

На правах рукописи



ИВАНОВ Владислав Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ  
МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПЕРЕМЕННОГО  
ТОКА В РЕЖИМЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и  
электрификация

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС) на кафедре «Электроподвижной состав».

Научный  
руководитель:

**МЕЛЬНИЧЕНКО Олег Валерьевич**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения».

Официальные  
оппоненты:

**ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович**  
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрическая тяга» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

**МАЛЫШЕВА Ольга Александровна**  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения».

Ведущая  
организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения» (ОмГУПС), г. Омск

Защита состоится «22» декабря 2020 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 218.003.07 на базе ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» по адресу: Россия, 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47, главный корпус, ауд. 204.

С диссертацией, авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ДВГУПС» ([www.dvgups.ru](http://www.dvgups.ru)) и на официальном сайте ([www.vak.minobrnauki.gov.ru](http://www.vak.minobrnauki.gov.ru)).

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47, ФГБОУ ВО «ДВГУПС», ученому секретарю диссертационного совета Д.218.003.07, e-mail: [kabalyk@festu.khv.ru](mailto:kabalyk@festu.khv.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» октября 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
Д 218.003.07, к.т.н., доцент



Ю.С. Кабалык

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Компания Российские железные дороги входит в тройку крупнейших потребителей энергии в Российской Федерации. В 2019 году компания использовала 48,4 млрд кВт·ч, что составляет около 4 % от всего потребления в нашей стране.

Одним из основных факторов экономии энергоресурсов является снижение затрат электрической энергии на тягу поездов, о нём говорится в ряде федеральных и стратегических документах, основными из которых являются:

- долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года утвержденная Правительством Российской Федерации от 19 марта 2019 г., №466-р;
- распоряжение ОАО "РЖД" от 11.02.2008 г., № 269р «Об энергетической стратегии ОАО "РЖД" на период до 2030 года»;
- распоряжение ОАО "РЖД" от 14.04.2018 г., № 769р «Об стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга)» и др.

В настоящее время у 90 % эксплуатируемого парка МВПС переменного тока, в состав которого входят отечественные электропоезда переменного тока с коллекторными тяговыми электродвигателями (ТЭД) серий ЭР9<sup>В/И</sup>, ЭД9Т, ЭД9М, сохраняется проблема высоких затрат электроэнергии, ввиду низкого коэффициента мощности ( $K_m$ ), который в режиме тяги не превышает 0,86, а такой как энерго и ресурсосберегающий режим – рекуперативное торможение вообще отсутствует, ввиду того, что на преобразователях в электропоездах применяется морально устаревшая неуправляемая диодная база.

К оставшимся 10 % эксплуатируемого парка МВПС переменного тока относятся современные отечественные электропоезда переменного тока, выпускаемые Демиховским машиностроительным заводом, серии ЭД9Э и ЭПЗД позволяющие осуществлять рекуперативное торможение, а также плавное регулирование питающего напряжения, подаваемого на коллекторные ТЭД за счет применения тиристорных выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП) и выпрямительных установок возбуждения (ВУВ). Однако за основу тиристорных преобразователей было принято техническое решение аналогично опытному электропоезду ЭР7, переоборудование которого было проведено ещё в 1967 г. Коэффициент мощности данных электропоездов в режиме рекуперативного торможения в максимальном его проявлении составляет не более 0,71, что доказывает неэффективное использование электрической энергии тяговой сети.

Как показывает полувековая практика, электроподвижной состав (ЭПС) однофазного переменного тока, выполненный на базе силовых тиристоров с их алгоритмами управления, имеет множество недостатков, основными из них являются: высокие затраты электроэнергии на тягу; тиристорная база преобразователей и алгоритмы их управления являются морально устаревшими (полууправляемые); значительные потери активной электроэнергии в системе тягового электроснабжения; загрузка тяговой сети реактивной энергией, снижающая пропускную способность тягового участка и др. Всё это подчёркивает острую отраслевую проблему энергосбережения при работе электропоездов в пригородном сообщении. Кроме того, нерациональное потребление электрической энергии ведет к завышенной стоимости тарифов на проезд в пригородном сообщении, что в свою очередь сказывается на снижении подвижности населения и конкурентоспособности МВПС перед другими видами транспорта.

### **Степень проработанности проблемы.**

В диссертационной работе произведен анализ истории развития силовых схем отечественного и зарубежного МВПС переменного тока, а также трудов ведущих ученых и

специалистов в области повышения энергоэффективности электроподвижного состава, таких как Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман, В. А. Кучумов, Б. И. Хоменко, А. Л. Лисицин, А. С. Мазнёв, В. И. Некрасов, А. В. Каменев, Д. Д. Захарченко, Ю. М. Иньков, Н. А. Ротанов, В. А. Голованов, А. Т. Бурков, А. В. Плакс, С. В. Покровский, Л. Д. Капустин, М. Л. Перцовский, А. Н. Савоськин, Н. Н. Широченко, Б. И. Косарев, В. Г. Щербаков, С. В. Власьевский, Ю. М. Кулинич, А. Л. Донской, А. Л. Лозановский, Н. С. Назаров, В. В. Макаров, В. В. Литовченко, О. Е. Пудовиков, В. Т. Черемисин, А. М. Евстафьев, О. В. Мельниченко и др., результаты которых были использованы в качестве научной основы при выполнении диссертационной работы.

На снижение энергетических показателей при работе электропоезда в режиме рекуперативного торможения влияют множество причин, основной из которых, на сегодняшний день, является применение морально устаревшей полууправляемой тиристорной базы ВИП и ВУВ. К тому же анализ тенденции развития силовых преобразователей МВПС переменного тока показал, что электрическая принципиальная силовая схема электропоездов остаётся неизменной уже более 50 лет. Основные изменения силовой схемы моторного вагона были связаны с использованием более мощных диодов высокого класса по напряжению, что позволило лишь снизить количество параллельных и последовательных цепей диодов в плечах преобразователя и повысить надежность их работы. В настоящее время разработка и внедрение преобразователей на современной, полностью управляемой силовой элементной базе позволит внедрить новые схемотехнические решения и способы их управления, позволяющие значительно повысить энергоэффективность электропоездов переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения.

**Целью диссертационной работы** является повышение коэффициента мощности моторвагонного подвижного состава переменного тока в режиме рекуперативного торможения путем совершенствования выпрямительно-инверторных преобразователей, выпрямительных установок возбуждения и способов их управления.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Выполнен анализ отечественных и зарубежных силовых схем моторвагонного подвижного состава переменного тока и способы их управления, определены их достоинства и недостатки.

2. Разработаны способы управления ВИП, ВУВ на базе IGBT-транзисторов и их схемотехнические решения, позволяющие повысить коэффициент мощности МВПС переменного тока в режиме рекуперативного торможения.

3. Выполнено аналитическое исследование электромагнитных процессов ВИП и ВУВ на тиристорах и IGBT-транзисторах МВПС переменного тока в режиме рекуперативного торможения методом анализа мгновенных схем замещения.

4. Разработана математическая модель в среде имитационного моделирования «Matlab/Simulink» системы «Тяговая подстанция – контактная сеть – моторный вагон» и проведено на ей сравнительное исследование протекающих электромагнитных процессов при работе моторного вагона в режиме рекуперативного торможения со штатными-тиристорными и предлагаемыми-транзисторными ВИП и ВУВ при реализации штатных и разработанных способов их управления.

5. Разработан научно-экспериментальный стенд тягового привода электропоезда переменного тока в режиме рекуперативного торможения и проведены на нём экспериментальные исследования работы транзисторных ВИП и ВУВ электропоезда.

**Объектом исследования** является коллекторный тяговый привод моторного вагона электропоезда серии ЭПЗД.

**Предметом исследования** являются электромагнитные процессы, протекающие в штатных – тиристорных и предлагаемых – транзисторных ВИП и ВУВ МВПС в режиме рекуперативного торможения.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

- предложен способ управления ВИП моторного вагона на базе IGBT-транзисторов, заключающийся в открытии его плеч в начале каждого полупериода питающего напряжения с некоторым углом от перехода переменного напряжения сети через ноль и регулированием момента их закрытия, обеспечивая симметрию переменного тока относительно напряжения сети, повышающий коэффициент мощности электропоезда в режиме рекуперативного торможения;

- предложен способ управления предлагаемой ВУВ моторного вагона на базе IGBT-транзисторов в режиме рекуперативного торможения значительно повышающий её коэффициент мощности за счет регулировки момента открытия и закрытия её плеч начиная от середины полупериода питающего напряжения, поддерживая симметрию переменного тока относительно напряжения сети;

- разработана математическая модель тягового привода моторного вагона электропоезда серии ЭПЗД в среде имитационного моделирования «MatLab/Simulink», позволяющая проводить исследования электромагнитных процессов работы электропоезда со штатными-тиристорными и предлагаемыми-транзисторными ВИП и ВУВ в режиме рекуперативного торможения.

