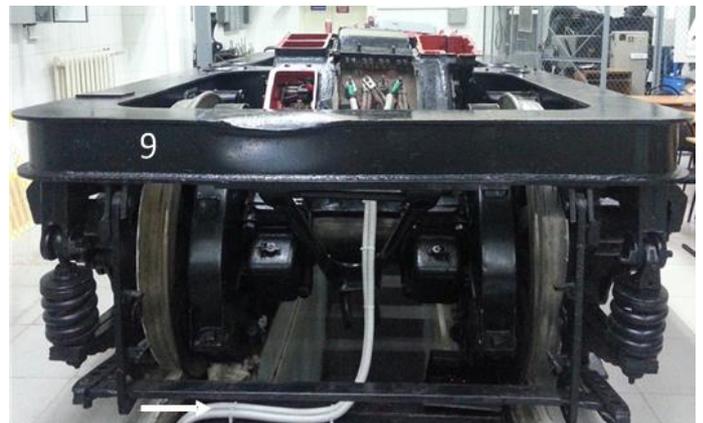


Рисунок 4.2 – Электрическая принципиальная силовая схема физической модели, работающей в режимах полного и ослабленного возбуждения со штатной и предлагаемой системой

Общий вид экспериментального стенда представлен на рисунке 4.3.



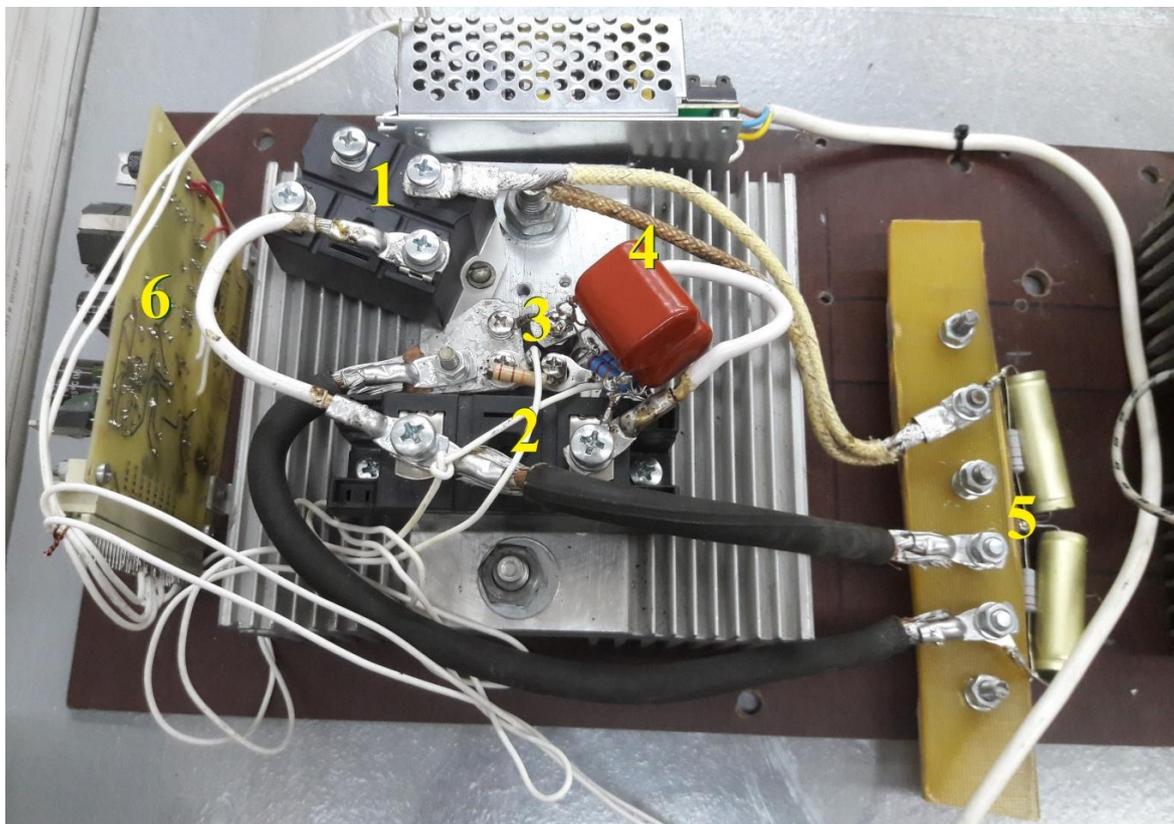
1 - осциллограф; 2 - пакетный переключатель SB1; 3 - счетчик СЭТ-1М.01; 4 - БУ; 5 - кнопка пуск/стоп; 6 - ВИП; 7 - имитатор тягового трансформатора; 8 - сглаживающий реактор; 9 - КМБ с ТЭД типа НБ-514; → - подключение ВИП с БУ ВИП к нагрузке
а) ВИП с БУ ВИП; б) КМБ с ТЭД НБ-514

Рисунок 4.3 – Экспериментальный стенд работы ТЭД в режиме нормального возбуждения

Макет штатной системы ОБ ТЭД состоит из резистора ОБ (R_1), сопротивление которого регулируется за счет переключения контакторов (K1-K3),

и индуктивного шунта ($L_{шш}$).

Общий вид макета представлен на рисунке 4.4, технические характеристики применяемых элементов, представлены в таблицах 4.2-4.4.



1,2 – диоды; 3 - IGBT-транзисторы; 4 – конденсатор; 5 – RC-цепочка; 6 – драйвер IGBT-транзисторов

Рисунок 4.4 – Макет системы ОВ ТЭД электровоза

Таблица 4.2 – Основные технические характеристики IGBT-транзистора типа IXDN75N120

Параметр	Значение
Напряжение коллектор-эмиттер, В	1200
Напряжение насыщения коллектор-эмиттер, В	2,2
Рабочий тока при 25 °С, А	150
Максимальная рассеиваемая мощность	660 Вт
Технология кристалла	NPT
Температура перехода минимальная, °С	- 40
Температура перехода максимальная, °С	+ 150
Масса, кг	0,044
Тип корпуса	PWS-D

Таблица 4.3 – Основные технические характеристики диода типа VBO72-08NO7

Параметр	Значение
Прямой ток, А	70
Максимальное обратное напряжение, В	800
Импульсный ток	750 А
Температура перехода минимальная, °С	- 40
Температура перехода максимальная, °С	150
Масса, кг	0,1
Тип корпуса	<i>PWS-D</i>

Таблица 4.4 – Основные технические характеристики диода типа MEO 450-12DA

Параметр	Значение
Прямой ток, А	453
Максимальное обратное напряжение, В	1200
Импульсный ток	4800 А
Температура перехода минимальная, °С	-40
Температура перехода максимальная, °С	150
Масса, кг	0,05
Тип корпуса	Y4-M6

Макет предлагаемой системы ОВ ТЭД (рисунок 4.4) включает в себя следующие элементы:

- *IGBT*-транзисторы (*VT1*, *VT2*) типа *IXYS IXDN75N120*, изменением длительности открытого состояния которых регулируется величина протекающего тока, основные технические параметры представлены в таблице 4.2;
- драйвера *IGBT*-транзистора, вход которого подключен к системе управления шунтирования поля, а выход – к *IGBT*-транзистору;
- диоды (*VD1*, *VD2*) типа *IXYS MEO450-12DA*, включенные последовательно с *IGBT*-транзисторами, технические параметры представлены в таблице 4.3;
- диод (*VD2*) типа *VBO 72-08NO7*, который подключен к положительной шине питания ТЭД, технические параметры представлены в таблице 4.4;
- параллельная *RC*-цепь, служащая для ограничения перенапряжений, вызываемых коммутационными процессами предлагаемой системы ОВ ТЭД;

4.2 Результаты экспериментального исследования работы штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД на лабораторном стенде

Для наглядного отображения диаграмм выпрямленного напряжения и токов ТЭД со штатной и предлагаемой системами ОВ ТЭД в ходе проведения экспериментальных испытаний использовался четырёхканальный осциллограф (3). Главным условием проведения экспериментальных исследований являлось обеспечение работы макета штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД при одинаковой нагрузке и входном напряжении питания. Полученные диаграммы напряжения ТЭД (u_d), токов якоря ($i_я$) и возбуждения ($i_в$) в цепи выпрямленного тока при работе ТЭД в режиме ОВ на трех ступенях при использовании штатной и предлагаемой систем представлены на рисунках 4.5 - 4.7.

