

На правах рукописи



ШРАМКО Сергей Геннадьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОВЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ
РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ БАЛЛАСТНЫХ РЕЗИСТОРОВ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (ФГБОУ ВО КнАГТУ) на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Мельниченко Олег Валерьевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Савоськин Анатолий Николаевич, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы» ФГБОУ ВО «Московский государственный университет путей сообщения императора Николая II» (МИИТ);

кандидат технических наук, доцент

Скорик Виталий Геннадьевич, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения».

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «01» ноября 2016 года в 12 час. 00 мин., в ауд. 201-3 на заседании диссертационного совета Д 999.086.03 на базе ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2016г.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять в адрес диссертационного совета Д 999.086.03, e-mail: keparu@knastu.ru

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

А.С.Гудим

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. ОАО «РЖД» потребляет до 6 % общего объема электроэнергии, произведенной в Российской Федерации. При этом значительная часть (до 78 %) электроэнергии расходуется на тягу поездов. Сегодня все эксплуатируемые в России электровозы переменного тока с коллекторными тяговыми электродвигателями не соответствуют современным требованиям по энергетическим показателям согласно ГОСТ Р 55364-2012.

Электрифицированные на переменном токе железные дороги России эксплуатируют электровозы оборудованные полупроводниковыми преобразователями для питания тяговых электродвигателей (ТЭД), в том числе около 60 % – выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) с зонно-фазовым регулированием, позволяющие реализовать режим электрического рекуперативного торможения. Применение на электровозах рекуперативного торможения позволяет добиться значительной экономии электроэнергии, снизить эксплуатационные расходы, повысить безопасность движения при вождении поездов повышенной массы и длины на участках пути с затяжными спусками и повысить участковую скорость.

Руководством компании ОАО «РЖД» обозначена одна из целевых задач – повышение энергоэффективности электровозов за счет увеличения удельной рекуперации электрической энергии. В связи с этим данное направление является основой достижения долгосрочных стратегических целей компании, отраженное в программах «Стратегия развития железнодорожного транспорта до 2030 года» и «Энергетическая стратегия холдинга «РЖД» на перспективу до 2030 года».

Одним из перспективных направлений для повышения энергетических показателей электровозов с ВИП является повышение коэффициента мощности (K_m) в режиме рекуперативного торможения, который является низким и составляет 0,45 - 0,65, что на 25 - 30 % ниже, чем в тяговом режиме ($K_m = 0,84$). Поэтому изыскание путей повышения K_m самих преобразователей электроподвижного состава (ЭПС), снижение потерь электроэнергии в тяговых сетях и общее повышение эффективности ЭПС переменного тока в режиме рекуперативного торможения остаются весьма актуальными.

Степень разработанности темы. Вопрос повышения энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения является широко проработанным многими российскими учеными. Однако в основном исследуется работа ВИП без учета возможности снижения величины активного сопротивления блока балластных резисторов (ББР) в цепи

якоря ТЭД. Величина этих сопротивлений оказывает существенное влияние на энергетические показатели режима рекуперативного торможения электровоза. Данная диссертационная работа посвящена исследованию вопросов повышения энергетической эффективности электровозов переменного тока за счет изменения величины активного сопротивления ББР в якорной цепи ТЭД и выравнивания токов параллельно включенных ТЭД, работающих в режиме генераторов с независимым возбуждением.

Целью диссертационной работы является повышение энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения путем изменения величины активного сопротивления ББР в якорной цепи ТЭД и выравнивания токов параллельно включенных ТЭД, работающих в режиме генераторов с независимым возбуждением.

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

1. Разработан способ изменения величины сопротивления ББР, позволяющий повысить K_m электровоза в режиме рекуперативного торможения.

2. Разработан способ выравнивания токов параллельно включенных ТЭД, работающих в режиме генераторов с независимым возбуждением, позволяющий обеспечить равномерное распределение нагрузок между параллельно включенными ТЭД.

3. Разработана математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» для режима рекуперативного торможения, учитывающая изменение активного сопротивления ББР.

4. Разработан научно-экспериментальный лабораторный «Стенд для исследования работы электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения», позволяющий исследовать влияние активного сопротивления ББР на K_m электровоза.

5. Исследован K_m электровоза при его работе в типовом режиме рекуперативного торможения и с изменением величины активного сопротивления ББР на математической модели и лабораторном стенде.

6. Разработано схемотехническое решение для реализации изменения активного сопротивления ББР применительно к электровозу.

Методы исследования. Исследование основано на применении теории электрических цепей, методов математического моделирования, численных методов решения интегральных и дифференциальных уравнений, теории преобразовательных устройств. Экспериментальные исследования проводились

на математической модели в среде MatLab/Simulink и на физической модели в лаборатории ИрГУПС.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен способ изменения сопротивления ББР электровоза, заключающийся в изменении величины его активного сопротивления в определенный момент времени относительно перехода сетевого напряжения через ноль, в результате чего увеличивается активная составляющая тока первичной обмотки тягового трансформатора и тем самым увеличивается коэффициент мощности электровоза.

2. Предложен способ выравнивания токов параллельно включенных ТЭД, работающих в режиме генераторов с независимым возбуждением, заключающийся в том, что при возникновении разности их токов формируется управляющий сигнал силовыми ключами для индивидуального изменения активного сопротивления ББР в цепи каждого ТЭД.

3. Разработана математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» для режима рекуперативного торможения с учетом изменения величины активного сопротивления ББР и выравнивания токов параллельно включенных ТЭД, работающих в режиме генераторов с независимым возбуждением.

Практическая ценность и реализация результатов работы состоит в следующем:

1. Разработаны схемные решения для модернизации силовой схемы электровоза с изменением сопротивления ББР, обеспечивающие повышение коэффициента мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения в среднем на 15 % и уменьшение на 28 % коэффициента относительной пульсации тока якоря ТЭД в сравнении с типовым режимом работы.

2. Разработаны принципиальные схемы блока управления для изменения сопротивления ББР и выравнивания токов параллельно включенных ТЭД, работающих в режиме генераторов с независимым возбуждением.

3. Изготовлен блок управления для изменения сопротивления ББР и выравнивания токов параллельно включенных ТЭД, работающих в режиме генераторов с независимым возбуждением.

4. Модернизированы два блока ББР-162 для установки их на электровоз переменного тока.

5. Разработан научно-экспериментальный лабораторный «Стенд для исследования работы электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения» на базе лаборатории «Системы управления ЭПС» ИрГУПС.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Способ изменения сопротивления ББР электровоза, заключающийся в изменении величины его активного сопротивления в определенный момент времени полупериода относительно перехода сетевого напряжения через ноль, в результате чего увеличивается активная составляющая тока первичной обмотки тягового трансформатора, тем самым увеличивается коэффициент мощности электровоза.

2. Способ выравнивания токов параллельно включенных ТЭД, работающих в режиме генераторов с независимым возбуждением, заключающийся в том, что при возникновении разности их токов изменяется управляющий сигнал силовыми ключами для индивидуального изменения активного сопротивления ББР в цепи каждого ТЭД.

3. Математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» для режима рекуперативного торможения с учетом изменения сопротивления ББР и выравнивания токов параллельно включенных ТЭД, работающих в режиме генераторов с независимым возбуждением.

Достоверность научных положений и результатов диссертации подтверждается результатами математического моделирования в среде MatLab/Simulink, совпадением их с экспериментальными данными, полученными на лабораторном стенде.

Апробация работы. Основные положения, результаты и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийской научно-практической конференции «Проблемы транспорта Восточной Сибири» (Иркутск, 2011, 2012); всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2013, 2014); всероссийской научно-практической конференции «Электропривод на транспорте и в промышленности» (Хабаровск, 2013); заседании секции «Локомотивное хозяйство» научно-технического совета ОАО «РЖД» от 21 августа 2012 г. №36; заседании рабочей группы при совете главных инженеров ОАО «РЖД» по вопросам формирования плана научно-технического развития ОАО «РЖД» от 31 января 2013 г. №ЦТех-104/пр.; заседании секции «Локомотивное хозяйство» НТС ОАО РЖД» под председательством главного инженера Дирекции тяги О.В. Чикиркина от 23 апреля 2015 г. № 10; научно-техническом совете по организации работ модификации электровоза 2(3)ЭС5К согласно концепции, предложенной кафедрой «Электроподвижной состав», под председательством главного инженера Дирекции тяги О.В. Чикиркина от 12 июля 2015 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 научных работ, из них 5 статей в ведущих научных рецензируемых журналах и изданиях перечня ВАК Минобрнауки России, получено 2 патента на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, библиографического списка из 99 наименований, 2 приложений и содержит 130 страниц основного текста, 9 таблиц и 64 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе работы проведен анализ научных трудов в области повышения коэффициента мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения. Отмечены работы ведущих ученых и специалистов, таких как Л. М. Трахтман, Б. Н. Тихменев, В. А. Кучумов, Л. А. Мугинштейн, В. Б. Похель, Н. А. Ротанов, Ю. М. Иньков, В. П. Феоктистов, Р. Р. Мамошин, А. Н. Савоськин, В. М. Антюхин, А. Л. Лозановский, Л. Д. Капустин, В. В. Литовченко, Л. В. Поссе, С. В. Захаревич, С. А. Петров, В. А. Голованов, К. Г. Кучма, С. Н. Засорин, А. И. Харитонов, А. Т. Бурков, В. Г. Щербаков, Б. И. Хоменко, Б. М. Наумов, Н. С. Копанев, С. В. Власьевский, Ю. М. Кулинич, Б. Н. Ребрик, Н. Н. Широченко, А. А. Бакланов, О. В. Мельниченко и др. Эти работы послужили научной основой при выполнении диссертационного исследования.

Представлены основные направления исследований направленных на повышение энергетических показателей режима рекуперативного торможения на электровозах переменного тока. В настоящее время началось широкое внедрение на электроподвижном составе управляемых силовых полупроводниковых приборов (СПП) применение которых открывает широкие возможности для реализации принципиально новых преобразователей и улучшения энергетических показателей электровозов в режимах тяги и рекуперативного торможения.

На основании проведенного анализа работ в области рекуперативного торможения электровоза переменного тока определена цель работы и сформулированы задачи исследования.

Во второй главе приведены результаты исследования электромагнитных процессов инвертирования с использованием теории расчета энергетических параметров преобразователей. Основные электромагнитные процессы однозонного инвертора представлены на рисунке 1.

В режиме рекуперации электрической энергии ток первичной обмотки трансформатора находится в противоположной фазе относительно напряжения

тяговой сети. Угол сдвига фаз j между током в первичной обмотке трансформатора и напряжением контактной сети зависит от угла опережения открытия тиристорov ВП b , при этом, с увеличением b увеличивается и j . Таким образом значение угла b непосредственно оказывает воздействие на энергетические характеристики процесса инвертирования.

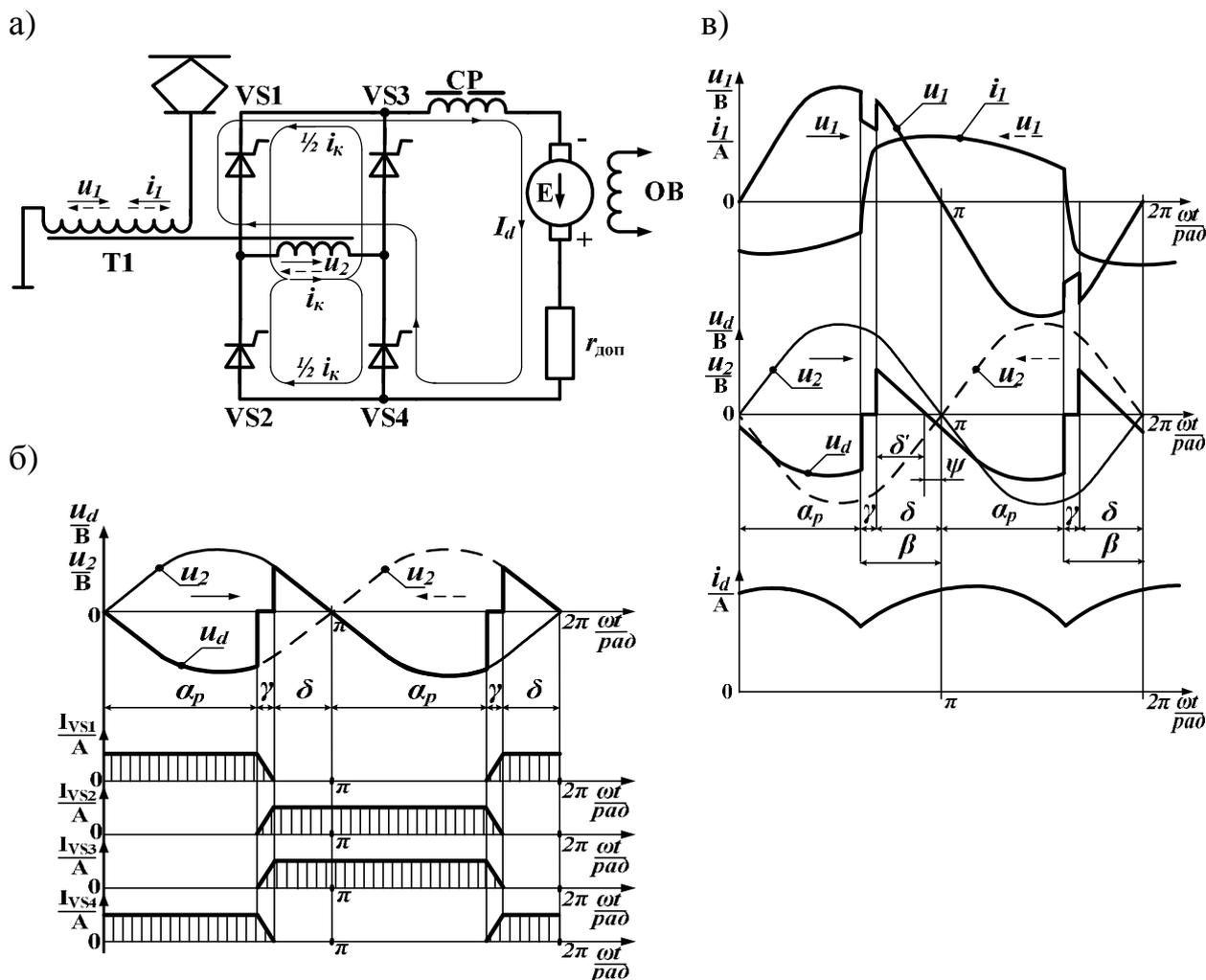


Рисунок 1 – Однозонный инвертор и электромагнитные процессы в нем:
 а – схема однозонного мостового инвертора; б – процессы коммутации;
 в – электромагнитные процессы при $X_d \neq \infty$