**Практическая ценность и реализация работы**

- реализована обобщенная математическая модель «тяговая подстанция – контактная сеть – моторный вагон» в среде имитационного моделирования «Matlab/Simulink», позволяющая исследовать электромагнитные процессы работы моторного вагона электропоезда со штатными-тиристорными и предлагаемыми-транзисторными ВИП, ВУВ в режиме рекуперативного торможения и способы их управления;

- разработан научно-экспериментальный стенд в лаборатории «Мини – депо», ИрГУПС, позволяющий проводить физическое моделирование работы ВИП и ВУВ электропоезда на базе IGBT-транзисторов, а также учебные занятия по дисциплине «Системы управления электроподвижным составом» со студентами специальности «Электрический транспорт железных дорог»;

- разработан микропроцессорный блок управления, осуществляющий способы управления ВИП и ВУВ на базе IGBT-транзисторов электропоезда в режиме рекуперативного торможения;

- определены параметры элементов цепей защиты для ВИП и ВУВ электропоезда на базе IGBT-транзисторов от коммутационных перенапряжений, позволяющие снизить выбросы напряжения до безопасного значения.

**Методы исследований.** Исследования основаны на использовании теории электрических цепей, методов математического моделирования, численных методов решения интегральных и дифференциальных уравнений, теории преобразовательных устройств. Экспериментальные исследования проводились на математической модели в среде имитационного моделирования «MatLab/Simulink», а также на физической модели в лаборатории «Мини – депо» ИрГУПС.

**Основные результаты работы, выносимые на защиту:**

- результаты разработки схмотехнического решения ВИП и ВУВ на базе IGBT-транзисторов и их алгоритмов управления, значительно повышающие коэффициент мощности тяговых электроприводов моторвагонного подвижного состава переменного тока в режиме рекуперативного торможения;

- результаты аналитических исследований электромагнитных процессов работы штатных и предлагаемых ВИП и ВУВ электропоезда переменного тока в режиме рекуперативного торможения;

- результаты исследования математического моделирования на обобщенной модели системы «Тяговая подстанция – контактная сеть – моторный вагон» электромагнитных процессов при работе моторного вагона электропоезда в режиме рекуперативного торможения со штатными и предлагаемыми ВИП и ВУВ;

- результаты исследования электромагнитных процессов работы тягового привода электропоезда на физической модели в лаборатории «Мини депо – ИрГУПС».

**Достоверность научных положений и результатов.** Достоверность аналитических исследований электромагнитных процессов, протекающих в штатных и предлагаемых ВИП, ВУВ подтверждаются результатами, полученными в ходе математического моделирования в среде имитационного моделирования «MatLab/Simulink» с дальнейшим их сопоставлением с данными полученными при физическом моделировании.

**Апробация работы:** Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на общесетевом слете молодежи ОАО «РЖД» в рамках конкурса инновационных проектов «Новое звено-2018» (г. Москва, 2018 г.); всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Транспортная инфраструктура Сибирского региона (ИрГУПС, Иркутск 2018); международном научно-практическом симпозиуме «Инновации и обеспечение безопасности эксплуатации современных железных дорог» (ИрГУПС, Иркутск 2018); четвертой Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодёжь» (ИрГУПС, Иркутск 2018 г.); третьей международной научно-практической конференции с международным участием «Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта» (ОмГУПС, Омск 2018 г.); четвертой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов» (ОмГУПС, Омск 2018 г.); всероссийской научно-практической конференции «Электропривод на транспорте и в промышленности» (ДВГУПС, Хабаровск 2018 г.); заседании научно-технического совета (ИрГУПС, Иркутск 2019 г.), научно-техническом семинаре (КНАГУ, Комсомольск-на-Амуре 2019 г.), расширенном межкафедральном научно-техническом семинаре (ДВГУПС, Хабаровск 2019 г.).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 17 печатных трудах, из них 1 статья опубликована в издании, входящем в международную систему цитирования Scopus, 3 статьи в ведущих научных рецензируемых журналах и изданиях перечня ВАК РФ, 13 статей в сборниках трудов и материалах конференций регионального, всероссийского и международного уровня, а также получен патент на изобретение №2700594.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, двух приложений, библиографического списка из 146 наименований и содержит 192 страницы основного текста, 12 таблиц и 104 рисунка.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы и дана её краткая характеристика.

**В первой главе** приведен анализ истории развития отечественных и зарубежных силовых схем моторвагонного подвижного состава переменного тока, а также способов их управления, при этом отмечены их достоинства и недостатки.

На основании проведённого анализа научных работ, определена цель работы и сформулированы основные задачи исследования.

**Во второй главе** проведено аналитическое исследование физических процессов работы ВИП и ВУВ электропоезда в режиме рекуперативного торможения методом анализа

мгновенных схем замещения при работе штатных (тиристорных) и предлагаемых (транзисторных) ВИП и ВУВ с их способами управления.

Достоинства IGBT-транзистора, конструкция которого объединяет преимущества полевого транзистора в управлении и биполярного в части выходных характеристик, открывают возможность использования их в силовой схеме электропоезда. На рисунке 1 представлена упрощённая принципиальная силовая схема электропоезда с предлагаемыми ВИП и ВУВ в режиме рекуперативного торможения.

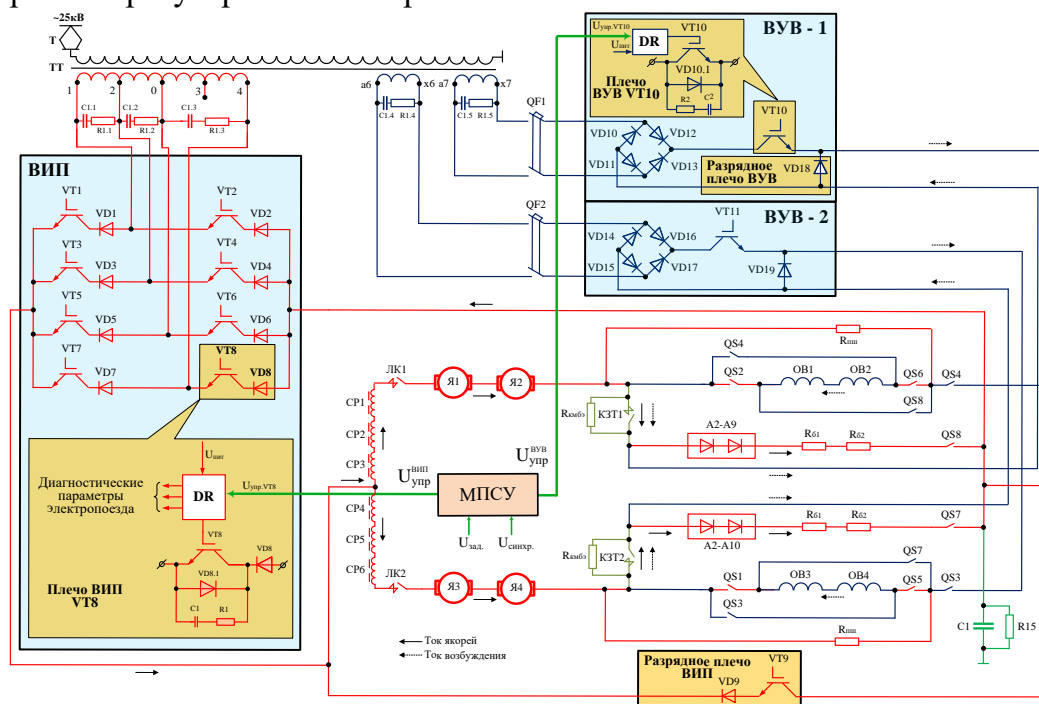


Рисунок 1 – Электрическая принципиальная схема силовых цепей электропоезда с предлагаемыми ВИП и ВУВ

Силовая принципиальная схема предлагаемого ВИП предусматривает, восемь плеч с добавлением дополнительного разрядного диодно-транзисторного плеча V9 (VT9-VD9), включённого параллельно цепи выпрямленного тока. Плечо ВИП, например, VT8, состоит из IGBT-транзистора с последовательно включённым диодом, а также снабберной RC-цепи, включённой параллельно транзистору.