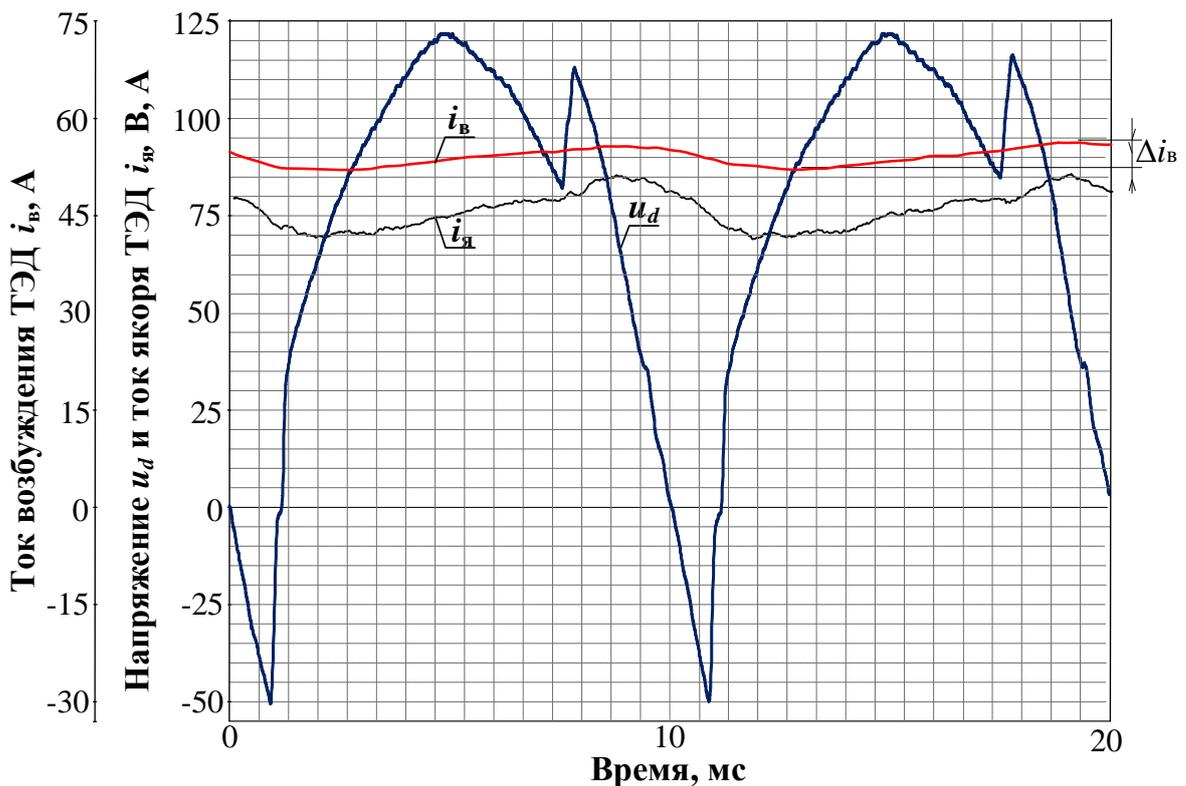


Рисунок 4.5 – Диаграмма выпрямленного напряжения u_d , токов якоря $i_я$ и возбуждения $i_в$ ТЭД на первой ступени штатной системы ОВ ТЭД электровоза

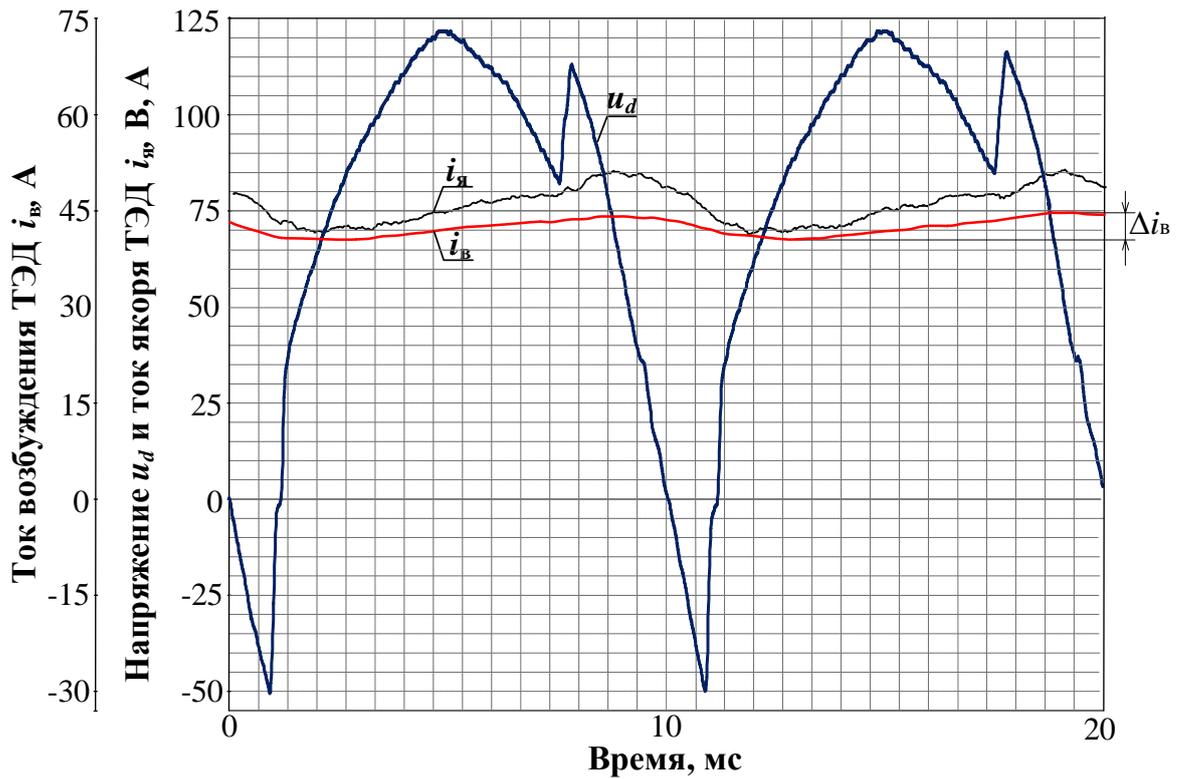


Рисунок 4.6 – Диаграмма выпрямленного напряжения u_d , токов якоря i_a и возбуждения i_b ТЭД на второй ступени штатной системы ОВ ТЭД электровоза

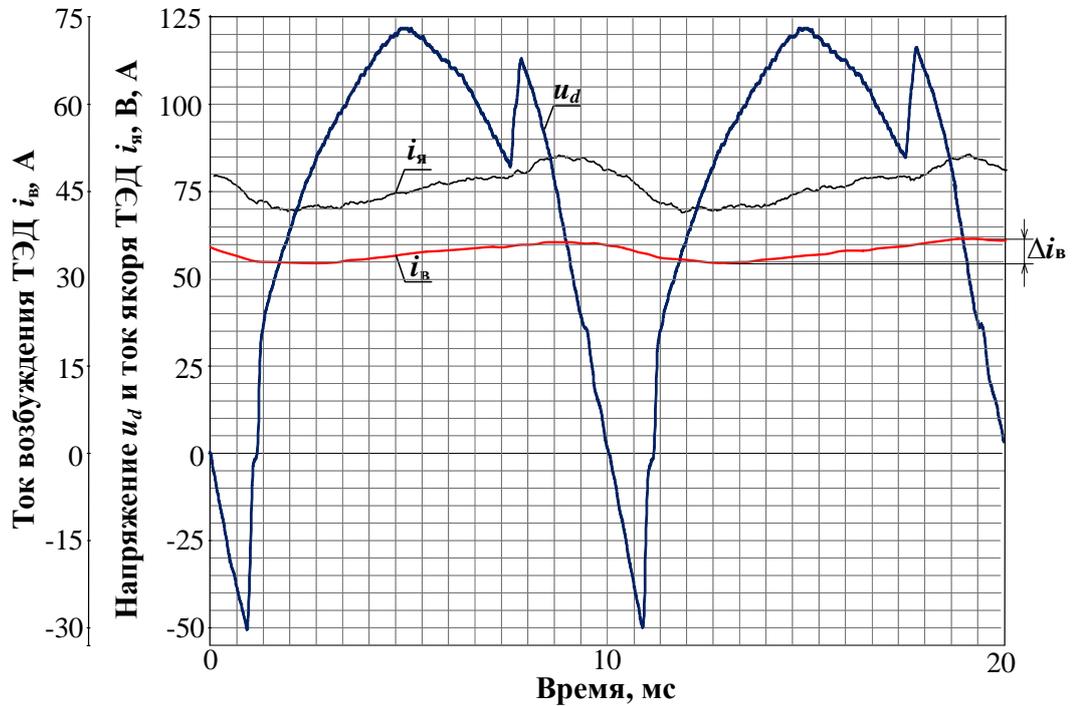


Рисунок 4.7 – Диаграмма выпрямленного напряжения u_d , токов якоря i_a и возбуждения i_b ТЭД на третьей ступени штатной системы ОВ ТЭД электровоза

На рисунках 4.8 – 4.10 представлены диаграммы выпрямленного напряжения

ТЭД u_d и токов якоря i_a и возбуждения i_b для предлагаемой системы ОВ ТЭД на базе *IGBT*-транзисторах.

