

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента о диссертационной работе 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»

### **Актуальность темы диссертации**

Проблема снижения затрат электроэнергии на электроподвижном составе (ЭПС) железных дорог Российской Федерации, несмотря на многочисленные поиски и разработки в этой области многих ученых и инженеров, продолжает оставаться актуальной. В этой связи для Российских железных дорог разработана программа «Энергетическая стратегия холдинга «РЖД» на перспективу до 2030 года», в которой поставлены задачи по внедрению энерго- и ресурсосберегающих технологий и новых технических средств. В этой стратегии энергосбережение и повышение качества электроэнергии в контактной сети являются одними из основных направлений развития.

В настоящее время грузовые электровозы переменного тока типа ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ80ТК, 2ЭС5К, 3ЭС5К и 4ЭС5К чаще всего состоят из двух, трех или четырех секций, в каждой из которых находится 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). Эти электровозы по своим энергетическим показателям не отвечают современным требованиям. Общим недостатком современных тяговых электроприводов электровозов является значительное потребление реактивной мощности, а также искажение формы напряжения в первичной обмотке тягового трансформатора, которые и обусловливают низкие значения коэффициента мощности, не превышающие в режимах тяги 0,84 и рекуперативного

торможения 0,65. Кроме того, существующие типовые алгоритмы управления преобразователями вызывают значительные искажения напряжения в контактной сети. Низкие коэффициенты мощности тяговых электроприводов электровозов переменного тока в номинальных режимах, а также достаточно большие искажения синусоидальной формы кривой напряжения контактной сети влекут значительные затраты электроэнергии на тягу поездов. Все это позволяет утверждать, что одним из основных путей развития и совершенствования электровозов переменного тока, является целенаправленное изменение способов управления ВИП с введением в его схему диодного плеча, а также радикальное совершенствование силовой схемы самого ВИП путем замены тиристоров на современные силовые IGBT-транзисторы и применение новых алгоритмов его управления, направленных на значительное повышение коэффициента мощности тяговых электроприводов электровозов и снижение амплитуды гармоник напряжения в контактной сети.

Таким образом, выбранное направление диссертационного исследования О.В. Мельниченко является актуальным в условиях современного состояния развития электроподвижного состава Российской железных дорог и посвящено решению научной проблемы повышения энергоэффективности и работоспособности электроприводов электровозов переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения.

### **Структура диссертационной 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.

### **Оценка проведенного исследования и полученных результатов**

Во введении проведен анализ причин снижения энергетических показателей

электровозов переменного тока, изложены и обоснованы суть и актуальность решаемой в диссертации проблемы, формулируются цели и задачи диссертационной работы, отмечены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дана характеристика современного состояния рассматриваемых проблем повышения энергетических показателей электроприводов электровозов переменного тока. На основе выполненного анализа автор обоснованно показывает недостатки существующих решений по повышению энергетических показателей электровозов переменного тока. Автор аргументировано определяет пути повышения энергетической эффективности и работоспособности тяговых электроприводов электровозов переменного тока и на базе этого формулирует цель диссертационной работы и задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели.

Во второй главе Мельниченко О.В. детально анализирует физические процессы работы ВИП электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения методом анализа мгновенных схем замещения при типовом (без включения диодного плеча) и предлагаемых алгоритмах с включением диодного плеча параллельно цепи выпрямленного тока. Автор убедительно обосновывает повышение коэффициента мощности электропривода электровоза переменного тока при применении диодного разрядного плеча и новых алгоритмов управления преобразователями, заключающееся в том, что при включении разрядного диодного плеча процессы коммутации начинаются с началом каждого полупериода напряжения сети, а не только с началом угла периода  $\alpha_0$ , что приводит к уменьшению продолжительности времени коммутации по углу  $\gamma$  и обуславливает уменьшение падения выпрямленного напряжения в этом интервале времени.

Автором выявлено уменьшение реактивной энергии за счет включения параллельно инвертору диодного плеча в период коммутации, благодаря чему коммутационные процессы в тиристорах инвертора происходят быстрее за счет короткого замыкания обмоток трансформатора на интервале угла коммутации  $\beta$ . В результате уменьшения угла  $\delta$  происходит уменьшение угла сдвига фаз  $\phi$  и увеличение среднего напряжения инвертора, что повышает коэффициент мощности

электровоза.