Обеспечить стабильную работу режима рекуперации можно, выбирая угол $b = const$ и независящим от тока нагрузки инвертора

$$b = d_{don} + g \tag{1}$$

где d_{don} – минимально допустимая величина угла запаса инвертора;
 g – время переходного процесса коммутации зависимого инвертора.

Данное равенство должно выполняться для наиболее тяжелых режимов нагрузок, при наибольшей величине угла коммутации γ . При номинальных и малых нагрузках, ввиду уменьшения угла коммутации γ , получится избыточное значение

угла δ и снижение коэффициента мощности электровоза. Для устранения этого недостатка регулирование угла опережения открытия тиристорov на всех современных электровозах переменного тока с рекуперативным торможением ведется по закону $d = const$. При этом осуществляется автоматическое регулирование величины угла запаса δ с целью поддержания постоянного минимального его значения, допустимого по условиям надежной работы тиристорных плеч ВИП.

Осуществление такого регулирования затруднено тем, что на величину угла коммутации γ , от которого зависит угол δ , влияет ряд факторов, не связанных с параметрами цепи самого инвертирующего электровоза. Поэтому входную величину системы автоматического регулирования принимают непосредственно или косвенно зависящей от угла γ .

Величина угла коммутации $\gamma = \beta - \delta$ зависит от следующих величин:

- от тока двигателя I_d ;
- от индуктивного сопротивления цепи переменного тока X_r , которое учитывает индуктивное сопротивление тяговой сети, а следовательно от расположения электровоза на фидерной линии относительно тяговых подстанций, и схемы питания участка;
- от мгновенного напряжения вторичной обмотки тягового трансформатора u_2 в момент начала коммутации, которое зависит от угла опережения открытия тиристорov ВИП, а также от наличия других электровозов на участке, которые вызывают искажение синусоидальной формы вторичного напряжения вследствие коммутации выпрямителей или инверторов.

Угол запаса δ выбирают при этом в расчете на возможное увеличение угла коммутации в первом полупериоде при наиболее тяжелой перегрузке, когда еще не вступила в действие система автоматического регулирования, а также с учетом времени, необходимого для окончания процесса восстановления запирающих свойств тиристорov плеч ВИП.

Необходимо также учитывать то, что:

- внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением с учетом активного сопротивления якоря имеет отрицательный наклон;
- внешняя характеристика инвертора с законом управления $d = const$ имеет также отрицательный наклон.

Точки статических характеристик определяются точками пересечения внешних характеристик генератора и нагрузки (инвертора). Взаимный наклон характеристик в этих точках должен удовлетворять условию статической устойчивости системы рекуперативного торможения, которое определяется неравенством

$$\frac{dU_d}{dI_d} < \frac{dU_u}{dI_d}, \quad (2)$$

где U_d – напряжение ТЭД в генераторном режиме;
 U_u – напряжение инвертора;
 I_d – ток ТЭД в генераторном режиме.

Для обеспечения выполнения неравенства (2) при принятом законе управления $d = const$ необходимо, чтобы внешняя характеристика генератора имела отрицательный наклон относительно внешней характеристики инвертора. Обеспечить такой наклон можно введением в якорную цепь генератора дополнительного активного сопротивления $r_{доп}$. На электровозах для этого применяются балластные резисторы, входящие в состав ББР, включенные в цепь якоря каждого двигателя, работающего в режиме генератора с независимым возбуждением.

Для выполнения неравенства (2) необходимо, чтобы активное сопротивление ББР превышало эквивалентное сопротивление инвертора

$$\lambda R'_{ЭМ} + R_{Эа} < r_{доп}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент, учитывающий влияние пульсаций выпрямленного тока;
 $R'_{ЭМ}$ – эквивалентное сопротивление для электромагнитного падения напряжения;

$R_{Эа}$ – эквивалентное сопротивление для активного падения напряжения;
 $r_{доп}$ – дополнительное активное сопротивление.

В ходе анализа электромагнитных процессов были получены выражения для определения эквивалентного сопротивления электромагнитного падения напряжения и эквивалентное сопротивление активного падения напряжения

$$R'_{ЭМ} = \frac{dU'_B}{dI_d} = - \frac{2\pi(X_T + X_B) \left(\sin(\delta + \gamma) \left(\pi + \frac{X_T}{X_B} \gamma \right) + \frac{X_T}{X_B} (\cos(\delta + \gamma) + \cos \delta) \right)}{\left(\pi + \frac{X_T}{X_B} \gamma \right)^2 (2\pi(X_T + X_B) \sin(\delta + \gamma) + \cos(\delta + \gamma) - \pi + 1)}, \quad (4)$$

$$R_{Эа} = k_{ЭТ}^2 \vartheta R_T + k_{ЭВ}^2 R_{В0}, \quad (5)$$

где $k_{ЭТ} = \frac{I_{ТЭ}}{I_d}$ – отношение действующего значения переменного тока к среднему току двигателя;

$\vartheta = 2 \left(\frac{U'_B}{U_m} \right)^2 \frac{R_T}{X_T}$ – поправочный коэффициент, учитывающий, что активное падение напряжения в цепи переменного тока в процессе коммутации не входит в сумму падений выпрямленного напряжения;

$R_T = \frac{1}{k_T^2} R_1 + R_2$ – общее активное сопротивление обмоток трансформатора, здесь R_1 и R_2 – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток тягового трансформатора, k_T – коэффициент трансформации тягового трансформатора;

$k_{ЭВ} = \frac{I_{ЭВ}}{I_d}$ – отношение действующего значения выпрямленного тока к

среднему току двигателя;

$R_{в0}$ – активное сопротивление общей цепи выпрямленного тока.

Для расчета минимального добавочного сопротивления в цепи якоря генератора, которое обеспечивает статическую устойчивость режима рекуперативного торможения, достаточно вычислить эквивалентные сопротивления $R'_{эм}$ и $R_{эа}$, так как они определяют наклон внешней характеристики инвертора.