Диоды в плече ВИП предназначены для защиты IGBT-транзисторов от подачи обратного напряжения на переход коллектор-эмиттер, а IGBT-транзисторы необходимы для регулирования выпрямленного напряжения.

Схема предлагаемого ВУВ выполнена на основе двухполупериодного диодного мостового выпрямителя, с последовательно соединённым транзисторным плечом. Такое схемотехническое решение дает возможность получить управляемый диодный мост для поддержания и регулирования токов возбуждения тяговых электродвигателей в режиме рекуперативного торможения. Для предлагаемой схемы ВИП и ВУВ разработаны алгоритмы управления, с управляющими сигналами, рисунок 2 и 3. Разработанный способ управления предлагаемым ВИП в режиме рекуперативного торможения заключается во включении IGBT-транзисторов с некоторым углом от перехода переменного напряжения сети через 0, а их закрытие является переменным значением, которое зависит от величины тока тяговых электродвигателей. При этом выключение IGBT-транзисторов всегда осуществляется на минимальных мгновенных значениях напряжения сети  $\Delta U_1$  с учетом длительности коммутации тока, обеспечивая угол  $\varphi \approx 0$  и симметрию переменного тока относительно напряжения сети. Разработанный способ управления ВУВ в режиме рекуперативного торможения заключается во включении и выключении IGBT-транзистора путем подачи управляющего сигнала  $\alpha_{reg}$ , кото-

Зона регулирования	Направление ЭДС трансформатора	Плечи ВИП								
		VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6	VT7	VT8	VT9
IV	→	$\beta_{reg}$	—	$\beta'_w$	—	—	—	—	$\beta_w$	$\beta_D$
	←	—	$\beta_{reg}$	—	$\beta'_w$	—	—	$\beta_w$	—	$\beta_D$
III	→	—	—	$\beta_{reg}$	—	$\beta'_w$	—	—	$\beta_w$	$\beta_D$
	←	—	—	—	$\beta_{reg}$	—	$\beta'_w$	$\beta_w$	—	$\beta_D$
II	→	$\beta_{reg}$	—	$\beta'_w$	—	—	$\beta_w$	—	—	$\beta_D$
	←	—	$\beta_{reg}$	—	$\beta'_w$	$\beta_w$	—	—	—	$\beta_D$
I	→	—	—	$\beta_{reg}$	—	—	$\beta_{reg}$	—	—	$\beta_D$
	←	—	—	—	$\beta_{reg}$	$\beta_{reg}$	—	—	—	$\beta_D$

$\beta_w$  и  $\beta'_w$ (work) – рабочий угол открытия силовых IGBT- транзисторов плеча ВИП;  $\beta_{reg}$ (regulation) – угол регулирования открытия силовых IGBT-транзисторов плеча ВИП;  $\beta_D$  – рабочий угол открытия дополнительного разрядного плеча ВИП

Рисунок 2 – Разработанный алгоритм управления предлагаемым ВИП электропоезда в режиме рекуперативного торможения

Зона регулирования	Направление ЭДС трансформатора	Плечи ВУВ				
		VD1	VD2	VD3	VD4	VT1
I	→	—	$\alpha_{reg}$	$\alpha_{reg}$	—	$\alpha_D$
	←	$\alpha_{reg}$	—	—	$\alpha_{reg}$	$\alpha_D$

$\alpha_{reg}$ (regulation) – угол регулирования открытия IGBT-транзистора ВУВ,  $\alpha_D$  – рабочий угол открытия дополнительного разрядного плеча ВУВ

Рисунок 3 – Разработанный алгоритм управления предлагаемой

ВУВ электропоезда в режиме рекуперативного торможения

работы ВИП и ВУВ в переходных и установившихся режимах были разработаны мгновенные схемы замещения и получены соответствующие им дифференциальные уравнения. На рисунке 5 приведены мгновенные схемы замещения для временных интервалов положительного полупериода, обозначенных на рисунке 4, б, а также соответствующая им система уравнений 1 (интервал 1-2), уравнение 2 (интервал 2-3), система уравнений 3 (интервал 3-4), уравнение 4 (интервал 4-5), система уравнений 5 (интервал 5-6), уравнение 6 (интервал 6-7), система уравнений 7 (интервал 7-8) и уравнение 8 (интервал 8- $\pi$ ) описывающие ток в переходных процессах предлагаемого ВИП. В уравнениях приняты следующие обозначения:  $\Delta U_{n\pi}$  – эквивалентное падение напряжения на плече ВИП (n-номер плеча);  $L_{k-m}$  – индуктивность вторичной обмотки трансформатора (k и m выводы вторичной обмотки);  $L_{d\pi}$  – эквивалентная индуктивность цепи выпрямленного тока;  $E_{k-m}$  – ЭДС вторичной обмотки трансформатора,  $i_B$ ,  $i_T$ ,  $i_{T'}$  – токи генератора;  $E_T$  – ЭДС ТЭД;  $U_d$  – падение напряжения в цепи выпрямленного тока. В предлагаемом ВИП, за счёт разработанного способа управления, значительно снижена длительность основной коммутации. Угол  $\phi$  практически равен нулю, что даёт значительное увеличение коэффициента мощности электропоезда.

На рисунке 6 приведены диаграммы электромагнитных процессов во вторичной обмотке тягового трансформатора (рисунок 6, а), цепи обмоток возбуждения (рисунок 6, б), и токи по плечам (рисунок 6, в) предлагаемой ВУВ электропоезда в режиме рекуперативного торможения. На рисунке 7 приведены мгновенные схемы замещения для временных интервалов положительного полупериода, обозначенного на рисунке 6, б, а также соответствующая им система уравнений 9 (интервал 1-2), уравнение 10 (интервал 2-3), система уравнений 11 (интервал 3-4) и уравнение 12 (интервал 4- $\pi$ ) описывающие ток в переходных процессах

рый регулируется от середины полупериода к  $\pi$ . Ширина импульса  $\alpha_{reg}$  выбирается исходя из необходимого тока возбуждения в тяговых электродвигателях. Поддержание тока возбуждения ТЭД в моменты отключения выпрямительных установок возбуждения от тягового трансформатора осуществляется с помощью работы обратных диодов (VD18, VD19), подключенных к ним параллельно.

На рисунке 4 приведены диаграммы электромагнитных процессов в цепи первичной обмотки тягового трансформатора (рисунок 4, а) цепи двигателя (рисунок 4, б), и токи по плечам (рисунок 4, в) предлагаемого ВИП электропоезда на 4-ой зоне регулирования в режиме рекуперативного торможения. Для интервальной оценки



предлагаемой ВУВ. В уравнениях приняты следующие обозначения:  $\Delta U_{n3}$  – эквивалентное падение напряжения на плече ВУВ (n-номер плеча);  $L_{k-m}$  – индуктивность вторичной обмотки трансформатора ( $k$  и  $m$  выводы вторичной обмотки);  $L_{d3}$  – эквивалентная индуктивность цепи выпрямленного тока;  $E_{k-m}$  – ЭДС вторичной обмотки трансформатора;  $i_B$ ,  $i_{OB}$ ,  $i'_{OB}$  – токи возбуждения;  $U_{OB}$  – падение напряжения в цепи выпрямленного тока.

