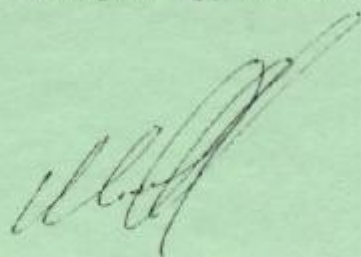


На правах рукописи



МЕЛЬНИЧЕНКО Олег Валерьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЭЛЕКТРОВОЗОВ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

ХАБАРОВСК 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС).

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор
ВЛАСЬЕВСКИЙ Станислав Васильевич.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент
ПУДОВИКОВ Олег Евгеньевич, заведующий кафедрой «Электропоезда и локомотивы» ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС)»;

доктор технических наук, профессор
ЩЕРБАКОВ Виктор Гаврилович, профессор кафедры «Электромеханика и электрические аппараты» ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»;

доктор технических наук, доцент
БУРКОВ Алексей Федорович, профессор кафедры «Судовая энергетика и автоматика» ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)».

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Защита диссертации состоится «23» декабря 2015 года в 10 час. 00 мин., в ауд. 201-3 на заседании диссертационного совета Д 212.092.04 при Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КнАГТУ, www.knastu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 201_ г.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять в адрес диссертационного совета Д 212.092.04, e-mail: knaru@knastu.ru

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

А.С. Гудим

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Проблема и актуальность темы исследования. Сегодня все эксплуатируемые в России электровозы переменного тока с коллекторными электродвигателями имеют невысокий уровень энергетических показателей в режимах тяги и рекуперативного торможения и характеризуются в связи с этим значительным потреблением электроэнергии, затраты на которую являются основной статьёй расходов Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД». Поэтому в «Энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на перспективу до 2030 года» одними из основных направлений развития являются энергосбережение и повышение качества электроэнергии в контактной сети.

В настоящее время грузовые электровозы переменного тока типа ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ80ТК, 2ЭС5К, 3ЭС5К и 4ЭС5К состоят из двух, трех или четырёх секций, в каждой из которых находятся четыре или шесть тяговых электроприводов постоянного тока на основе коллекторных тяговых двигателей с питанием их от сети через тяговый трансформатор и два или три выпрямительно-инверторных преобразователя (ВИП), работающих выпрямителями в режиме тяги электровоза и инверторами в режиме его электрического рекуперативного торможения. Общими недостатками тяговых электроприводов электровоза являются значительное потребление реактивной мощности, а также искажение формы напряжения и тока в первичной обмотке тягового трансформатора электровоза, которые и обуславливают низкие значения коэффициента мощности (K_M), не превышающие в режимах тяги 0,84 и рекуперативного торможения 0,65. Кроме того, существующие типовые алгоритмы управления преобразователями порождают при их работе появление значительных гармонических составляющих (гармоник) напряжения в контактной сети. Это приводит к сокращению срока службы изоляции электрических машин и аппаратов, к ухудшению работы связи, к сбоям в работе систем управления преобразователями электровоза и др.

Колебания напряжения в контактной сети, вызванные процессами переключения тиристорных преобразователей, в некоторых режимах имеют амплитуду, соизмеримую с напряжением контактной сети. При углах регулирования, близких к 90 эл. град., и при значительном удалении электровоза от тяговой подстанции максимальные значения амплитуды искаженного напряжения могут в 1,5-1,8 раза превышать амплитуду питающего напряжения.

Большая протяженность электрифицированных железных дорог на переменном токе, сложные условия эксплуатации тяговых электроприводов с одновременной непрерывностью и быстротечностью протекающих в них процессов передачи, преобразования и потребления электроэнергии, составляют объективную совокупность внешних и внутренних факторов, от которых зависит уровень энергоэффективности и работоспособности электровозов.

Все указанные выше типы электровозов оснащены системой рекуперативного торможения, с помощью которой появляется возможность увеличения пропускной и провозной способности железных дорог, повышения безопасности движения поездов и возврата электроэнергии в контактную сеть. В то же

время существует ряд серьезных причин, сдерживающих широкое применение рекуперативного торможения: работа инвертора вызывает значительные искажения синусоидальной формы напряжения контактной сети на токоприемнике электровоза и сопровождается низким коэффициентом мощности по причине завышенной величины угла запаса инвертора. Возникающие гармонические искажения в кривой напряжения сети отрицательно влияют на работу блока синхронизации аппаратуры управления инвертором, в результате чего нарушается его устойчивая работа, что может привести к опрокидыванию инвертора и выходу электровоза из строя.

Во многих технических решениях, используемых в настоящее время на электровозах переменного тока с целью повышения их энергетической эффективности, присутствуют достаточно сложные дополнительные устройства и элементы в виде различных компенсаторов реактивной энергии, основанных на применении полупроводниковых приборов силовой электроники и электронной техники их управления. Их внедрение на электровозе в силу сложности построения и размещения требует больших дополнительных финансовых затрат и приведет в определенной степени к снижению надежности работы электровоза.

Большой вклад в развитие этой области транспортной науки внесли такие отечественные ученые и специалисты, как Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман, И. П. Исаев, С. Н. Засорин, А. В. Плакс, С. В. Захаревич, В. А. Некрасов, К. Г. Кучма, А. В. Каменев, А. Л. Лисицин, Л. А. Мугинштейн, В. А. Кучумов, Ю. М. Иньков, Н. А. Ротанов, В. П. Феоктистов, С. В. Покровский, Р. Р. Мамошин, А. Н. Савоськин, В. Н. Лисунов, В. Д. Тулупов, В. А. Голованов, Н. Н. Горин, Л. Д. Капустин, Г. А. Штибен, Ю. А. Басов, Е. Г. Бовэ, М. Л. Перцовский, Н. И. Радионов, Ю. М. Кулинич, С. В. Власьевский, В. В. Литовченко, В. Г. Щербаков, А. Л. Лозановский, А. С. Копанев, Б. И. Хоменко, В. П. Янов, В. А. Малютин, В. Н. Горбань, Н. Н. Широченко, Н. Г. Шабалин, В. В. Семченко, В. В. Находкин, А. Л. Донской и другие, а также зарубежные ученые и специалисты Г. Кноблах, Д. Зденек, В. Брейер, М. Депенброк, Г. Когет, А. Коссие, Т. Христиан, Хасимото Сюньити, А. Баррал, П. Валтонен, В. Харпрехт, В. Шперер, П. Кахлер, И. М. Метцлер, Х. Керманн, Х. Гатманн, В. Вейгел, Г. Шолтис и другие.

Изложенное выше позволяет утверждать, что одними из основных путей развития и совершенствования современных электровозов переменного тока являются целенаправленное изменение способов управления ВИП с введением в его схему диодного плеча, радикальное совершенствование силовой схемы ВИП путем замены тиристоров на современные силовые IGBT-транзисторы и применение нового алгоритма его управления, которые направлены на значительное повышение коэффициента мощности тяговых электроприводов электровоза и снижение гармоник напряжения в контактной сети, а также его работоспособности при нормальных и аварийных режимах. Однако достижение этого требует применения комплексного подхода к решению сложных и нестандартных задач аналитического и экспериментального исследования с проведением гибридного (математического и физического) моделирования, модернизации отдельных узлов электровоза через НИОКР и опытных испытаний модер-

низированного электровоза в условиях реальной эксплуатации.

Поэтому проведение таких исследований, на основе которых выполняется разработка технических решений, способов и средств управления ВИП, направленных на повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока, несомненно является сегодня актуальной и экономически значимой задачей.

Таким образом, диссертационная работа представляет собой новое решение важной народно-хозяйственной проблемы повышения энергетических показателей электровозов и качества потребляемой ими электроэнергии. Актуальность реализации рассмотренной проблемы определяет цель данной работы.

Целью диссертационной работы является решение научной проблемы повышения энергоэффективности и работоспособности электроприводов электровоза переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе разработана и реализована концепция комплексного подхода к проведению исследований. При этом были поставлены и решены следующие задачи:

1. Выполнен системный анализ существующих способов и средств повышения энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения.

2. Разработаны и обоснованы новые алгоритмы управления многозонными ВИП электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения на первой и высших зонах регулирования, позволяющие повысить его энергетическую эффективность.

3. Проведены аналитические исследования процессов работы ВИП электровоза переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения с типовым и новыми алгоритмами управления с включением диодного плеча в силовую схему ВИП.

4. Разработаны энергосберегающие алгоритмы разнофазного управления (РФУ) ВИП электровоза переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения, позволяющие эффективно снижать свободные высокочастотные колебания в тяговой сети железной дороги.

5. Разработан алгоритм управления ВИП, позволяющий повысить работоспособность и энергетические показатели тяговых электроприводов электровоза при образовании аварийных процессов, связанных с пропуском импульсов управления на тиристоры плеча ВИП в режимах тяги и рекуперативного торможения.

6. В среде MatLab создана математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз», позволяющая исследовать электромагнитные процессы работы ВИП электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения с типовым и новыми способами управления с одновременным включением диодного плеча в силовую цепь ВИП, а также при образовании аварийных процессов в ВИП в результате пропуска импульсов управления на его плечи в один из полупериодов напряжения.

7. Модернизирован опытный электровоз серии ВЛ80Р новыми алгоритмами управления ВИП и диодным плечом, включенным параллельно цепи выпрямленного тока.

8. Проведены эксплуатационные испытания модернизированного электровоза серии ВЛ80Р на участке Иркутск-Сортировочный – Большой Луг – Андриановская на Восточно-Сибирской железной дороге – филиале ОАО «РЖД» с типовым и предлагаемыми способами управления.

9. Разработаны принцип, структура и схемное решение ВИП на основе IGBT-транзисторов в режимах тяги и рекуперативного торможения электровоза переменного тока, а также способы его управления, позволяющие провести модернизацию электровоза с достижением у его тяговых электроприводов высокого коэффициента мощности.

10. Оценена экономическая эффективность предлагаемых технических решений.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Предложена концепция, позволяющая реализовать математическое моделирование на обобщенной модели системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» с целью проведения исследований процессов работы электровоза с учетом применения диодного плеча, разнофазного управления и новых алгоритмов управления ВИП в режимах тяги и рекуперативного торможения.

2. Разработаны принцип, структура и схемное решение ВИП на основе IGBT-транзисторов с частотой коммутации, соответствующей частоте питающей сети, а также его новый алгоритм управления.

3. Разработан способ управления ВИП, позволяющий повысить коэффициент мощности электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения с учетом включения параллельно цепи выпрямленного тока диодного плеча и применения разнофазного алгоритма управления ВИП.

4. Впервые предложен способ повышения работоспособности ВИП электровоза при отсутствии импульсов управления за счет резервирования аварийных плеч ВИП диодным плечом и работы ВИП по алгоритму управления с одновременной коммутацией тиристорных плеч.

5. Разработаны новые энергосберегающие алгоритмы разнофазного управления ВИП электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения, которые при их реализации не снижают выпрямленного напряжения на тяговых двигателях, обеспечивают повышение коэффициента мощности электровоза и снижение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения контактной сети.

Научно-техническая новизна ряда выполненных значимых работ подтверждена патентами РФ на изобретения №№54704, 2322749, 2435288, 2475374, 2467892, 2469458, 2498490, 2539323, 2557006, 2561068.

Практическая ценность работы. Разработанная концепция комплексного подхода в проведении исследований на основе применения средств гибридного моделирования и проведения испытаний на реальном электровозе позволила получить следующие результаты:

1. Разработаны силовая схема включения диодного разрядного плеча и конструкция его исполнения в ВИП, позволяющие повысить энергетические показатели электровоза и его работоспособность.

2. Разработано схемное и конструктивное решение блока разнофазного управления ВИП электровоза, позволяющее реализовывать энергосберегающие

алгоритмы управления ВИП.

3. Разработано схемное и конструктивное решение кассеты блока распределительного устройства (БРУ) для реализации новых алгоритмов управления ВИП.

4. Предложено техническое решение по управлению IGBT-транзисторами в схеме ВИП, что позволило симметризовать максимальные мгновенные значения тока сети с максимальными мгновенными значениями напряжения сети, частично компенсировать индуктивный характер нагрузки электровоза, а угол сдвига фаз φ между током и напряжением сети приблизить к нулю.

5. Разработано схемное конструктивное решение стенда экспериментальной установки, включающей в себя тиристорный и транзисторный ВИП, блок их управления, трансформатор, сглаживающий реактор и тяговый электродвигатель.

6. Проведена модернизация семи электровозов ВЛ80Р №№ 1665, 1812, 1822, 1829, 1849 и ВЛ85 №№ 200, 230 под схему включения диодного разрядного плеча и применения разнофазного управления ВИП, которые находятся в эксплуатации.

7. Проведены опытные испытания электровоза ВЛ80Р №1829 на участке Большой Луг - Слюдянка Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» с разработанными техническими решениями.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы реализованы в полном объеме в ряде научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР):

1. В НИОКР «Повышение эффективности и энергетических показателей режима рекуперативного торможения электровозов переменного тока» по Договору №35 от «19» января 2009 г., шифр работы 19.9.007.Н (между ОАО «РЖД» и ИрГУПС).

2. В НИОКР «Повышение качества электрической энергии в контактной сети, ресурса электронного и электрооборудования электровоза переменного тока» по Договору от 08 июня 2010 г. №726/493, шифр работы 31.1.001.Н (между ОАО «РЖД» и ИрГУПС).

3. По Договору №4/ЦТ-2012-И от 19 октября 2012 г. (между ЗАО «ОЦВ» и ИрГУПС) была изготовлена установочная серия устройств повышения качества электрической энергии в контактной сети, ресурса электронного и электрического оборудования электровозов переменного тока.

4. В НИОКР «Разработка и внедрение комплексного оборудования для повышения энергетических показателей и эффективности работы электровозов переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения» по Договору №184 от 10 апреля 2014 г., шифр работы 9.047 (между ОАО «РЖД» и ИрГУПС).

5. Разработан и изготовлен лабораторный стенд с тиристорным и транзисторным ВИП для проведения научных исследований и учебных занятий по дисциплине «Системы управления ЭПС» со студентами специальности «Электрический транспорт железных дорог».

Практическая реализация представленных в диссертации разработок, а также их исследование, испытания и внедрение осуществлялись под научным руководством автора диссертации, его аспирантами и соискателями по выполнению данной темы.

Методы исследований. Решение поставленных в диссертации задач вызвало необходимость применения широкого спектра теоретических и экспериментальных методов и способов исследования: теории линейных и нелинейных электрических цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами, методов математического и физического моделирования, численных методов решения интегральных и дифференциальных уравнений, теории преобразовательных устройств, схемотехники на интегральных микросхемах и вычислительных устройствах, полупроводниковых приборах силовой электроники, в том числе и IGBT-транзисторах. Научные исследования проводились на математической модели в среде MatLab/Simulink, на физических моделях в лаборатории и на реальных электровозах серий ВЛ80Р и ВЛ85.

Основные результаты работы, выносимые на защиту:

1. Результаты аналитических исследований процессов работы ВИП электровоза переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения с типовым и новым алгоритмами управления с включением диодного плеча в силовую схему ВИП, которые заключаются в следующем:

- способ управления ВИП, позволяющий повысить коэффициент мощности тяговых электроприводов электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения;

- способ повышения работоспособности ВИП электровоза в режиме тяги при отсутствии импульсов управления на тиристорах его плеч;

- новые энергосберегающие алгоритмы разнофазного управления ВИП электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения, которые обеспечивают повышение коэффициента мощности тягового электропривода и снижение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения контактной сети.

2. Результаты исследования математического моделирования на обобщенной модели системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» электромагнитных процессов при работе электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения с учетом применения диодного плеча, разнофазного управления и новых алгоритмов управления ВИП.

3. Результаты разработки ВИП на основе IGBT-транзисторов и его алгоритма управления, приводящие к радикальному решению проблемы повышения энергоэффективности тяговых электроприводов электровоза.

4. Результаты практической реализации разработанных способов управления и энергосберегающих алгоритмов разнофазного управления на базе новейших достижений силовой электроники, интегральной микроэлектроники и вычислительной техники.

5. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие результаты аналитических исследований и математического моделирования электромагнитных процессов работы электровоза с типовым и новым алгоритмами управления с включением диодного плеча в силовую схему ВИП.

Личный вклад автора. Диссертация является результатом личных исследований автора, которые проводились под его руководством или при непосредственном участии. Результаты, определяющие научную новизну и практи-

ческую значимость работы, получены соискателем лично. В опубликованных в соавторстве работах автору принадлежит описание проблемы и актуальности, постановка задачи, научное обоснование предложенных способов управления и реализующих их технических решений, разработка обобщенной математической модели системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» с учетом применения диодного плеча, разнофазного управления и новых алгоритмов управления ВИП электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения, обобщение и анализ результатов исследований.