Используя полученные соотношения и проведя вычисления, определим эквивалентное сопротивление преобразователя

$$\lambda R'_{эм} + R_{эа} = \mathbf{0,0698 \text{ Ом.}} \quad (6)$$

Для выполнения условия статической устойчивости системы рекуперативного торможения (2) необходимо, чтобы минимальная величина дополнительного активного сопротивления была больше 0,07 Ом. Исходя из существующей конструкции ББР наиболее удобно использовать половину его сопротивления, которая составляет 0,0725 Ом.

Для определения влияния сопротивления ББР на K_M в режиме рекуперативного торможения были получены выражения, учитывающие его влияние для первой и последующих зон.

Для первой зоны K_M определяется выражением

$$K_M = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \left[\cos \beta_p - \frac{2X_T I_d}{U_m} - \left[\frac{\Delta u_{вн}}{U_{в0}} + \frac{R_{эа} I_d}{U_{в0}} + \frac{\pi^2 I_d r_{доп}}{32 U_{в0}} \right] \right], \quad (7)$$

где $U_{в0}$ – выпрямленное напряжение без нагрузки до включения инверторного режима;

X_T – общее индуктивное сопротивление обмоток трансформатора;

$\Delta u_{вн}$ – падение напряжения в тиристорах плеч инвертора;

$\beta_p = \pi - \alpha_p$ – регулируемый по фазе угол открытия тиристоров.

Для последующих зон K_M определяется выражением

$$K_M = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\frac{1}{2} ((1 + \varepsilon) \cos \delta + (1 - \varepsilon) \cos \beta_p - (2\varepsilon^2 + \varepsilon - \mu + \frac{\mu}{\varepsilon} + 1) \frac{\lambda X_{Tn} I_{dn}}{U_{mn}})}{K_{эф} K_{дэф} \sqrt{\frac{\pi + (\varepsilon^2 - 1) \cdot (\beta_p - \delta)}{\pi}}} - \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\Delta u_{вн} + R_{эа} I_d + \frac{\pi^2}{32} I_d r_{доп}}{U_{60n} K_{эф} K_{дэф} \sqrt{\frac{\pi + (\varepsilon^2 - 1) \cdot (\beta_p - \delta)}{\pi}}} \quad (8)$$

где 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;

$K_{эф}$ – коэффициент эффективности переменного тока;

$K_{дэф}$ – коэффициент эффективности выпрямленного тока.

Используя выражения (7) и (8), были рассчитаны значения коэффициентов мощности ВИП для первой и последующих зон регулирования при значениях $r_{доп} = 0,145$ Ом, что соответствует штатному сопротивлению блока балластных резисторов, и для $r_{доп} = 0,0725$ Ом, которое соответствует минимально допустимому значению для обеспечения статической устойчивости режима рекуперативного торможения.

Полученные результаты представлены в графическом виде, как зависимость $K_M = f(U_d/U_{в0})$ на рисунке 2.

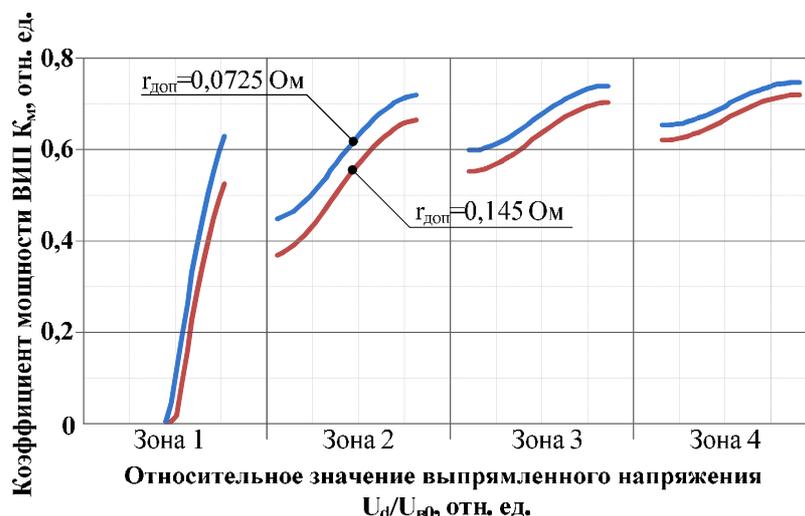


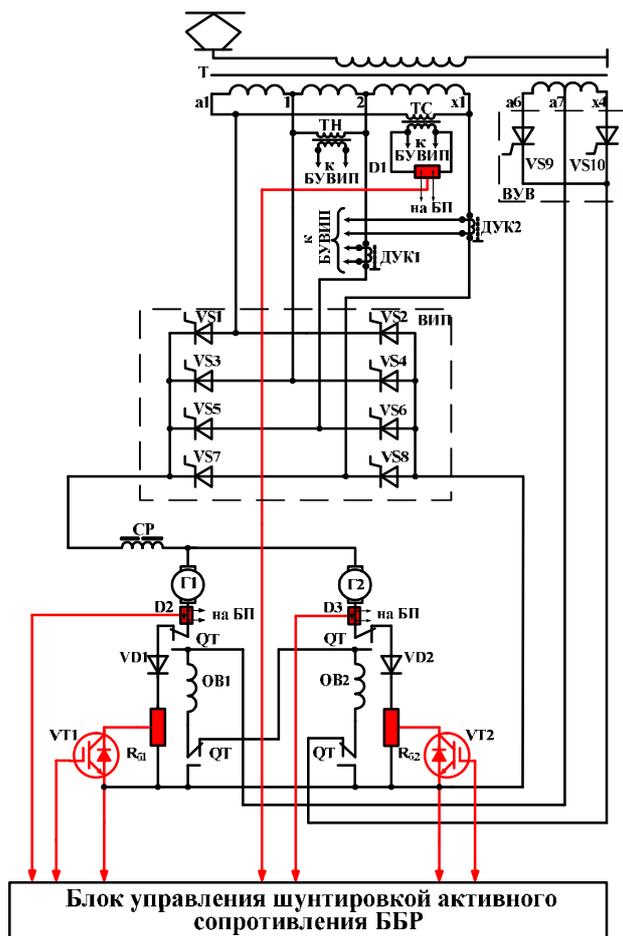
Рисунок 2 – Коэффициент мощности $K_M = f(U_d/U_{в0})$ ВИП при различных значениях дополнительного резистора

Анализ результатов позволяет сделать вывод, что при изменении $r_{доп}$ от 0,145 Ом до 0,0725 Ом K_M увеличивается в среднем на 15 % в зависимости от зоны регулирования напряжения инвертора.

На основании изложенного выше разработан способ изменения величины активного сопротивления ББР при работе электровоза в режиме рекуперативного торможения. Способ заключается в том, что при изменении величины сопротивления ББР в определенный момент времени полупериода относительно перехода сетевого напряжения через ноль, изменяется и форма тока первичной обмотки тягового трансформатора. Тем самым значительно повышается коэффициент мощности электровоза. Изменение величины сопротивления ББР в сторону уменьше-

ния можно осуществить шунтированием части сопротивления ключевым элементом, в качестве которого предлагается использовать биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT-транзистор).

Для предлагаемого способа изменения сопротивления ББР на рисунке 3 приведена упрощенная принципиальная схема силовых цепей для одной тележки электровоза серии ВЛ80Р.