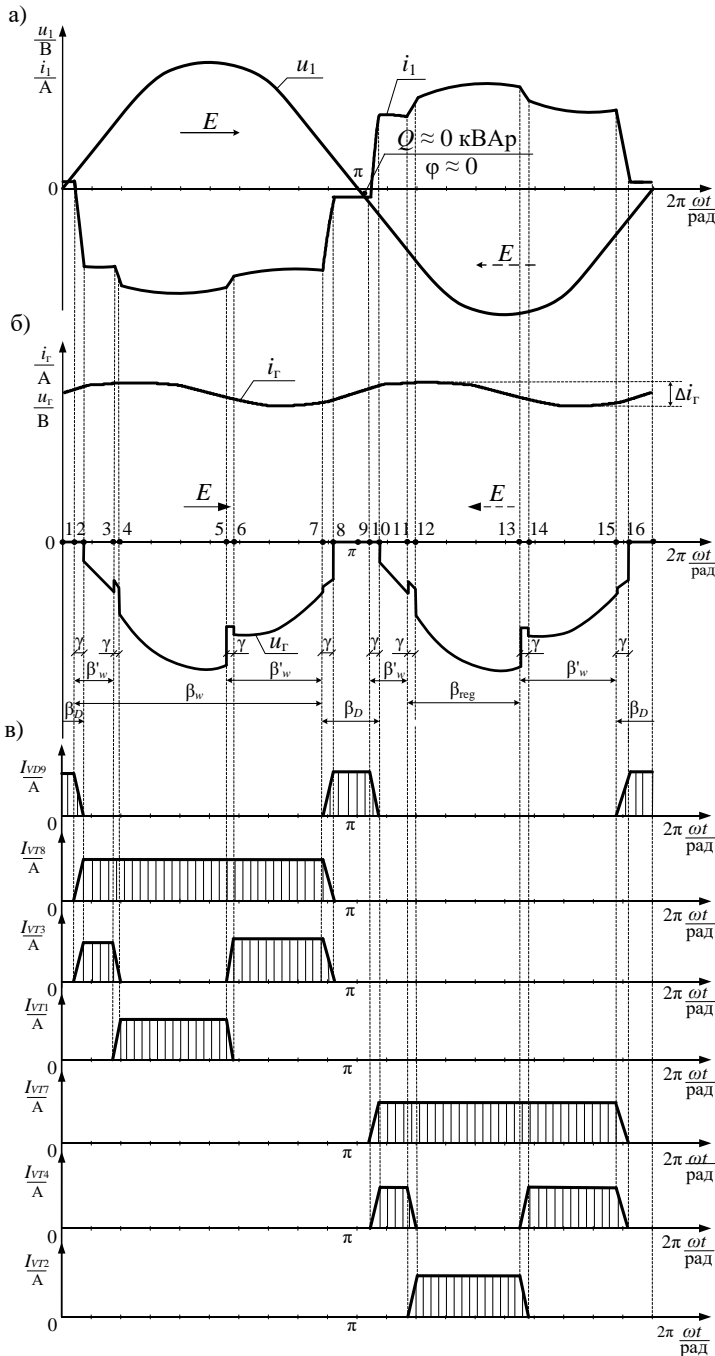


Рисунок 4 – Диаграммы электромагнитных процессов предлагаемого ВИП электропоезда на примере 4-ой зоны регулирования в режиме рекуперативного торможения

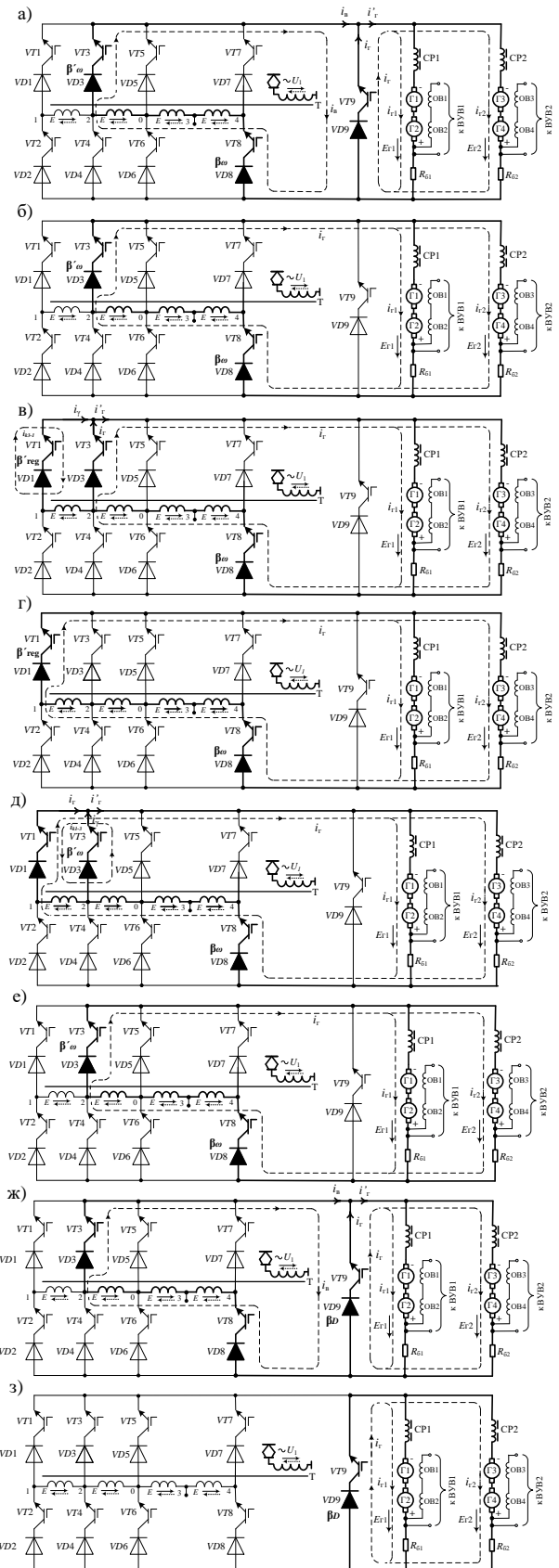


Рисунок 5 – Мгновенные схемы замещения предлагаемого ВИП на 4-ой зоне регулирования, соответствующие интервалам времени: а) интервал 1 – 2; б) интервал 2 – 3; в) интервал 3 – 4; г) интервал 4 – 5; д) интервал 5 – 6; е) интервал 6 – 7; ж) интервал 7 – 8; з) интервал 8 – π

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_B}{dt} &= \frac{E_{2,4} - \Delta U_{3Э} + \Delta U_{9Э} - \Delta U_{8Э}}{L_{2,4}}; \\ \frac{di_r}{dt} &= \frac{E_r - \Delta U_r - \Delta U_{9Э}}{L_{r3}}; \\ i_r + i_B - i_r' &= 0. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_r}{dt} &= \frac{E_{1,4} + E_r - \Delta U_{1Э} - \Delta U_r - \Delta U_{8Э}}{L_{1,4} + L_{r3}}; \\ \frac{di_\gamma}{dt} &= \frac{E_{1,2} + \Delta U_{3Э} - \Delta U_{1Э}}{L_{1,2}}; \\ i_r + i_\gamma - i_r' &= 0. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\frac{di_r}{dt} = \frac{E_{2,4} - \Delta U_{3Э} + E_r - \Delta U_{8Э} - \Delta U_r}{L_{2,4} + L_{r3}}. \quad (2)$$

$$\frac{di_r}{dt} = \frac{E_{2,4} - \Delta U_{3Э} + E_r - \Delta U_{8Э} - \Delta U_r}{L_{2,4} + L_{r3}}. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_r}{dt} &= \frac{E_{2,4} + E_r - \Delta U_{3Э} - \Delta U_r - \Delta U_{8Э}}{L_{2,4} + L_{r3}}; \\ \frac{di_\gamma}{dt} &= \frac{E_{1,2} + \Delta U_{1Э} - \Delta U_{3Э}}{L_{1,2}}; \\ i_r + i_\gamma - i_r' &= 0. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_B}{dt} &= \frac{E_{2,4} - \Delta U_{3Э} + \Delta U_{9Э} - \Delta U_{8Э}}{L_{2,4}}; \\ \frac{di_r}{dt} &= \frac{E_r - \Delta U_r - \Delta U_{9Э}}{L_{r3}}; \\ i_r + i_B - i_r' &= 0. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$\frac{di_r}{dt} = \frac{E_{1,4} - \Delta U_{1Э} + E_r - \Delta U_{8Э} - \Delta U_r}{L_{1,4} + L_{r3}}. \quad (4)$$