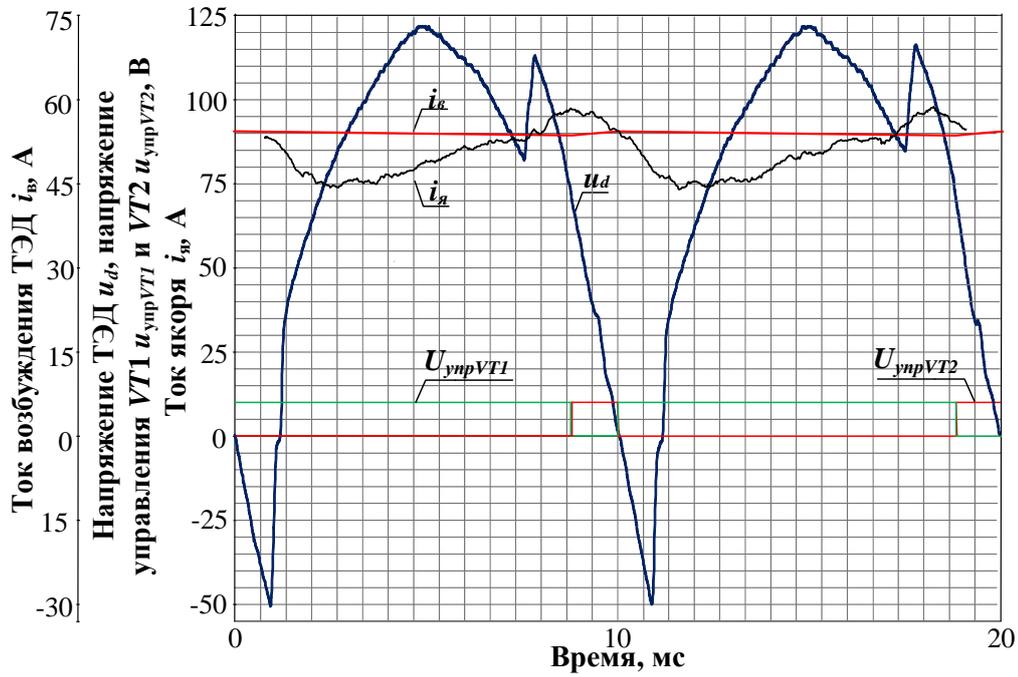


Рисунок 4.8 – Диаграмма выпрямленного напряжения u_d , токов якоря i_a и возбуждения i_b ТЭД на первой ступени предлагаемой системы ОВ ТЭД электровоза

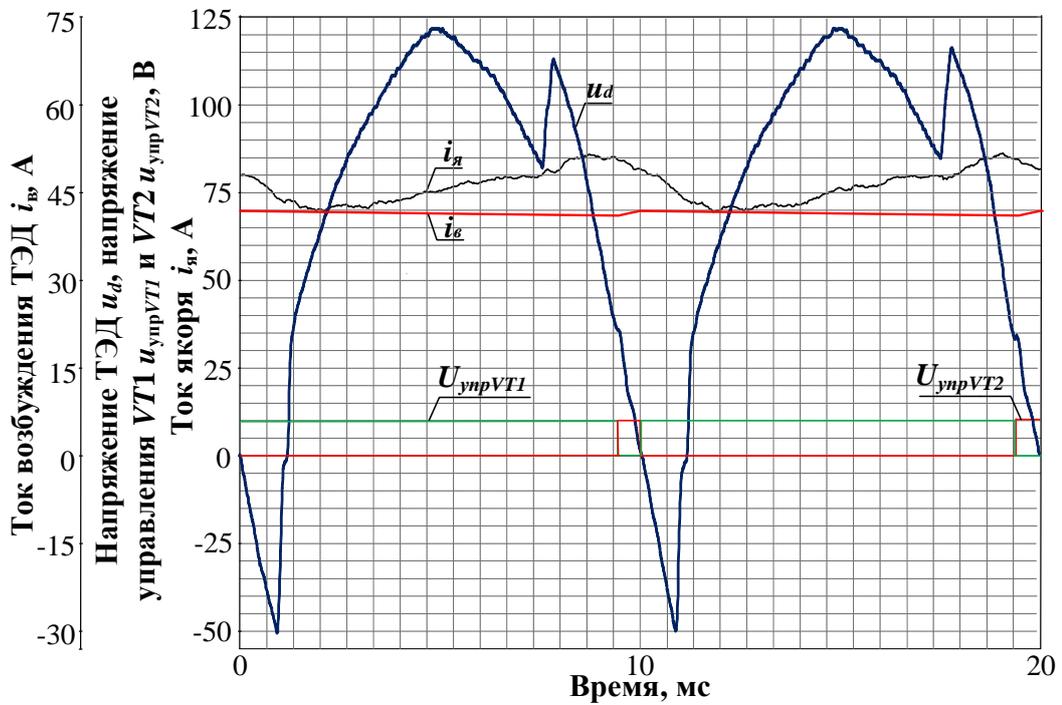


Рисунок 4.9 – Диаграмма выпрямленного напряжения u_d и токов якоря i_a и возбуждения i_b ТЭД на второй ступени предлагаемой системы ОВ ТЭД электровоза

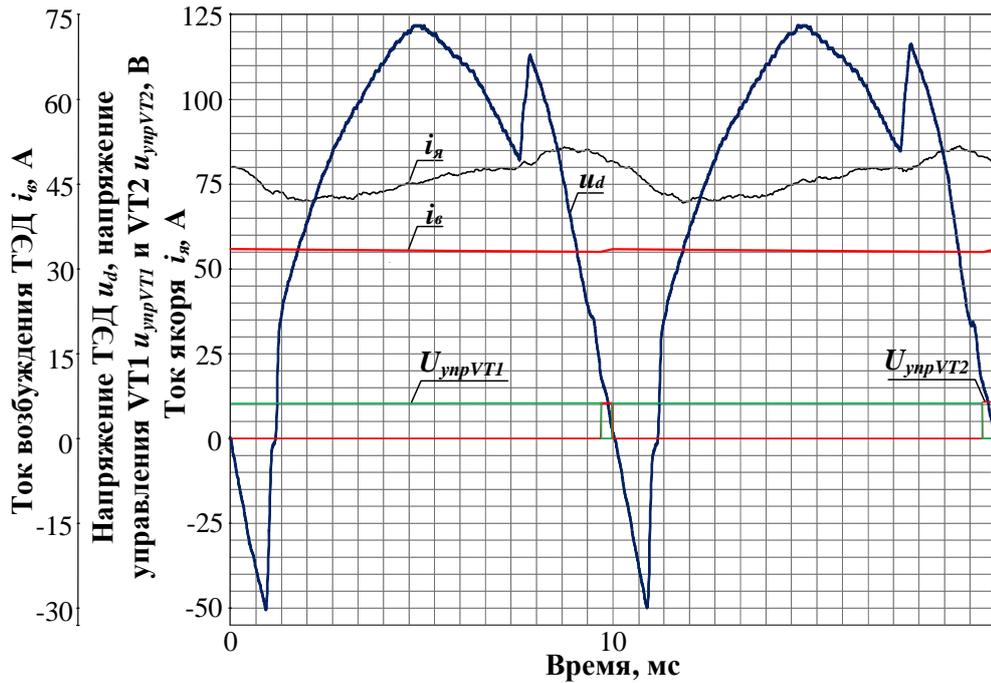


Рисунок 4.10 – Диаграмма выпрямленного напряжения u_d и токов якоря i_a и возбуждения i_b ТЭД на третьей ступени предлагаемой системы ОВ ТЭД электровоза

На рисунках 4.11 – 4.13 приведены диаграммы выпрямленного напряжения u_d ТЭД, токов якоря i_a и возбуждения i_b для штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД, полученные на физической модели.

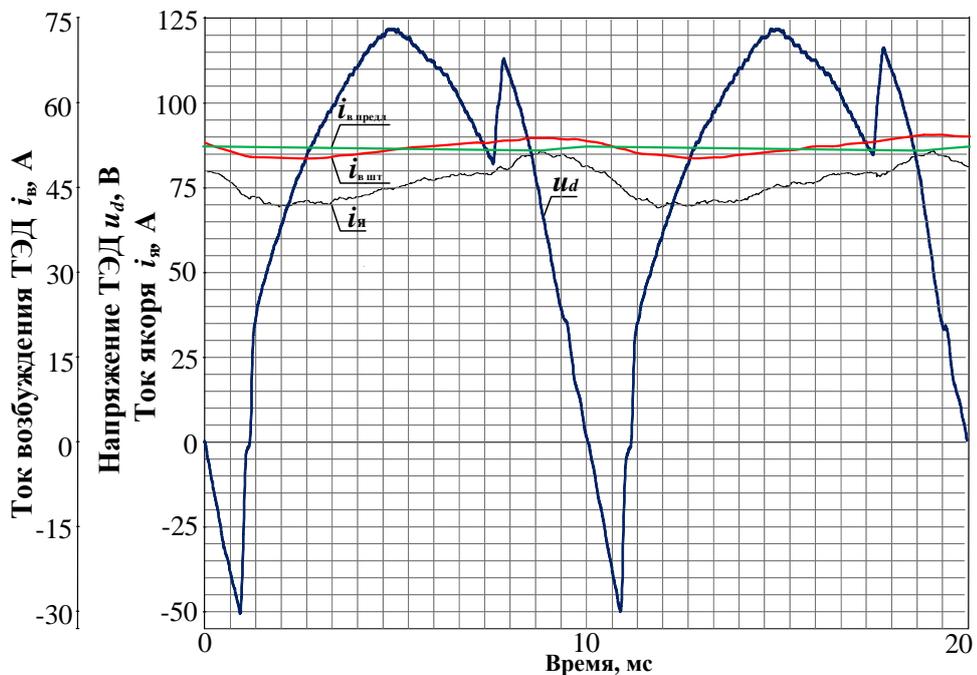


Рисунок 4.11 – Диаграмма выпрямленного напряжения u_d ТЭД, тока якоря i_a и возбуждения для штатной $i_{b \text{ штат}}$ и предлагаемой системы ОВ ТЭД $i_{b \text{ предл}}$ при работе на первой ступени ($\beta = 70\%$)

