

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию

Фадейкина Тимофея Николаевича

на тему «Исследование тяговых электроприводов с асинхронными двигателями для подвижного состава железных дорог с целью повышения их энергетической эффективности»

по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

### **Актуальность избранной темы**

Железнодорожный транспорт Российской Федерации в 2014 г. потребил более 5 % электрической энергии, выработанными всеми электростанциями России, что составило 39767000000 кВт·ч. На железных дорогах Российской Федерации в настоящее время эксплуатируется более 15000 единиц тягового подвижного состава (электровозов, электропоездов, автономных локомотивов, дизель-поездов), на котором в основном применяют тяговые двигатели постоянного (пульсирующего) тока в сочетании с различными системами регулирования движением поездов. В последние годы на тяговом подвижном составе (ТПС) железных дорог развитых стран Европы и РФ вместо электроприводов с коллекторными тяговыми электродвигателями постоянного (пульсирующего) тока стали применять электроприводы с бесколлекторными (асинхронными и синхронными и индукторными) тяговыми двигателями переменного тока.

Опыт эксплуатации показал, что электровозы ЭП20 имеют завышенный на 30...40% удельный расход электроэнергии к уровню лучших показателей электровозов с коллекторными тяговыми двигателями и потому, согласно распоряжению ОАО «РЖД» от 17.09.2007 №1808р «О планировании и нормировании расхода топливно-энергетических ресурсов», не являются энергоэффективными. Удельный расход электроэнергии электровозов 2ЭС10 в 2015 г. достиг 80,2 кВт·ч/10 тыс. т·км брутто в то время как у заменяемых ими аналогов

электровозов ВЛ15 удельный расход электроэнергии 67,4 кВт·ч/10 тыс. т·км брутто. Коэффициент полезного действия вновь приобретаемых электровозов, согласно технических условий, которые рассматривают и утверждают в ОАО «РЖД» не соответствует ГОСТ Р 55364-2012 «Электровозы. Общие технические требования» и ниже установленных в нем значений на 0,5...1%.

Основные показатели и характеристики входных преобразований электроподвижного состава (ЭПС) переменного и постоянного тока изучены достаточно подробно, но вопросам определения потерь мощности в конденсаторах их входных фильтров уделено недостаточно внимания, хотя эти потери также влияют на энергоэффективность тягового электропривода.

Поэтому в работе были определены потери мощности в конденсаторах фильтров входных преобразователей ЭПС, хотя основное внимание в ней, уделено определению энергоэффективности выходных блоков тяговых электроприводов, в первую очередь определяющих энергоэффективность тягового подвижного состава. Эти вопросы являются актуальными, особенно в условиях современного состояния экономики, когда требуется создавать высокоэкономичные промышленные и транспортные электроприводы.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

В качестве выходного звена в таких электроприводах используют модуль «автономный инвертор напряжения – тяговый двигатель переменного тока».

Основные показатели и характеристики входных и выходных звеньев статических преобразователей электроэнергии изучены достаточно подробно в работах российских и зарубежных исследователей. В этих публикациях рассматривают конкретные типы автономных инверторов напряжений (АИН) применительно к конкретному типу асинхронных тяговых двигателей (АТД), как правило, не приводятся никаких сравнительных данных по возможностям применения для этих целей АИН другого типа. В настоящей работе, определена энергоэффективность выходных модулей тяговых электроприводов перспективного

подвижного состава, содержащих АТД и АИН различных исполнений и даны рекомендации по рациональному построению автономных инверторов напряжения, обеспечивающих высокую энергоэффективность тягового электропривода.

**Достоверность и новизна, полученных результатов** диссертационной работы обоснована теоретически и подтверждается удовлетворительным совпадением полученных в работе результатов с данными экспериментальных исследований, полученных в ВЭлНИИ и приведённых в литературных источниках результатами работ других авторов, занимающихся исследованием и разработкой тяговых электроприводов со статическими преобразователями электроэнергии, выполненными на основе автономных инверторов напряжения. Научная новизна работы заключается в том, что в ней с применением современных средств и программ вычислительной техники:

- выполнен сравнительный анализ потерь мощности в блоках "автономный инвертор напряжения – асинхронный тяговый двигатель" для трёх видов автономных инверторов напряжения: двухуровневого АИН с амплитудной и широтно-импульсной модуляцией и трёхуровневого АИН;
- определена энергоэффективность блоков "автономный инвертор напряжения – асинхронный тяговый двигатель" применительно к использованию их в тяговом электроприводе перспективного электровоза.

**Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов** заключается в том, что её рекомендации могут быть полезными при разработке и создании статических преобразователей электроэнергии с автономными инверторами напряжения для тяговых электроприводов различных транспортных средств новых поколений; кроме того результаты диссертации используются в учебном процессе в МИИТе при изучении дисциплины "Электронные преобразователи для электроподвижного состава".

### **Оценка содержания диссертации, её завершенность**

Диссертация Фадейкина Т.Н., является законченной научно-квалификационной работой, в которой выполнен анализ выходных модулей тяговых электроприводов перспективных транспортных средств и на основании результатов выполненной работы проведён сравнительный технико-экономический анализ энергоэффективности предлагаемых решений.

Представленная диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 113 наименований.

Во введении приведена цель работы, методы исследований, научная новизна работы, практическая ценность и апробация работы, а также освещены недостаточно проработанные вопросы имеющихся публикаций.

Первая глава посвящена обзору электроприводов с асинхронными тяговыми двигателями автономного и неавтономного подвижного состава и определены общие энергетические показатели приведённых структур. Предложена обобщённая структура выходного модуля электрической части ТЭП, который является аналогичным как для автономного и неавтономного подвижного состава. Там же приведены аналитические соотношения для расчёта потерь мощности в выходном модуле.

Вторая глава посвящена исследованию и расчёту потерь мощности в конденсаторах выходных фильтров 4 q-S - и импульсного преобразователя ЭПС. Рассмотрены структуры входных преобразователей тяговых электроприводов существующих и перспективных транспортных средств. С применением математических моделей 4 q-S- преобразователя и импульсного преобразователя, реализованных в программных пакете Matlab Simulink, был выполнен гармонический анализ кривых выходных напряжений и с учётом схемы замещения конденсатора, предложенной проф. Ермуратским В.В., были рассчитаны потери мощности в конденсаторах выходных фильтров.

На основании выполненного в предыдущем разделе анализа потерь мощности в конденсаторах фильтров входных звеньев преобразователей электроэнергии, применяемых на электроподвижном составе железных дорог России, автор

предложил рекомендации по применению на ЭПС конденсаторов различных фирм - производителей.

Третья глава посвящена анализу энергоэффективности выходных модулей тяговых электроприводов. Автором были рассмотрены три вида АИН: двухуровневый АИН с амплитудной модуляцией, двухуровневый АИН с ШИМ, трёхуровневый АИН с ШИМ, укомплектованных IGBT- модулями различных классов, и рассчитаны потери мощности в преобразователях с учётом различных кратностях частоты модуляции.

Также в данной главе были рассчитаны потери мощности и КПД асинхронного тягового двигателя при питании его от АИН различных видов. С помощью программного пакета Matlab Simulink для получения кривых фазного тока и напряжения были использованы модели асинхронного тягового двигателя и автономного инвертора напряжения. Выполнен гармонический анализ кривых выходного напряжения и тока. Наиболее интересным представляются выводы автора на основании сравнительного анализа нескольких вариантов структур выходных модулей "АИН – АТД", в результате чего была предложена наиболее рациональная структура выходного модуля и алгоритм формирования кривой выходного напряжения АИН, обеспечивающие минимальные потери мощности в АИН и АТД. Рекомендации автора по применению трёхуровневых АИН с ШИМ дают возможность использовать при дальнейшей разработке структурных схем тяговых электроприводов подвижного состава.

Четвёртая глава является логическим завершением диссертации. В ней автором была выполнена оценка способов повышения энергетической эффективности тяговых электроприводов, которую можно получить при внедрении в них выходных модулей с АИН разных видов и различных алгоритмов формирования кривых выходного напряжения. С учётом рекомендаций, изложенных в "Методике определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем" для шестисекционного магистрального пассажирского двухсистемного электропоезда пятого поколения типа ЭП20 был рассчитан расход электроэнергии в выходном модуле для вышеперечисленных видов АИН и

установлено, что наиболее целесообразным является применение в выходных модулях перспективного ЭПС с АТД трёхуровневого АИН с ШИМ.

### **Достоинство и недостатки в содержании и оформлении диссертации.**

Диссертация является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на достаточно высоком уровне. Вместе с тем в диссертации следует отметить и недостатки:

1. В первой главе автор на рисунке 1.1 не указал, что является приводным двигателем генератора, если это газовая турбина, то возможно применение высокочастотных генераторов. При этом, соответственно, может измениться и структура преобразования электроэнергии с установкой в ней вместо выпрямителя и АИН непосредственного преобразователя частоты. Однако такой вариант в диссертации даже не упоминается. В первой главе приведены формулы и определения, которые автор впоследствии не использует в работе то же самое относится и ко входным преобразователям ЭПС, где указаны только выпрямители, хотя в работе рассчитывается 4 q-S - и импульсный преобразователи.

