

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ЖЕЛЕЗНОДОРЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I»
(ФГБОУ ВПО ПГУПС)

Московский пр., д.9, Санкт-Петербург, 190031
Телефон: (812) 457-86-28, факс: (812) 315-26-21
E-mail: dou@pgups.edu, http://www.pgups.ru
ОКПО 01115840, ОГРН 1027810241502,
ИНН 7812009592 / КПП 783801001

26.11.2015 № 005.05.5-40/89
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ
Проектор по научной работе
д.т.н., профессор
Г.С. Титова
«25» ноября 2015г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Мельниченко Олега Валерьевича «Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

1. Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Мельниченко Олега Валерьевича посвящена важной народно-хозяйственной проблеме, направлена на совершенствование тяговых электроприводов электровозов переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения и повышение их энергетической эффективности. Тема исследования является актуальной, так как повышение энергетической эффективности эксплуатации электровозов переменного тока обеспечит значительное снижение затрат на тягу поездов и повысит уровень безопасности движения, что отражено в программе «Энергетическая стратегия холдинга «РЖД» на перспективу до 2030 года».

Сегодня отечественные электровозы переменного тока с коллекторными тяговыми электроприводами не отвечают современным требованиям по ряду параметров, наиболее существенными из которых являются коэффициент мощности и коэффициент искажения синусоидальности напряжения контактной сети. Принципы работы электровозов и построение их силовых схем имеют ряд существенных недостатков, в частности типовые алгоритмы управления преобразователями порождают при их работе значительные гармонические составляющие напряжения в контактной сети с одновременным значительным потреблением реактивной мощности. Это приводит к повышенным потерям энергии в системе электроснабжения,

сокращению срока службы изоляции электрических машин и аппаратов, к ухудшению работы средств связи, к сбоям в работе систем управления преобразователями электровозов.

Однако с развитием микропроцессорной техники и управляемых полупроводниковых приборов в настоящее время имеется возможность реализовать принципиально новые научно-технические решения тех задач, которые наиболее остро стояли перед учёными последние 35-40 лет. Именно такие решения представлены и исследованы в настоящей диссертационной работе и соответствуют выбранной теме.

2. Степень обоснованности основных научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

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

Обоснованность основных научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается значительным объёмом выполненных под научным руководством автора научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, завершившихся разработкой способов и средств повышения энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока, изготовлением опытных образцов, проведением их испытаний и дальнейшим тиражированием.

Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на международных, всероссийских, отраслевых и региональных симпозиумах, конференциях, выставках и конкурсах в Москве, Санкт-Петербурге, Новочеркасске, Новосибирске, Томске, Иркутске, Чите, Хабаровске в 2007 – 2015 годах.

3. Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность выполненной диссертационной работы подтверждается результатами аналитических и экспериментальных исследований, проводимых на лабораторных стендах, внедрением их результатов на реальные электровозы с последующими эксплуатационными испытаниями, их сравнительным анализом, наличием ряда патентов на изобретения, а также использованием численных методов решения интегральных и дифференциальных уравнений, теории преобразовательных устройств.

Научная новизна аналитических и экспериментальных исследований, выполненных автором и представленных в диссертации, заключается в следующем:

- предложена концепция, позволяющая реализовать математическое моделирование обобщенной модели системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз», провести исследования сложных электромагнитных процессов, протекающих в электровозе с учетом всех предложенных научно-обоснованных технических решений, направленных на повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов в режимах тяги и рекуперативного торможения. Результаты исследований электромагнитных процессов, полученные на математической модели, имеют удовлетворительную сходимость с экспериментальными кривыми тока и напряжения, полученными при испытаниях электровозов в условиях эксплуатации;