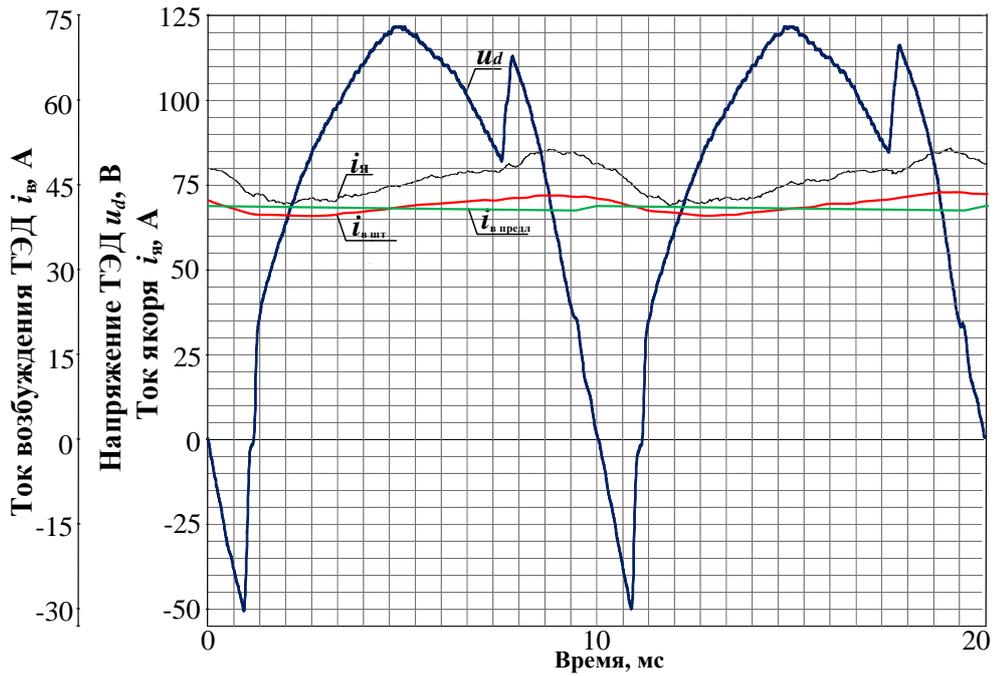


Рисунок 4.12 – Диаграмма выпрямленного напряжения u_d ТЭД, тока якоря i_a и токов возбуждения для штатной $i_{в штат}$ и предлагаемой систем ОВ ТЭД $i_{в предл}$ при работе на второй ступени ($\beta = 52\%$)

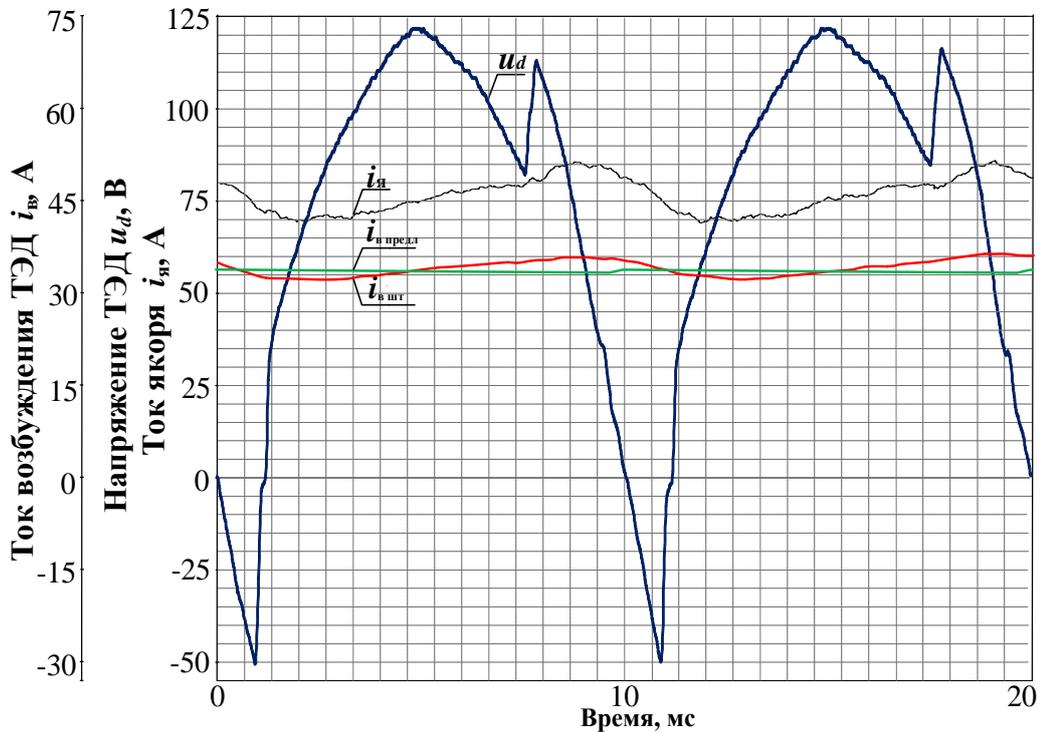


Рисунок 4.13 – Диаграмма выпрямленного напряжения u_d ТЭД, тока якоря i_a и токов возбуждения для штатной $i_{в штат}$ и предлагаемой систем ОВ ТЭД $i_{в предл}$ при работе на третьей ступени ($\beta = 43\%$)

Анализируя полученные на экспериментальном стенде электромагнитные процессы ТЭД электровоза, работающего в режиме ОП со штатной и предлагаемой системами (рисунки 4.5 – 4.13) получены коэффициенты пульсации тока возбуждения при одинаковых параметрах токов якоря, возбуждения для трех ступеней ОВ (таблица 4.5) [88].

Таблица 4.5 – Результаты анализа электромагнитных процессов ТЭД, работающего в режиме ОВ, полученных на физической модели

Ступень регулирования	Коэффициент ОВ ТЭД ($K_{ОВ}$), %	$I_{я}$, А	$I_{в}$, А	Коэффициент относительной пульсации	
				Штат. ОВ ТЭД, $K_{ОВ}$, %	Предл. ОВ ТЭД, $K_{ОВ}$, %
ОВ1	70	78	54	7,4	1,8
ОВ2	52	78	40	10	1,3
ОВ3	43	78	33	12,1	0,8

На основании данных таблиц 3.6 и 4.5, полученных в среде *MatLab Simulink* и на физической модели, построена зависимость коэффициента пульсации тока возбуждения ТЭД от коэффициента ОВ (рисунок 4.14).

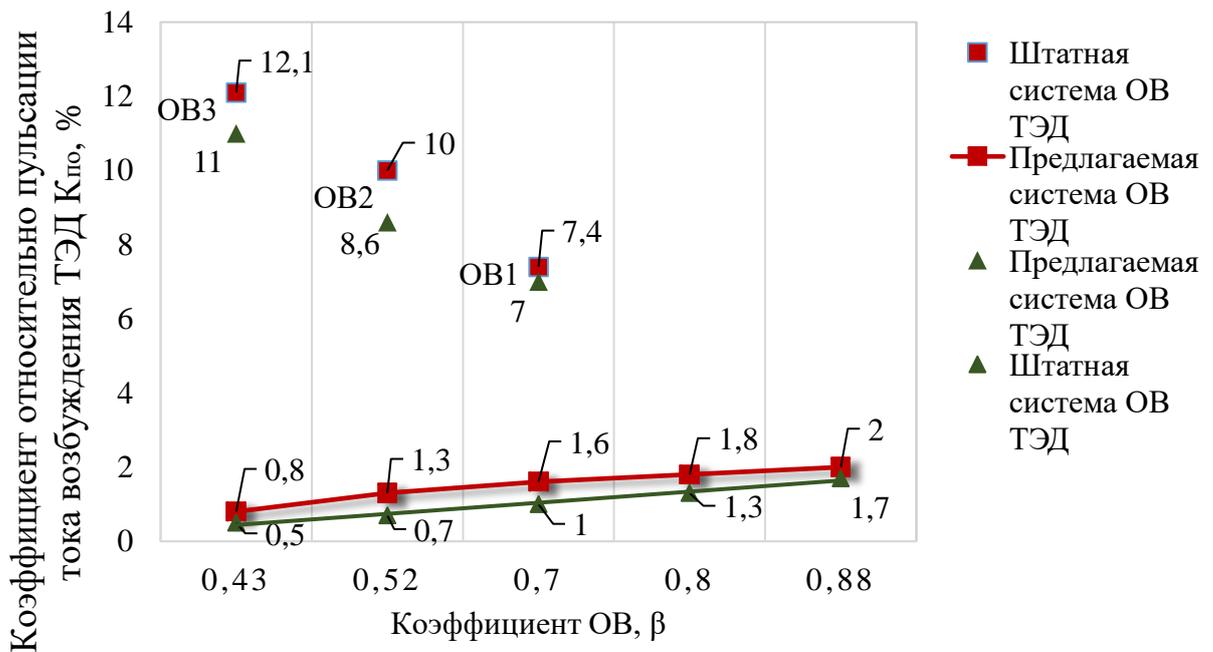


Рисунок 4.14 – Зависимость коэффициента относительно пульсации тока возбуждения от коэффициента ОВ ТЭД электровоза, полученная на физической модели и в среде *MatLab Simulink*

Из анализа рисунка 4.14 можно сделать вывод, что относительная пульсация тока возбуждения при предлагаемой системе ОВ ТЭД по отношению к штатной снижается в среднем не менее чем на 80 %. Полученные электромагнитные процессы ТЭД подтверждают адекватность работы математической модели [34].

4.3 Технико-экономическая оценка внедрения предлагаемой системы ОВ ТЭД с плавным регулированием на электровоз переменного тока серии ЗЭС5К

Экономическая эффективность разработанной системы ОВ ТЭД на базе *IGBT*-транзисторов обеспечивается за счет: плавного регулирования тока возбуждения (число ступеней не ограничено), что позволяет повысить техническую скорость электровоза не менее чем на 2,5 км/ч; снижения пульсаций тока возбуждения не менее чем на 80 %, что позволяет продлить ресурс работы ТЭД не менее чем на 15 %, а также упрощается силовая цепь ЭПС, за счет исключения с электровоза серии ЗЭС5К 12 медесодержащих индуктивных шунтов и 24 контактора [33].