Под руководством автора диссертации по темам, являющимся фрагментами решаемой в диссертации проблемы, подготовлены два кандидата технических наук и осуществляется подготовка двух кандидатских диссертаций.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских, отраслевых и региональных симпозиумах, конференциях, выставках и конкурсах: всероссийская научно-практическая конференция учёных транспортных вузов, ДВГУПС, 2006, 2007 гг.; 5-я, 6-я международная конференция «Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке», ДВГУПС, 2007, 2008 гг.; международная научно-практическая конференция учёных транспортных вузов, Хабаровск, 2008 г.; 9-я международная научно-техническая конференция (АПЭП-2008), Новосибирск, 2008 г.; всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, 2008 г.; региональная конференция «Транспортные проблемы Сибирского региона», ИрГУПС, 2009 г.; научно-практическая конференция учёных транспорта, вузов, НИИ, посвящённая 110-летию Забайкальской железной дороги, Чита, 2010 г.; 7-я международная научно-практическая конференция «TRANS-MECH-ART-СHEM», Москва, 2010 г.; всероссийская научно-практическая конференция «Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования», Хабаровск, 2010 г.; региональная конференция «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», ИрГУПС, 2011 – 2013 гг.; общесетевой слет молодежи ОАО «РЖД» в рамках конкурса инновационных проектов «Новое звено 2011» с проектом «Повышение эффективности работы рекуперативного торможения электровоза переменного тока за счет применения IGBT-транзисторов в выпрямительной установке возбуждения», Москва, 2011 г.; совещание у главного инженера Дирекции тяги ОАО «РЖД», протокол №128 от 30 сентября 2011 г., проводимом в соответствии с поручением старшего вице-президента ОАО «РЖД» В.А. Гапановича, №П-ВГ-387 от 27.09.2011 г.; совещание у вице-президента ОАО «РЖД» А.В. Воротилкина, протокол №АВ-263/пр от 14 ноября 2011 г.; 3-я, 4-я всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Проблемы транспорта Восточной Сибири», Иркутск, 2012, 2013 гг.; заседание секции «Локомотивное хозяйство» научно-технического совета ОАО «РЖД» под председательством главного инженера Дирекции тяги ОАО «РЖД», протокол № 36 от 21 августа 2012 г.; общесетевой слет молодежи ОАО «РЖД» в рамках конкурса инновационных проектов «Новое звено 2012», проект победитель, Москва, 2012 г.; всероссийская научно-практическая конференция «Электропривод на транспорте и в промышленно-

сти», Хабаровск, 2013 г.; международный научно-технический симпозиум «Элтранс-2013» «Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов скоростного и высокоскоростного транспорта», Санкт-Петербург, 2013 г.; международная научно-техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии» (ЭПЭ-2013), Томск, 2013 г.; совещание у первого заместителя начальника Департамента технической политики ОАО «РЖД» Ю.В. Митрохина, протокол № ЦТех-385/пр от 24 июля 2013 г.; совещание у главного инженера Дирекции тяги ОАО «РЖД», протокол № ЦТ-323/пр от 09 августа 2013 г.; совещание под председательством главного инженера Дирекции тяги протокол №ЦТ-27/пр. от 25 января 2013 г.; заседание секции «Локомотивное хозяйство» протокол №35 от 16 августа 2013 г.; расширенное совещание с участием представителей завода изготовителя ООО «Уральские локомотивы», ЗАО «Дорожный центр внедрения Красноярской ж.д.», Восточно-Сибирской Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД» протокол №1 от 02 июля 2014 г.; научно-технический совет «Локомотивное хозяйство», Москва, 2014 г, протокол №37 от 16 октября 2014 г.; выездное заседание секции «Локомотивное хозяйство» Научно-технического совета ОАО «РЖД» по теме «Принципы построения магистрального электровоза переменного тока с высокими энергетическими показателями в режимах тяги и рекуперативного торможения», ООО «ПК НЭВЗ», Новочеркасск, протокол №12 от 10 июня 2015 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 72 научные работы, из них одна монография, 21 статья – в ведущих научных рецензируемых журналах и изданиях перечня ВАК Минобрнауки России, получено 9 патентов на изобретения, 1 патент на полезную модель и 1 решение о выдаче патента на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, двух приложений, библиографического списка из 259 наименований и содержит 347 страниц основного текста, 45 таблиц и 237 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении на основе анализа причин снижения энергетических показателей электровозов переменного тока изложены и обоснованы суть и актуальность решаемой в диссертации проблемы повышения энергетической эффективности и работоспособности тяговых электроприводов электровоза. Отмечены возможные пути решения данной проблемы. Стремление решения рассмотренной проблемы определило идею диссертационной работы – разработка способов, алгоритмов и средств управления ВИП, а также новых технических решений ВИП, направленных на значительное повышение коэффициента мощности и работоспособности тяговых электроприводов электровоза переменного тока. На этой основе сформулирована цель диссертационной работы.

Отмечено, что для разработки путей повышения энергоэффективности и работоспособности тяговых электроприводов предложена концепция, позволяющая применить комплексный подход, который основывается на совокупности гибридного моделирования, аналитического и экспериментального исследования предлагаемых технических решений. Теоретическое и практическое осуществление такого подхода связано с разработкой, обоснованием и исследова-

нием технических решений, реализацией их в конструкторском виде с последующим испытанием и внедрением на электровозе. Для достижения этой цели в рамках диссертации представлена аргументированная совокупность задач, а также их теоретически и экспериментально подтвержденные решения. Полученные при этом принципиально новые результаты определили сформулированную научную новизну диссертационных исследований, значительная часть которых подтверждена патентами на изобретения. Поскольку решенная в диссертации проблема актуальна не только теоретически, но и имеет большое практическое значение, в рамках данного раздела определена также конкретная практическая ценность диссертационной работы.

В первой главе диссертации сформулированы и обоснованы необходимые пути повышения энергоэффективности и работоспособности тяговых электроприводов электровоза. Для этого проведен анализ основополагающих публикаций в области повышения энергетических показателей тяговых электроприводов электровозов переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения. Научной основой стало изучение трудов отечественных и зарубежных ученых и специалистов в области теории и практики применения выпрямительно-инверторных преобразователей на электроподвижном составе, а также их систем управления. Анализ публикаций показал, что существующие схемные решения построения тиристорных ВИП и их систем управления обладают следующими основными недостатками:

1. Регулирование выпрямленного напряжения в ВИП на тиристорах как при выпрямлении, так и инвертировании осуществляется путем перемещения фазы импульсов управления тиристорами только с конца полупериода напряжения в сторону его начала. При этом открытие тиристорov, например, при выпрямлении, происходит при условии подачи импульсов управления на их управляющие электроды и наличии положительного напряжения на их анодах. В то же время закрытие тиристорov осуществляется только путем приложения к их анодам обратного (отрицательного) напряжения, т.е. только в следующем полупериоде напряжения. В результате возникает угол сдвига фаз φ между переменными значениями напряжения и тока в обмотке трансформатора, а значит, и в контактной сети, что вызывает уменьшение коэффициента мощности. Аналогично система работает и при инвертировании.

2. Достаточно большая величина фазы α_0 нерегулируемых импульсов управления (9-10 эл. град.) приводит к увеличению угла сдвига фаз φ , а значит, к уменьшению коэффициента мощности.

3. Необходима большая длительность импульсов управления (до 1000 мкс) для обеспечения надежной работы ВИП в период основной коммутации токов тиристорных плеч ВИП.

4. Сложная система управления ВИП из-за большого количества элементов (датчики, преобразовательные, логические и усилительные элементы) и их связей между собой приводит к снижению надежности ее работы.

5. Наличие поочередной организации процесса основной коммутации тиристорных плеч ВИП, в результате которой в короткозамкнутом контуре коммутации находится значительная сумма индуктивных сопротивлений секций

вторичной обмотки тягового трансформатора, приводящая к увеличению длительности угла коммутации и э.д.с. самоиндукции этого контура, что уменьшает коэффициент мощности тягового электропривода электровоза и увеличивает искажение синусоидальной формы напряжения сети.

6. В режиме рекуперативного торможения для обеспечения устойчивой и надежной работы электровоза угол запаса (порядка 25-30 эл. град.), а следовательно, и угол опережения β инвертора имеют большую величину, что приводит к значительному снижению коэффициента мощности.

7. В коммутационный и внекоммутационный интервалы работы выпрямителя и инвертора возникают значительные искажения кривой напряжения контактной сети.

Причины появления этих недостатков обусловлены тем, что основные схемные решения построения ВИП, систем их управления и элементная база в составе этих решений закладывались в 70-80-е годы XX века. В настоящее время по прошествии 30-40 лет эти решения согласно ГОСТ Р 55364-2012 не отвечают современным техническим требованиям. Все это потребовало разработки новых технических решений и их систем управления, основанных на новых принципах и новой элементной базе.

Таким образом, проведенный анализ существующих работ в обозначенной области показал, что из многих путей повышения энергетической эффективности и работоспособности тяговых электроприводов электровозов переменного тока наиболее эффективным и менее затратным является поэтапный путь разработки новых способов и средств управления существующих тиристорных ВИП (путь модернизации с использованием достоинств и устранением недостатков существующих технических решений в области ВИП), а также путь совершенствования силовой схемы ВИП на основе замены тиристоров на IGBT-транзисторы и диоды с применением нового алгоритма его управления (путь обновления конструктивного решения ВИП и его управления), приводящий к более значительному повышению коэффициента мощности тяговых электроприводов электровоза.

Отсюда вытекают цель диссертационной работы и задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели. Разработка и обоснование применения новых алгоритмов управления ВИП в режимах выпрямителя и инвертора с включением диодного плеча в их силовые схемы, ориентированных на повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов, составляет суть и содержание следующей главы диссертации.

Во второй главе проведено детальное аналитическое исследование физических процессов работы ВИП электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения методом анализа мгновенных схем замещения на первой и четвертой зонах регулирования при типовом (без включения диодного плеча) и предлагаемых алгоритмах с включением диодного плеча параллельно цепи выпрямленного тока.

Упрощенная схема ВИП электровоза для режима тяги с включенным диодным плечом VD9 приведена на рис. 1, а, а для режима рекуперативного торможения с включенным диодным плечом VD9 – на рис. 1, б.

Основная цель предлагаемых алгоритмов управления ВИП с включением

диодного плеча в его силовую схему – это достижение улучшенных потенциальных условий включения тиристорных плеч, упрощение алгоритма работы на первой зоне, уменьшение длительности коммутации и эквивалентного индуктивного сопротивления цепи переменного тока. Кроме того, включение диодного плеча обеспечивает разряд накопленной в индуктивностях цепи двигателей электромагнитной энергии, которая используется полезно для выполнения механической работы электровоза. Предлагаемые алгоритмы управления ВИП для режимов выпрямителя (а) и инвертора (б) приведены в табл. 1.

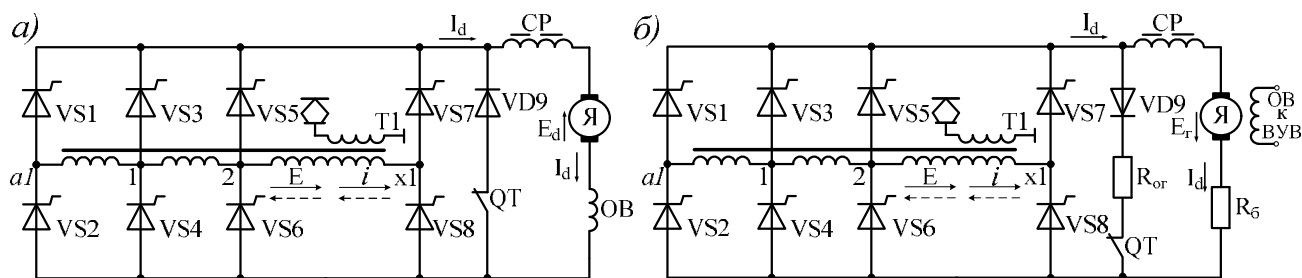


Рис. 1. Упрощенная схема ВИП электровоза в режимах тяги (а) и рекуперативного торможения (б) с включением диодного плеча VD9

Табл. 1. Предлагаемые алгоритмы работы плеч ВИП электровоза в режимах выпрямителя (а) и инвертора (б)

а) Зона	Полупериод	Плечи выпрямителя							
		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
1	→	-	-	-	α_p	α_p	-	-	-
	←	-	-	α_p	-	-	α_p	-	-
2	→	-	α_p	α_0	α_0	α_0	-	-	-
	←	α_p	-	α_0	α_0	-	α_0	-	-
3	→	-	-	-	α_p	α_0	α_0	α_0	-
	←	-	-	α_p	-	α_0	α_0	-	α_0
4	→	-	α_p	-	α_0	α_0	α_0	α_0	-
	←	α_p	-	α_0	-	α_0	α_0	-	α_0

б) Зона	Полупериод	Плечи инвертора							
		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
4	→	-	β_3	α_p	-	-	β	β_3	-
	←	β_3	-	-	α_p	β	-	-	β_3
3	→	-	-	-	β_3	α_p	β	β_3	-
	←	-	-	β_3	-	β	α_p	-	β_3
2	→	-	β_3	α_p	β	β_3	-	-	-
	←	β_3	-	β	α_p	-	β_3	-	-
1	→	-	-	-	α_p	β	-	-	-
	←	-	-	β	-	-	α_p	-	-

Работа выпрямителя с предлагаемым алгоритмом управления и включением диодного плеча на первой зоне значительно отличается от работы выпрямителя с типовым алгоритмом управления. Наличие разрядного диодного плеча создаёт возможность упрощения алгоритма управления тиристорами выпрямителя и изменяет процесс их работы: уменьшает длительность протекания тока через них в каждом полупериоде за счёт перевода тока из буферного контура на разрядное диодное плечо. Упрощение алгоритма управления тиристорами заключается в том, что в каждом полупериоде напряжения подаются только импульсы управления с фазой α_p на два тиристорных плеча ВИП, соответствующих положительной полярности напряжения. В результате тиристоры не участвуют в процессе разряда по буферному контуру электромагнитной энергии нагрузки, которая теперь разряжается в каждом полупериоде с помощью разрядного диодного плеча. Такая работа выпрямителя позволяет снизить потребление реактивной энергии, а значит, повысить энергетические показатели за

счёт отсутствия интервала времени, в пределах угла α_0 , в котором поток энергии направлен из выпрямителя в сеть.

На высших зонах регулирования применение нового алгоритма управления и разрядного диодного плеча привели к изменениям электромагнитных процессов в выпрямительном преобразователе, в результате действия которых происходит повышение коэффициента мощности электровоза, выражающееся в следующем: при включении разрядного диодного плеча процессы коммутации начинаются не с началом угла α_0 , а с началом каждого полупериода напряжения сети; применение нового алгоритма управления приводит к уменьшению длительности коммутации γ , а следовательно, к уменьшению падения выпрямленного напряжения в этом интервале. Диаграммы выпрямленного напряжения ВИП в режиме выпрямителя при типовом (а) и предлагаемом (б) алгоритмах управления представлены на рис. 2.