2. Во второй главе приводится пример импульсного преобразователя постоянного напряжения. Не указано, какого он типа - повышающего или повышающего? При расчёте потерь мощности в конденсаторе не слишком информативно выполнен рисунок схемы замещения конденсатора.

3. В третьей главе автор выбрал в качестве расчётной частоту выходного напряжения АИН, равную 25 Гц, хотя можно было рассчитать потери мощности и на других частотах. В автореферате приводится широко известная система уравнений, характеризующая работу асинхронного двигателя. Не показано, что автор работы внес нового. Желательно также привести тяговые характеристики электровозов с применением инверторов разных видов.

4. В четвёртой главе расчёт расхода электроэнергии производился только для условного профиля, хотя интересно было бы выбрать конкретный профиль участка, где эксплуатируются данные электровозы, и для него рассчитать расход электроэнергии с вышеперечисленными видами АИН.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общую достаточно высокую оценку теоретических и практических . результатов диссертационного исследования.

### **Соответствие автореферата основному содержанию диссертации**

Автореферат в полной мере соответствует основному содержанию диссертации.

### **Соответствие диссертации и автореферата требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011**

Диссертация и автореферат соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления» М.: Стандартинформ. – 2012.

### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней**

Диссертация Фадейкина Тимофея Николаевича на соискание учёной степени кандидата технических наук соответствует критериям, установленным «Положении о присуждении ученых степеней»,

- по пункту 10 – работа написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствуют о личном вкладе автора диссертации в науку. Диссертация имеет прикладной характер, полученные автором научные результаты могут быть применены для повышения энергоэффективности тяговых электроприводов перспективного подвижного состава. Предложенные автором решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями;

- диссертация соответствует пунктам 11 и 14 Положения, результаты работы опубликованы в 7 изданиях, 3 из которых входят в перечень рецензируемых

научных изданий ВАК РФ. Все заимствованные материалы имеют ссылки на источники. В диссертации автор использует результаты научных работ, выполненных им лично и в соавторстве, что отмечено в работе.

Диссертация Фадейкина Тимофея Николаевича на соискание ученой степени кандидата технических наук является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технические, технологические решения, имеющие важное значение в условиях современного состояния экономики, когда требуется создавать высокоэкономичные промышленные и транспортные электроприводы, что соответствует требованиям п. 9 «Положении о присуждении ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Официальный оппонент

Никифорова Нина Борисовна, кандидат технических наук

05.22.07 - «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»

129626, г. Москва, ул.3-я Мытищинская, д. 10.,

телефон: 8 (499) 260-42-38,

Электронная почта: press@vniiizht.ru

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»), отдел «Тяговый подвижной состав», ведущий научный сотрудник.

27.09.16

Дата  
печать организации



Н.Б.

Н.Б. Никифорова

Никифорова Н.Б.  
зубчатая в. енг. Илья -  
и.и. Ильинова

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента на диссертацию**  
**Фадейкина Тимофея Николаевича**  
**на тему «Исследование тяговых электроприводов с асинхронными**  
**двигателями для подвижного состава железных дорог с целью повышения их**  
**энергетической эффективности»**  
**по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы**  
**на соискание ученой степени кандидата технических наук**

**Актуальность избранной темы**

На первых этапах развития тяговых электроприводов с асинхронными тяговыми двигателями (АТД) на электроподвижном составе переменного тока были реализованы структуры, содержащие входной управляемый выпрямитель и выходной автономный инвертор тока, питающий асинхронные тяговые двигатели.

Однако успехи в создании элементной базы силовой электроники, и в частности, освоение серийного производства силовых управляемых ключевых элементов на токи до 750 А и рабочие напряжения до 6500 В позволили в качестве регуляторов режимов работы мощных асинхронных тяговых двигателей применять автономные инверторы напряжения.

