

ФАДЕЙКИН ТИМОФЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С
АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ДЛЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» (МГУПС (МИИТ)).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Иньков Юрий Моисеевич

Официальные оппоненты:

Розанов Юрий Константинович,
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»,
кафедра «Электрические и электронные
аппараты», профессор;

Никифорова Нина Борисовна,
кандидат технических наук, Акционерное
общество «Научно-исследовательский
институт железнодорожного транспорта»,
отдел «Тяговый подвижной состав»,
ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

«Научно-исследовательский и проектно-
конструкторский институт информатизации,
автоматизации и связи на железнодорожном
транспорте» (ОАО «НИИАС»)

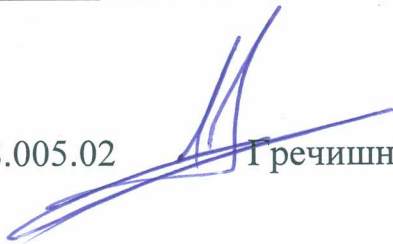
Защита состоится «12» октября 2016 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 218.005.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д.9, стр.9, ауд.2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МГУПС (МИИТ), www.mii.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 218.005.02

 Гречишников Виктор Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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, синхронными и индукторными) тяговыми двигателями переменного тока.

Основные показатели и характеристики входных преобразований электроподвижного состава (ЭПС) переменного и постоянного тока изучены достаточно подробно, но вопросам определения потерь мощности в конденсаторах их выходных 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 разработанности темы. В последние годы на российских железных дорогах, а ещё раньше и на железных дорогах передовых зарубежных стран всё шире начинают внедряться тяговые электроприводы с исполнительными двигателями переменного тока (синхронными, асинхронными и индукторными) и

разнообразными статическими преобразователями электроэнергии, которые, как правило, выполняют многозвенными.

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: А. Т. Буркова, А. В. Грищенко, Ю. М. Инькова, А. А. Зарифьяна, П. Г. Колпахчяна, В. А. Кучумова, В. В. Литовченко, А. П. Павленко, Я. Ю. Пармаса, К. С. Перфильева, Е. М. Плохова, Н. А. Ротанова, Л. Н. Сори́на, Б. Н. Тихменёва, Г. А. Федяевой, В. А. Шарова и других. В известных публикациях рассматривают конкретные типы автономных инверторов напряжений (АИН) применительно к конкретному типу асинхронных тяговых двигателей (АТД), не приводя ни каких 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.

Цели и задачи. Целью данной работы явились исследование энергоэффективности выходных модулей тяговых электроприводов железнодорожных транспортных средств, определение потерь мощности в фильтрах, применяемых в статических преобразователях электроэнергии этих приводов, и разработка рекомендаций по повышению энергоэффективности выходных модулей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать обобщённую структуру электрической части тягового электропривода для различных типов подвижного состава, позволяющую установить общие закономерности в процессах передачи электроэнергии от источника электроэнергии к тяговому двигателю локомотива;
- разработать методики оценки энергетических показателей отдельных звеньев статических преобразователей электроэнергии в обобщённой структуре электрической части тягового электропривода при несинусоидальных токах и напряжениях;

- рассчитать потери мощности в конденсаторах фильтров входных звеньев статических преобразователей тяговых электроприводов и сформулировать рекомендации по элементной базе этих фильтров;

- разработать математическую модель модуля «автономный инвертор напряжения – тяговый двигатель переменного тока» для исследования электромагнитных процессов в этом модуле и разработки рекомендаций по структуре и алгоритму управления автономным инвертором напряжения;

- на основании результатов выполненной работы провести сравнительный технико-экономический анализ энергоэффективности предлагаемых решений.

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 ценность работы:

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.

Методы исследований:

При выполнении исследований были использованы методы 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.

Положения, выносимые на защиту:

- сравнительное исследование несинусоидальных кривых выходных токов и напряжений АИН трёх типов и с различными алгоритмами формирования кривой их выходного напряжения, выполненное методом гармонического анализа;
- сравнительный анализ потерь мощности в модуле «АИН - АТД» и его КПД, выполненный с использованием современных вычислительных средств и программных пакетов;
- рекомендации по выбору энергосберегающей структуры выходного модуля, сформулированы на основании рассчитанного в работе условного расхода электроэнергии на тягу поездов электроподвижным составом с тяговыми электроприводами, содержащими АИН разных типов.