Упрощенная принципиальная силовая из тягового трансформатора Т, выпрямительной установки возбуждения (ВУВ) на тиристорах VS9, VS10, ВПН на тиристорах VS1-VS8, сглаживающего реактора СР, двух тяговых двигателей, включенных в режиме генераторов с независимым возбуждением, датчика потенциальных условий ТН, датчика синхронизации ТС, двух датчиков угла коммутации ДУК1 и ДУК2, тормозного переключателя QT. В схему добавлены диоды VD1, VD2, IGBT-транзис-

Рисунок 3 – Упрощенная принципиальная силовая схема электровоза в расчете на одну тележку
 торы VT1 и VT2, выполняющие роль управляемых ключей, которые изменяют сопротивление ББР, датчик напряжения D1 предназначенный для синхронизации блока управления изменением сопротивления ББР с сетевым напряжением и два датчика тока D2, D3 для измерения токов якорей ТЭД, работающих в режиме генераторов с независимым возбуждением. Диоды VD1 и VD2 предназначенные для исключения контурных токов в цепи якорей двух параллельно включенных генераторов.

На основе предложенного способа изменения величины активного сопротивления ББР разработан способ выравнивания токов параллельно включенных

ТЭД в режиме генераторов с независимым возбуждением. Функциональная схема системы выравнивания токов ТЭД представлена на рисунке 4.

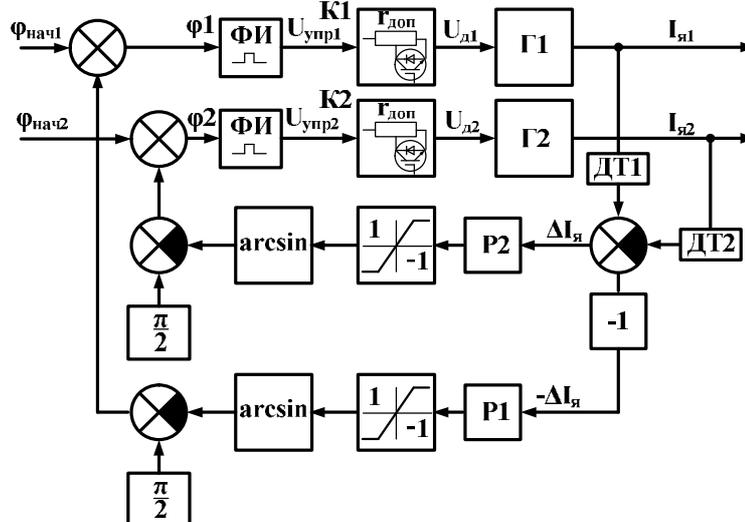


Рисунок 4 – Функциональная схема системы выравнивания токов ТЭД электровоза в режиме генераторов с независимым возбуждением

Схема содержит два генератора Г1 и Г2, датчики тока ДТ1 и ДТ2, элемент сравнения, который вычисляет разность токов якорей ΔI_a и два идентичных канала регулирования угла открытия ключей изменения сопротивления ББР К1 и К2. Входными сигналами системы выравнивания токов служат сигналы датчиков тока, а сама система является разомкнутой. На один канал разность токов ΔI_a подается с положительным знаком, а на второй – с отрицательным. Каждый канал содержит пропорционально-интегральный регулятор, формирующий требуемый закон управления, блок ограничения сигнала, блок вычисления arcsin, выходная величина которого вычитается из константы $\pi/2$ для формирования диапазона угла φ от 0 до π . Далее сигналы регуляторов поступают на формирователи импульсов ФИ, которые управляют ключами К1 и К2.

Для предлагаемого способа изменения величины активного сопротивления ББР и выравнивания токов параллельно включенных ТЭД в режиме генераторов с независимым возбуждением предлагается включать силовые ключи в момент времени, равный 2 мс от перехода сетевого напряжения через ноль. К этому моменту времени заканчиваются переходные процессы, связанные с переключением плеч ВИП при смене полупериода сетевого напряжения. Предельный момент отключения силовых ключей определяется значением угла опережения зажигания тиристор. Если $\beta \geq 36$ эл. град., то отключение происходит в момент времени, соответствующий углу β . Если $\beta < 36$ эл. град., то отключение происходит в момент времени, равный 8 мс от перехода сетевого напряжения через ноль. Выбор такого момента времени для отключения силовых ключей

чей системы изменения величины активного сопротивления ББР и выравнивания токов параллельно включенных ТЭД в режиме генераторов с независимым возбуждением обусловлен наименьшим влиянием на процесс коммутации тиристорных плеч при смене полупериода сетевого напряжения. В пределах этих ограничений силовые ключи могут быть отключены в момент времени, соответствующий углу φ , если он входит в диапазон допустимых ограничений.

Третья глава посвящена имитационному моделированию электромагнитных процессов, протекающих в электровозе. Разработана уточненная математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» для режима рекуперативного торможения с учетом изменения сопротивления ББР и выравнивания токов генераторов.

В основу математической модели положены результаты исследований ученых А. Н. Савоськина, С. В. Власьевского, Ю. М. Кулинича. Моделировалась силовая электрическая схема двухсекционного электровоза ВЛ80Р.

Разработанная модель позволяет производить анализ протекающих электромагнитных процессов работы электровоза при типовом режиме и с предлагаемым способом изменения сопротивления ББР, а также анализировать протекающие электромагнитные процессы. Средой разработки модели выбран пакет MatLab. Проведен сравнительный анализ электромагнитных процессов при работе электровоза при типовом режиме и с изменением сопротивления ББР.

Для оценки адекватности математической модели был выполнен сравнительный анализ электромагнитных процессов при моделировании и эксплуатации электровоза при идентичных условиях. В качестве критериев сравнения были выбраны значения угла запаса δ и угла коммутации γ . Результаты представлены в таблице 1 и на рисунках 5 и 6.

Таблица 1 – Сравнительный анализ электромагнитных процессов при моделировании и работе электровоза в эксплуатации

Параметр, эл. град.	Эксперимент на математической модели	Эксперимент на реальном электровозе	Относительная погрешность Δ , %
δ	25	24	4,1
γ	10,5	11	4,5

Из рисунков 5 и 6 видно, что при угле опережения открытия тиристорov ВП $\beta = 35$ эл. град. угол запаса δ , полученный при работе электровоза, равен 24 эл. град., а при математическом моделировании – 25 эл. град. Угол коммутации, полученный при работе электровоза, равен $\gamma = 11$ эл. град., а при матема-

тическом моделировании – $\gamma = 10,5$ эл. град. Относительная погрешность не превышает 4,5 %, что меньше допустимой погрешности при математическом моделировании в 10 %.