Авторы имеющихся публикаций рассматривают конкретные типы АИН применительно к конкретному типу АТД, не приводя ни каких сравнительных данных по возможностям применения для этих целей АИН другого типа. Поэтому диссертационная работа Фадейкина Т.Н. посвящённая исследованию тяговых электроприводов с асинхронными двигателями для подвижного состава железных дорог с целью повышения их энергетической эффективности, является актуальной, и представляет значительный интерес при создании перспективного подвижного состава.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Научные положения, выводы и рекомендации диссертации имеют явно выраженный научно-практический характер и были получены в результате использования методов теории электрических линейных и нелинейных цепей, численные и аналитические методы решения дифференциальных уравнений, методы анализа электрических машин переменного тока при несинусоидальных токах и напряжениях, методы анализа электромагнитных процессов и расчёта полупроводниковых приборов и преобразователей. С применением программного пакета Mathcad, Matlab Simulink с последующим использованием программы Excel был выполнен спектральный анализ токов и напряжений на конденсаторах фильтра и АТД методом быстрого преобразования Фурье.

**Достоверность и новизна, полученных результатов работы обоснована теоретически и подтверждается удовлетворительным совпадением полученных в работе результатов по определению КПД и потерь мощности в автономных инверторах напряжения и асинхронных тяговых двигателях, с полученными данными НИИ и в работах других авторов.**

Научная новизна работы заключается в том, что в ней:

1. Разработана обобщённая структура электрической части тягового электропривода для различных типов подвижного состава, позволяющая установить общие закономерности в процессах передачи электроэнергии от источника электроэнергии к тяговому двигателю локомотива;
2. Разработана методика оценки энергетических показателей отдельных звеньев статических преобразователей электроэнергии в обобщённой структуре электрической части тягового электропривода при несинусоидальных токах и напряжениях.
3. Выполнен сравнительный анализ потерь мощности в модулях «автономный инвертор напряжения – тяговый двигатель переменного тока» для трёх видов автономных инверторов напряжения: двухуровневых АИН с амплитудной и широтно-импульсной модуляцией ШИМ и трёхуровневого автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией.

## **Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов:**

1. Результаты могут быть использованы при разработке и создании статических преобразователей электроэнергии с автономными инверторами напряжения для тяговых электроприводов различных транспортных средств.
2. Результаты диссертации используются в учебном процессе в МИИТе при изучении дисциплины "Электронные преобразователи для электроподвижного состава".
3. В результате выполненных расчётов потерь энергии в выходных модулях тяговых электроприводов, содержащими двух- и трёхуровневые АИН с разными алгоритмами управления, определены коэффициенты полезного действия этих модулей и показано, что для обеспечения высокой энергоэффективности перспективного тягового подвижного состава с АТД наиболее целесообразно применение в выходных модулях тяговых электроприводов трёхуровневых АИН с ШИМ.

### **Оценка содержания диссертации, её завершенность**

Рецензируемая диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 113 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, не вызывающая сомнения поскольку энергоэффективность преобразователей электроэнергии тяговых электроприводов и исполнительных двигателей является определяющей при оценке энергоэффективности транспортных средств. Там же указаны использованные в работе методы исследования.

В первой главе на основе анализа возможных структур тяговых электроприводов прилагается обобщённая структура электрической части тягового электропривода, позволяющая выделить в ней аналогичные звенья, используемые в тяговых электроприводах автономных и неавтономных транспортных средств.

Таким звеном или модулем, исследованию энергетических характеристик которого и посвящена в основном рецензируемая работа, является модуль, содержащий автономный инвертор напряжения и асинхронный тяговый двигатель.

По первой главе можно сделать следующие замечания:

- в тяговом электроприводе автономных локомотивов, в частности, газотурбовозов, могут использоваться высокочастотные синхронные генераторы. В этом случае система преобразования энергии могла бы существенно упроститься за счёт использования вместо двухзвенного преобразователя "выпрямитель – инвертор" непосредственного преобразователя частоты. Однако в диссертации об этом ничего не сказано;

- на наш взгляд, автор указывая на возможность использования для оценки энергетических характеристик преобразователей интегрального показателя  $\eta \lambda$ , не указал почему этот показатель он не использовал в своей работе.

Вторая глава посвящена анализу электромагнитных процессов в конденсаторах фильтров входных преобразователей электроподвижного состава переменного и постоянного тока и определению потерь мощности в этих конденсаторах. Достоверность полученных в данной главе результатов и предложений по элементной базе фильтров не вызывает сомнений, поскольку автор использует при анализе работы конденсатора широко известную в литературе и хорошо зарекомендовавшую себя модель конденсатора предложенную профессором Ермуратским В.В.

В качестве замечания по второй главе отметим, что автор в качестве одного из вариантов входного преобразователя электроподвижного состава переменного тока рассматривает диодный выпрямитель. Такие преобразователи имеющей на выходе сглаживающий дроссель и могут работать только в сочетании с выходным автономным инвертором тока, что не является рациональным решением для перспективного электроподвижного состава. Поэтому этот материал можно было бы без ущерба для качества диссертации убрать.