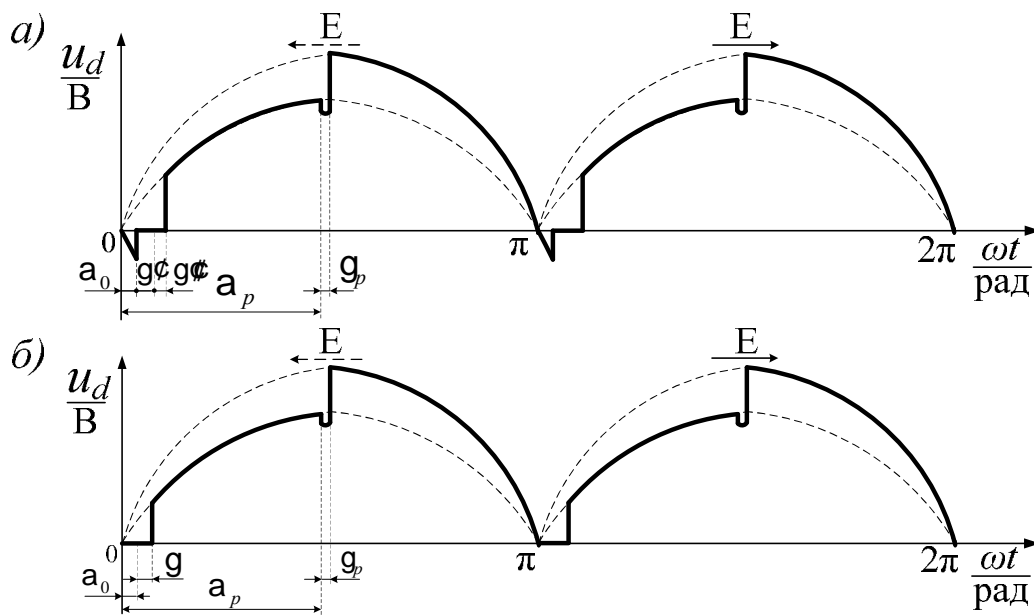


Рис. 2. Диаграммы выпрямленного напряжения выпрямителя электровоза на четвертой зоне регулирования при типовом (а) и предлагаемом с диодным плечом (б) алгоритмах управления

Выражение коэффициента мощности тягового электропривода электровоза в режиме тяги при применении нового алгоритма управления ВИП и включении диодного плеча имеет вид

$$K_M = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\frac{1}{2}((1+\varepsilon)+(1-\varepsilon)\cos\alpha_p - (2\varepsilon\mu - \varepsilon + 1)\frac{\lambda X_{Tn} I_{dn}}{U_{mn}})}{K_{\varepsilon\phi} K_{d\varepsilon\phi} \sqrt{\frac{\pi + (\varepsilon^2 - 1)\alpha_p}{\pi}}}, \quad (1)$$

где U_{mn} – амплитудное значение переменного напряжения вторичной обмотки тягового трансформатора полной n -ой зоны ВИП; I_{dn} – среднее значение выпрямленного тока на n -ой полной зоне ВИП; X_{Tn} – эквивалентное значение индуктивного сопротивления цепи переменного тока ВИП на n -ой полной зоне регулирования, приведённое к вторичной обмотке трансформатора; $K_{\varepsilon\phi}$ – коэффициент эффективности переменного тока; $K_{d\varepsilon\phi}$ – коэффициент эффективности выпрямлен-

ного тока; I – коэффициент, учитывающий влияние пульсаций выпрямленного тока; ε – коэффициент, выражающий отношение амплитудного значения переменного напряжения предыдущей ($n-1$) зоны ВИП к такому же напряжению последующей (n) зоны; μ – коэффициент, выражающий отношение приведенного эквивалентного значения индуктивного сопротивления цепи переменного тока ВИП предыдущей ($n-1$) зоны к такому же сопротивлению последующей (n) зоны.

Исследования физических процессов работы ВИП электровоза в режиме инвертора выявили, что на коэффициент мощности влияют следующие основные параметры и процессы его работы: достаточно большая величина угла запаса инвертора, вследствие чего из сети потребляется значительное количество реактивной энергии и, как следствие, уменьшается возврат в сеть активная энергия генератора, большая величина длительности коммутации тока тиристорных плеч инвертора γ .

Были исследованы физические процессы работы ВИП электровоза в режиме инвертора на первой и четвёртой зонах регулирования с новым алгоритмом его управления (табл. 1, б) и включением диодного плеча VD9 в схему ВИП (см. рис. 1, б). В результате их рассмотрения выявлено, что коэффициент мощности электровоза повышается в результате следующего: для первой зоны регулирования образуется буферный контур, при котором значительно сокращается интервал времени потребления реактивной энергии в генератор и увеличивается возврат активной электроэнергии в сеть, а также сохраняется режим значительного использования электроэнергии генератора для электрического торможения электровоза вместо режима противовключения; уменьшение реактивной энергии за счет включения параллельно инвертору диодного плеча, который последовательно соединен с добавочным токоограничивающим резистором $R_{ог}$ для ограничения скорости нарастания тока в момент включения диодного плеча в работу; на высших зонах регулирования включение диодного плеча и применение нового способа управления создает в момент времени $180 - \beta + \gamma_1$ электрическую цепь из тиристорных плеч, вступающих в работу очередного цикла, через которую выпрямленный ток инвертора замыкается не через цепь генератора, а накоротко через диодное плечо VD. Благодаря такой цепи коммутационные процессы в тиристорах инвертора происходят быстрее, чем без неё, за счет короткого замыкания обмоток трансформатора на интервале угла β . В результате, угол коммутации большого контура γ_2 уменьшается, и инвертор устойчиво входит во внекоммутационный интервал работы, что позволяет системе управления инвертором выбрать угол запаса δ меньшей величины. Благодаря уменьшению угла δ происходит уменьшение угла сдвига фаз φ и увеличение среднего значения напряжения инвертора U_d , что ведет к повышению коэффициента мощности электровоза.

Диаграммы выпрямленного напряжения ВИП в режиме инвертора при типовом (а) и предлагаемом (б) алгоритмах управления представлены на рис. 3.

Выражение коэффициента мощности тягового электропривода электровоза в режиме рекуперативного торможения при применении нового алгоритма управления ВИП и включении диодного плеча имеет вид

$$K_M = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\frac{1}{2}((1+\varepsilon) \cos \delta + (1-\varepsilon) \cos \beta_p - (2\varepsilon^2 + \varepsilon - \mu + \frac{\mu}{\varepsilon} + 1) \frac{\lambda X_T n^1 dn}{U_{mn}})}{K_{\varepsilon\phi} K_{d\varepsilon\phi} \sqrt{\frac{\varepsilon^2(\beta_p - \delta) + (\beta_p - \delta)}{\pi}}}. \quad (2)$$

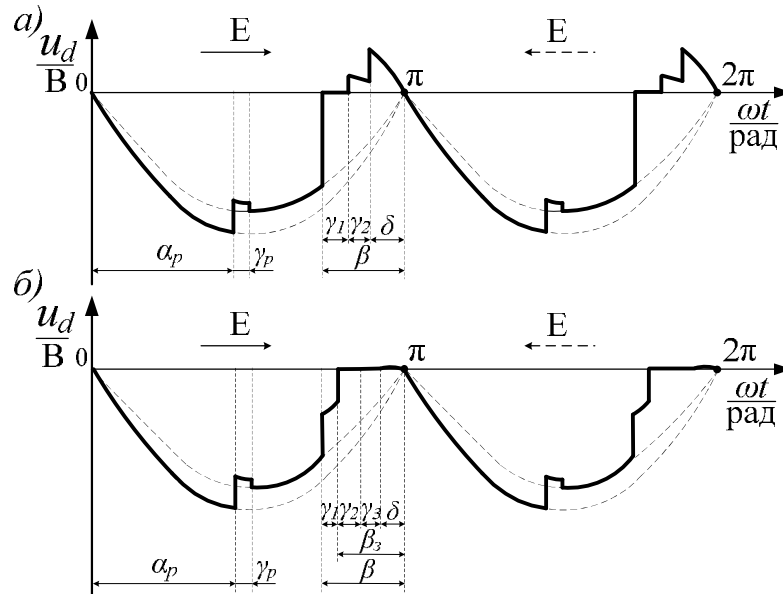


Рис. 3. Диаграммы выпрямленного напряжения инвертора электровоза на четвертой зоне регулирования при типовом (а) и предлагаемом с диодным плечом (б) алгоритмах управления

В данной главе рассмотрены результаты применения новых алгоритмов управления в режимах выпрямителя и инвертора, направленные на изменение процессов коммутации и приводящие к повышению коэффициента мощности. В то же время главную роль в снижении коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения контактной сети выполняет разнофазное управление ВИПами секции электровоза, результаты разработки которого приведены в следующей главе диссертации.

Третья глава посвящена аналитическому исследованию системы разнофазного управления ВИП и разработке новых алгоритмов управления по уменьшению коммутационных колебаний напряжения сети, возникающих при работе электровозов переменного тока с тиристорными ВИП.

Искажение синусоидальной формы напряжения сети вызвано множеством факторов, но наибольшее влияние на возникновение искажений напряжения оказывает работа электровоза. Причиной искажения формы кривой напряжения при этом являются процессы основной и фазовой коммутаций тиристорных многозонного ВИП электровоза в совокупности с особенностями контактной сети и ее распределенными электрическими параметрами.

Упрощенная схема участка контактной сети и форма кривой напряжения на токоприемнике показана на рис. 4, где U_m – амплитудное значение напряжения на тяговой подстанции; ТП1 (ТП2) – тяговая подстанция; УВ – управляющий вентиль преобразователя; a – коэффициент, учитывающий отношение сопротивлений контактной сети и силового трансформатора электровоза; L_d , L_T – приведенные индуктивность цепи выпрямленного тока и индуктивность тягового трансформатора электровоза к напряжению контактной сети соответ-

ственно; U_d – приведенное выпрямленное напряжение на тяговом электрическом двигателе к напряжению контактной сети; E – противо-э.д.с. двигателя; L_0 , C_0 , R_0 – распределенная индуктивность, емкость и активное сопротивление контактной сети соответственно; R_l – погонная поперечная проводимость, имитирующая токи утечки.

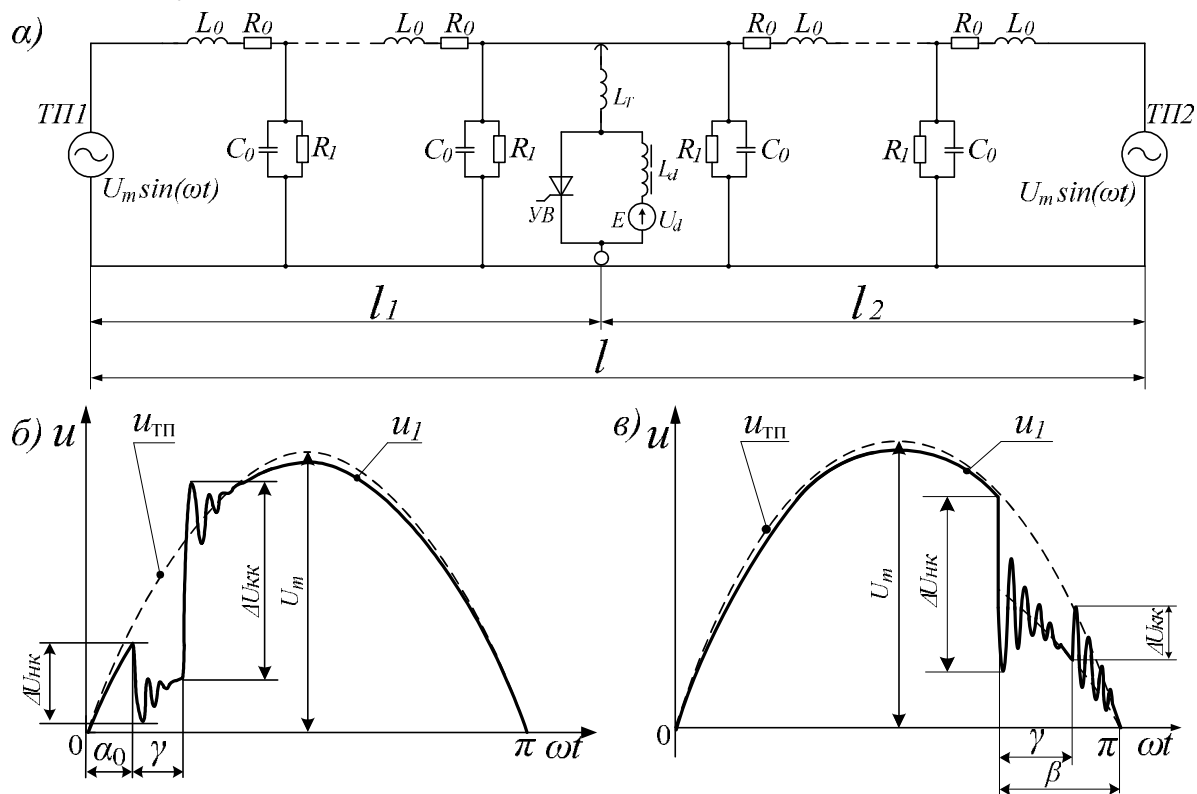


Рис. 4. Упрощенная схема питания участка контактной сети (а) и форма кривой установившегося напряжения на токоприемнике электровоза в режимах тяги (б) и рекуперативного торможения (в)

Известно, что возникновение коммутационных и послекоммутационных свободных колебаний напряжения на токоприемнике электровоза происходит в момент начала и окончания основной коммутации тиристорных плеч ВИП как в режиме выпрямления (см. рис. 4, б), так и инвертирования (см. рис. 4, в). Частота вынужденных послекоммутационных колебаний $f_{\text{ПК}}$ зависит от распределенных емкостей и индуктивностей в контактной сети, индуктивностей тяговой подстанции и трансформатора электровоза и может быть оценена по формуле

$$\begin{aligned}
 f_{\text{ПК}} &= \frac{1}{2 \times \varphi} \sqrt{\frac{1}{(C_{\text{КС}}) \times (L_{\text{ТТ}} + L_{\text{ВТ}} + L_{\text{КС}} + L')}} = \\
 &= \frac{1}{2 \times \varphi} \sqrt{\frac{1}{(C_{\text{КС}}) \times \left(\frac{X_{\text{ЛВТ}} + X_{\text{ЛТТ}} + X_{\text{ЛКС}} \times \lambda_1 + X' \right)}{2 \times \varphi \times f_{\text{С}}}}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

где $C_{\text{КС}}$ – распределенная емкость контактной сети, мкФ; $L_{\text{ТТ}}$ ($X_{\text{ЛТТ}}$) – индуктивность (реактивное сопротивление) тягового трансформатора; $L_{\text{КС}}$ ($X_{\text{ЛКС}}$) – индуктивность (реактивное сопротивление) контактной сети; $L_{\text{ВТ}}$ ($X_{\text{ЛВТ}}$) – индук-

тивность (реактивное сопротивление) цепи выпрямленного тока; $L' (X')$ – дополнительная индуктивность (реактивное сопротивление), вызванная поверхностными эффектами; f_c – частота питающего напряжения сети; l_1 – расстояние до ближайшей тяговой подстанции.

Кроме этого, при прохождении фазовой коммутации тиристорных плеч ВИП в процессе регулирования выпрямленного напряжения в зоне также возникают коммутационные и послекоммутационные свободные колебания напряжения на токоприемнике электровоза. Все эти колебания значительно искажают синусоидальную форму кривой напряжения контактной сети.

Для снижения амплитуды колебаний напряжения контактной сети в периоды основной коммутации и после нее в режимах выпрямителя и инвертора в работе применены новые алгоритмы управления тиристорных плеч ВИП совместно с включением диодного плеча в его силовую схему (параллельно цепи выпрямленного тока). Роль диодного плеча как в выпрямителе, так и в инверторе, с точки зрения уменьшения искажений кривой напряжения сети, связана со снижением коммутационных свободных колебаний, т.е. колебаний на интервале основной коммутации. За счет открытия диодного плеча происходит значительное снижение мгновенного значения напряжения сети в момент начала коммутации тиристорных плеч ВИП, что уменьшает амплитуду коммутационных колебаний. В то же время свободные колебания, вызванные фазовой коммутацией тиристорных плеч ВИП, при применении новых алгоритмов управления совместно с включением диодного плеча остаются неизменными. Чтобы демпфировать эти колебания, был предложен механизм разнофазного управления ВИП в секции электровоза. Применение разнофазного управления ВИП связано только с уменьшением искажений кривой напряжения сети от действия фазовой коммутации тиристорных плеч ВИП, которая при углах в диапазоне от 50 до 130 эл. град. вызывает значительные амплитуды коммутационных и послекоммутационных свободных колебаний.

Для более значительного эффекта повышения качества напряжения на токоприемнике электровоза предлагается дополнительно к новому способу управления основной коммутации ввести еще и разнофазное управление выпрямителями электровоза по углу α_p . Разнофазное управление заключается в задержке сигналов управления α_p фазовой коммутации различных групп выпрямителей на расчетное время, равное первому полупериоду послекоммутационных колебаний напряжения на токоприемнике электровоза с учётом изменяющихся распределённых параметров контактной сети. При этом на интервале времени от 50 до 130 эл. град. полупериода напряжения реализуется максимальное время задержки, равное полупериоду 7-ой гармоники сетевого напряжения.

На интервале времени от $\alpha_0 + \gamma$ до 50 эл. град. задержка происходит на минимальное время, равное полупериоду высокочастотной гармоники с максимальной амплитудой (например, 31-я гармоника). Причем, в моментах времени, где происходит ограничение угла α_p (в начале и конце полупериода напряжения), разнофазное управление сводится к нулю.

Разработанный способ разнофазного управления существенно отличается от других предыдущих способов разнофазного управления, разработанных во ВНИИЖТ в 80-е годы XX века. В них при организации задержки открытия одного плеча выпрямителя относительно другого возникает уменьшение среднего выпрямленного напряжения на тяговых двигателях, что значительно снижает величину коэффициента мощности электровоза. В основе разработанного в диссертации способа разнофазного управления лежит энергосберегающий алгоритм разнофазного управления выпрямителями на 1, 2, 3 и 4-й зонах, который отличается от существующих тем, что в нем среднее выпрямленное напряжение тяговых двигателей не снижается, а остается на прежнем уровне по отношению к типовому алгоритму управления выпрямителями. Достигается это тем, что время необходимого сдвига делится пополам, а именно на один выпрямитель половинная задержка подаётся со знаком минус, а на другой – со знаком плюс. В следующем периоде для выравнивания токовой нагрузки, между выпрямителями электровоза задержанные импульсы управления меняются местами.