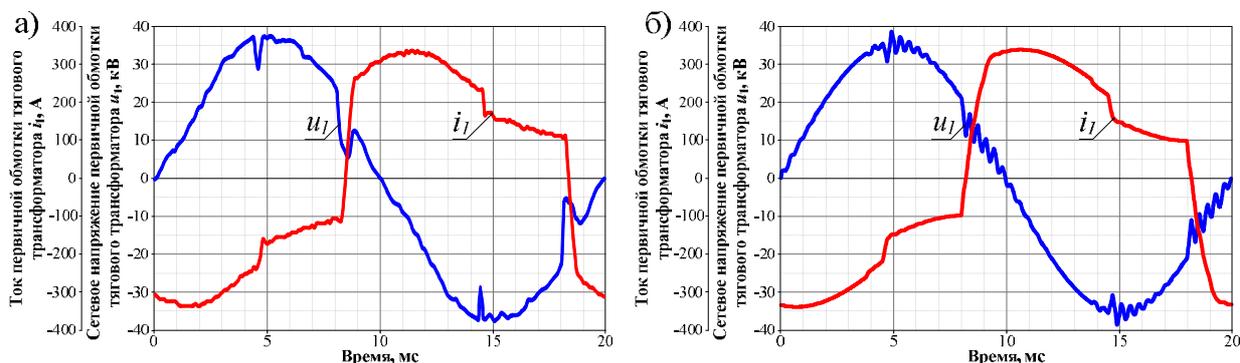


Рисунок 5 – Диаграммы напряжения и тока первичной обмотки тягового трансформатора: (а) – полученные в ходе эксплуатационных исследований; (б) – полученные при математическом моделировании

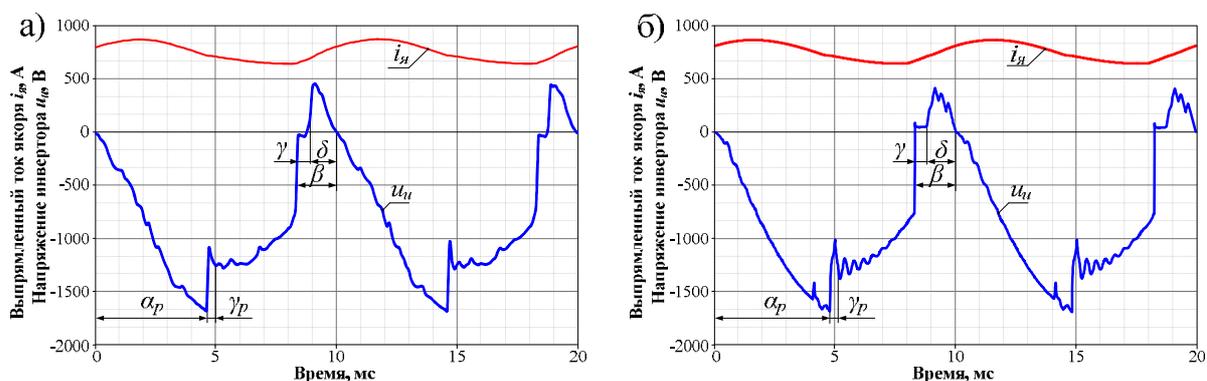


Рисунок 6 – Диаграммы мгновенных значений выпрямленного напряжения инвертора и тока якоря ТЭД: (а) – полученные в ходе эксплуатационных исследований; (б) – полученные при математическом моделировании

На рисунках 7- 9 приведены результаты моделирования электромагнитных процессов работы электровоза при типовом режиме и с предлагаемым способом изменения параметров активного сопротивления ББР.

Результаты математического моделирования работы типовой схемы электровоза и при предлагаемом способе изменения параметров активного сопротивления ББР, полученные на математической модели представлены в таблице 2. Анализ данных таблицы 2 позволяет сделать вывод о том, что при предлагаемом способе изменения активного сопротивления ББР коэффициент мощности электровоза в среднем увеличивается на 15 %, а пульсация тока якоря ТЭД снижается на 28 %.

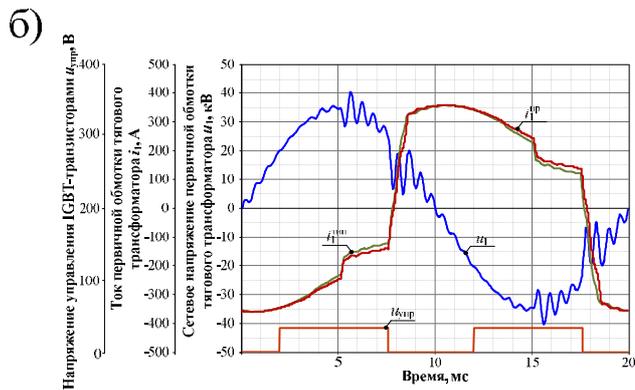
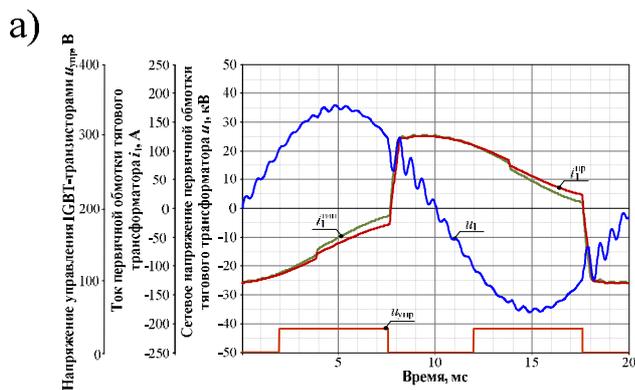


Рисунок 7 – Форма кривых напряжения и тока тягового трансформатора электровоза при работе с типовым и предлагаемым способом изменения активного сопротивления ББР: (а) – на первой зоне регулирования; (б) – на четвертой зоне регулирования

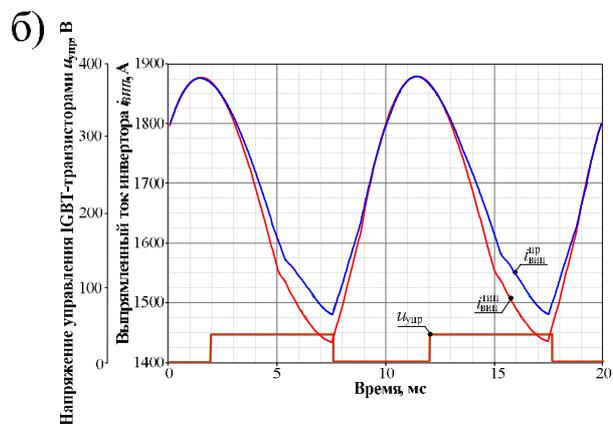
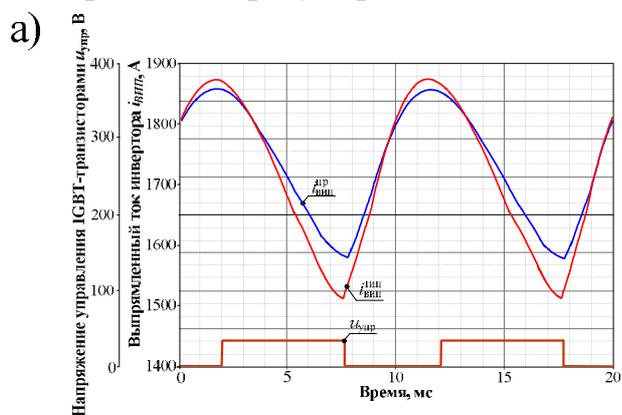