$$\frac{di_r}{dt} = \frac{E_r - \Delta U_r - \Delta U_{9Э}}{L_{r3}}. \quad (8)$$

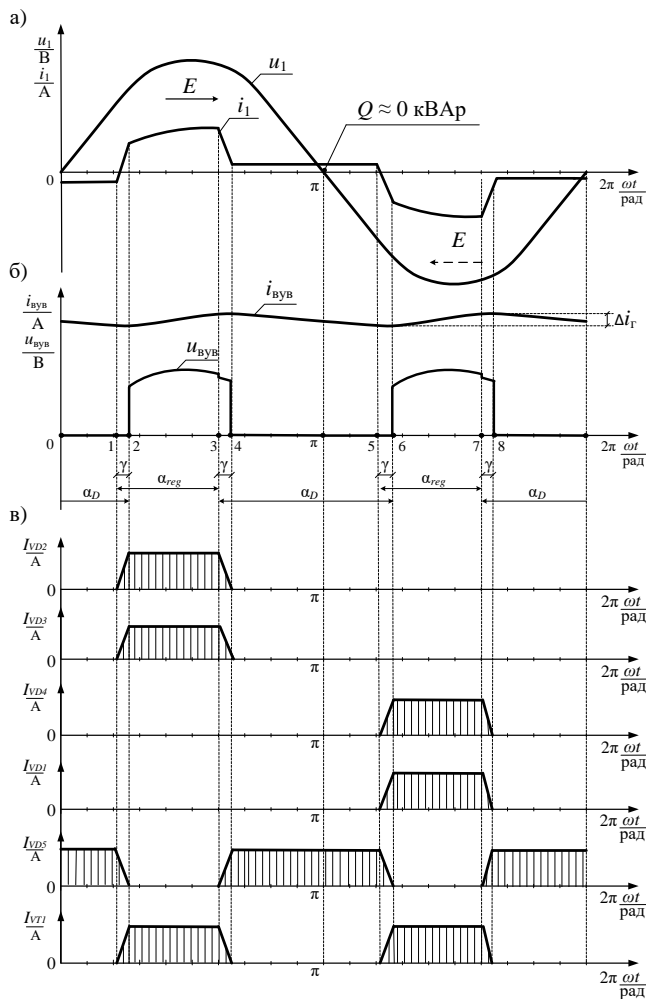


Рисунок 6 – Диаграммы электромагнитных процессов предлагаемой ВУВ электропоезда в режиме рекуперативного торможения

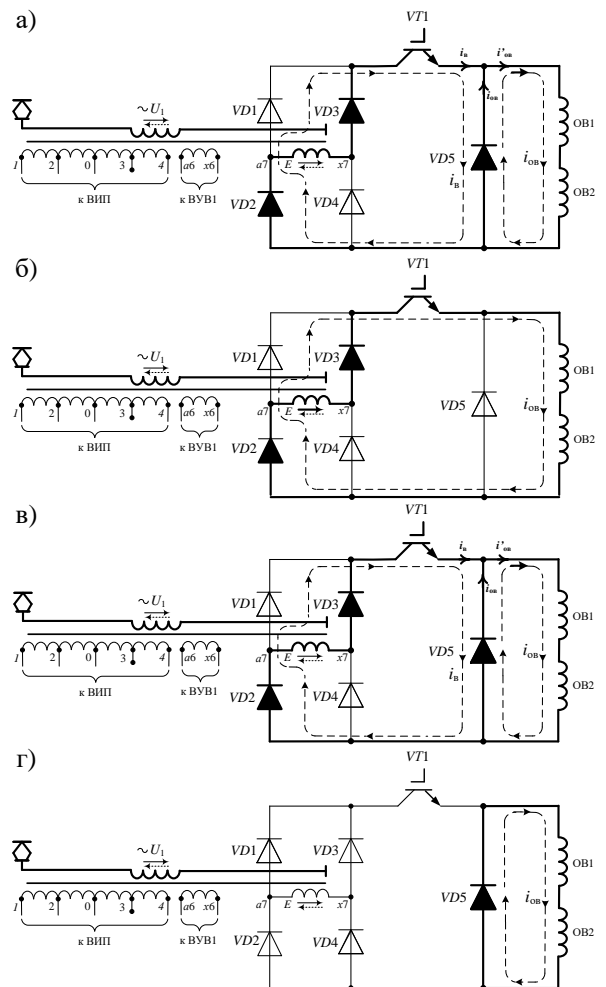


Рисунок 7 – Мгновенные схемы замещения предлагаемой ВУВ, соответствующие интервалам времени: 1-2 (а); 2-3 (б); 3-4 (в); 4-π (г)

$$\begin{cases} \frac{di_B}{dt} = \frac{E_{a7-x7} - \Delta U_{vd3} - \Delta U_{vd2} - \Delta U_{vt1} + \Delta U_{vd5}}{L_{a7-x7}}; \\ \frac{di_{OB}}{dt} = \frac{-\Delta U_{OB} - \Delta U_{vd5}}{L_{v3}}; \\ i_B + i_{OB} - i'_{OB} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{di_{OB}}{dt} = \frac{E_{a7-x7} - \Delta U_{vd3} - \Delta U_{vd2} - \Delta U_{vt1} - \Delta U_{OB}}{L_{a7-x7} + L_{v3}}; \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{di_B}{dt} = \frac{E_{a7-x7} - \Delta U_{vd3} - \Delta U_{vd2} - \Delta U_{vt1} + \Delta U_{vd5}}{L_{a7-x7}}; \\ \frac{di_{OB}}{dt} = \frac{-\Delta U_{OB} - \Delta U_{vd5}}{L_{v3}}; \\ i_B + i_{OB} - i'_{OB} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{di_{OB}}{dt} = \frac{-\Delta U_{OB} - \Delta U_{vd5}}{L_{v3}}. \quad (12)$$

**Третья глава** посвящена математическому моделированию электромагнитных процессов коммутации тока плеч при работе штатных и предлагаемых ВИП и ВУВ электропоезда. Разработана обобщённая математическая модель «Тяговая подстанция-контактная сеть-моторный вагон» с ВИП и ВУВ на IGBT-транзисторах. При разработке математической модели учитывался опыт исследований, ведущих российских ученых А. Н. Савоськина, Б. И. Косарева, С. В. Власьевского, Ю. М. Кулинича, который явился основой для её создания. При проведении моделирования была принята схема силовых электрических цепей моторного вагона электропоезда серии ЭПЗД, работающего в режиме рекуперативного торможения. Модель позволяет производить исследования электромагнит-

ных процессов при работе штатных и предлагаемых ВИП, ВУВ с их способами управления. За критерии сравнения в работе приняты коэффициент мощности электропоезда и коэффициент относительной пульсации выпрямленного тока ВИП и ВУВ.

Расчёт коэффициента мощности электропоезда производится по формуле

$$K_m = \frac{\sum_{k=0}^n U_k I_k \cos \varphi_k}{\sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2}} = \frac{U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + \dots + U_k I_k + U_k I_k \cos \varphi_k}{\sqrt{U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_k^2} \cdot \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_k^2}}, \quad (13)$$

где  $U_k$ ,  $I_k$  – действующие значения напряжения и тока сети  $k$ -й гармоники;  $\varphi_k$  – угол сдвига фазы между напряжением и током  $k$ -й гармоники.

Коэффициент относительной пульсации выпрямленного тока ВИП и ВУВ рассчитывается как

$$K_{по\_I} = \frac{\Delta i}{I}, \quad (14)$$

где  $\Delta i$  – переменная составляющая выпрямленного тока ВИП и ВУВ;

$I$  – среднее значение выпрямленного тока ВИП и ВУВ.

Для безопасной работы ВИП и ВУВ рассчитаны цепи защиты с параметрами, позволяющими защитить IGBT-транзисторы преобразователей от перенапряжений в переходных процессах.

**В четвертой главе** проведено математическое моделирование работы ВИП и ВУВ электропоезда, в ходе которого получены осциллограммы электромагнитных процессов ВИП и ВУВ, представленные на рисунках 8-11 соответственно. Из приведенных результатов, можно сделать вывод, что при использовании предлагаемых ВИП и ВУВ с разработанными способами их управления увеличивается  $K_m$  электропоезда в среднем до 0,95, в то время как со штатными преобразователями  $K_m$  составляет 0,64. В среднем, на протяжении всего диапазона регулирования (с 1-ой по 4-ую зоны) повышение коэффициента мощности электропоезда с предлагаемыми ВИП и ВУВ составило 49 %. Увеличен возврат электрической энергии в контактную сеть моторным вагоном электропоезда в среднем на 29 %, а

уменьшение коэффициента относительной пульсации тока ВИП составило 25,24 % в сравнении со штатным. Кроме того, увеличено среднее значение напряжения ВИП на 23,52 % за счет значительного снижения потерь при протекании сетевой коммутации.