Учитывая резонансные свойства контактной сети, имеет смысл выбирать угол разнофазного управления, связывая его с резонансной частотой контактной сети. Поэтому угол сдвига фаз $\alpha_{\text{рфу}}$ зависит от частоты послекоммутационных колебаний $f_{\text{пк}}$, а следовательно, и от изменяющихся параметров контактной сети. В результате угол $\alpha_{\text{рфу}}$ можно определить по формуле

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{рфу}} &= \frac{360}{N} \cdot f_c \cdot T_{\text{пк}} = 180 \cdot f_c \cdot \frac{1}{f_{\text{пк}}} = 180 \cdot f_c \cdot \frac{1}{\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_{\text{кк}}(L_{\text{тг}}+L_{\text{вт}}+L_{\text{кк}}+L')}}}} = \\ &= 360 \cdot \pi \cdot f_c \cdot \sqrt{C_{\text{кк}} \left(\frac{X_{\text{лвт}}+X_{\text{лтг}}+X_{\text{лкк}} \cdot l_1+X'}{2\pi f_c} \right)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $T_{\text{пк}}$ – период послекоммутационных колебаний, с.; N – количество генераторов, $N = 2$.

Для того, чтобы подавить коммутационные и послекоммутационные колебания, система разнофазного управления в целом должна обладать свойствами фильтра. Для разработки способа разнофазного управления в работе сначала было проведено аналитическое исследование системы РФУ с учетом свободных высокочастотных колебаний напряжения контактной сети, возникающих при прохождении основной и фазовой коммутации тиристорных плеч ВИП.

Для решения этой задачи была исследована функция напряжения контактной сети при типовом алгоритме управления ВИП электровоза ВЛ80Р №1829, полученная во время его опытных испытаний на участке Большой Луг – Слюдянка ВСЖД – филиала ОАО «РЖД». Для данной функции были рассчитаны значения коэффициентов ряда Фурье в косинусно-синусной форме для периодического сигнала. Расчёт производился на ЭВМ с помощью программы, написанной на языке Паскаль до 40-ой гармоники, а по гармоникам – восстановлена функция от времени.

Кривая напряжения контактной сети на токоприемнике электровоза, снятая во время опытных испытаний электровоза ВЛ80Р №1829, представлена на рис. 5, а.

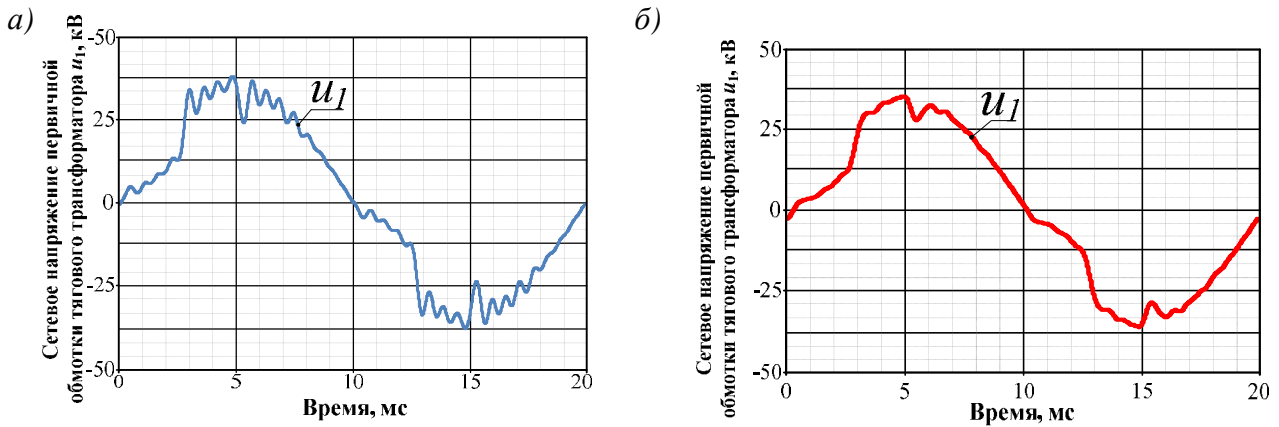


Рис. 5. Кривая напряжения контактной сети на токоприемнике электровоза ВЛ80Р №1829 (а) и результирующая функция напряжения $u(t)$ со сдвигом по фазе на время τ на частоте 31-ой гармоники (б)

Из рис. 5, а видно, что данная функция напряжения периодическая и может быть представлена в виде ряда Фурье

$$u(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{C}_k e^{-jk\omega_1 t}, \quad (5)$$

где $\omega_1 = 2\pi/T$ – круговая частота, соответствующая периоду повторения сигнала, равному T ; $k\omega_1$ – кратные частоты, называемые гармониками; \dot{C}_k – комплексные коэффициенты ряда Фурье.

Формула для расчета коэффициентов ряда Фурье в комплексной форме

$$\dot{C}_k = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) e^{-jk\omega_1 t} dt, \quad (6)$$

исходя из этого спектральная функция сигнала $\dot{U}(\omega)$ будет представлена формулой

$$\dot{U}(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} 2\pi \dot{C}_k \delta(\omega - \omega_1 k), \quad (7)$$

где δ – дельта-функция частоты.

Принцип разнофазного управления заключается в том, что коммутация в плечах ВИП происходит не одновременно, а с задержкой начала коммутации одного ВИП в секции электровоза относительно другого на время τ . Тогда спектральная функция для задержанного сигнала будет иметь вид

$$\dot{U}_{\text{зад}}(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} 2\pi \dot{C}_k \delta(\omega - \omega_1 k) e^{-j\omega\tau}. \quad (8)$$

Из формулы (8) видно, что в спектральной функции задержанного сигнала амплитудный спектр остаётся неизменным, так как модуль комплексной экспоненты $e^{-j\omega\tau}$ равен 1, а фазовый спектр приобретает дополнительное слагаемое – $\omega\tau$, линейно зависящее от частоты.

Коммутационные колебания напряжения на токоприёмнике электровоза с разнофазным управлением ВИП будут складываться из коммутационных колебаний напряжений незадержанного и задержанного ВИП. Применяя свойство

линейности преобразования Фурье, запишем спектр для суммарного сигнала

$$\dot{U}_{\text{общ}}(\omega) = \dot{U}(\omega) + \dot{U}_{\text{зад}}(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} 2\pi \dot{C}_k \delta(\omega - \omega_1 k) (1 + e^{-j\omega\tau}). \quad (9)$$

Как показывают исследования коммутационных колебаний на токоприёмнике электровоза переменного тока с зонно-фазным регулированием, для достаточной точности описания процессов можно ограничиться 40-ой гармоникой сигнала. Соответственно имеем

$$\dot{U}_{\text{общ}}(\omega) = \sum_{k=0}^{k=40} 2\pi \dot{C}_k \delta(\omega - \omega_1 k) (1 + e^{-j\omega\tau}) = \dot{U}(\omega) \cdot \dot{K}_{\text{рф}}(\omega), \quad (10)$$

где $\dot{K}_{\text{рф}}(\omega) = 1 + e^{-j\omega\tau}$ – комплексный коэффициент передачи фильтра.

Из-за наличия в функции множителя $e^{-j\omega\tau}$, ее можно рассматривать как АФЧХ фильтра $|\dot{K}_{\text{рф}}(\omega)|$, определяющего подавляющие свойства полученной системы разнофазного управления. Если требуется подавить определенную частоту (при количестве генераторов $N = 2$) необходимо варьировать τ так, чтобы незадержанный и задержанный сигналы были сдвинуты на 180 эл. град. на этой частоте.

Рассмотрим принцип получения задержанного сигнала напряжения, который будет использоваться для подавления необходимой гармоники в искаженном сигнале напряжения. Используя кривую напряжения контактной сети на токоприемнике электровоза, снятую во время его испытаний (см. рис. 5, а), применим рассмотренную методику преобразования для построения задержанного сигнала напряжения на время τ с таким же амплитудным спектром как и исходный сигнал. Вначале для исходного сигнала напряжения сети (см. рис. 5, а) рассчитываются коэффициенты ряда Фурье в косинусно-синусной форме для периодического сигнала. Затем по этим коэффициентам строится функция напряжения сети и ее амплитудный частотный спектр. Для построения задержанного сигнала напряжения определяется гармоника, которую необходимо подавить. Из анализа спектральной функции наибольшие амплитуды имеют 3, 5, 7, 13, 15, 21, 23, 29 и 31 гармоники. Расчет времени задержки τ сигналов этих гармоник выполняется по формуле

$$\tau = \frac{M}{f_i \cdot N}, \quad (11)$$

где M – множество целых чисел, f_i – частота колебаний, N – число генераторов сигналов.

В идеальном случае время задержки τ должно быть равно полупериоду частоты гармоники. Например, для 5-ой гармоники ($f = 250$ Гц) при $M = 1$ и $N = 2$, $T = 0,004$ с, а $T/2 = 0,002$ с.

Амплитудный спектр задержанного сигнала напряжения на время τ остается таким же, как и исходный сигнал. Далее складываем исходный и задержанный сигналы и получаем результирующий сигнал $u(t)$ на токоприемнике электровоза. Для примера, на рис. 5, б представлен результирующий сигнал $u(t)$ со сдвигом по фазе на время τ для 31-ой гармоники.

Таким образом, данная методика преобразования исходного сигнала, задержанного на время τ для определенной частоты гармоники, положена в основу энергосберегающего алгоритма разнофазного управления ВИП электровоза для режимов тяги и рекуперативного торможения.

Суть этого алгоритма заключается в задержке сигналов управления с фазой α_p различных групп ВИП на расчетное время, равное полупериоду послекоммутационных колебаний напряжения на токоприемнике электровоза с учетом изменяющихся параметров контактной сети. При этом для режима тяги на интервале времени от 50 до 130 эл. град. полупериода напряжения сети реализуют максимальное время задержки импульсов, равное длительности полупериода низкочастотной 7-ой гармоники, а на интервалах времени от $\alpha_0 + \gamma$ до 50 эл. град. вначале и от 130 до 160 эл. град. в конце полупериода реализуют задержку импульсов управления α_p на минимальное время, равное полупериоду одной из наибольших высокочастотных гармоник, рис. 8, а. Причем в моментах времени $(\alpha_0 + \gamma)$ и 160 эл. град. на краях регулирования задержку времени сводят к нулю. Для того, чтобы среднее выпрямленное напряжение на тяговых двигателях при разнофазном управлении оставалось на прежнем уровне и не снижалось по отношению к типовому алгоритму управления, в энергосберегающем алгоритме предусмотрено задержку величины времени делить пополам, т.е. уменьшать в два раза. Причем в данном ВИП половинная задержка времени подачи импульсов выполняется со знаком минус, а во втором ВИП – со знаком плюс. В следующем периоде напряжения сети, для выравнивания токовой нагрузки между ВИП секции электровоза, задержанные импульсы меняются местами. Такой принцип заложен в разработку новых энергосберегающих алгоритмов разнофазного управления для режима тяги и рекуперативного торможения. На рис. 6 и 7 изображены диаграммы выпрямленных напряжений ВИП секции электровоза, поясняющие принцип работы разнофазного управления в режимах тяги и рекуперативного торможения.

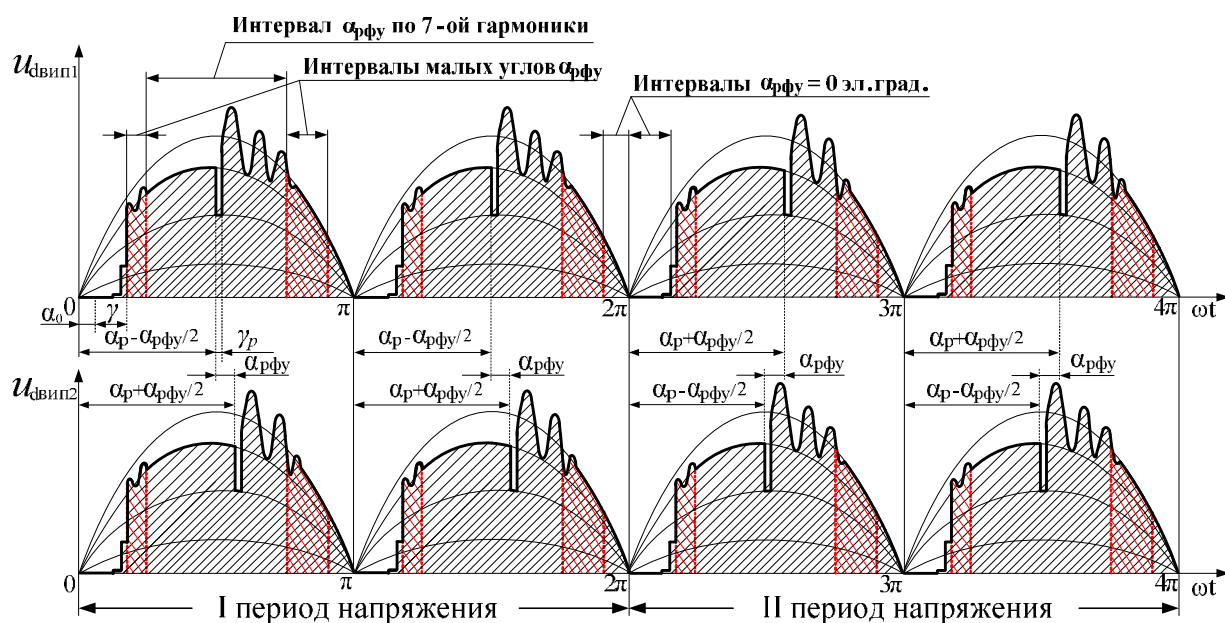


Рис. 6. Диаграммы выпрямленных напряжений ВИП секции электровоза при разнофазном управлении в режиме тяги

Для реализации способа разнофазного управления ВИП на электровозе было разработано программное обеспечение (подпрограмма) в рамках основной программы, управляющей работой всех ВИП электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения. В этой подпрограмме реализуется алгоритм формирования фазы $\alpha_{рфу}$ импульсов управления для открытия тиристоров ВИП, участвующих в регулировании выпрямленного напряжения в пределах каждой зоны ВИП. На рис. 8, б для режима рекуперативного торможения представлен принцип формирования $\alpha_{рфу}$ на интервале полупериода напряжения сети с учетом среднего (50-130 эл. град.) диапазона регулирования по низкочастотной 7-ой гармонике и крайних (20-50 эл. град. и 130- β эл. град.) диапазонов регулирования по высокочастотным (27-35) гармоникам в начале и конце полупериода напряжения.

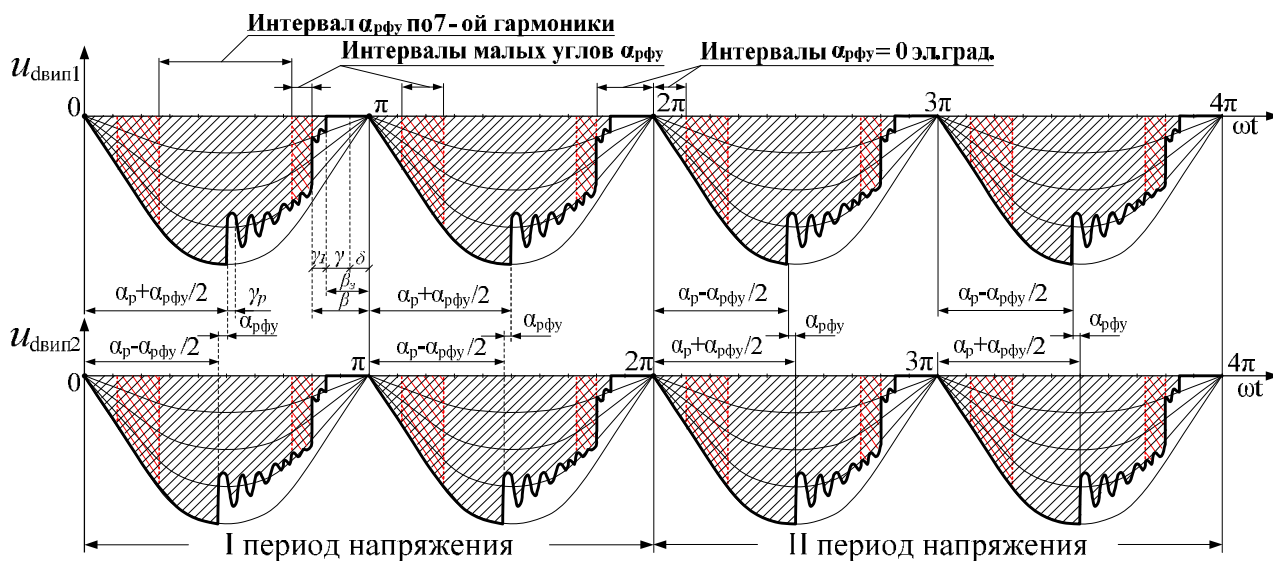


Рис. 7. Диаграммы выпрямленных напряжений ВИП секции электровоза при разнофазном управлении в режиме рекуперативного торможения

Благодаря реализации такого принципа формирования $\alpha_{рфу}$ гашение свободных колебаний напряжения на токоприемнике электровоза происходит дифференцированно, исходя из изменения величины фазы $\alpha_{р}$ регулируемых импульсов управления на интервале полупериода напряжения сети и изменения величин распределенных параметров контактной сети при движении электровоза с поездом на фидерной зоне участка тягового электроснабжения.