Третья глава посвящена исследованию путей снижения коммутационных колебаний напряжения контактной сети. В ней детально выполнен анализ работы нескольких преобразователей со сдвигом во времени коммутации силовых полупроводниковых приборов. Автор обосновано доказывает, что применение новых энергосберегающих разнофазных алгоритмов управления (РФАУ) ВИП позволяют реализовать функцию фильтра высокочастотных колебаний возникающих при работе ВИП электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения и за счёт этого существенно снизить искажения синусоидальности напряжения контактной сети. При этом совместное применение диодного разрядного плеча с новыми алгоритмами управления ВИП позволяют дополнительно повысить и коэффициент мощности электровоза. Применение разнофазного управления ВИП связано только с уменьшением искажений кривой напряжения сети от действия фазовой коммутации тиристорных плеч ВИП.

К оригинальности авторской наработки необходимо отнести подход реализации РФАУ ВИП, который позволил не только снизить коммутационные искажения контактной сети, но и значительно повысить коэффициент мощности электровоза, что ранее в практике не встречалось.

В четвертой главе на основе анализа существующих математических моделей тягового электропривода электровоза и контактной сети, автором создана уточненная математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз». При этом особенно значима созданная автором подсистема блока управления, позволяющая при малых затратах времени проводить моделирование различных алгоритмов управления ВИП в одинаковых режимах и условиях нагрузки электровоза.

При реализации такого принципа формирования угла разнофазного управления гашение свободных колебаний напряжения на токоприемнике электровоза происходит дифференцировано, на интервале полупериода напряжения сети и изменения величины распределемых параметров контактной сети при движении электровоза с поездом на фидерной зоне участка тягового электроснабжения.

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.

Приведенные результаты исследования электромагнитных процессов работы ВИП в режимах тяги и рекуперативного торможения подтверждают правильность теоретических выводов, изложенных в предыдущих главах диссертации.

В шестой главе впервые предложен способ повышения надежности работы ВИП электровоза в режиме тяги при возникновении аварийного режима из-за пропуска импульса управления, подаваемого на тиристоры любого плача ВИП. Автор аналитическим анализом и математическим моделированием показывает, что предлагаемый алгоритм управления с диодным разрядным плечом обеспечивает наличие резерва любого тиристорного плача ВИП, не принявшего нагрузку на всех зонах регулирования, что даёт возможность машинисту электровоза довести поезд до ближайшей станции без образования бросков тока тяговых двигателей. Ранее из-за бросков тока тяговых двигателей электроприводов электровоза на перегоне, локомотивная бригада была вынуждена заказывать вспомогательный локомотив.

В седьмой главе автором предлагается разработанный на базе IGBT-транзисторов ВИП электровоза, который может уже сегодня заменить ВИП на тиристорах с минимальными изменениями его типовой силовой схемы. Применение полностью управляемых транзисторов в ВИП позволило разработать новые алгоритмы его управления в режимах тяги и рекуперативного торможения, которые значительно компенсируют индуктивный характер нагрузки электровоза и, соответственно, повышают его коэффициент мощности в номинальном режиме с величины 0,84 до 0,96. При реализации предлагаемой силовой схемы значительно сокращается количество датчиков (нет необходимости в датчиках угла коммутации и потенциальных условий), необходимых для работы системы управления электровоза. Предлагаемая силовая схема в режиме рекуперации не требует спе-

циальных мер по обеспечению устойчивости инвертора путем надёжного закрытия силовых приборов в плечах ВИП электровоза.