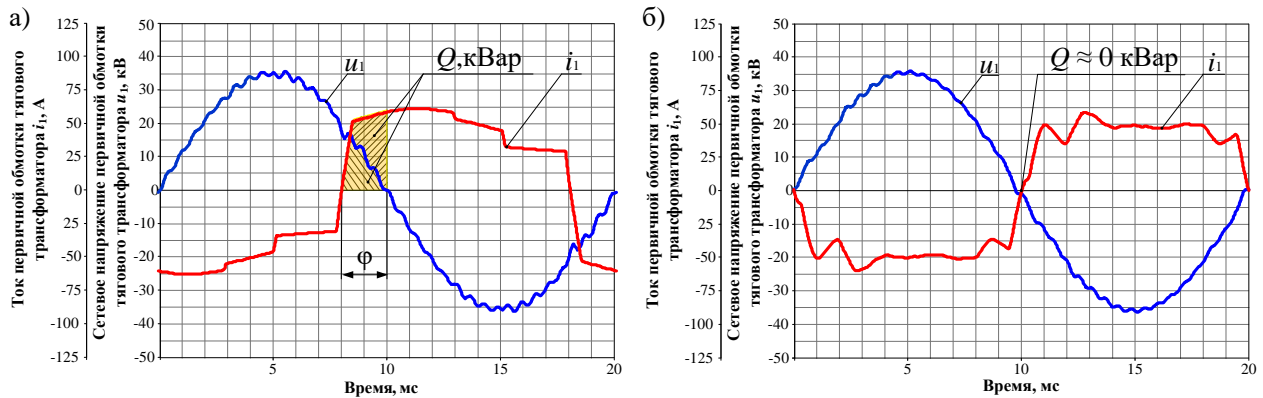


Рисунок 8 – Форма кривых напряжения ( $u_1$ ) и тока ( $i_1$ ) в первичной обмотке тягового трансформатора электропоезда при работе штатного (а) и предлагаемого (б) ВИП на 4-ой зоне регулирования в режиме рекуперативного торможения

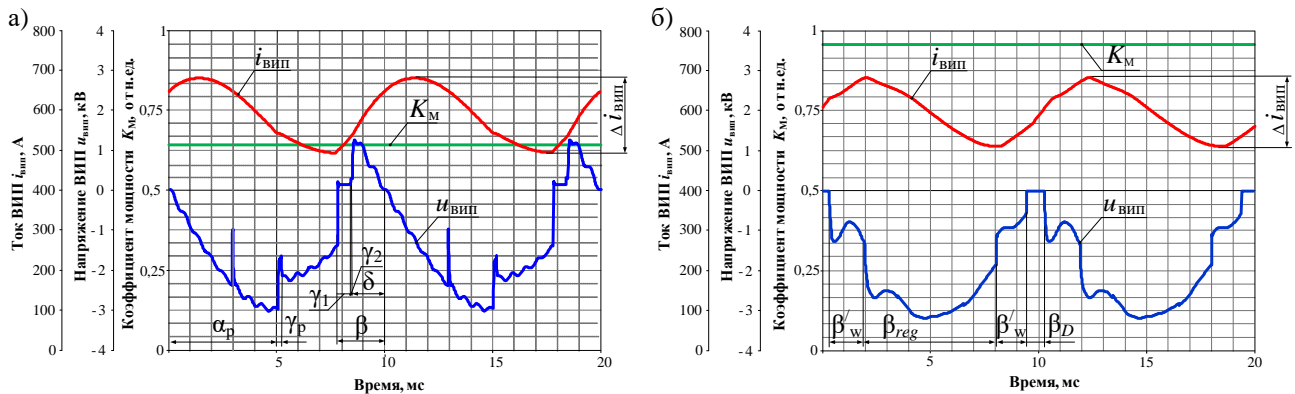


Рисунок 9 – Диаграммы выпрямленного напряжения ( $u_{VIP}$ ), тока ( $i_{VIP}$ ) ВИП и коэффициента мощности ( $K_M$ ) электропоезда в режиме рекуперативного торможения при работе штатного (а) и предлагаемого (б) ВИП на 4-ой зоне регулирования

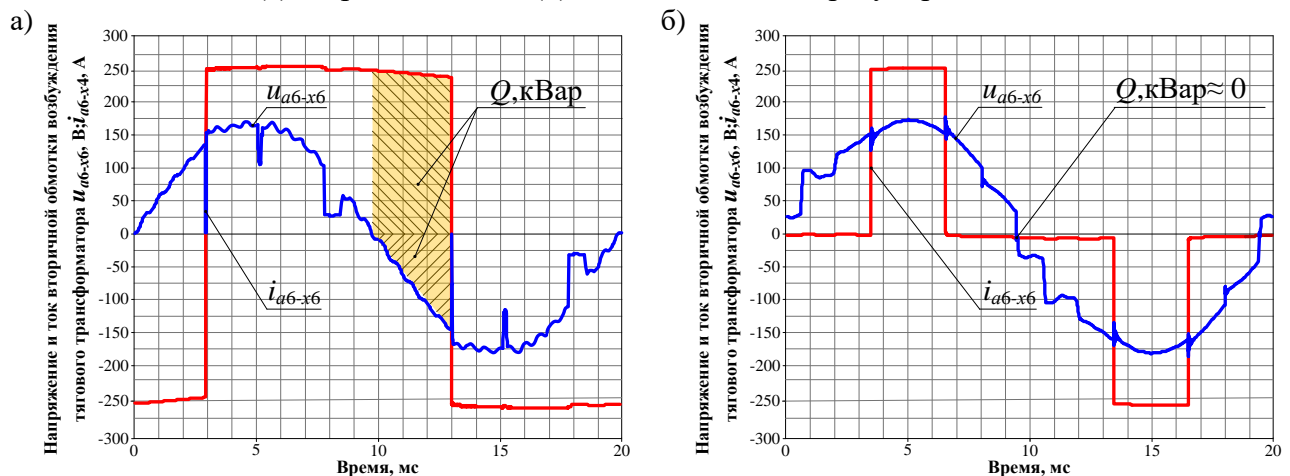


Рисунок 10 – Форма кривых напряжения ( $u_1$ ) и тока ( $i_1$ ) в первичной обмотке тягового трансформатора электропоезда при работе штатной (а) и предлагаемой (б) ВУВ в режиме рекуперативного торможения

**В пятой главе** приведены результаты экспериментальных исследований работы ВИП и ВУВ в режиме рекуперативного торможения на разработанном научно-экспериментальном стенде, который позволяет получить электромагнитные процессы, протекающие в предлагаемых преобразователях. Для стенда разработан микропроцессорный БУ,

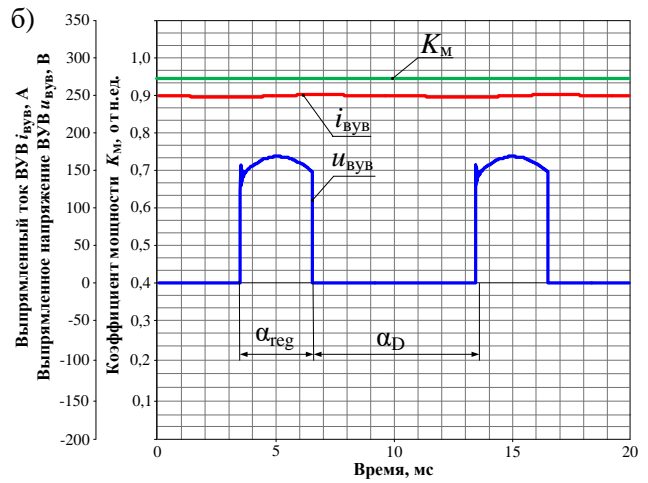
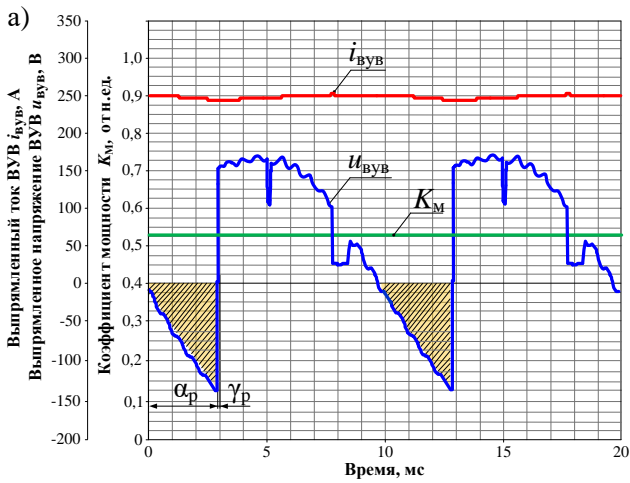