Таким образом, годовая экономическая эффективность внедрения устройства ОВ ТЭД на электровоз переменного тока определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{эф}} = \mathcal{E}_{\text{V}_{\text{уч}}} + \mathcal{E}_{\text{рес. ТЭД}}, \quad (4.7)$$

где $\mathcal{E}_{\text{V}_{\text{уч}}}$ – денежные средства от повышения участковой скорости электровоза;

$\mathcal{E}_{\text{рес.ТЭД}}$ – денежные средства от повышения ресурса работы ТЭД электровоза, в результате внедрения системы ОВ ТЭД электровоза с плавным регулированием.

4.3.1 Экономия денежных средств от повышения участковой скорости электровоза

Экономия денежных средств от уменьшения участковой скорости движения поездов определяется по формуле (4.8)

$$\Delta V_{\text{тех}} = E_{\text{п-час}} \cdot \Sigma NS \cdot (1/V_{\text{уч до}} - 1/V_{\text{уч после}}), \quad (4.8)$$

где $E_{\text{п-час}}$ – стоимость поезд-часа грузового поезда на ВСЖД согласно распоряжению «ОАО «РЖД» № 1292/р от 11.06.2021, $E_{\text{п-час}} = 2393,42$ руб.;

ΣNS – годовой пробег грузового электровоза 3ЭС5К по главному ходу, 262800 поезд-км.;

$V_{\text{уч до}}$ – участковая скорость до модификации электровоза, $V_{\text{тех до}} = 37$ км/ч, согласно данным эксплуатационного локомотивного депо Иркутск;

$V_{\text{уч после}}$ – участковая скорость после модификации электровоза, $V_{\text{тех после}} = 39,5$ км/ч.

Экономия расходов на один трехсекционный электровоз серии 3ЭС5К при изменении величины участковой скорости составит

$$\Delta E_{V_{\text{уч}}} = 2393,42 \cdot 262800 \cdot (1/37 - 1/39,5) = 1075,93 \text{ тыс. руб.}$$

4.3.2 Экономия денежных средств от повышения ресурса работы тяговых электродвигателей

Согласно статистике МПР по оборудованию электровозов приписки к эксплуатационным локомотивным депо Восточно-Сибирской дирекции тяги (Приложение № 70 12 месяцев ВСЖД за 2020 год) общее количество неисправностей по всем видам оборудования на 144 электровоза серии 3ЭС5К

приходится 2016 отказов, из общего числа отказов на ТЭД – 369 случаев. В свою очередь при неисправности ТЭД наибольшее количество отказов приходится на коллекторно-щеточный аппарат – 223 случая (около 60 %) (рисунок 4.15).

В свою очередь при неисправности ТЭД наибольшее количество отказов приходится на коллекторно-щеточный аппарат – 223 случая (около 60 %) (рисунок 4.15). Из анализа маршрутных карт машиниста, выявлено, что режим ОВ ТЭД на Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД) используется на 30 % всего пути, таким образом, можно считать, что не менее чем 15 % отказов ТЭД происходит в режиме ОВ ТЭД по причине нарушения коммутационной устойчивости в следствии пульсации тока возбуждения. Используя предлагаемое устройство ОВ ТЭД пульсация тока возбуждения снижается не менее чем на 80 %, что позволит практически исключить выходы из строя коллекторно-щеточный аппарат в режиме ОВ ТЭД электровоза.

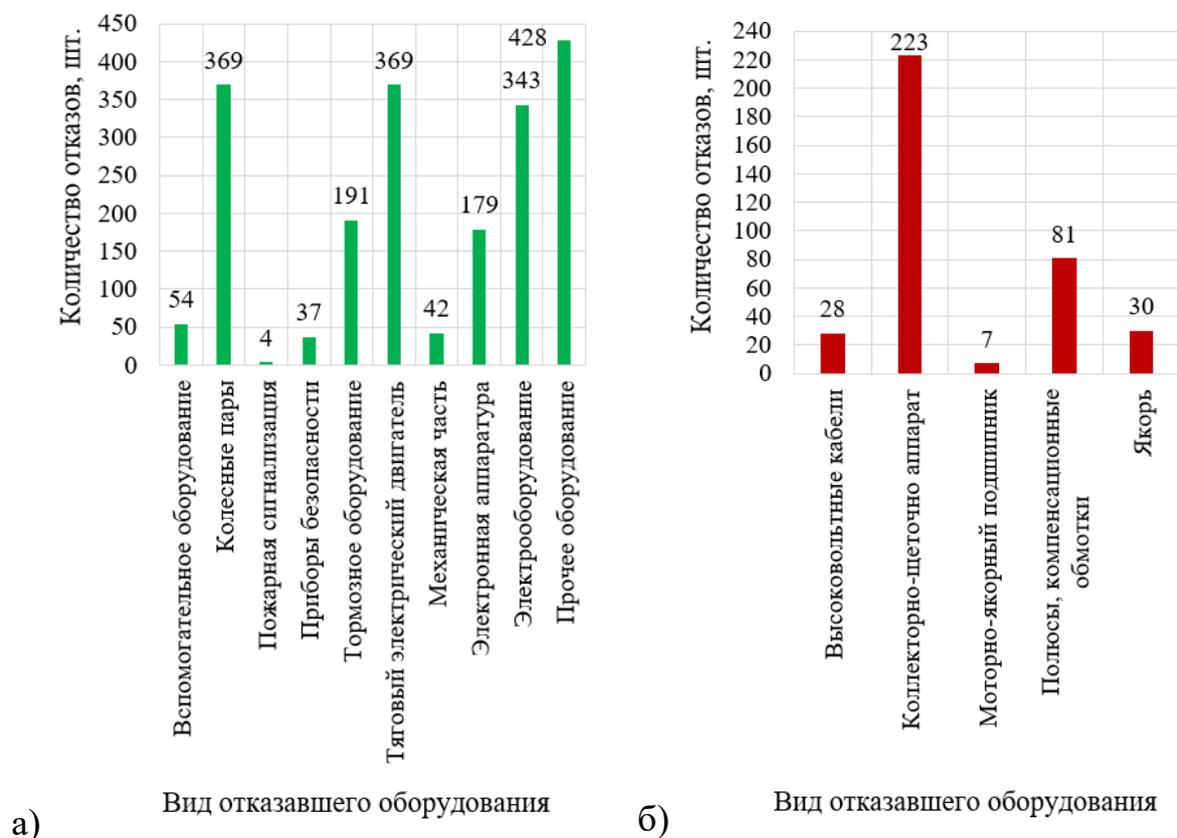


Рисунок 4.15 – Гистограмма распределения общего количества отказов оборудования (а) и распределения отказавших узлов по ТЭД (б) электровозов серии ЗЭС5К приписки к эксплуатационным локомотивным депо Восточно-Сибирской дирекции тяги за 2020 год

Тогда экономия денежных средств при сокращении отказов коллекторно-щеточного аппарата ТЭД электровоза при работе предлагаемого устройства ОВ ТЭД определяется

$$C_{\text{ТЭД}} = 0,15 \cdot T_{\text{пр}} \cdot Ц, \quad (4.9)$$

где 0,15 - доля сокращения времени простоя электровоза в следствии выхода из строя коллекторно-щеточного аппарата ТЭД при работе предлагаемого устройства ОВ ТЭД электровоза;

$T_{\text{пр}}$ – время простоя электровозов в следствии выхода из строя коллекторно-щеточного аппарата ТЭД, 8048,77 часа (приложения № 70 12 месяцев ВСЖД за 2020 год);

$Ц$ – цена одного часа простоя поездного электровоза с локомотивной бригадой с учетом амортизации, арендных платежей и капитальных ремонтов локомотивов, 2376,31 руб. согласно распоряжению «ОАО «РЖД» № 1292/р от 11.06.2021.

Таким образом, экономия денежных средств с повышения ресурса ТЭД электровозов серии 3ЭС5К приписки эксплуатационных локомотивных депо ВСЖД (144 электровозов) за счет работы предлагаемого устройства ОВ ТЭД составит

$$Э_{\text{рес. ТЭД}} = 0,15 \cdot 8048,77 \cdot 2376,31 = 2868,96 \text{ тыс. руб.}$$

Следовательно, на один электровоз серии 3ЭС5К экономия денежных средств составит 19,92 тыс. руб.

4.4 Затраты на изготовление усовершенствованных систем ослабления возбуждения тяговых электрических двигателей для электровоза серии ЗЭС5К

Элементная база для изготовления предлагаемой системы ОВ ТЭД на один электровоз ЗЭС5К представлена в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Сметная стоимость элементной базы для изготовления системы ОВ ТЭД электровоза ЗЭС5К

Название элемента	Количество, ед.	Стоимость, руб./ед.	Сумма, тыс. руб.
Блок управления	3	100000	300
Корпус устройства	12	2500	24
IGBT-транзистор с радиатором	24	28000	624
Драйвер	24	15000	360
Диод	36	15000	540
Соединительные медная шина, м	50	550	27,5
Провод монтажный, м	1500	15	22,5
Датчик напряжения	12	4000	48
Датчик тока	12	4000	48
Радиатор	12	15000	180
Резистор ОВ	12	5000	48
Итого: стоимость элементной базы для изготовления $K_{пр}$, руб.			2222

В таблице 4.7 представлена тарифная заработная плата на монтаж устройства ОВ ТЭД на один электровоз серии ЗЭС5К, согласно данным отдела по нормированию оплаты труда.