- предложены: принцип, структура и схемное решение выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) на основе IGBT-транзисторов с частотой коммутации, соответствующей частоте питающей сети. Предложен принципиально новый подход к организации управления ВИП электровоза на основе IGBT-транзисторов и его алгоритмам управления, позволяющий значительно скомпенсировать индуктивный характер нагрузки электровоза. Ожидаемое среднее увеличение коэффициента мощности в режиме тяги составляет 24 %, в режиме рекуперативного торможения 36 %. Предложена силовая схема тягового электропривода электровоза, которая в дальнейшем позволит реализовать поосное регулирование сил тяги и торможения, что будет способствовать дополнительной экономии электроэнергии на тягу поездов;

- предложены способы управления тиристорным ВИП, позволяющие повысить коэффициент мощности электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения, и заключающиеся в сочетании включения параллельно цепи выпрямленного тока диодного разгрузочного плеча и применения новых разнофазных способов управления ВИП с учетом процессов коммутации тиристоров ВИП электровоза и в совокупности с особенностями контактной сети и ее распределенными электрическими параметрами;

- впервые исследован способ повышения работоспособности ВИП электровоза при частичном пропуске импульсов управления за счет резервирования аварийных плеч ВИП диодным плечом и организации работы ВИП по усовершенствованному алгоритму управления с одновременной коммутацией тиристорных плеч, позволяющий машинисту электровоза довести поезд до ближайшей станции без возникновения опасных бросков тока тяговых двигателей;

- предложены энергосберегающие алгоритмы разнофазного управления ВИП электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения, которые при их реализации не приводят к снижению выпрямленного напряжения на тяговых двигателях электровоза. В тоже время за счёт разработанных цифровых фильтров, разнофазное управление обеспечивает как повышение коэффициента мощности, так и снижение коэффициента искажения синусоидальности кривой

напряжения контактной сети.

4. Оценка структуры и содержания диссертационной работы

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

Содержание и структура диссертации логически связаны, соответствуют поставленной цели и задачам. Язык и стиль оформления диссертации на качественном уровне, содержательно представлены выводы исследований.

Во введении показана актуальность выбранного направления исследования, сформулирована цель, приведена научная новизна, степень достоверности, практическая значимость полученных результатов и дана информация об апробации полученных положений исследования.

В первом разделе автором проведен анализ известных способов повышения энергетических показателей тяговых электроприводов электровозов переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения. Обозначено направление исследования в области повышения энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов. Поставлены четкие задачи для достижения поставленной цели.

Во втором разделе проведено детальное аналитическое исследование физических процессов работы ВИП электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения методом анализа мгновенных схем замещения при типовом и предлагаемом алгоритмах управления с включением диодного разгрузочного плеча параллельно цепи выпрямленного тока; приведено обоснование усовершенствования алгоритма.

Ценность исследований заключается в предложенных способах управления ВИП, значительно повышающих коэффициент мощности электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения за счет совершенствования процесса основной коммутации тока тиристорных плеч ВИП, что позволило ускорить его и полностью исключить потребление реактивной энергии в контуре, в котором поток энергии был направлен из преобразователя в сеть.

В третьем разделе проведено аналитическое исследование системы разнофазного управления ВИП электровоза переменного тока при возникновении свободных высокочастотных колебаний в контактной сети. Автором предложены новые энергосберегающие алгоритмы разнофазного управления преобразователями электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения. Суть их заключается в задержке или опережении сигналов управления α_p фазовой коммутации различных групп ВИП на расчетное время, равное первому полупериоду послекоммутационных колебаний напряжения на токоприёмнике электровоза с учётом изменяющихся распределённых параметров контактной сети, что действительно приводит к эффективному гашению послекоммутационных

колебаний.