В третьей главе являющейся как бы основной составляющей частью диссертации, проанализирована энергоэффективность выходных модулей, состоящих из автономных инверторов напряжения разных видов и асинхронного тягового двигателя.

В рамках данной главы автор рассмотрел наиболее широко применяемые в электроприводах виды инверторов и выполнил сравнительную оценку потерь

мощности в них и питающихся от них асинхронных тяговых двигателей, чего не было в известных работах, выполненных на аналогичную тему.

При этом силовые цепи инверторах во всех во всех случаях выполнены на IGBT – модулях, что позволяет исключить из них обладающие низким КПД углем принудительной коммутации. Только такие инверторы будут применяться на перспективных транспортных средствах.

Следует отметить, что использую широко известную схему замещения асинхронного двигателя, автор учёл в ней высшие гармонические составляющие напряжения и тока, обусловленные реальной формой кривой выходного напряжения инвертора напряжения, что является достоинством и новым результатом рецензируемой работы.

По третьей главе можно сделать следующие замечания:

- автор выполнил спектральный анализ кривых выходного напряжения инверторов только для случая реализации системы управления с синусоидальной ШИМ. В тоже время перспективной является система управления, реализующая пространственно - векторную ШИМ, а анализа кривой выходного напряжения инвертора с такой системой управления в работе нет.

- в работе не рассмотрены многоуровневые, в частности, четырёх – пяти – и т.д. инверторы, хотя такие инверторы также могут найти себе применение в перспективных электроприводах.

В четвёртой главе выполнена оценка экономической эффективности от внедрения на электровозах современных статических преобразователей.

Автор использовал при анализе рекомендованную ОАО "РЖД" "Методику определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем", что подтверждает обоснованность выполненной в работе оценки, на основании которой рекомендовано в перспективных тяговых электроприводах использовать выходные модули с трёхуровневыми инверторами напряжения.

В качестве замечания по данной главе можно отметить, что экономическая эффективность оценена только для выходных модулей тяговых электроприводов,

хотя потери мощности, снижающие КПД электропривода, имеются и во входных модулях. А об этом автор не говорил.

Диссертация является завершённым научным исследованием, результаты и рекомендации которого могут быть использованы в практике создания тяговых электроприводов перспективных транспортных средств.

Диссертация написана грамотным языком и аккуратно оформлена, хотя рисунок 1.7 мог бы быть сделан лучше, например, как рисунок 1.6.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы и не влияют на теоретические и практические результаты диссертационного исследования.

#### **Соответствие автореферата основному содержанию диссертации**

Автореферат в полной мере соответствует основному содержанию диссертации.

#### **Соответствие диссертации и автореферата требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011**

Диссертация и автореферат соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления» М.: Стандартинформ. – 2012.

#### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней**

Диссертация Фадейкина Тимофея Николаевича на соискание учёной степени кандидата технических наук соответствует критериям, установленным «Положении о присуждении ученых степеней»,

- пункт 10 – диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствуют о личном вкладе автора диссертации в науку. Диссертация содержит рекомендации по использованию научных выводов, а предложенные автором решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями;

- пункт 11 – основные научные результаты диссертации опубликованы автором в 7 изданиях, 3 из которых входят в перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ.

- пункт 14 – в диссертационной работе автор надлежащим образом ссылается на авторов и источники заимствования материалов и отдельных результатов. В диссертации соискатель использует результаты научных работ, выполненных им лично и в соавторстве и отмечает это обстоятельство.

**Заключение о соответствии диссертации п.9 Положения о присуждении ученых степеней**

Диссертация Фадейкина Тимофея Николаевича на соискание ученой степени кандидата технических наук является самостоятельной оконченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи оценки повышения энергоэффективности тяговых электроприводов со статическими преобразователями электроэнергии и асинхронными двигателями имеющей существенное значение для электроэнергетических устройств транспортных средств, что соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Официальный оппонент,

Розанов Юрий Константинович,

доктор технических наук,

05.09.03 - «Электротехнические комплексы и системы»,

111250 г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, тел. м. 8-(916) 183 – 79 – 66,

эл. почта: [y.rozanov@mail.ru](mailto:y.rozanov@mail.ru)

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ»  
профессор кафедры «Электрические и  
электронные аппараты».

 Ю. К. Розанов

Подпись Розанова Ю.К. удостоверяю.

Подпись \_\_\_\_\_  
удостоверяю  
заместитель начальника управления  
по работе с персоналом

Е.Ю. Баранова

20.09.2016