Таблица 4.7 – Тарифная заработная плата за монтаж системы ОВ ТЭД

Наименование вида работ	Разряд работ	Трудоемкость, чел. час.	Часовая тарифная ставка, руб.	Сумма, тыс. руб.
Разборка типового устройства ОВ ТЭД и установка предлагаемого устройства ОВ ТЭД на один электровоз серии ЗЭС5К	6	300	95,92	28,776
Итого: тарифная заработная плата C_c , руб.				28,776

Фонд оплаты труда (ФОТ) работников рассчитывается по формуле (4.10)

$$\text{ФОТ} = E_{\text{озп}} + E_{\text{дзп}}, \quad (4.10)$$

где $E_{\text{озп}}$ – основная заработная плата;

$E_{\text{дзп}}$ – дополнительная заработная плата.

Отчисления на социальные нужды $E_{\text{соц}}$ определяются по формуле (4.11)

$$E_{\text{соц}} = 0,3 \cdot \text{ФОТ}. \quad (4.11)$$

Основная и дополнительная заработные платы рассчитываются по формулам (4.12) и (4.13)

$$E_{\text{озп}} = C_c \cdot (K_p + K_c) \cdot (1 + K_n), \quad (4.12)$$

$$E_{\text{дзп}} = 9 \% \cdot E_{\text{озп}}, \quad (4.13)$$

где K_n – коэффициент премии, 35 %;

K_p – районный коэффициент, 1,3;

K_c – северный коэффициент, 30 %.

Подставив численные значения в формулы (4.12), (4.13) получим

$$E_{\text{озп}} = 28,776 \cdot 10^3 \cdot (1,3 + 0,3) \cdot (1 + 0,35) = 62,156 \text{ тыс. руб.}$$

$$E_{\text{дзп}} = 0,09 \cdot 62,156 \cdot 10^3 = 5,59 \text{ тыс. руб.}$$

Подставив численные значения в формулу (4.10) получим

$$\text{ФОТ} = 62,156 \cdot 10^3 + 5,59 \cdot 10^3 = 67,75 \text{ тыс. руб.}$$

Подставив численные значения в формулу (4.11) получим

$$E_{\text{соц}} = 0,3 \cdot 67,75 \cdot 10^3 = 20,325 \text{ тыс. руб.}$$

В итоге капитальные вложения K_B на закупку комплектующих устройств ОВ ТЭД и установку их на один электровоз серии ЗЭС5К определяются по формуле (4.14)

$$K_B = K_{\text{пр}} + \Phi_{\text{ОТ}} + E_{\text{соц}}. \quad (4.14)$$

Подставив численные значения в формулу (4.14) получим

$$K_B = 2222 \cdot 10^3 + 67,75 \cdot 10^3 + 20,325 \cdot 10^3 = 2210,1 \text{ тыс. руб.}$$

Стоимость штатных систем ОВ ТЭД для ЗЭС5К равна 606 тыс. рублей (12 индуктивных шунтов типа ИШ-009 стоимостью 44500 руб., 24 контактора типа ПК-358 стоимостью 3000 руб.). Итоговая стоимость оборудования электровоза ЗЭС5К новыми устройства ОВ ТЭД с учетом разницы штатных составит 1556,08 тыс. рублей.

4.5 Общая годовая экономия денежных средств от внедрения усовершенствованной системы ОВ ТЭД на электровоз переменного тока серии ЗЭС5К

Подставив численные значения в формулу (4.7) общий экономический эффект от внедрения усовершенствованной системы ОВ ТЭД на электровоз ЗЭС5К составляет

$$\mathcal{E}_{\text{эф}} = 1075,93 + 19,92 = 1095,85 \text{ тыс. руб.}$$

Срок окупаемости составит

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_B}{\mathcal{E}_{\text{эф}}}, \quad (4.15)$$

Подставив численные значения в формулу (4.15) получим

$$T_{\text{ок}} = \frac{1556,08}{1095,85} \approx 1,42 \text{ года.}$$

В итоге получено, что годовая экономия денежных средств от модернизированного электровоза серии ЗЭС5К составит 1095,85 тыс. руб. Срок окупаемости внедрения усовершенствованной системы ОВ ТЭД на электровоз переменного тока не превысит 1 года 5 месяцев [33, 88].

4.6 Выводы по разделу 4

1 Разработан научный экспериментальный стенд штатной и предлагаемой систем ОВ ТЭД электровоза переменного тока, проведены его испытания, на котором получены диаграммы токов и напряжения ТЭД, работающего в режиме ОВ, подтверждающие адекватность математической модели с погрешностью не более 10 %.

2 Анализируя полученные электромагнитные процессы ТЭД, работающего в режиме ОВ, получено, что предлагаемая система ОВ ТЭД позволит обеспечить плавное регулирование тока возбуждения, при этом снизить его относительную пульсацию по сравнению со штатной системой на 80 %.

3 Экономический эффект с одного электровоза переменного тока серии ЗЭС5К, оборудованного усовершенствованной системой ОВ ТЭД, составит 1095,85 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВСЖД – Восточно-Сибирская железная дорога.

ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь.

КМБ – колесно-моторный блок.

МДС – магнитодвижущая сила.

ЭПС – электроподвижной состав.

ОАО «РЖД» – открытое акционерное общество «Российские железные дороги».

ХХ – холостой ход.

ОЯ – обмотка якоря.

ОВ – ослабление возбуждения.

НВ – нормальное возбуждение.

СПП – силовой полупроводниковый прибор.

СР – сглаживающий реактор.

ТЭД – тяговый электродвигатель.

ТТ – тяговый трансформатор.

ЭДС – электродвижущая сила.

ИШ – индуктивный шунт.

IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistor* (рус. биполярный транзистор с изолированным затвором).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Алексеев, А.Е. Тяговые электрические машины и преобразователи / А.Е. Алексеев. – Л. «Энергия», 1977. – 444 с.
- 2 Алексеев, А.С. Использование метода конечных элементов для исследования переходных процессов в контактной сети. / А.С. Алексеев // Труды 2 Международного симпозиума. М.: МИИТ, 2000. – 104 с.
- 3 Алексеев А.С. Исследование влияния нелинейности кривой намагничивания тягового электродвигателя на переходные процессы в силовой цепи электровоза / А.С. Алексеев // Фундаментальные проблемы динамики и прочности подвижного состава: Юбил. сб. науч. тр. / Под ред. А.Н. Савоськина. – М.: МГУПС, 1997. – С. 84-88.
- 4 Алексеев, А.С. Система автоматического регулирования тока коллекторных тяговых двигателей электровоза: диссертация...канд. техн. наук: 05.09.03 / Алексеев Алексей Сергеевич - Москва, 2009. – 302 с.
- 5 Аликин, Р. И. Исследование кривых тока и некомпенсированной ЭДС коммутируемых секций тягового двигателя с составными щетками / Р.И. Аликин. – Текст: непосредственный // Электротехника. – 1968. – № 4. – С. 41-43.
- 6 Асанов, Т.К. Исследование электромагнитных процессов в тяговой сети при совместной работе нескольких преобразовательных агрегатов: автореферат дис. ... канд. тех. наук: 05.22.09 / Тюкфяць Касымович Асанов. – Москва, 1979. – 24 с.
- 7 Асанов, Т.К. Элементы математической модели электровоза с тиристорным преобразователем / Т.К. Асанов, Р.И. Караев, А.Ф. Фролов, А.Н. Шуров // Вестник ВНИИЖТ. – №3. – М., 1981. – С. 34-38.
- 8 Стратегия научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга): утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 17 апреля 2018 г. № 769/р. - М., 2018. - 218 с.
- 9 Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов // Учебник для вузов ж. д. транспорта. – М. Транспорт, 1978. – 266 с.

10 Бочаров, В.И., «Магистральные электровозы». Электрические машины и трансформаторное оборудование электровозов. / П.А. Золотарев, М.А. Козорезов, Ю.В. Куприянов, А.Л. Курочка, А.Л. Лозановский, И.Л. Шапиро, В.П. Янов // «Машиностроение». – 1968. – С. 444.

11 Буняева, Е.В. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения электровозов переменного тока: диссертация. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Буняева Екатерина Викторовна – Хабаровск. – 2013 – 158 с.

12 Буше, Н.А., Пути экономия цветных металлов на железнодорожном транспорте / С.М. Захаров, Т.Г. Яковлева // Железные дороги мира. – 2004. – № 2 – 52- 54 с.

13 Веников, В.А. Применение теории подобия и физического моделирования в электротехнике / В.А. Веников // Госэнергоиздат. – 1949. – 168 с.

14 Власьевский, С.В. Математическое моделирование процессов коммутации в выпрямительно-инверторных преобразователях электровозов однофазно-постоянного тока: Монография / С.В. Власьевский – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС. – 2001. – 138 с.

15 Власьевский, С.В. Повышение эффективности выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов переменного тока с рекуперативным торможением: диссертация. докт. техн. наук: 05.09.03 / Власьевский Станислав Васильевич – Хабаровск. – 2001. – 396 с.

16 Волчек, Т.В. Анализ способов и технических средств систем ослабления поля тяговых электрических двигателей электровозов постоянного и переменного токов / О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, А.О. Линьков // Вестник Иркутского государственного технического университета / Иркутский национальный исследовательский технический ун-т. – №3(23). – 2019. – С. 531-542.

17 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. – № 3. –2019. – С. 163-171.