Энергосбережение достигается за счёт того, что автор предлагает интервалы необходимого опережения и отставания импульсов управления разнести на две полуволны напряжения тяговой обмотки. Половинная интервальная задержка подается со знаком минус на один ВИП, со знаком плюс на другой. В следующий период для выравнивания токовой нагрузки между ВИП электровоза интервальные задержки импульсов управления меняются местами. Для того чтобы максимально эффективно использовать новые алгоритмы управления ВИП, автором был найден компромисс, который позволяет не только значительно снижать послекоммутационные колебания напряжения на токоприёмнике, но и эффективно повышать коэффициент мощности электровоза. Для этого предложено на интервале времени от 50 до 130 эл. град. полупериода напряжения реализовывать максимальное время задержки, равное полупериоду 7-ой гармоники сетевого напряжения, а на интервале времени от $\alpha_0 + \gamma$ до 50 эл. град. и 130 до 160 эл. град. производить задержку импульсов регулирования на минимальное время, равное полупериоду высокочастотной гармоники с максимальной её амплитудой. Причем, в моментах времени, где происходит ограничение угла α_p (в начале и конце полупериода напряжения), время задержки разнофазного управления сводится к нулю.

Автором разработаны алгоритмы и подпрограмма разнофазного управления ВИП электровоза для микроконтроллера, реализующие энергосберегающие способы разнофазного управления ВИП. Обоснована структура цифрового фильтра и выполнена его реализация в виде программного кода для микроконтроллера. Предложенные технические решения глубоко проработаны, научно обоснованы и могут быть рекомендованы к внедрению на всех электровозах переменного тока с тиристорными ВИП.

Четвёртый раздел посвящен обобщенной математической модели системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз», позволившей провести исследования процессов работы электровоза с учетом применения диодного разгрузочного плеча, разнофазного управления и новых алгоритмов управления ВИП в режимах тяги и рекуперативного торможения.

Математическая модель электровоза представляет сложную комплексную часть: силовая электрическая схема и система управления, состоящие из нескольких составных частей: тяговый трансформатор, ВИП и его системы управления, 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 блок формирования основных сигналов и сигналов разнофазного управления и блок распределительного устройства. Блок управления позволяет реализовать все основные вычислительные операции по управлению тяговыми электроприводами электровоза, а также предложенные способы и алгоритмы разнофазного управления ВИП для режимов тяги и

рекуперативного торможения. Алгоритм цифрового фильтра и алгоритм разнофазного управления ВИП реализованы на уровне программного обеспечения блока управления.

В пятом разделе автором достаточно информативно представлены результаты математического моделирования электромагнитных процессов в виде кривых напряжения и тока в первичной обмотке тягового трансформатора электровоза, выпрямленного напряжения тягового двигателя, тока ВИП, токов тиристорных плеч в коммутационный и в некоммутационный интервалы времени. Приведен гармонический состав переменного напряжения на токоприёмнике электровоза для типовых и предлагаемых способов управления в режимах тяги и рекуперативного торможения, а также коэффициент мощности электровоза. Доказаны преимущества предлагаемых технических решений.

В результате, при предлагаемом алгоритме и способах разнофазного управления ВИП в режиме тяги с включением диодного разгрузочного плача, коэффициент искажения синусоидальности напряжения контактной сети снизился на 50 %, коэффициент мощности электровоза повысился на 6,5 %, а угол сдвига фаз между входным током и сетевым напряжением уменьшился на 4,4 % относительно типового. Применение нового алгоритма и способа разнофазного управления ВИП с включением диодного разгрузочного плача в режиме рекуперативного торможения позволил повысить коэффициент мощности электровоза на 20 %, снизить коэффициент искажения синусоидальности на 35 %, а угол сдвига фаз между входным током и сетевым напряжением уменьшить на 30 % относительно типового управления ВИП.

Достигнутое значительное повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока позволит снизить негативное влияние на работу электронного и электрического оборудования, продлить их срок службы, а также повысить бесперебойность и безопасность движения поездов.

В шестом разделе рассмотрены аварийные процессы работы ВИП электровоза переменного тока в режиме тяги. Аварийные процессы работы ВИП могут быть вызваны отказами в работе системы управления ВИП, проявившиеся в виде пропусков подачи импульсов управления на те или иные тиристорные плечи.