Рисунок 8 – Диаграммы выпрямленного тока ВИП электровоза с типовой схемой и с предлагаемым способом изменения активного сопротивления ББР: (а) – на первой зоне регулирования; (б) – на четвертой зоне регулирования

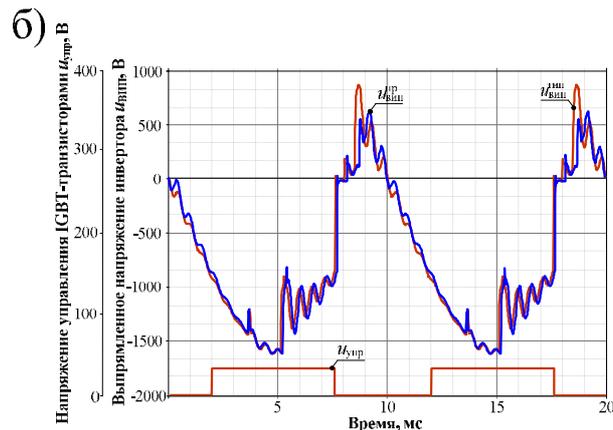
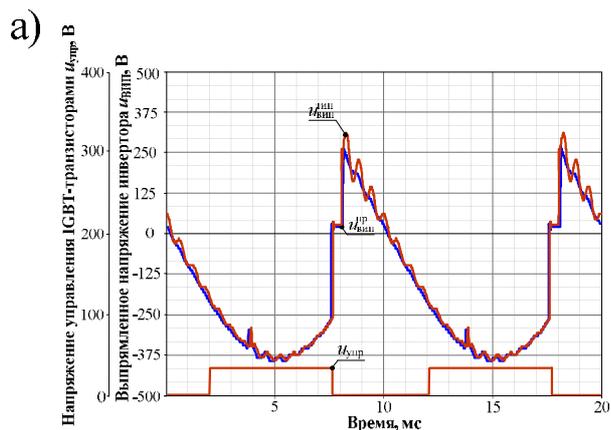


Рисунок 9 – Диаграммы выпрямленного напряжения ВИП электровоза с типовой схемой и с предлагаемым способом изменения активного сопротивления ББР: (а) – на первой зоне регулирования; (б) – на четвертой зоне регулирования

Таблица 2 – Результаты математического моделирования работы типовой схемы и с предлагаемым способом изменения активного сопротивления ББР

Номер зоны	α_p типовой, эл. град.	$I_{я}$, А	$K_{по_Iя}$, отн.ед.			K_M , отн.ед.		
			Типовой режим работы	Предлагаемый режим работы	Δ , %	Типовой режим работы	Предлагаемый режим работы	Δ , %
1	120	815	0,2801	0,2013	28,1	0,1952	0,2694	38,1
1	140	890	0,2731	0,1973	27,7	0,4050	0,5025	24,1
2	90	820	0,3112	0,2197	29,4	0,5278	0,5961	12,9
2	120	870	0,3167	0,2281	27,9	0,6097	0,6693	9,76
3	90	810	0,3615	0,2548	29,5	0,6126	0,6732	9,89
3	120	870	0,3983	0,2798	29,7	0,6763	0,7218	6,73
4	90	840	0,4121	0,2912	29,3	0,7121	0,7614	6,92

α_p – регулируемый угол открытия тиристорov ВИП, эл.град.;

$K_{по_Iя}$ – коэффициент относительной пульсации тока якоря, отн.ед.;

K_M – коэффициент мощности электровоза, отн.ед.

Для оценки эффективности работы предложенной схемы выравнивания токов было проведено моделирование работы силовой схемы электровоза ВЛ80Р и модели выравнивания токов в параллельно включенных ТЭД в режиме генераторов с независимым возбуждением. Моделирование проводилось при токе рекуперации $I_d = 800$ А, что соответствует длительному режиму работы электровоза. Результаты моделирования для четвертой зоны регулирования при разности линейных скоростей осей колесных пар электровоза в 1 % представлены на рисунке 10.

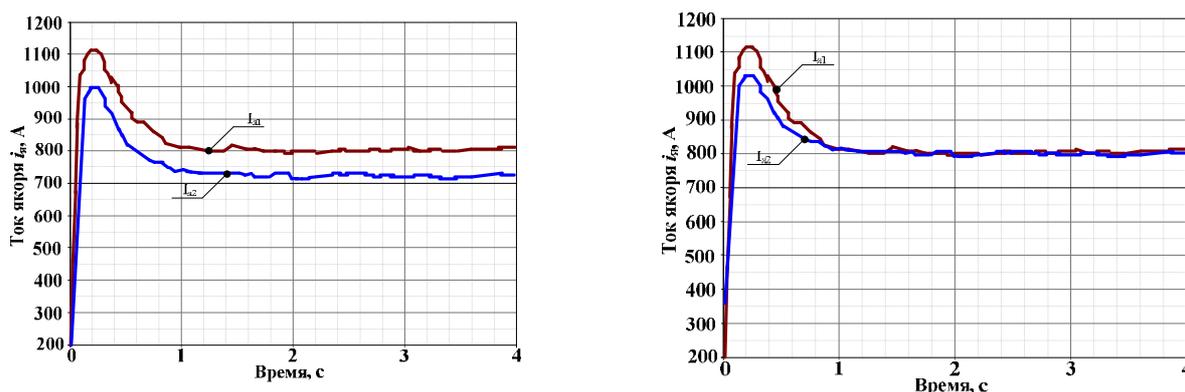


Рисунок 10 – Результаты моделирования работы системы выравнивания токов: (а) – без выравнивания токов, (б) – с выравниванием токов

Анализ приведенных диаграмм позволяет сделать вывод об эффективной работе предлагаемого способа выравнивания токов якоря и удовлетворительном распределении нагрузок между параллельно включенными ТЭД.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований работы электровоза в режиме рекуперативного торможения в типовом режиме и с предлагаемым способом изменения активного сопротивления ББР, полученные на лабораторном стенде.



Рисунок 11 – Лабораторный стенд для исследования работы электровоза

Для проведения эксперимента на базе лаборатории «Системы управления ЭПС» ИрГУПСа разработан стенд для исследования работы электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения, рисунок 11. Стенд является физической моделью электровоза. Параметры физической модели «контактная сеть – электровоз» определялись через масштабные

коэффициенты в соответствии с теорией подобия. На основе рассчитанных данных изготовлены элементы модели. Для реализации предлагаемого способа изменения величины активного сопротивления ББР разработан блок управления.

На рисунке 12 представлены электромагнитные процессы, полученные на физической модели электровоза при работе в типовом режиме и с предлагаемым способом изменения величины активного сопротивления ББР.