18 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. – № 3. – 2020. – С. 2-14.

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

20 Волчек, Т.В. Повышение технической скорости электроподвижного состава за счет обеспечения плавного регулирования тока возбуждения тяговых электродвигателей / О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, В.С. Томилов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – №3 (67). – 2020.– С. 93-100.

21 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. – №2(50). – 2021. – С. 99-105.

22 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. – №4(52). – 2021. – С. 97-102.

23 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.

24 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*»: Труды третьей международ. науч. конф. / Чехия, Карловы Вары. 2017 г. – С. 96-102.

25 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 международной науч.- практ. конф. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2018. – С.411- 415.

26 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.

27 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.

28 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.

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

30 Волчек, Т.В. Современный подход к регулированию ослабления поля тяговых электродвигателей электровозов переменного тока / Т.В. Волчек, О.В.

Мельниченко, С.Г. Шрамко. // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона / Дальневосточный университет путей сообщения. – Хабаровск. – №3. – 2019. – С. 23-25.

31 Волчек, Т.В. Повышение ресурса работы коллекторно-щеточного аппарата за счет усовершенствованной системы ослабления поля тяговых электродвигателей электровоза / 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.

32 Волчек, Т.В. Влияние пульсации тока возбуждения на процесс коммутации в коллекторных тяговых двигателях электровоза 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.

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

34 Волчек, Т.В. Экспериментальные исследования усовершенствованной и штатной системы ослабления поля тяговых электродвигателей электровозов переменного тока / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век. Сборник материалов VII Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург. – 2020. – С. 127-134.

35 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.

36 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.

37 Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия. – 1978. – 832 с.

38 Гребенюк, П.Т. Тяговые расчеты / П.Т. Гребенюк, А.Н. Долганов, А.И. Скворцов // Справочник под ред. П.Т. Гребенюка. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.

39 Долгосрочной программы развития ОАО «РЖД» до 2025 года (утверждена распоряжением Правительством РФ от 19.03.2019 г. № 466р): [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-19032019-n-466-r/dolgosrochnaia-programma-razvitiia-otkrytogo-aktsionernogo/> (дата обращения 20.09.2020).

40 Дубровский, З.М. Грузовые электровозы переменного тока / З.М. Дубровский, В.И. Попов, Б.А. Тушканов // Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт. – 1998. – 503 с.

41 Дымант, Ю.Н. Электрическая схема электропоезда ЭР9Е / Ю.Н. Дымант, В.Г. Уткин. // Электрическая и тепловозная тяга. – 1978. – №7. – С. 31-34.

42 Евстафьев, А.М. Электронные системы ослабления возбуждения тяговых двигателей электроподвижного состава: диссертация...канд. техн. наук: 05.22.07 / Евстафьев Андрей Михайлович – Санкт-Петербург. – 2005. – 135 с.

43 Ж. Коже «Итоги пятилетней эксплуатаций электровозов ВВ15000» / Железные дороги мира. – Москва. – 1978. – № 10. – 91 с.

44 Жиц, М. З. Переходные процессы в машинах постоянного тока / М.З. Жиц. – М.: Энергия. – 1974. — 118 с.

45 Захарченко, Д.Д. Тяговые электрические машины и трансформаторы / Д.Д. Захарченко // Учебник для вузов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт. – 1979. – 303 с.

46 Захарченко, Д.Д. Тяговые электрические машины / Д.Д. Захарченко, Н.А. Ротанов // Учебник для вузов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт. – 1991. – 343 с.

47 Информационная система «Грузопоток» руководство по эксплуатации ООО ИЦ «Кортэс». – Москва. – 2008. – 65 с.

- 48 Иоффе, А.Б. Тяговые электрические машины. – М.: Госэнергоиздат/ – 1967. – 248 с.
- 49 Калинин, М.В. Влияние параметров полупроводниковых приборов на характеристики электровозов переменного тока в режиме ослабленного возбуждения / М.В. Калинин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 2(24). – С. 114-124.
- 50 Калинин, М.В. Совершенствование системы ослабления возбуждения тяговых двигателей электровозов переменного тока: диссертация...канд. техн. наук: 05.22.07 / Калинин Михаил Владимирович – Санкт-Петербург. – 2011. – 161 с.
- 51 Калинин, М.В. Электронные системы ослабления возбуждения ТД электровозов переменного тока / М.В. Калинин // Современные технологии – транспорту. Известия ПГУПС. – 2009. – 19-29 с.
- 52 Каталог продукции. Прокат холоднокатаный тонколистовой из электротехнической анизотропной стали / ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат». – 2009. – 42 с.
- 53 Кужим, М.Ф., Савичев Н.В. Электровоз ВЛ15. / М.Ф. Кужим, Н.В. Савичев // Справочник для локомотивных и ремонтных бригад – СПб.: Астерион. – 2002. – 380 с.
- 54 Кулинич, Ю.М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием: монография / Ю.М. Кулинич. – Хабаровск: изд-во ДВГУПС. – 2001. – 153 с.
- 55 Курбасов, А.С. Повышение работоспособности тяговых электродвигателей / А.С. Курбасов // М.: Транспорт. – 1977. – 222 с.
- 56 Курбасов, А.С. Проектирование тяговых электродвигателей / А.С. Курбасов, В.И. Седов, Л.Н. Сорин //: Учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Транспорт. – 1987. – 536 с.
- 57 Курочка, А.Л. Исследование высоковольтных электрических машин постоянного и пульсирующего тока / А.Л. Курочка, А.А. Суровиков, В.П. Янов // М.: Энергия. – 1975. – 192 с.

58 Кучеров, С.В. Система регулирования скорости тяговых электродвигателей электровоза на базе импульсно-резистивного шунта ИРШ-К4 / С.В. Кучеров // Труды Забайкальского института ж.д. транспорта «Транссиб: на острие реформ». – 2016. – 132-137 с.

59 Лейтес, Л.В. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов / Л.В. Лейтес, А.М. Пинцов. – М.: Энергия. – 1974. – С. 192.

60 М. Скилбин Развитие применения тиристорov для электрической тяги: новые электровозы класса 2 «Национального общества железных дорог Бельгии». – Железные дороги мира. – 1976. – № 8. – 79-88 с.

61 Мазнёв, А.С. Электронные системы управления для электроподвижного состава постоянного тока / А.С. Мазнёв, А.М. Евстафьев // Известия ПГУПС. Современные технологии – транспорту. – 2007. – 60-69 с.

62 Мазнев, А.С., Евстафьев А.М. Тяговые возможности электропоездов можно улучшить / А.С. Мазнев, А.М. Евстафьев // Локомотив. – 2004. – №10. – 32-33 с.

63 Мазнев, А.С. Электронные системы регулирования возбуждения для электроподвижного состава / А.С. Мазнев, О.И. Шатнев, А.М. Евстафьев // Вестник РГУПС. – 2007. – №3. – С. 4-12.

64 Мазнев, А.С. Электропоезд ЭР2 с тиристорной системой ослабления возбуждения / А.С. Мазнев, О.И. Шатнев, К.В. Марченко // Локомотив. – 2001. – №3. – 29-30 с.

65 Мельниченко О.В. Повышение энергетических показателей электровозов переменного тока с тиристорными выпрямителями: диссертация ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Мельниченко Олек Валерьевич. – Хабаровск. – 2005. – 168 с.

66 Мепшит, Б.Г. Определение энергетической эффективности импульсных преобразователей средствами имитационного моделирования / Б.Г. Мепшит, Г.Б. Вебер // Железные дороги мира. – 1980. – №1 – С. 23-29.

- 67 Михайлов, М.И. Определение электрических параметров контактной сети однофазного переменного тока / М.И. Михайлов, Ю.Е. Купцов, А.Д. Разумов // Вестник ВНИИЖТ. – 1957. – № 8. – С. 16–20.
- 68 Находкин, М. Д. Проектирование тяговых электрических машин / М.Д. Находкин // М.: Транспорт. – 1957. – 536 с.
- 69 Озеров, М.И. Регулирование тяги ослаблением возбуждения двигателей / М.И. Озеров, А.И. Чумоватов / Локомотив. –2002. –№2. –16-18 с.
- 70 Осипов, С.И. Теория электрической тяги / С.И. Осипов, С.С. Осипов, В.П. Феокимов // Учебник для вузов ж.-д. транспорта – С.: Маршрут. – 2006. – 436 с.
- 71 Пассажирский электровоз ЧС2^т / Под ред. А.Л. Лисицына. – М.: Транспорт. – 1979. – 288 с.
- 72 Пассажирский электровоз ЧС4 и ЧС4^т / Каптелкин В. А., Колесин Ю.В., Ильин И.П., Потапов А.С. Моховиков Д.И. – М.: Транспорт. – 1975. – 384 с.
- 73 Пассажирский электровоз ЧС^т / Под ред. А. Л. Лисицына. – М.: Транспорт. – 1979. – 288 с.
- 74 Патент № 2700243, Российская Федерация, МПК В60L 9/08 (2006.01), В60L 15/08 (2006.01), H02P 7/10 (2006.01). 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». – 8 с.: ил. - Текст: непосредственный.
- 75 Патент № 119695 Российская Федерация, МПК В60L15/08. Устройство для регулирования скорости тяговых электродвигателей электровоза: № 2012108233/11: заявл. 05.03.2012: опубликовано 27.08.2012 / Воротилкин А.В., Хоменко А.П., Каргапольцев С.К., Ярилов Е.В., Кучеров С.В., Ларченко А.В. заявитель ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения». – 2 с.: ил. - Текст: непосредственный.