Предлагаемый алгоритм управления на первой зоне регулирования при пропуске импульсов управления на плечи ВИП в режиме тяги обеспечивает резервирование за счёт диодного разгрузочного плача. На высших зонах регулирования пропуск импульсов управления тиристорного плача при предлагаемом алгоритме управления ВИП обеспечивает резервирование за счёт одновременного открытия параллельных плеч ВИП. На первой и высших зонах регулирования выпрямленное напряжение и ток двигателей электровоза всегда остаются регулируемыми и зависят от положения штурвала машиниста электровоза. Ценностью полученных результатов

является предлагаемый алгоритм управления с диодным разгрузочным плечом, обеспечивающим резервирование тиристорного плеча ВИП, не принявшего нагрузку на всех зонах регулирования, что даёт возможность машинисту электровоза довести поезд до ближайшей станции без образования опасных бросков тока для тяговых двигателей и другого электрооборудования электровоза.

В этом же разделе приведены результаты исследования на математической модели аварийных процессов ВИП при типовых алгоритмах управления и усовершенствованных, доказывающие эффективное повышение работоспособности ВИП с новыми алгоритмами управления.

Седьмой раздел посвящен разработке структуры, схемного решения и принципов управления ВИП на основе IGBT-транзисторов с частотой коммутации, соответствующей частоте питающей сети. Такой преобразователь позволит повысить коэффициент мощности тяговых электроприводов электровоза переменного тока до уровня 0,96.

Уникальными являются диаграммы управления ВИП для режимов тяги и рекуперативного торможения. Они разрабатывались исходя из нескольких критериев: коэффициент мощности электровоза должен быть максимально возможным, работа электровоза надёжна, а его система управления проста. Диаграмма управления содержит несколько интервалов, которые имеют различные углы наклона сигнала управления. Эти углы наклона определяют интенсивность нарастания выпрямленного напряжения в определённой области полупериода, что обеспечивает постоянное симметрирование тока сети относительно первой гармоники напряжения сети. Оригинальным является решение по организации работы плеч преобразователя электропривода электровоза с использованием диодного разгрузочного плеча, установленного параллельно цепи выпрямленного тока.

Восьмой раздел содержит технические решения, реализацию разработанных способов, результаты испытаний на лабораторных стендах и испытания на реальном электровозе, а также технико-экономическую оценку от внедрения данных способов. Необходимо также отметить, что в ходе выполнения лабораторных исследований были созданы стенды, которые могут использоваться в учебном процессе для подготовки специалистов в области железнодорожного транспорта.

Приведены результаты испытаний и сравнительные исследования повышения работоспособности ВИП реального электровоза при аварийных режимах, связанных с частичным пропуском импульсов управления тиристорных плеч ВИП. Адекватность математической модели подтверждена сравнением результатов моделирования с осциллограммами, полученными на лабораторных стендах и при исследованиях на электровозах в условиях эксплуатации.

По результатам проведенных испытаний на лабораторных стендах ВИП электропривода электровоза на базе IGBT-транзисторов показана возможность увеличения коэффициента мощности электропривода

электровоза в режиме тяги в среднем на 20 %, а в режиме рекуперативного торможения – на 36 % относительно типового ВИП.

В заключении сформулированы основные результаты по диссертационной работе.

5. Значимость результатов диссертации для науки и практики

Научная значимость выполненной работы состоит в том, что соискателем разработана концепция комплексного подхода в проведении исследований на основе применения средств моделирования и проведения испытаний на реальных электровозах, выполнен значительный объём теоретических и аналитических исследований, разработаны научно-прикладные подходы и принципы, новые структуры и схемные решения, способы и алгоритмы, позволяющие значительно повысить (до уровня современных требований) энергетическую эффективность и работоспособность тяговых электроприводов электровозов переменного тока.

Следует отметить, что научно-техническая новизна подтверждена десятью патентами РФ на изобретения.

Практическая значимость работы определяется разработанной силовой схемой включения диодного разгрузочного плеча и конструкцией его исполнения в ВИП, позволяющим повысить энергетические показатели электровоза и его работоспособность. В настоящее время, предложенное автором решение, тиражирует ОАО «Электровыпрямитель» г. Саранск для модернизации электровозов переменного тока серий ВЛ80Р и ВЛ85.