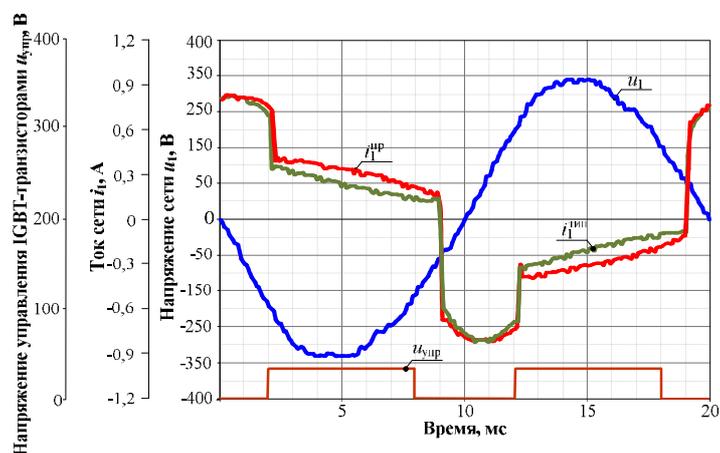


Рисунок 12 – Электромагнитные процессы работы электровоза в режиме рекуперативного торможения при типовом режиме и с предлагаемым способом изменения активного сопротивления ББР, полученные на физической модели

На рисунке 12 представлены следующие кривые:

u_1 – напряжение сети;

$i_1^{\text{тип}}$ – ток сети при типовом режиме работы;

$i_1^{\text{пр}}$ – ток сети с предлагаемым способом изменения сопротивления ББР.

$u_{упр}$ – напряжение управления силовым IGBT-транзистором.

Результаты испытаний физической модели электровоза представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Энергетические показатели типового и с предлагаемым способом изменения величины активного сопротивления ББР режимов работы, полученные на лабораторном стенде

Номер зоны	Напряжение ВИП, В	Ток якоря, А	Ток сети, А	$K_{по}$, %	K_M , отн.ед.
Работа электровоза в типовом режиме					
1,5	28,5	1,23	0,615	36,1	0,4262
2,5	43,4	1,69	0,845	32,1	0,6241
3,5	72,6	1,92	0,96	28,1	0,6793
Работа электровоза с предлагаемым способом изменения величины активного сопротивления ББР					
1,5	28,3	1,46	0,731	25,4	0,5898
2,5	42,9	1,96	0,982	22,8	0,6764
3,5	71,6	2,39	1,198	20,1	0,7098

По результатам лабораторных испытаний получено относительное повышение коэффициента мощности электровоза в среднем на 15 % и снижение коэффициента относительной пульсации тока якоря ТЭД в среднем на 28 %.

В главе произведен расчет технико-экономических показателей одного электровоза серии ВЛ80Р при модернизации предлагаемыми способами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложен способ изменения сопротивления ББР электровоза, заключающийся в изменении величины сопротивления ББР в определенный момент времени относительно перехода сетевого напряжения через ноль, что изменяет форму тока первичной обмотки тягового трансформатора, тем самым увеличивая коэффициент мощности электровоза.

2. Предложен способ выравнивания токов параллельно включенных ТЭД, работающих в режиме генераторов с независимым возбуждением, заключающийся в том, что при возникновении разности их токов формируется управляющий сигнал силовыми ключами для изменения сопротивления активного сопротивления ББР.

3. Разработана математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» для режима рекуперативного торможения с учетом изменения сопротивления ББР, реализованная в среде «MatLab».

4. Разработаны схемные решения для модернизации силовой схемы электровоза предлагаемым способом изменения величины активного сопротивления ББР, обеспечивающие повышение коэффициента мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения.

5. Изготовлен блок управления для изменения сопротивления ББР и выравнивания токов параллельно включенных ТЭД, работающих в режиме генераторов с независимым возбуждением.

6. Разработан научно-экспериментальный лабораторный стенд «Стенд для исследования работы электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения» на базе лаборатории «Системы управления ЭПС» ИрГУПС.

7. Проведены исследования энергетических показателей электровоза в режиме рекуперативного торможения при работе с типовым и предлагаемым способом изменения величины активного сопротивления ББР на математической модели и лабораторном стенде. Повышение коэффициента мощности электровоза с предлагаемым способом изменения величины активного сопротивления ББР составило в среднем 15 %, уменьшение коэффициента относительной пульсации тока якоря 28 % в сравнении с типовым режимом работы.

8. Годовой экономический эффект от внедрения результатов исследований на один электровоз серии ВЛ80Р при эксплуатации составит 1113 тыс. руб., со сроком окупаемости 1,8 года.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Шрамко С.Г. Повышение коэффициента мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения / С.Г. Шрамко, А.О. Линьков, О. В. Мельниченко // Мир транспорта / Московский гос. ун-т путей сообщения. Москва, 2013. № 3(47). С. 64 – 69.

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

3. Шрамко С.Г. Экспериментальный стенд для исследования процессов работы тиристорного и транзисторного выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза переменного тока в режиме тяги на высших зонах регулирования / С.Г. Шрамко, О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, Д.А. Яговкин // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2014 №11. - С. 251-259.

4. 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 /

С.Г. Шрамко, С.В. Власьевский, О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, Д.А. Яговкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика/ – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2014. Т. 14. № 4. С. 52-59.

5. Шрамко С.Г. Повышение эффективности эксплуатации электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения / С.Г. Шрамко // Вестник Иркутского государственного технического университета, Под ред. Р.В. Бель, Л.В. Герасимчук. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, вып. №4(111), 2016, – 201 с.: ил. С. 192-199.

6. Пат. №2475374 Способ повышения коэффициента мощности при рекуперативном торможении электровоза переменного тока и устройство для его реализации / Шрамко С.Г., Мельниченко О.В., Портной А.Ю. // 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. №31.2.

7. Пат. №2459717 Электронное устройство токовой защиты ББР электровозов серии ВЛ80р / Шрамко С.Г., Мельниченко О.В., Портной А.Ю., // Пат. №2459717, Рос. Федерация: МПК В60L3/00, заявитель ОАО «РЖД» - №2011114345/11; заявл. 13.04.11; опубл. 27.08.2012. Бюл. №24.

8. Шрамко С.Г. Способ повышения тягово-энергетических характеристик локомотивов переменного тока в режиме рекуперативного торможения / Шрамко С.Г., О.В. Мельниченко, Портной А.Ю. // Проблемы транспорта Восточной Сибири. Сборник научных трудов Научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Электромеханического факультета ИрГУПС Иркутск, 2011. - С. 89-92.

9. Шрамко С.Г. Способ повышения тягово-энергетических характеристик электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения / Шрамко С.Г., О.В. Мельниченко, Портной А.Ю. // Электропривод на транспорте и в промышленности: труды Всероссийской Научно-практической конференции: 25-27 сентября 2013 г.- Хабаровск: ДВГУПС, 2013, С. 197-199.

10. Шрамко С.Г. Способ повышения коэффициента мощности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения / Шрамко С.Г., О. В. Мельниченко, Портной А.Ю. // Вестник Института тяги и подвижного состава / Под ред. А.Е. Стецюка и Ю.А. Гамоли. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2013. – Вып. 9. – 110 с.: ил. С. 4-7.