76 Патент № 2208530 Российская Федерация, МПК В60L15/08. Тяговый электропривод постоянного тока с тиристорным управлением: № 2001127657/28: заявл. 04.10.2001: опубликовано 20.07.2003 / Минаев М.И., Борейша В.В., Скобельцин В.В., Мазнев А.С. заявитель ОАО «Экспериментальный завод». – 6 с.: ил. - Текст: непосредственный.

77 Патент № 2262456 Российская Федерация, МПК В60L15/08. Устройство для регулирования скорости электроподвижного состава: №2004108081/11: заявл. 19.03.2004: опубликовано 20.10.2005 / Мазнев А.С., Шатнев О.И., Евстафьев А.М.; заявитель ГОУ ВПО «ПГУПС». - 7 с.: ил. - Текст: непосредственный.

78 Патент № 2283248 Российская Федерация, МПК В60L 15/04, H02P7/06. Устройство для регулирования возбуждения тягового электродвигателя постоянного тока: № 2005103681/11; заявл. 11.02.2005: опубликовано 10.09.2006 / Мазнев А.С., Евстафьев А.М. заявитель ГОУ ВПО «ПГУПС». – 7 с. ил. - Текст: непосредственный.

79 Патент № 2291068 Российская Федерация, МПК В60L15/08. Тяговый электропривод постоянного тока с тиристорным управлением: №2005121118/11: заявл. 05.07.2005: опубликовано 10.01.2007 / Мазнев А.С., Евстафьев А.М. заявитель ГОУ ВПО «ПГУПС». – 7 с. ил. - Текст: непосредственный.

80 Патент № 2369492 Российская Федерация, МПК В60L15/08. Устройство для регулирования скорости электроподвижного состава: № 2008124695/11: заявл. 16.06.2008: опубликовано 10.10.2009 / Мазнев А.С., Евстафьев А.М. заявитель ГОУ ВПО «ПГУПС». – 6 с. ил. - Текст: непосредственный.

81 Патент № 43826 Российская Федерация, МПК В60L15/08. Устройство для регулирования скорости электроподвижного состава: №2004131269/22: заявл. 25.10.2004: опубликовано 10.02.2005 / Мазнев А.С., Евстафьев А.М. заявитель ГОУ ВПО «ПГУПС». – 8 с. ил. - Текст: непосредственный.

82 Патент № 46718 Российская Федерация, МПК В60L15/08. Устройство для регулирования возбуждения тягового электродвигателя постоянного тока: №

2005105784/22: заявл. 01.03.2005: опубликовано 27.07.2005 / Мазнев А.С., Евстафьев А. М. заявитель ГОУ ВПО «ПГУПС». – 6 с. ил. - Текст: непосредственный.

83 Патент № 55694 Российская Федерация, МПК В60L15/08. Устройство для регулирования возбуждения тяговых электродвигателей постоянного тока: № 2006109145/22: заявл. 22.03.2006: опубликовано 27.08.2006 / Мазнев А.С., Евстафьев А.М. заявитель ГОУ ВПО «ПГУПС». – 7 с. ил. - Текст: непосредственный.

84 Патент № 76295 Российская Федерация, МПК В60L15/08. Тяговый электропривод: № 2008119979/22: заявл. 20.05.2008: опубликовано 20.09.2008 / Мазнев А. С., Евстафьев А.М., Калинин М.В. заявитель ГОУ ВПО «ПГУПС». – 6 с. ил. - Текст: непосредственный.

85 Патент № 85408 Российская Федерация, МПК В60L15/08. Устройство для регулирования скорости электроподвижного состава: № 2009103714/22: заявл. 04.02.2009: опубликовано 10.08.2009 / Ярилов Е. В., Кучеров С.В., Ларченко А.В.; заявитель общество с ограниченной ответственностью «Забайкальский научно-исследовательский институт отраслевых технологий». – 7 с. ил. - Текст: непосредственный.

86 Патент № 148 478 Российская Федерация, МПК В60L15/08. Тяговый электропривод выпрямленного тока с электронным шунтом: № 2014129594/11: заявл. 18.07.2014: опубликовано 10.12.2014 / Лазуткин Г.В., Шуликова А.И.; заявитель открытое акционерное общество «Российские железные дороги». – 5 с. ил. - Текст: непосредственный.

87 Плакс, А.В. Система управления электрическим подвижным составом / А.В. Плакс // Учебник для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут. – 2005. – 360 с.

88 Повышение технической скорости и снижение затрат электрической энергии при организации вождения тяжеловесных поездов: отчет о НИР. 8.146 / ИрГУПС: рук. Шрамко С.Г.: исп. Волчек Т.В., Портной А.Ю., Линьков А.О. – Иркутск. – 2022. – 91 с.

- 89 Похель, В.Б. Выбор параметров компенсатора реактивной мощности грузового электровоза с учетом среднеэксплуатационного баланса потребления активной и реактивной энергии / В.Б. Похель, С.В. Покровский, Н.Н. Широченко // Вестник ВНИИЖТ. – 1997. – № 4. – С. 21-26.
- 90 Раков, В.А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза (1956-1965) / В.А. Раков. – М.: Транспорт. – 1966. – 248 с.
- 91 Раков, В.А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза (1966-1975) / В.А. Раков. – М.: Транспорт. – 1979. – 213 с.
- 92 Раков, В.А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза (1976-1985) / В.А. Раков. – М.: Транспорт. – 1990. – 238 с.
- 93 Раков, В.А. Локомотивы железных дорог Советского Союза / В.А. Раков. – М.: Транспорт. – 1956. – 433 с.
- 94 Розенфельд, В.Е. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров, М.И. Озеров // М.: Транспорт. – 1995. – 294 с.
- 95 Савоськин, А.Н. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе контактная сеть – электровоз / А.Н. Савоськин, Ю.М. Кулинич, А.С. Алексеев // Электричество. – 2002. – №2. – С. 29-35.
- 96 Савоськин, А.Н. Разработка комплекса по исследованию электромагнитных процессов / А.Н. Савоськин, О.Е. Пудовиков, А.А. Чучин // Методические указания к лабораторным работам. – М.: МИИТ. – 2007. – 99 с.
- 97 Седова, И.Ю. Расчет и исследование трансформаторной ЭДС машины постоянного тока, работающей в составе вентильного электропривода / И.Ю. Седова, Е.А. Аванесова // Известие вузов. Электротехника. – 2013. – №3. – С. 28-36.
- 98 Скобелев, В.Е. Двигатели пульсирующего тока. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние. – 1985. – 208 с.
- 99 Степанов, Е.Л. Методы и средства повышения ресурса щеток тяговых электродвигателей: диссертация ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Степанов Евгений Леонидович. – Новосибирск. – 2010. – 214 с.

- 100 Тихменев, Б.Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б.Н. Тихменев, В.А. Кучумов. – М.: Транспорт. – 1988. – 312 с.
- 101 Тихменев, Б.Н. Электровозы переменного тока со статическими преобразователями. М.: Транспорт. – 1958. – 277 с.
- 102 Тихменев, Б.Н. Подвижной состав электрофицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. / Б.Н. Тихменев, Л.М. Трахтман //Учебник для вузов ж.-д. транспорта. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт. – 1980. – 470 с.
- 103 Указ Президента Российской Федерации В.В. Путина от 7.05.2018 г. №204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года»: [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://mintrudtuva.ru> (дата обращения 20.03.2019).
- 104 Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в *MATLAB*, *SimPowerSistems* и *Simulink* / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер. – 2008. – 288 с.
- 105 Электрическое оборудование моторвагонных секций переменного тока с тиристорным управлением». – Железные дороги мира. – 1979. – № 10. – 90 с.
- 106 Электровоз 2ЭС5К: Руководство по эксплуатации Книга 1 / ОАО «ВЭЛНИИ». – М.: Транспорт. – 2006. – 249 с.
- 107 Электровоз ВЛ10: Руководство по эксплуатации / Министерство путей сообщения. – М.: Транспорт. – 1975. – 235 с.
- 108 Электровоз ВЛ11: Руководство по эксплуатации / Под. Ред. Г. И. Чиракадзе и О. А. Кикнадзе. – М.: Транспорт. – 1983. – 464 с.
- 109 Электровоз ВЛ22^м: Руководство по эксплуатации / Министерство путей сообщения. – М.: 1961. – 235 с.
- 110 Электровоз ВЛ8: Руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт. – 1982. – 320 с.
- 111 Электровоз ВЛ80^с: Руководство по эксплуатации / Васько Н.М., Козельский Н.П., Матлахов А.А. и др. – М.: Транспорт. – 1982. – 622 с.
- 112 Электровоз ВЛ85: Руководство по эксплуатации / Тушканов Б. А.,

Пушкарёв Л.А., Позднякова Л.А. и др. – М.: Транспорт. – 1992. – 480 с.

113 Электровоз ЭП1: Руководство по эксплуатации Том1 / Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт электровозостроения. – М.: Транспорт. – 2006. – 554 с.

114 Электропоезд ЭД9М: Руководство по эксплуатации / ОАО «Демидовский машиностроительный завод». – М.: Транспорт. – 2005. – 304 с.

115 Электропоезда с тиристорным регулирование для железных дорог Тайваня» // Железные дороги мира. – М.: Русское издание. – 1978. - №2. – 90 с.

116 Яговкин, Д.А. Совершенствование выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока и принципа его управления в режиме тяги: диссертация ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Яговкин Дмитрий Андреевич. – Иркутск. – 2016. – 176 с.

117 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.