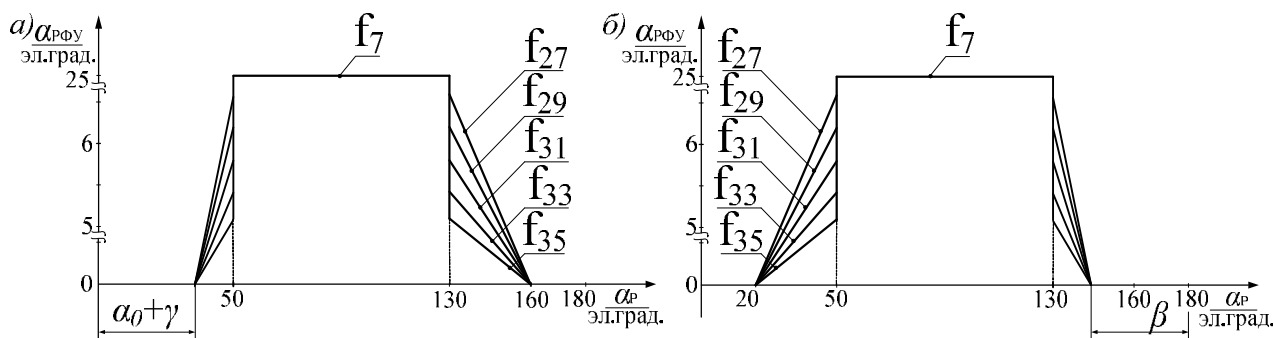


Рис. 8. Принцип формирования $\alpha_{рфу}$ в ВИП с его разнофазным управлением в режимах тяги (а) и рекуперативного торможения (б) электровоза

В результате искажение формы кривой напряжения контактной сети значительно уменьшается (до 50 %), что приводит к повышению качества электроэнергии в контактной сети.

В четвертой главе на основе предложенных положений концепции комплексного подхода при проведении исследований по повышению энергетической эффективности и работоспособности тяговых электроприводов электровоза определены и обоснованы принципы построения обобщенной математической модели системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз», с помощью которой проведено математическое моделирование электромагнитных процессов работы тяговых электроприводов электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения.

Единство принципов построения обобщенной модели обусловлено общностью целей, достигаемых осуществлением этих положений концепции:

- обеспечение универсальности математического моделирования в рамках каждой части обобщенной модели;

- применение для моделирования основных математических моделей системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз», которые достаточно полно и достоверно описывают в них реальные процессы в режимах тяги и рекуперативного торможения электровоза.

Обобщенная математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» включает в себя следующие подсистемы: тяговая подстанция, контактная сеть и электровоз. В свою очередь математическая модель электровоза как объект математического моделирования представляет сложную комплексную часть «силовая электрическая схема электровоза и его система управления», состоящую из нескольких подчастей, осуществляющих взаимодействие между собой: тяговый трансформатор, выпрямительно-инверторный преобразователь в режимах выпрямителя и инвертора и его система управления, цепь выпрямленного тока (сглаживающий реактор и тяговый двигатель) в режимах тяги и рекуперативного торможения, выпрямительная установка возбуждения (ВУВ) в режиме рекуперативного торможения, блок управления ВИП, включающий в себя два блока: блок формирования сигналов и разнофазного управления и блок распределительного устройства.

Для всех электрических цепей устройств, реализованных в математических моделях, составляются схемы замещения согласно законам электротехники. Далее для этих схем записываются уравнения в дифференциальной форме, которые описывают протекание электромагнитных процессов. Для получения результатов моделирования в диссертации используется пакет схемотехнического моделирования MatLab.

Для сравнения результатов моделирования электромагнитных процессов, протекающих в ВИП, с типовым и предлагаемым алгоритмами управления, а также при применении разнофазного управления ВИП в главе представлен выбор критериев сравнения, в качестве которых выбраны коэффициенты мощности (оценка энергоэффективности) и искажения синусоидальной формы кривой напряжения контактной сети (оценка качества электроэнергии).

Пятая глава содержит результаты математического моделирования электромагнитных процессов работы ВИП электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения с типовым и предлагаемым алгоритмами управления с применением диодного плеча в силовой схеме ВИП, в том числе и с применением разнофазного управления.

Результаты моделирования оформлены в виде диаграмм электромагнитных процессов и рассчитанных энергетических показателей, представленных в табличной форме. Далее результаты моделирования сравниваются. В основе этого сравнения лежит следующий подход: рассмотрение процессов работы ВИП выполнено при типовом алгоритме управления ВИП существующего электровоза ВЛ80Р в режимах тяги и рекуперативного торможения и работы ВИП с новым алгоритмом с включением диодного плеча в его силовую схему и применением разнофазного управления. Важным элементом сравнения является то, что все сравнения выполнены при работе ВИП на середине первой (0,5) зоны и четвертой (3,5) зоны при токовой нагрузке тяговых электроприводов в номинальном режиме электровоза. Сравнение выполнено с использованием выбранных критериев сравнения.

Вначале приводим результаты моделирования и их сравнение по диаграммам электромагнитных процессов в электровозе для всех исследований, проведенных во 2-ой и 3-ей главах диссертации.

В качестве примера на рис. 9 приведены диаграммы электромагнитных процессов на 3,5 зоне при работе электровоза в режиме тяги с типовым и предлагаемым алгоритмами управления с применением диодного плеча и разнофазного управления по 7-ой гармонике, а на рис. 10 для режима рекуперативного торможения электровоза.

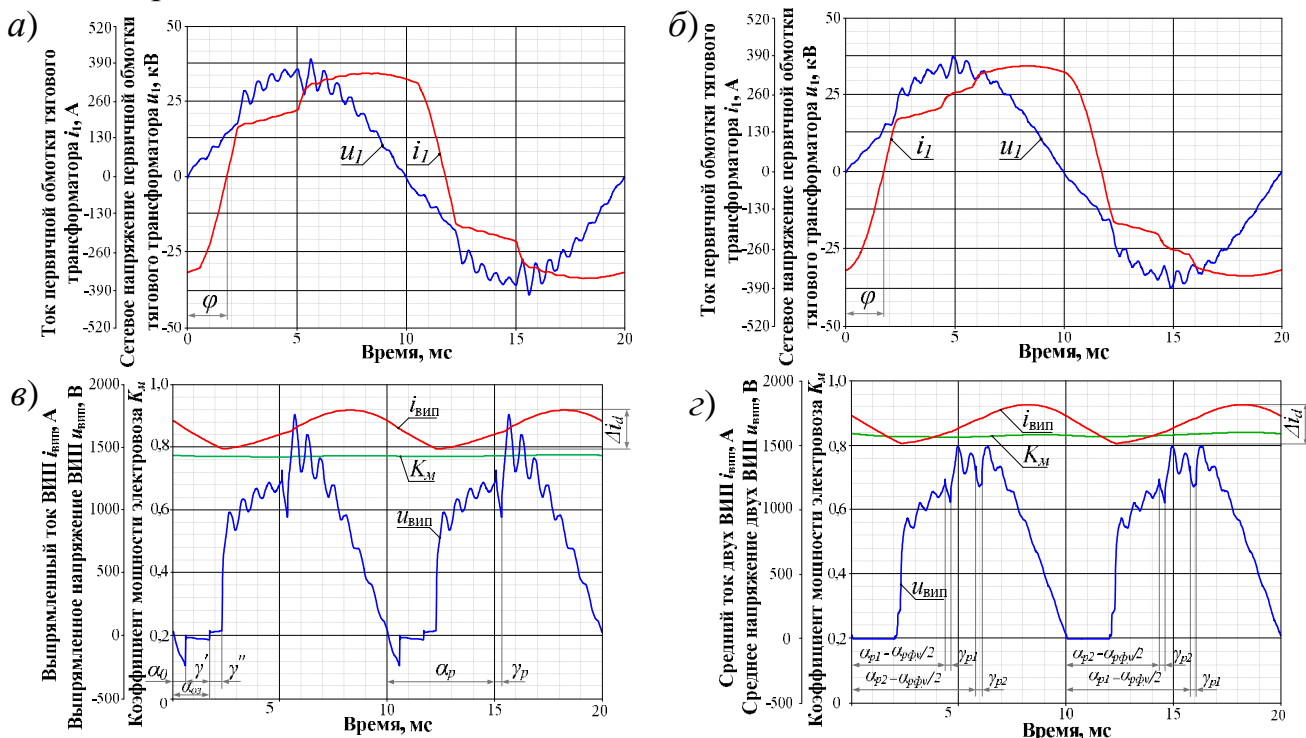


Рис. 9. Диаграммы электромагнитных процессов на 3,5 зоне регулирования напряжения при работе электровоза с типовым (а, в) и предлагаемым разнофазным (б, з) алгоритмами управления в режиме тяги (сдвиг α_p по 7 гармонике)

В табл. 3 представлены количественные результаты сравнения по коэффициентам мощности и искажения синусоидальности кривой напряжения контактной сети для случаев, изображенных на рис. 9 и 10.

Сравнение электромагнитных процессов и количественных энергетических показателей показывает, что разработка новых алгоритмов управления ВИП и с помощью системы РФУ значительно увеличило энергетическую эффективность электровоза.

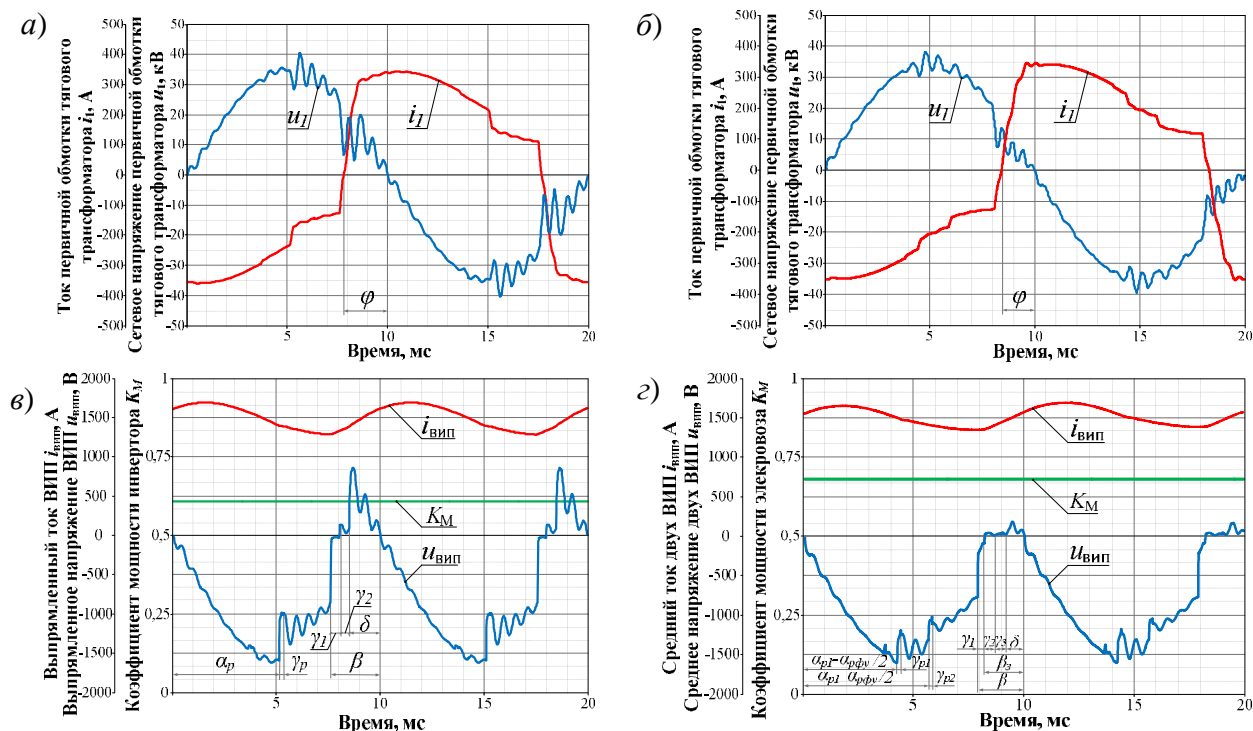


Рис. 10. Диаграммы электромагнитных процессов на 3,5 зоне регулирования напряжения при работе электровоза с типовым (а, в) и предлагаемым разнофазным (б, г) алгоритмами управления в режиме рекуперативного торможения (сдвиг α_p по 7 гармонике)

Табл. 3. Средние значения коэффициентов мощности и коэффициентов искажения синусоидальности напряжения сети с типовым и предлагаемыми способами управления ВИП на 3,5 зоне регулирования и их процентное соотношение

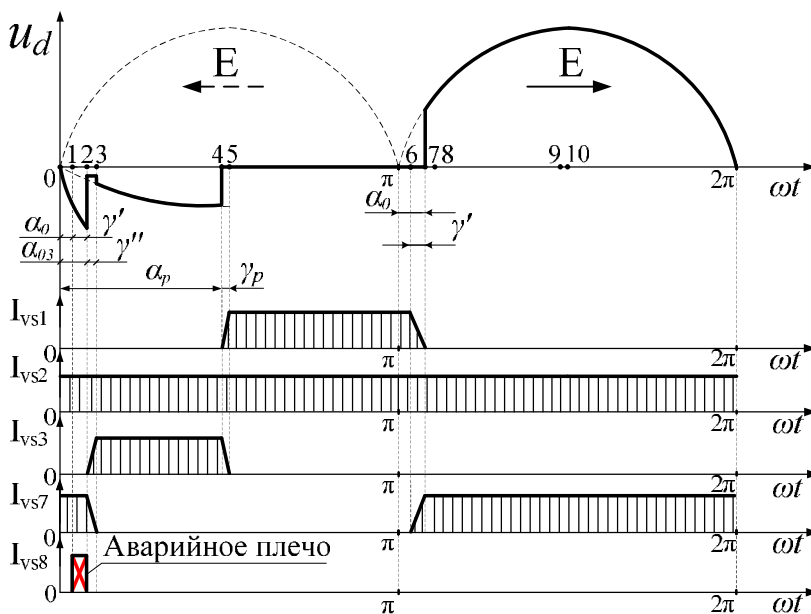
Алгоритмы управления ВИП	3,5 зоны регулирования напряжения выпрямителя				3,5 зоны регулирования напряжения инвертора			
	K_U	%	K_M	%	K_U	%	K_M	%
Типовой	10,08	100	0,775	100	12,98	100	0,608	100
Предлагаемый с диодным плечом и РФУ (сдвиг α_p по 7 гармонике)	4,9	48,6	0,83	106,5	8,36	64,41	0,734	120,7

Рассмотренные результаты математического моделирования процессов работы ВИП электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения с различными алгоритмами управления и системой РФУ относятся к нормальным режимам работы электровоза. Однако в эксплуатации электровозы могут иметь и аварийные режимы работы, вызванные отказом того или иного вида оборудования и его управления. Работоспособность электровоза в случае возникновения аварийного режима может быть обеспечена, если будут разработаны такие соответ-

ствующие способы и средства управления аварийным объектом, при которых этот объект сохраняет частичную или полную работоспособность. Одним из таких основных объектов электровоза является ВИП, от работоспособности которого зависит работа в целом всего электровоза. Исследованию аварийных процессов работы ВИП электровоза посвящена следующая глава диссертации.