Рисунок 11 – Диаграммы выпрямленного напряжения ( $u_{ВУВ}$ ), тока ( $i_{ВУВ}$ ) и коэффициента мощности ( $K_M$ ) ВУВ в режиме рекуперативного торможения при работе штатной (а) и предлагаемой (б) ВУВ



Рисунок 12 – Научно-экспериментальный стенд в «Мини – депо» ИрГУПС, для исследования работы предлагаемых ВИП и ВУВ электропоезда

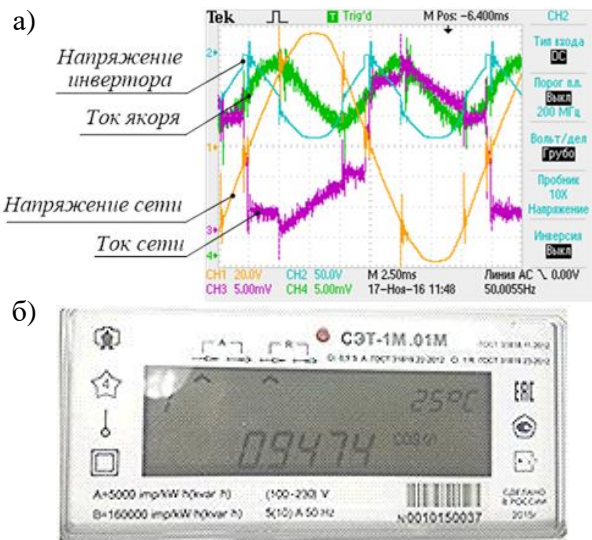


Рисунок 14 – Осциллограммы (а) и коэффициент мощности (б) электропоезда, полученные на стенде при работе ВИП в режиме рекуперативного торможения на 3,5 зоны регулирования

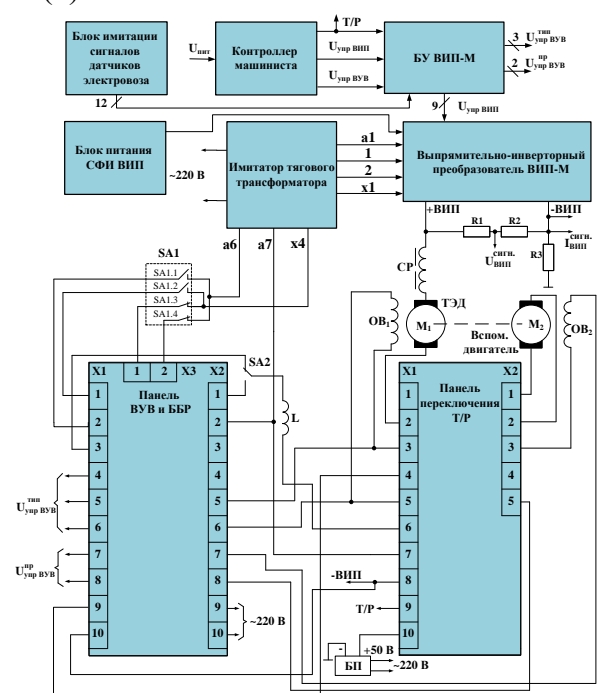


Рисунок 13 – Функциональная схема научно-экспериментального стенда для проведения предварительных испытаний силовой части ВИП и ВУВ электропоезда

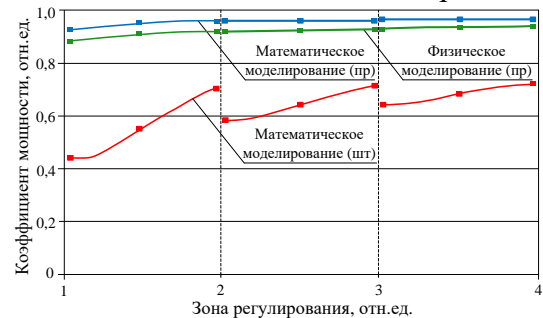


Рисунок 15 – Зависимости коэффициента мощности электропоезда со штатными и предлагаемыми ВИП и ВУВ от зоны регулирования питающего напряжения, полученные при математическом и физическом моделировании

который реализует алгоритмы управления штатных и предлагаемых ВИП, ВУВ электропоезда. Общий вид научно-экспериментального стенда и его структурная схема приведены на рисунках 12 и 13 соответственно. На рисунке 14 приведены осциллограммы напряжения и тока сети, напряжения инвертора, тока якоря (рисунок 14, а) и соответствующее им значение коэффициента мощности (рисунок 14, б) полученные на стенде в режиме рекуперативного торможения на 3,5 зоны регулирования. На рисунке 15 представлены экспериментальные графики коэффициента мощности электропоезда со штатными и предлагаемыми ВИП и ВУВ в режиме рекуперативного торможения. Экспериментально получено, что на протяжении всех зон регулирования питающего напряжения, коэффициент мощности электропоезда с предлагаемыми ВИП и ВУВ имеет значение не ниже 0,88.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Выполнен анализ отечественных и зарубежных силовых схем моторвагонного подвижного состава переменного тока и способов их управления, определены их достоинства и недостатки.

2 Разработаны способы управления предлагаемыми ВИП и ВУВ электропоезда на базе IGBT-транзисторов в режиме рекуперативного торможения и их схемотехнические решения, позволяющие в среднем повысить коэффициент мощности электропоезда на 49 % относительно электропоезда со штатными ВИП и ВУВ.

3 Разработаны мгновенные схемы замещения штатных-тиристорных, а также предлагаемых-транзисторных ВИП и ВУВ электропоезда, получены системы дифференциальных уравнений, позволяющие исследовать коммутационные и внекоммутационные интервалы изменения тока преобразователей.

4 По результатам анализа мгновенных схем замещений ВИП и ВУВ электропоезда выявлены недостатки штатных-тиристорных и достоинства предлагаемых-транзисторных преобразователей при реализации способов их управления.

5 Разработана математическая модель системы «Тяговая подстанция – контактная сеть – моторный вагон», позволяющая проводить исследования протекающих электромагнитных процессов при работе моторного вагона электропоезда в режиме рекуперативного торможения со штатными-тиристорными и предлагаемыми-транзисторными ВИП и ВУВ при реализации штатных и разработанных способов их управления.

6 Проведены исследования электромагнитных процессов работы электропоезда со штатными и предлагаемыми ВИП и ВУВ на математической модели в режиме рекуперативного торможения, в результате которых было получено:

- коэффициент мощности электропоезда со штатными ВИП и ВУВ в среднем составил  $K_m = 0,635$ , с предлагаемыми ВИП и ВУВ  $K_m = 0,945$ , что выше относительно штатного электропоезда на 49 %;

- коэффициент мощности электропоезда в режиме рекуперативного торможения на первой зоне регулирования напряжения при работе со штатными ВИП и ВУВ составляет  $K_m = 0,44$ , с предлагаемыми ВИП и ВУВ  $K_m = 0,92$ , что выше относительно штатного электропоезда на 109 % соответственно;

- коэффициент мощности электропоезда в режиме рекуперативного торможения на 3,5 зоны регулирования напряжения при работе со штатными ВИП и ВУВ составляет  $K_m = 0,68$ , с предлагаемыми ВИП и ВУВ  $K_m = 0,96$ , что выше относительно штатного электропоезда на 41 % соответственно;

- за счет уменьшения продолжительности коммутаций плеч инвертора увеличено средневыпрямленное значение напряжения ВИП в среднем на 23,52 %;

- коэффициент относительной пульсации тока штатного ВИП в среднем составляет  $K_{по\_I_{вип}}^{шт} = 23,06$ , предлагаемого  $K_{по\_I_{вип}}^{пр} = 17,24$ , что ниже на 25,24 %;

- коэффициент относительной пульсации тока штатной ВУВ в среднем составляет  $K_{по\_I_{вув}}^{шт} = 4,91$ , предлагаемой  $K_{по\_I_{вув}}^{пр} = 1,66$ , что ниже на 66 %;

- при работе моторного вагона со штатными ВИП и ВУВ потребляемая реактивная мощность индуктивного характера в первичной обмотке тягового трансформатора в среднем составляет 611,31 кВАр, с предлагаемыми ВИП и ВУВ – 210,15 кВАр, что ниже относительно штатного моторного вагона на 66 %;

- возврат электрической энергии в контактную сеть моторным вагоном электропоезда со штатными ВИП и ВУВ в среднем составляет 537,5 кВт, с предлагаемыми ВИП и ВУВ – 693,13 кВт, что выше относительно штатного моторного вагона на 28,95 %.