Разработано схемное и конструктивное решение блока разнофазного управления ВИП электровоза, позволяющее реализовать энергосберегающие алгоритмы управления ВИП. Разработано схемное и конструктивное решение кассеты блока распределительного устройства для реализации новых алгоритмов управления ВИП. На все вышеперечисленные решения изготовлен комплект конструкторской документации, проведены четыре научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР), по результатам которых модернизированы семь опытных электровозов различных серий.

Предложенное автором техническое решение по использованию и управлению IGBT-транзисторами в схеме ВИП электровоза в настоящее время уже используются проектно-конструкторскими и научными организациями Новочеркасского электровозостроительного завода «НЭВЗ», ОАО «Электровыпрямитель», г. Саранск, Всероссийским научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом электровозостроения «ВЭлНИИ» для организации проведения НИОКР с последующей постройкой электровоза переменного тока 2ЭС5КМ «Байкал» в 2016-2017 гг.

6. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности

Диссертация соответствует заявленной специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы», так как содержит основные положения «Области исследований»:

1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем».

2. «Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем».

3. «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления».

4. «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

7. Соответствие автореферата диссертации ее содержанию

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

8. Замечания по диссертационной работе

1. В формулах (3), (4) автореферата и (3.9), (3.10) диссертации для частоты и угла сдвига фаз вынужденных послекоммутационных высокочастотных колебаний используются распределенные параметры емкости и индуктивности тяговой сети, в то время как в первой части формулы (3) и пояснений к ней они представлены как сосредоточенные.

2. В третьем и пятом разделах диссертации приведены осциллограммы напряжений сетевой обмотки трансформатора и выходного напряжения ВИП при разнофазном управлении, а также энергетические показатели электровоза. Не приведено обоснование выбора углов фазового сдвига по 7-й гармонике.

3. Из рисунков 3.19 и 3.21 неясно по каким параметрам принимается сдвиг фазового угла управления тиристорами ВИП при разнофазном управлении для высокочастотных гармонических составляющих.

4. В шестом разделе диссертации были предложены способы повышения работоспособности электроприводов электровозов только в режиме тяги, а для режима рекуперации нет. С чем это связано?

5. Неясно, как оценивалось в восьмом разделе диссертации увеличение средневзвешенного коэффициента мощности для режимов тяги и рекуперативного торможения перспективного электровоза с ВИП на основе приборов IGBT.

6. Почему в диссертации не были проведены исследования, направленные на создание двухзонного преобразователя на IGBT-транзисторах, так как это могло бы ещё больше упростить и удешевить стоимость электровоза?

7. В автореферате при перечислении отечественных ученых неправильно указаны инициалы д.т.н. Некрасова Олега Алексеевича, в

диссертации – д.т.н. профессора Некрасова Владимира Ивановича и д.т.н. Некрасова Олега Алексеевича.

9. Заключение по диссертации

На основании изучения диссертации, автореферата и работ соискателя, опубликованных по теме диссертации, можно сделать заключение, что диссертация Мельниченко Олега Валерьевича выполнена на высоком научном уровне, и представляет собой самостоятельное законченное исследование, в котором содержится решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение, изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие электроподвижного состава ОАО «РЖД» и страны в целом.

Диссертационная работа Мельниченко Олега Валерьевича соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Мельниченко Олег Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Заключение принято на заседании кафедры «Электрическая тяга» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I 17 ноября 2015 г., протокол № 3.

Заведующий кафедрой «Электрическая тяга» ПГУПС,
к.т.н., доцент Евстафьев Андрей Михайлович

д.т.н. профессор кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС
Никитин Виктор Валерьевич

профессор кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС,
к.т.н., доцент Якушев Алексей Яковлевич

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, ПГУПС
Тел. (812) 310-25-21, e-mail: dou@pgups.edu