В шестой главе рассмотрены аварийные процессы работы ВИП электровоза переменного тока в режиме тяги. Эти процессы могут быть вызваны отказами в работе системы управления ВИП, проявившие себя в виде пропусков подачи импульсов управления на те или иные тиристорные плечи ВИП. Для сравнения в данной главе проведены исследования аварийных процессов работы ВИП с типовым и предлагаемым алгоритмами управления совместно с включением диодного плеча в силовую схему ВИП. Исследование аварийных процессов проведено на базе анализа мгновенных схем замещения процессов работы ВИП электровоза с типовым и предлагаемым алгоритмами управления и с диодным разрядным плечом в случае пропуска импульсов управления на тиристоры плеч выпрямителя.

В диссертации проведено исследование аварийных процессов работы ВИП при типовом и предлагаемом алгоритмах управления совместно с диодным плечом при пропуске импульсов управления на тиристорные плечи, работающие как на 1-ой зоне, так и на всех других (2, 3 и 4) зонах регулирования. Наиболее опасным для оборудования электровоза является аварийный процесс в ВИП при пропуске на 4-ой зоне импульсов управления на любое плечо этой зоны. В качестве примера на рис. 11 изображены временные диаграммы выпрямленного напряжения и токов плеч ВИП, иллюстрирующие аварийные процессы на 4-ой зоне регулирования при пропуске импульсов управления с фазой α_0 , подаваемых на плечо VS8 при типовом алгоритме управления ВИП. На диаграмме выпрямленного напряжения данного рисунка показаны интервалы времени 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5- π -6, 6-7, 7-8-9-10- 2π , на которых происходит изменение процесса выпрямления переменного напряжения секции вторичной обмотки трансформатора, а на диаграммах



тока – процесс изменения и перераспределения тока в плечах ВИП на 4-ой зоне регулирования.

Рис. 11. Диаграммы выпрямленного напряжения и токов плеч ВИП с типовым алгоритмом управления на 4-й зоне регулирования при пропуске импульса управления с фазой α_0 на плечо VS8

На рис. 12 представлены мгновенные схемы замещения работы ВИП при отказе работы плеча VS8 вследствие пропуска импульса управления, соответствующие ин-

тервалам времени $a - 3$, которые объясняют возникновение и развитие аварийного процесса в плечах ВИП и в цепи тяговых двигателей электровоза.

Для проведения исследования аварийных процессов ВИП при типовом и новом алгоритмах управления с включением диодного плеча было проведено их математическое моделирование, а в опытных поездках электровоза на участке Большой Луг – Андриановская Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» – экспериментальные исследования, по которым можно сделать сравнение и оценить сходимость процессов моделирования и реальных процессов на электровозе.

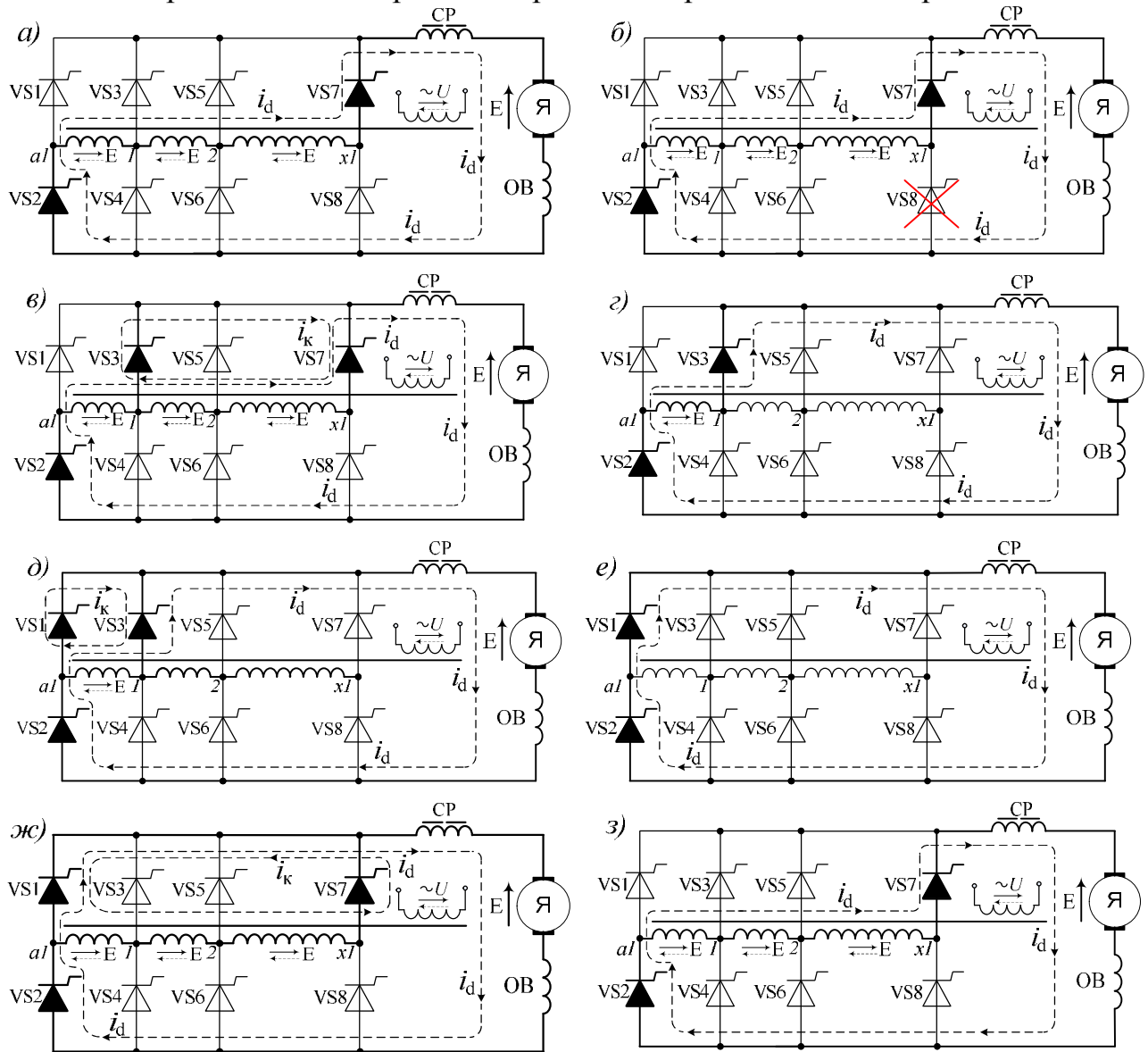


Рис. 12. Мгновенные схемы замещения ВИП на 4-й зоне регулирования, соответствующие интервалам времени: 0–1 (а); 1–2 (б); 2–3 (в); 3–4 (г), 4–5 (д); 5–π–6 (е); 6–7 (ж); 7–8–9–10–2π (з) при пропуске импульса управления с фазой α_0 на плечо VS8

На рис. 13 показаны результаты математического моделирования аварийных процессов на 4-ой зоне при пропуске в одном из полупериодов импульсов управления α_0 на плечо VS8. На диаграммах этого рисунка показаны кривые выпрямленного тока и напряжения двигателя и кривые токов плеч ВИП.

Анализ результатов математического моделирования показывает, что при аварийном плече VS8 в течение половины первого полупериода происходит рост

реактивной энергии, что резко снижает энергетические показатели электровоза. Выпрямленный ток двигателя падает с 1050 А приблизительно до 150 А, а затем возрастает до 1100 А, образуя при этом значительные броски тока.

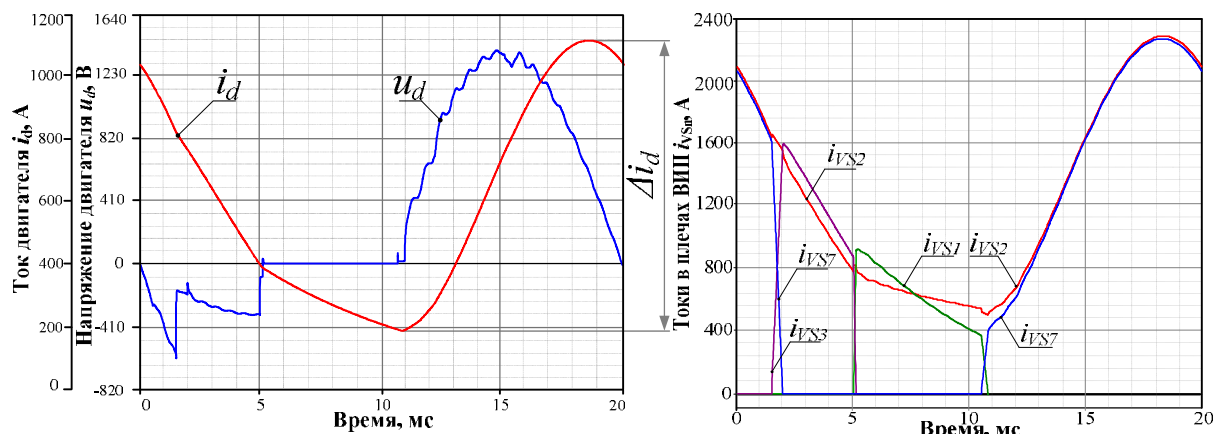


Рис. 13. Диаграммы электромагнитных процессов ВИП с типовым алгоритмом управления на 4-й зоне регулирования при пропуске импульса управления с фазой α_0 на плечо VS8

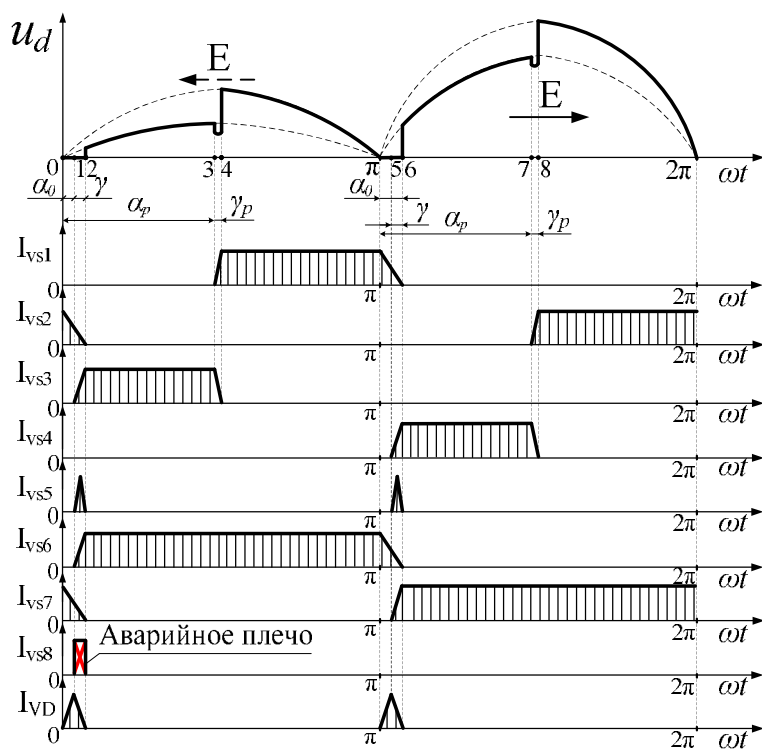


Рис. 14. Диаграмма выпрямленного напряжения и токов плеч ВИП с предлагаемым алгоритмом управления и диодным плечом VD на 4-й зоне регулирования при пропуске импульса управления с фазой α_0 на плечо VS8

включении диодного плеча в его силовую схему. На диаграмме выпрямленного напряжения данного рисунка показаны интервалы времени, подобные как на рис. 11 при типовом алгоритме. Эти интервалы показывают процессы изменения напряжения и токов плеч ВИП, а также тока в диодном плече VD.

На рис. 15 представлены мгновенные схемы замещения работы ВИП при отказе работы плеча VS8 вследствие пропуска в одном из двух полупериодов импульсов управления, соответствующие интервалам времени $a - k$, которые

Второй полупериод напряжения является нерегулируемым, к тяговому двигателю всегда прикладывается полное напряжение 4-ой зоны. К тому же плечо VS2 в течение всего периода находится в проводящем ток состоянии, что увеличивает токовую перегрузку плеча по времени и таким образом перегружает его.

На рис. 14 изображены временные диаграммы выпрямленного напряжения и токов плеч ВИП, иллюстрирующие аварийные процессы на 4-ой зоне регулирования при пропуске импульсов управления с фазой α_0 , подаваемых на плечо VS8 при предлагаемом алгоритме управления ВИП и

объясняют аварийные процессы, протекающие в плечах ВИП и в цепи тяговых двигателей электровоза.

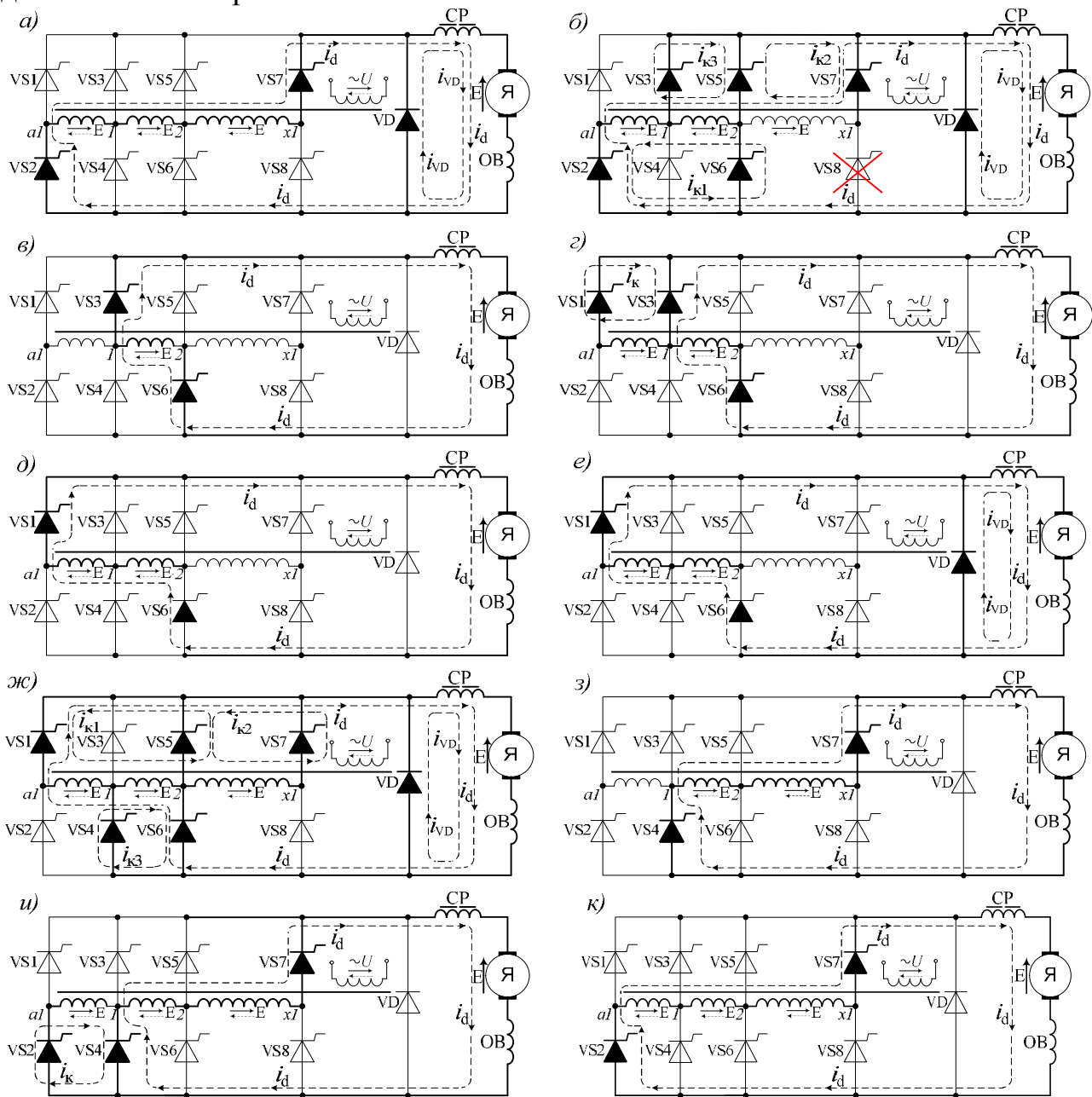


Рис. 15. Мгновенные схемы замещения ВИП на 4-й зоне регулирования с предлагаемым алгоритмом управления и диодным плечом VD, соответствующие интервалам времени: 0–1 (а); 1–2(б); 2–3 (в); 3–4 (г) 4–π (д); π–5 (е); 5–6 (ж); 6–7 (з) 7–8 (и); 8–2π (к) при пропуске импульса управления с фазой α_0 на плечо VS8

На рис. 16 показаны результаты математического моделирования аварийных процессов на 4-ой зоне при пропуске импульсов управления α_0 на плечо VS8 при предлагаемом алгоритме и включении диодного плеча в силовую схему ВИП. На диаграммах этого рисунка показаны кривые выпрямленного тока и напряжения двигателя и кривые токов плеч ВИП.