7 Произведен расчет и подбор снабберных цепей защиты для IGBT-транзисторов ВИП и ВУВ электропоезда от коммутационных перенапряжений, позволяющие снизить выбросы напряжения ниже амплитудного значения выпрямленного напряжения преобразователей.

8 Разработан научно-экспериментальный стенд тягового привода электропоезда, позволяющий проводить физическое моделирование работы ВИП и ВУВ электропоезда на базе IGBT-транзисторов в режиме рекуперативного торможения, а также блок его управления.

9 Проведены исследования электромагнитных процессов работы транзисторных ВИП и ВУВ электропоезда на научно-экспериментальном стенде, которые подтвердили исследования, полученные на математической модели, относительная погрешность которых составила в пределах 10 %.

10 Рассчитан годовой экономический эффект на один моторный вагон электропоезда серии ЭПЗД с предлагаемыми ВИП и ВУВ на базе IGBT-транзисторов, который составил 380,08 тыс. руб. при сроке окупаемости 6,7 года.

## **СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статья в издании, входящем в международную систему цитирования Scopus:**

1. **Ivanov, V.S.** Increasing Energy Efficiency and Reliability of Electric Multiple Unit Regenerative Braking / V.S. Ivanov, R.I. Ustinov, O.V. Melnichenko // VIII International Scientific Siberian Transport Forum: TransSiberia 2020, Volume 1, pp 420-426.

### **Статьи в рецензируемых журналах, включенных в перечень, утвержденный ВАК**

2. **Иванов В. С.** Анализ применения преобразователей в силовых схемах отечественного моторвагонного подвижного состава переменного тока / В. С. Иванов, О. В. Мельниченко // Вестник ИрГТУ / Иркутский национальный технический. ун.-т. Иркутск, 2018. Вып. 4. С. 231-243.

3. **Иванов В. С.** Математическое моделирование тягового трансформатора электропоезда переменного тока серии ЭД9Э в среде имитационного моделирования Matlab Simulink / В. С. Иванов, О. В. Мельниченко, В. В. Дурных // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун.-т. путей сообщения. Иркутск, 2018. Вып. 3. С 57-68.

4. **Иванов В. С.** Теоретическое исследование электромагнитных процессов инвертора на базе тиристорных и IGBT-транзисторных электропоезда переменного тока в режиме рекуперативного торможения / В. С. Иванов, О. В. Мельниченко / Научно-технический журнал «Известия Транссиба» / Омский гос. ун.-т. путей сообщения. Омск, 2018. Вып. 3. С 28-44.

### **Авторские свидетельства и патенты**

5. **Иванов В. С., Мельниченко О. В., Линьков А. О., Портной А. Ю., Шрамко С. Г., Яговкин Д. А., Устинов Р. И., Дурных В. В.** Силовой выпрямительно-инверторный преобразователь однофазного переменного тока для электрического транспорта и способ его управления // Пат. № 2700594, Рос. Федерация: МПК H02M 7/21, заявитель и патентообладатель ООО «Транспортные прогрессивные технологии», заявл. 07.11.2018, опублик. 18.09.2019. Бюл. №26. – 1 с: ил.

### **Публикации в других изданиях**

6. **Иванов В. С.** Выпрямительно-инверторный преобразователь на базе IGBT-транзисторов для моторвагонного подвижного состава / В. С. Иванов, О. В. Мельниченко, В. В. Дурных // Scientific research – 2017: Proceedings of articles the III International scientific conference / Czech Republic, Karlovy Vary - Russia, Moscow, September 28-29, 2017. С. 122-130.

7. **Иванов В. С.** Разработка силовой схемы электропоезда переменного тока серии ЭД9Э на базе IGBT-транзисторов / В. С. Иванов, О. В. Мельниченко // Наука и молодежь: сборник трудов Четвертой Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (апрель – май 2018 г.) / Иркутский гос. ун.-т. путей сообщения. Иркутск, 2018. С. 137-140.
8. **Иванов В. С.** Математическое моделирование тягового трансформатора электропоезда переменного тока серии ЭД9Э в среде имитационного моделирования MATLAB SIMULINK / В. С. Иванов, В. А. Аксенов, О. В. Мельниченко, В. В. Дурных, Ю. В. Газизов / Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Девятой Междунар. науч.-практ. конф., 10 – 13 апреля 2018 г. / Иркутский гос. ун.-т. путей сообщения. Иркутск, 2018. Т.2. С. 273-280.
9. **Иванов В. С.** Математическое моделирование выпрямительно-инверторного преобразователя электропоезда переменного тока в режиме рекуперативного торможения / В. С. Иванов, Р. И. Устинов // Электропривод на транспорте и в промышленности: тр. II Всероссийской. науч.-практической. конференции (Хабаровск, 20–21 сентября 2018 г.) / Дальневосточный ун.-т. путей сообщения. Хабаровск, 2018. С. 143-150.
10. **Иванов В. С.** Разработка выпрямительно-инверторного преобразователя и выпрямительной установки возбуждения для моторвагонного подвижного состава переменного тока на диодно-транзисторной базе / В. С. Иванов, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков // Электропривод на транспорте и в промышленности: тр. II Всероссийской. науч.-практической. конференции (Хабаровск, 20–21 сентября 2018 г.) / Дальневосточный ун.-т. путей сообщения. Хабаровск, 2018. С. 135-143.
11. **Иванов В. С.** Обзор перспектив повышения энергетической эффективности и надёжности рекуперативного торможения на электроподвижном составе / В. С. Иванов, И. А. Баринов, Д. А. Яговкин, Р. И. Устинов, С. Г. Шрамко, А. О. Линьков, О. В. Мельниченко // Электропривод на транспорте и в промышленности: тр. II Всероссийской. научно-практической конференции. (Хабаровск, 20–21 сентября 2018 г.) / Дальневосточный ун.-т. путей сообщения. Хабаровск, 2018. С. 150-157.
12. **Иванов В. С.** Диодно-транзисторная база моторвагонного подвижного состава переменного тока / В. С. Иванов, И. А. Баринов // Электронный научный журнал «Молодая наука Сибири» / Иркутский гос. ун.-т. путей сообщения. Иркутск, 2018.
13. **Иванов В. С.** Интервальное прогнозирование динамики удельного расхода электроэнергии на тягу поездов в контексте развития технологии рекуперации энергии / В. С. Иванов, И. А. Баринов, // Электронный научный журнал «Молодая наука Сибири» / Иркутский гос. ун.-т. путей сообщения. Иркутск, 2018.
14. **Иванов В. С.** Цепи защиты транзисторного выпрямительно-инверторного преобразователя для электроподвижного состава переменного тока / В. С. Иванов, И. А. Баринов // Эксплуатационная надёжность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы IV всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун.-т путей сообщения. Омск, 2018. С 86-92.
15. **Иванов В. С.** О перспективности применения систем бортового хранения рекуперированной энергии на рельсовом транспорте / В. С. Иванов, И. А. Баринов, / Эксплуатационная надёжность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы IV всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун.-т путей сообщения. Омск, 2018. С 181-189.
16. **Иванов В. С.** Проблема выбора конструкции IGBT-транзисторов в качестве силовой элементной базы на отечественном электроподвижном составе / В. С. Иванов, И. А. Баринов // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта: Материалы третьей международной научно-практической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2018. – С 78-83.
17. **Иванов В. С.** Использование силовых IGBT-транзисторов для высокоэффективного выпрямления и инвертирования электрической энергии на электроподвижном составе / В. С. Иванов, И. А. Баринов // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта: Материалы третьей международной научно-практической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2018. С 225-230.
18. **Иванов В. С.** Применение IGBT-транзисторов повысит надёжность работы отечественного моторвагонного подвижного состава / В. С. Иванов, Р. И. Устинов, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков // Ежемесячный производственно-технический и научно-популярный журнал «Локомотив» / Москва, 2019. Вып. 2. С 44-47.