В восьмой главе представлены технические решения по реализации предлагаемых способов повышения энергетической эффективности электроприводов электровозов переменного тока, а так же результаты эксплуатационных испытаний электровоза с новым алгоритмом разнофазного управлением ВИП и диодным разрядным плечом. 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. Приведённые результаты исследования на стендах подтверждают адекватность математических моделей и полученных теоретических положений.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и технических решений**

Степень обоснованности научных положений, выводов и технических решений основывается на согласованности научных выводов и результатов экспериментов. Научные положения, выводы и технические решения, изложенные в диссертационной работе Мельниченко О.В., по мнению оппонента, достаточно обоснованы. В работе использовались методы, соответствующие объекту и предмету исследования. Теоретические основы представленных результатов заложены в трудах известных отечественных ученых и зарубежных специалистов, посвященных тяговому электроприводу и системам управления электровозов переменного тока.

Приведенный в диссертационной работе сравнительный анализ результатов аналитических и экспериментальных исследований тягового электропривода с новыми алгоритмами управления показал, что расхождение между этими результатами не превышают 10%.

## Научная новизна и практическая значимость работы

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке принципа, структуры и схемного решения ВИП на основе IGBT-транзисторов с частотой коммутации, соответствующей частоте питающей сети, а также его нового алгоритма управления, разработке способа управления ВИП, который позволяет повысить коэффициент мощности электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения с учетом включения параллельно цепи выпрямленного тока диодного плеча и применения нового энергосберегающего алгоритма разнофазного управления ВИП.

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

Практическая значимость заключается в том, что предложенная соискателем концепция комплексного подхода в проведении исследований на основе применения средств гибридного моделирования и проведения испытаний на реальном электровозе позволила минимизировать затраты на проведение НИОКР, получить схемные и конструктивные решения, сократить сроки внедрения предлагаемых решений, позволяющих повысить энергетические показатели электровоза и его работоспособность. Результаты диссертационной работы реализованы в полном объеме в ряде научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проведенных в период с 2005 по 2014 годы.

## Замечания по диссертации и автореферату

1. Считаю, что пункт 3.5 диссертации (стр. 134-141) является избыточным, и в нем было бы достаточно только общего описания предлагаемого алгоритма разнофазного управления с указанием отличия от алгоритма предложенного ВНИИЖТ.

2. В выводах по 4 главе указано, что создана уточненная математическая модель, но при этом нет конкретизации, какие параметры модели были уточнены. Недостаточно проанализированы критерии сравнения результатов моделирования.

3. В главе 8 не предоставлены коэффициенты подобия, которые должны подтверждать адекватность разработанной физической модели (стенда) электровоза, который выбран в качестве прототипа.

4. В тексте автореферата и диссертации имеются отдельные стилистические и грамматические ошибки. Имеется ряд неоправданных повторений одних и тех же фраз. См., например, п. 1-6, 8 на стр. 5 и 6 автореферата: «Электровозы переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения», т.е. 7 повторений, которые можно было поместить в начало текста.

### **Общие выводы**

Перечисленные недостатки существенно не влияют на научное содержание работы и не меняют высокой оценки диссертации О.В. Мельниченко.

Анализ содержания диссертации позволяет сделать заключение о высоком теоретическом уровне и практической значимости полученных в ней результатов, сделанных выводов и технических решений. Работа обладает четкой структурой, материал подается автором в логической последовательности, продиктованной поставленной целью и раскрывающими ее задачами. Её результаты являются оригинальными, своевременно опубликованы в научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, докладывались на международных, всероссийских, отраслевых и региональных симпозиумах, конференциях, выставках и конкурсах.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

В целом, считаю, что работа Мельниченко О.В выполнена на высоком научном уровне, и представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение, изложены новые на-

учно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие электроподвижного состава ОАО «РЖД».

Таким образом, диссертация Олега Валерьевича Мельниченко «Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока» соответствует всем критериям, предъявляемым к докторским диссертациям Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Официальный оппонент, доктор технических наук, профессор, академик Академии транспорта РФ и Академии электротехнических наук РФ, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры «Электромеханика и электрические аппараты», ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова».

Щербаков Виктор Гаврилович

346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, ЮРГПУ (НПИ), тел. (8635)255-215.

E-mail: emf@emf.srstu.novoch.ru

Личную подпись Щербакова В.Г. заверяю: ученый секретарь Ученого совета ФГБОУ ВПО ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова

Н.Н.Холодкова