Анализ результатов математического моделирования показывает, что предлагаемый способ управления ВИП и включение диодного плеча при аварийном плече VS8 вследствие пропуска на него импульса управления осуществляют резервирование плеча VS8 за счет одновременного открытия других

параллельных плеч ВИП согласно алгоритму управления.

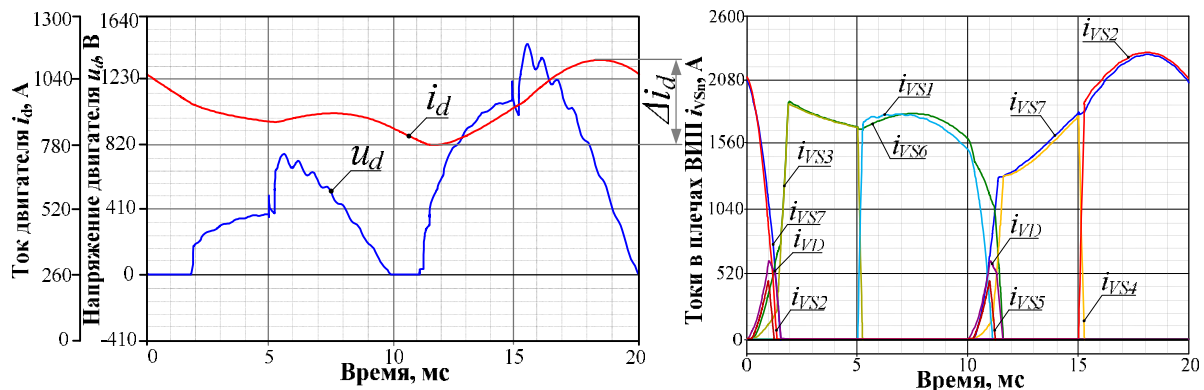


Рис. 16. Диаграммы электромагнитных процессов ВИП с предлагаемым алгоритмом управления и диодным плечом VD на 4-й зоне регулирования при пропуске импульса управления с фазой α_0 на плечо VS8

При этом среднее значение выпрямленного напряжения и тока двигателей электровоза незначительно уменьшаются (на 10 %) и остаются всегда регулируемыми и зависят от положения рукоятки управления. В этом случае броски тока двигателей отсутствуют, и машинист может вести поезд дальше, не опасаясь аварийного режима.

Седьмая глава посвящена разработке схемного решения четырехзонного ВИП на основе IGBT-транзисторов с частотой организации коммутации транзисторных плеч, соответствующей частоте напряжения контактной сети, а также алгоритма управления транзисторами такого ВИП. Этот преобразователь позволяет повысить коэффициент мощности тяговых электроприводов электровоза до уровня 0,96. Принципиальная схема электровоза с ВИП на IGBT-транзисторах представлена на рис. 17.

Табл. 4. Предлагаемые алгоритмы управления плечами ВИП на IGBT-транзисторах в режимах выпрямителя (а) и инвертора (б)

Зона	Полу-период	Плечи ВИП								
		VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6	VT7	VT8	VT9
1	→	—	—	—	α_{reg}	α_{reg}	—	—	—	α_D
	←	—	—	α_{reg}	—	—	α_{reg}	—	—	α_D
2	→	—	α_{reg}	—	α_w	α_w	—	—	—	α_D
	←	α_{reg}	—	α_w	—	—	α_w	—	—	α_D
3	→	—	—	—	α_{reg}	—	α_w	α_w	—	α_D
	←	—	—	α_{reg}	—	α_w	—	—	α_w	α_D
4	→	—	α_{reg}	—	α_w	—	—	α_w	—	α_D
	←	α_{reg}	—	α_w	—	—	—	α_w	—	α_D

Зона	Полу-период	Плечи ВИП								
		VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6	VT7	VT8	VT9
4	→	β_{reg}	—	β'_w	—	—	—	—	β_w	β_D
	←	—	β_{reg}	—	β'_w	—	—	β_w	—	β_D
3	→	—	—	β_{reg}	—	β'_w	—	—	β_w	β_D
	←	—	—	—	β_{reg}	—	β'_w	β_w	—	β_D
2	→	β_{reg}	—	β'_w	—	—	β_w	—	—	β_D
	←	—	β_{reg}	—	β'_w	β_w	—	—	—	β_D
1	→	—	—	β_{reg}	—	—	β_{reg}	—	—	β_D
	←	—	—	—	β_{reg}	β_{reg}	—	—	—	β_D

В табл. 4 введены следующие обозначения:

α_w – рабочая зона открытия IGBT-транзисторов выпрямителя;

α_{reg} – зона регулирования открытия IGBT-транзисторов выпрямителя;

β_w – рабочая зона открытия IGBT-транзисторов инвертора;

β_{reg} – зона регулирования IGBT-транзисторов инвертора по большому контуру;

β'_w – зона регулирования IGBT-транзисторов инвертора по малому контуру;

α_D, β_D – зона работы дополнительного диодного плеча ВИП.

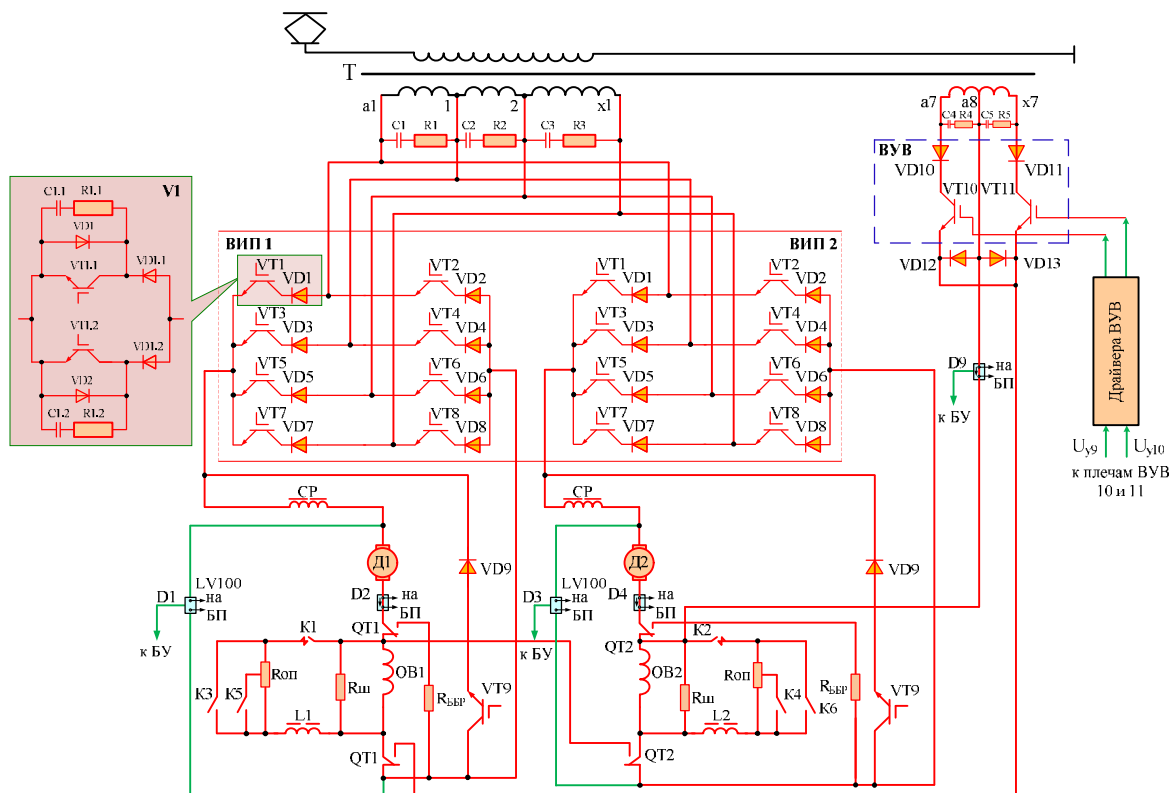


Рис. 17. Принципиальная схема электровоза с ВИП на IGBT-транзисторах

В этой схеме также используется восемь транзисторных плеч и диодное плечо, включенное параллельно цепи выпрямленного тока, которые осуществляют четыре зоны регулирования напряжения на тяговых двигателях электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения. Предлагаемые алгоритмы управления ВИП на IGBT-транзисторах в режимах выпрямителя и инвертора приведены в табл. 4.

Идея предлагаемого принципа управления такого преобразователя заключается в том, что при использовании IGBT-транзисторов имеется возможность управления включением и выключением плеча в необходимый момент времени. Время включения и выключения плеч выбирается таким образом, чтобы частично скомпенсировать индуктивный характер нагрузки ВИП.

Рассматриваемый алгоритм предусматривает коммутацию тех же плеч в тех же зонах, что и типовой преобразователь. Принципы формирования зон приведены на рис. 18, а для режима тяги и на рис. 18, б для режима рекуперации.

Регулирование начинается с первой зоны, на которой выпрямленное напряжение, подведённое к тяговым двигателям, определяется напряжением обмотки 1-2 трансформатора, поданным в интервал времени α_{reg} . В первой зоне в положительный полупериод напряжения сети открываются плечи 4 и 5, в отрицательный – 3 и 6. На все эти плечи подается сигнал управления α_{reg} . В промежутках времени, когда плечи ВИП закрыты, ток в двигателе поддерживается за счет разряда накопленной электромагнитной энергии через диодное плечо VD9, шунтирующее цепь постоянного тока на всех зонах регулирования. На высших зонах регулирования напряжение будет также подаваться в ранней части полупериода (см. рис. 18, а), чтобы компенсировать индуктивный характер нагрузки, что обуславливает больший коэффициент мощности по сравнению с типовой схемой.

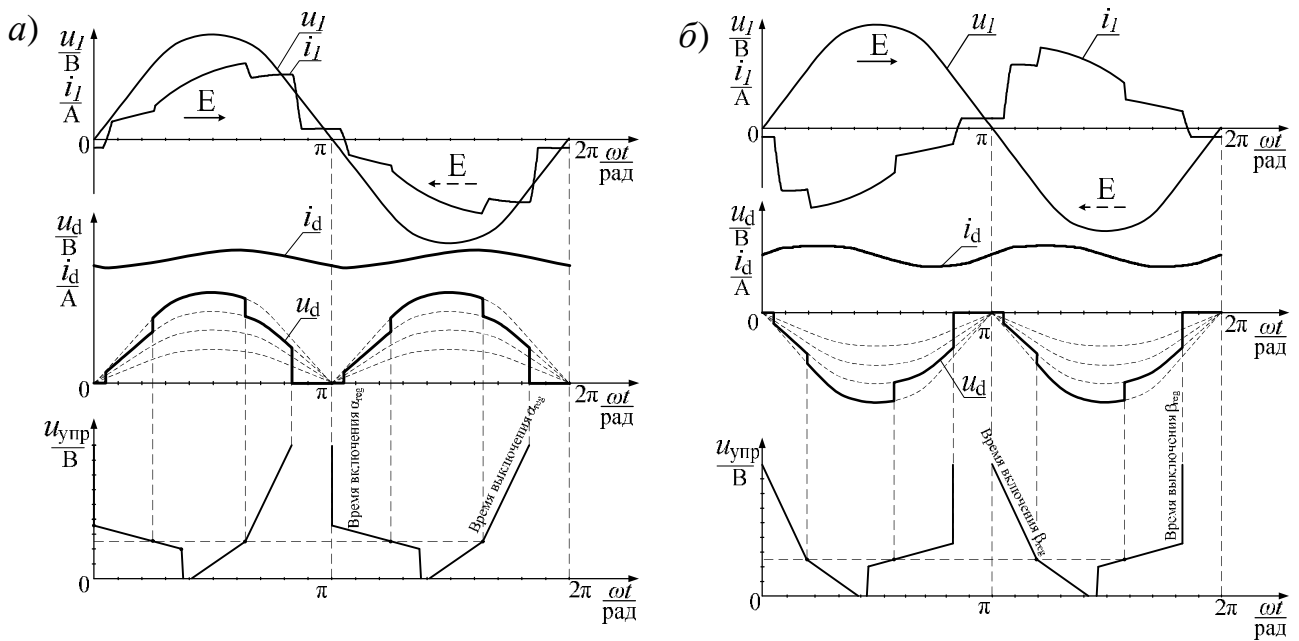


Рис. 18. Временные диаграммы для 4-й зоны предлагаемого ВИП на основе IGBT-транзисторов в режимах выпрямителя (а) и инвертора (б)

На рис. 18, б приведены временные диаграммы работы предлагаемого ВИП в режиме инвертора для 4-й зоны регулирования. Приращение напряжения высшей зоны инвертора происходит при максимальных значениях напряжения сети, а это в свою очередь увеличивает рекуперлируемый ток в активной его части. За счет этого значительно уменьшается угол сдвига фаз между током и напряжением первичной обмотки тягового трансформатора, следовательно, повышается коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения.

Электромагнитная совместимость предлагаемого ВИП на основе IGBT-транзисторов с другой аппаратурой, работающей на железнодорожном транспорте, не изменится, так как предлагаемый ВИП, как и типовой, синхронизирован с частотой сети 50 Гц.

Электромагнитные процессы при работе ВИП на основе IGBT-транзисторов на примере 3,5 зоны регулирования, полученные на математической модели в среде MatLab, представлены на рис. 19.

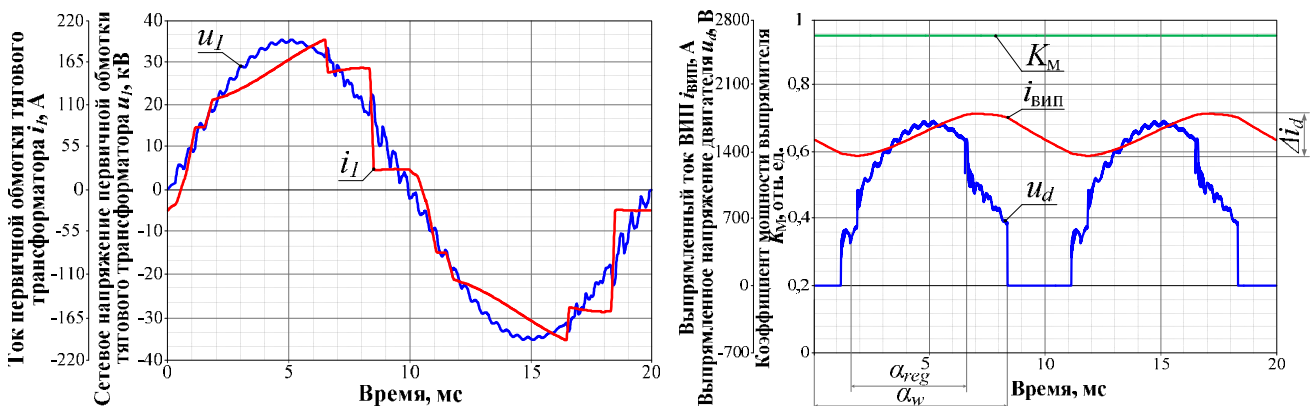


Рис. 19. Диаграммы электромагнитных процессов на 3,5 зоне регулирования напряжения при работе электровоза с ВИП на основе IGBT-транзисторов, полученные на математической модели

В восьмой главе содержатся технические решения реализации разработанных способов и дана технико-экономическая оценка внедрения этих способов.

Приведены разработанные схемы электрической принципиальной системы разнофазного управления преобразователями электровоза, схемы электрического монтажа диодного плеча и РФУ на электровоз серии ВЛ80Р №1829, описаны схемы измерения параметров, для которых использовался счетчик активной и реактивной электрической энергии СЭТ-1М, измеритель параметров сети Ресурс-UF2, а также оборудование вагона-лаборатории № 088-72095 Красноярской дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД».

Предлагаемыми решениями (новым разнофазным алгоритмом управления ВИП с включением в его силовую схему диодного плеча) оборудован электровоз ВЛ80Р № 1829, на котором проведены эксплуатационные испытания на участке Иркутск-Сортировочный – Большой Луг – Андриановская на Восточно-Сибирской железной дороге – филиале ОАО «РЖД» при его работе с типовым и предлагаемым алгоритмами с разнофазным управлением ВИП и включением диодного плеча. Во время эксплуатационных испытаний электровоза ВЛ80Р №1829 получена зависимость коэффициентов мощности от активной мощности секции электровоза в режиме тяги, представленная на рис. 20, а.

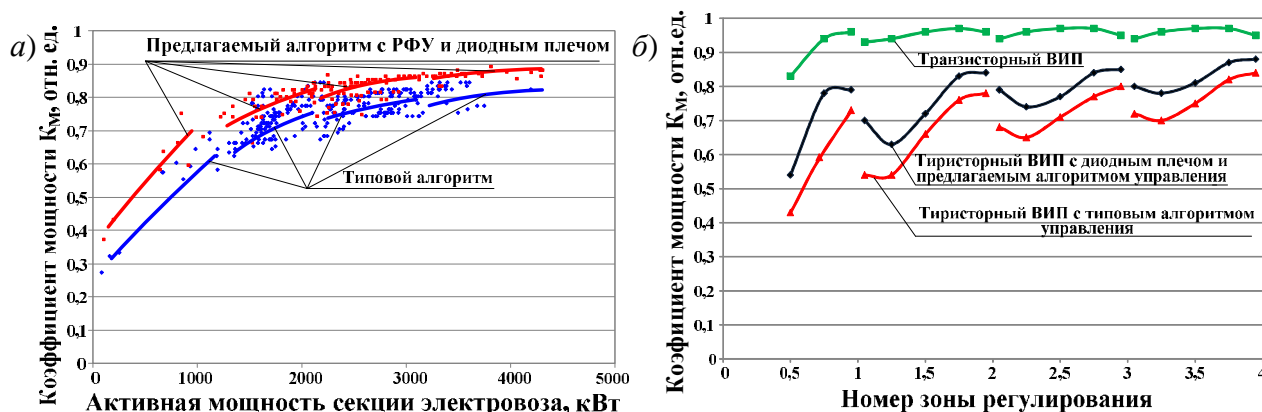


Рис. 20. Зависимость коэффициентов мощности электровоза ВЛ80Р №1829 в режиме тяги, полученные в ходе эксплуатационных испытаний (а) и на лабораторном стенде (б)

Для исследования разработанных принципов, структуры и схемного решения ВИП на основе IGBT-транзисторов с новыми его алгоритмами управления разработаны лабораторные стенды имитации работы ВИП электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения, на которых получены зависимости коэффициентов мощности электровоза при типовом и предлагаемых алгоритмах управления ВИП, а также при работе ВИП на основе IGBT-транзисторов, представленные на рис. 20, б.

По результатам проведенных испытаний на лабораторном стенде электропривода электровоза в режиме рекуперативного торможения коэффициент мощности увеличился в среднем на 36 % относительно типового ВИП.

Кроме нормального режима работы, на электровозе были исследованы аварийные процессы при снятии импульсов управления плеч ВИП, которые на примере четвертой зоны показаны на рис. 21.

Эксплуатационные испытания модернизированного электровоза ВЛ80Р

№ 1829 подтвердили повышение энергетических показателей электровоза, доказали сохранение его работоспособности в допустимых условиях по пульсации выпрямленного тока при возникновении аварийных режимов, связанных с пропуском импульсов управления ВИП.

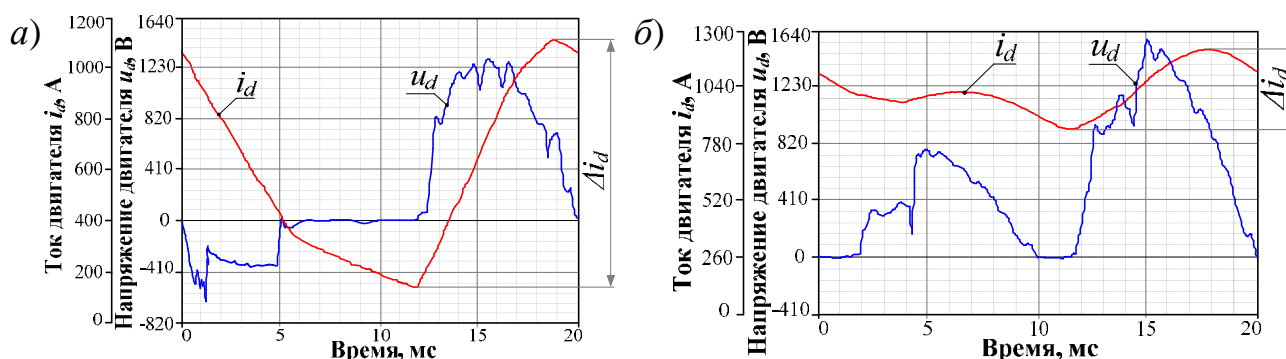


Рис. 21. Экспериментальные диаграммы электромагнитных процессов ВИП с типовым (а) и предлагаемым алгоритмами управления и диодным плечом VD (б) на 4-й зоне регулирования при пропуске импульса управления на плечо VS8

В ходе сравнительного анализа электромагнитных процессов при математическом моделировании и эксплуатационных испытаниях электровоза получено, что разница между расчетными и экспериментальными данными не превышает уровня допустимой погрешности в 10 %.

В главе произведен расчет технико-экономического обоснования. Годовой экономический эффект от внедрения предлагаемого алгоритма управления ВИП с диодным плечом и РФУ на один электровоз серии ВЛ80Р составит 3 283 тыс. руб., сумма капитальных вложений – 770 тыс. руб., а срок окупаемости – около 4 месяцев.

Годовой экономический эффект от внедрения нового ВИП на основе IGBT-транзисторов на один электровоз серии ВЛ80Р составит 3 594 тыс. руб., сумма капитальных вложений – 12 530 тыс. руб., а срок окупаемости – 3,5 года.

В заключении приведены основные результаты исследований и выводы по работе.

В приложении представлены 3 акта о внедрении результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований получены следующие наиболее значимые научные и практические результаты работы:

1. Разработан новый способ управления ВИП, позволяющий повысить коэффициент мощности тяговых электроприводов электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения.

2. Проведены сравнительные аналитические исследования процессов работы тяговых электроприводов электровоза переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения с типовым и новым алгоритмами управления ВИП с включением диодного плеча в его силовую схему.

3. Разработан способ повышения работоспособности ВИП электровоза в режиме тяги при отсутствии импульсов управления на тиристорах некоторых

его плеч и проведены сравнительные исследования электромагнитных процессов работы электровоза с применением способа и без него.

4. Разработаны новые энергосберегающие алгоритмы разнофазного управления ВИП и проведены сравнительные исследования электромагнитных процессов работы электровоза с их применением и без них.

5. Разработана обобщенная математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» с целью проведения исследований процессов работы электровоза с учетом применения диодного плеча, разнофазного управления и новых алгоритмов управления ВИП в режимах тяги и рекуперативного торможения.

6. Предложены принцип, структура и схемное решение ВИП на основе IGBT-транзисторов с частотой коммутации, соответствующей частоте питающей сети, а также его новые алгоритмы управления.

7. Разработано схемное и конструктивное решение блока разнофазного управления и блока распределения импульсов в составе блока управления ВИП.

8. Разработано схемное и конструктивное решение стенда тиристорного и транзисторного ВИП для проведения экспериментальных исследований.

9. Проведена модернизация пяти электровозов ВЛ80Р №№ 1665, 1812, 1822, 1829, 1849 с применением диодного плеча в режиме тяги и новых алгоритмов разнофазного управления ВИП и двух электровозов ВЛ85 №№ 200, 230 с применением диодного плеча в режиме тяги и новым алгоритмом управления ВИП.

Совокупность изложенных выше теоретических и экспериментальных результатов исследования служит основанием для заключения о достижении цели, поставленной в диссертационной работе.

Список научных трудов по теме диссертации

Статьи, опубликованные в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Мельниченко О. В., Власьевский С. В., Скорик В. Г. Свободные колебания напряжения в контактной сети, вызванные процессами коммутации тиристорных преобразователей электровозов // Электроника и электрооборудование транспорта. Научно-технический журнал. №1, 2007. – С. 14-19.

2. Мельниченко О. В., Власьевский С. В., Скорик В. Г. Улучшение формы напряжения контактной сети при работе электровозов с тиристорными выпрямителями // Вестник ВНИИЖТ. №5, 2007. – С. 42-47.

3. Мельниченко О. В., Цыбульский В. С., Чикиркин О. В. Повышение качества электрической энергии в контактной сети с целью снижения отказов электронного и силового оборудования электровоза // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. №3(19), Иркутск, ИрГУПС, 2008. – С 58 – 66.

4. Мельниченко О. В., Газизов Ю. В. Адаптивная система разнофазного управления тиристорными преобразователями // Железнодорожный транспорт. 2009. № 2. С. 43-44.

5. Мельниченко О. В., Газизов Ю. В. Повышение энергетических показателей электровозов переменного тока // Железнодорожный транспорт. 2010, № 3. – С. 50-52.

6. Мельниченко О. В., Газизов Ю. В. Способ улучшить энергопоказатели // Мир транспорта. 2010, № 1. – С. 52-58.

7. Мельниченко О. В., Газизов Ю. В. Разработка и испытания адаптивной системы разнофазного управления электровоза ВЛ80Р // Вестник ИрГТУ. – 2011. – № 4. – С. 72-78.

8. Мельниченко О. В. Повышение эффективности работы рекуперативного торможения электровозов переменного тока в зоне высоких скоростей движения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. №1, Иркутск, ИрГУПС, 2011. – С 174 – 179.

9. Мельниченко О. В., Линьков А. О., Шрамко С. Г. Повышение коэффициента мощности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения // Мир транспорта, 3 (47) 2013. - С. 64-69.

10. Мельниченко О. В. Математическое моделирование ВИП электровоза в аварийных режимах с типовым и предлагаемым способами управления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Научный журнал, №4(40), 2013, – С. 229-233.

11. Мельниченко О. В., Линьков А. О., Портной А.Ю., Шрамко С. Г. Математическое моделирование работы электровоза с новой выпрямительной установкой возбуждения на IGBT-транзисторах // Наука и техника транспорта, 2013 №2. - С. 21-28.

12. Мельниченко О. В., Власьевский С. В. Повышение энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме тяги с помощью разнофазного управления выпрямителями на первой зоне регулирования // Электроника и электрооборудование транспорта. №3, 2014. – С. 26-31.

13. Мельниченко О. В., Власьевский С. В. Энергосберегающий алгоритм разнофазного управления четырёхзонного выпрямительного преобразователя электровоза // Электроника и электрооборудование транспорта. №4, 2014. – С. 13-19.

14. Мельниченко О. В. Математическая модель разнофазного управления выпрямительно-инверторными преобразователями электровоза // Вестник Иркутского государственного технического университета, №5(88), 2014, – С. 127-135.

15. Мельниченко О. В., Власьевский С. В. Повышение энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения с помощью разнофазного управления инверторами на первой зоне регулирования // Вестник Иркутского государственного технического университета, №7(90), 2014, – С. 93-99.

16. Мельниченко О. В., Портной А. Ю., Яговкин Д. А., Шрамко С. Г. Новый выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава переменного тока с повышенными энергетическими характеристиками в режиме тяги // Наука и техника транспорта. №3, 2014, – С. 46-51.

17. Мельниченко О. В., Власьевский С. В. Повышение энергетической эффективности электровоза переменного тока за счёт разнофазного управления инверторами на высших зонах регулирования // Электроника и электрооборудование транспорта. №5, 2014. – С. 29-35.

18. Мельниченко О. В., Яговкин Д. А., Портной А. Ю., Шрамко С. Г. Экспериментальный стенд для исследования процессов работы тиристорного и транзи-

сторного выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза переменного тока в режиме тяги на высших зонах регулирования // Вестник Иркутского государственного технического университета, №11(94), 2014, – С. 251-259.

19. Мельниченко О. В., Власьевский С. В., Портной А. Ю., Яговкин Д. А., Шрамко С. Г. Экспериментальный стенд для исследования процессов работы тиристорного и транзисторного выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза переменного тока в режиме тяги на первой зоне регулирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика/ – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2014. Т. 14. № 4. С. 52-59.

20. Мельниченко О. В., Власьевский С. В. Повышение энергетической эффективности работы электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения // Ученые записки Комсомольска на Амуре гос. техн. Университета. – 2014. – № II-1(18). – С. 19–27.

21. Мельниченко О. В., Власьевский С. В. Аварийные процессы тиристорного преобразователя электровоза переменного тока в режиме тяги на первой зоне регулирования // Трансп.: Наука, техн., упр./ ВИНТИ РАН. – 2015. – № 2. – С. 14–20.

22. Мельниченко О. В. Обеспечение работоспособности электровоза в режиме тяги при аварийных режимах выпрямительно-инверторного преобразователя // Монография. Тираж 500 экз. Иркутск: ИрГУПС, 2014. – 168 с.

Патенты на изобретения

1. Мельниченко О. В., Власьевский С. В., Бабичук А. К., Многозонный выпрямитель однофазного переменного тока // Пат. № 54704 от 10.01.2006 г. Рос. Федерация: МПК Н 02 М 5/12/ заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения - №2006100380/22, заявл. 10.01.06; опубл. 10.07.2006, Бюл. №19.

2. Мельниченко О. В., Власьевский С. В., Бабичук А. К. Способ управления многозонным выпрямителем однофазного переменного тока // Пат. №2322749, Рос. Федерация: МПК В60L 9/12/ заявитель и патентообладатель Иркутский гос. ун-т путей сообщения - №2006140957/09, заявл. 20.11.06; опубл. 20.04.2008 Бюл. №11.

3. Мельниченко О. В., Газизов Ю.В., Шафрыгин А. В. Способ снижения послекоммутационных колебаний напряжения на токоприёмнике электровоза и устройство для его осуществления // Пат. № 2435288, Рос. Федерация: МПК Н02М 7/155, заявитель и патентообладатель Иркутский гос. ун-т путей сообщения - №2009109459/07, заявл. 16.03.09; опубл. 27.11.2011, Бюл. №33.

4. Мельниченко О. В., Портной А. Ю., Шрамко С. Г. Способ повышения коэффициента мощности при рекуперативном торможении электровоза переменного тока и устройство для его реализации // Пат. №2475374 Рос. Федерация: МПК G01R 34/31, заявитель и патентообладатель Иркутский гос-ый ун-т путей сообщения - №2010144087/11, заявл. 27.10.10; опубл. 10.05.2012. Бюл. №31.

5. Мельниченко О. В., Газизов Ю. В., Портной А. Ю., Шрамко С. Г. Способ повышения энергетических показателей электровоза переменного тока и качества электрической энергии на токоприемнике при его работе и устройство для

его осуществления // Пат. №2467892, Рос. Федерация: МПК В60L3/00, заявитель ОАО «РЖД» - №2011114344/11, заявл. 13.04.11; опубл. 27.11.2012. Бюл. №33.

6. Мельниченко О. В., Власьевский С. В. Способ управления зависимым инвертором однофазного переменного тока // Пат. № 2469458 от 10.12.2012 г. Рос. Федерация: МПК В60L заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. - №2006100380/22, заявл. 21.07.11; опубл. 10.12.2012. Бюл. №19.

7. Мельниченко О. В., Портной А. Ю., Шрамко С. Г. Многозонный выпрямительно-инверторный преобразователь и способ управления преобразователем // Пат. №2498490, Рос. Федерация: МПК G01L 1/100, заявитель и патентообладатель Иркутский гос. ун-т путей сообщения - №2012114982/07, заявл. 16.04.12; опубл. 10.11.2013. Бюл. №19.

8. Мельниченко О. В., Портной А. Ю., Яговкин Д. А., Шрамко С. Г. Способ фазового управления тиристорными преобразователями, одновременно работающими на индивидуальные нагрузки // Пат. №2539323, Рос. Федерация: МПК H02M 1/088, заявитель и патентообладатель Иркутский гос. ун-т путей сообщения - №2013106299/07, заявл. 13.02.13; опубл. 20.01.2015. Бюл. №2.

9. Мельниченко О. В., Яговкин Д. А., Портной А. Ю., Шрамко С. Г. Способ повышения энергетических показателей электровозов переменного тока с ВИП на IGBT-транзисторах (модулях) по критерию потребления максимально активной мощности // Пат. №2557006, Рос. Федерация: МПК H02M 5/40, заявитель и патентообладатель Иркутский гос-ый ун-т путей сообщения – №2014104274/07, заявл. 06.02.14; опубл. 20.07.2015. Бюл. №20.

10. Мельниченко О. В., Буняева Е. В., Власьевский С. В., Скорик В. Г. Способ управления зависимым инвертором однофазного переменного тока [Текст] // Пат. №2561068, Рос. Федерация: МПК H02M7/162, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения». – №2014119292/07; заявл. 13.05.2014; опубл. 20.08.2015, Бюл. № 23.

11. Решение о выдаче патента на изобретение от 29.05.2015 по заявке №2014115762/07(024703 от 18.04.2014). Способ управления многозонным выпрямительно-инверторным преобразователем однофазного переменного тока. Авторы: С.В. Власьевский, О.В. Мельниченко, В.В. Семченко.

Имеется 39 научных статей, опубликованных в российских изданиях и материалах международных и всероссийских конференций.