При этом под "условным расходом энергии" понимаем расход энергии на тягу поездов за единицу времени тяговыми электроприводами, выходные модули которых имеют различные структуры АИН и алгоритмы управления ими.

Степень достоверности результатов Достоверность 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 в ВЭлНИИ, СПГУПС и опубликованными в работах других авторов, занимающихся исследованием и разработкой тяговых электроприводов с автономными инверторами напряжения и асинхронными тяговыми двигателями.

Апробация работы проходила на проходила на XIV Международной научно-технической конференции "Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, образование и практика" (Фадеекин Т.Н. "Моделирование элементов тягового электропривода автономных транспортных средств", с. 336), на научно-практической конференции "неделя науки – 2011" (Фадеекин Т. Н. Симплексное управление автономным инвертором напряжения // Труды научно-практической конференции "Неделя науки -2011. Наука МИИТа – транспорту" Часть 1 – М. 1: МИИТ, 2011. С. III-108 - III-109), XVI Международной научно-технической конференции "Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, образование и практика ICPEES 2015", г. Кременчуг, Украина (Фадеекин Т. Н. "Моделирование элементов тягового электропривода автономных транспортных средств", с. 98), а также на научном семинаре кафедры "Электропоезда и локомотивы" в 2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели и решаемые в работе задачи, а также указаны использованные методы исследования.

В первой главе с целью разработки обобщённой структуры электрической части электропривода выполнен обзор электроприводов с асинхронными тяговыми двигателями автономного и неавтономного тягового подвижного состава.

Преобразовательные комплексы электроприводов автономного и неавтономного тягового подвижного состава (ТПС) имеют практически одинаковые структуры электрической части, причём преобразователи электрической энергии на ТПС обоих видов выполняют многозвенными т.е. состоящими из нескольких звеньев.

В качестве входного звена на автономном ТПС используют бестрансформаторный многофазный выпрямитель, а на неавтономном ТПС – трансформаторный выпрямитель или четырёхквadrантный преобразователь.

Хотя в общем случае исполнительный механизм включает в себя тяговый двигатель переменного тока (синхронный, асинхронный или индукторный) редуктор и колёсную пару, в рамках данной работы, посвящённой исследованию электрической части тяговых электроприводов рассматривается только асинхронный тяговый двигатель, как элемент электрической части электропривода.

Входные звенья преобразователей электроэнергии (преобразовательных комплексов) автономных локомотивов и электроподвижного состава (ЭПС) переменного тока представляют собой многофазные или однофазные выпрямительные установки, исследованию и созданию которых, а также оценке их энергетических показателей посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных авторов. На ЭПС постоянного тока в качестве входного звена преобразователя электроэнергии применяют импульсные преобразователи постоянного напряжения (ИППН).

В то же время выходные звенья (модули) тяговых электроприводов, в которых в последнее время всё более широко стали применять автономные инверторы напряжения, исследованы в совокупности с асинхронным двигателем ещё недостаточно детально, в том числе, и с точки зрения сравнительной оценки их энергетических показателей.

Алгоритм формирования кривой выходного напряжения АИН, от которого существенно зависят потери мощности в двигателе, также оказывает значительное влияние на коэффициент полезного действия тягового двигателя, в качестве которого в работе рассмотрен трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (асинхронный тяговый двигатель – АТД). А эти вопросы в опубликованных источниках отражены недостаточно.

Поэтому основное внимание в работе уделено сравнительной оценке энергетических показателей выходного модуля преобразователя тягового электропривода, состоящего из автономного инвертора напряжения того или иного вида и асинхронного тягового двигателя (рисунок 1). В работе мы назвали эту часть электропривода выходным модулем.

К основным показателям, определяющим энергоэффективность выходного модуля (и тягового электропривода в целом), принято относить коэффициент полезного действия η_m и коэффициент мощности λ_m на выходе автономного инвертора напряжения (АИН) (на входных зажимах асинхронного тягового двигателя – АТД). Иногда используют ещё, так называемый, энергетический коэффициент полезного действия η_Σ , равный произведению η_m на λ_m .

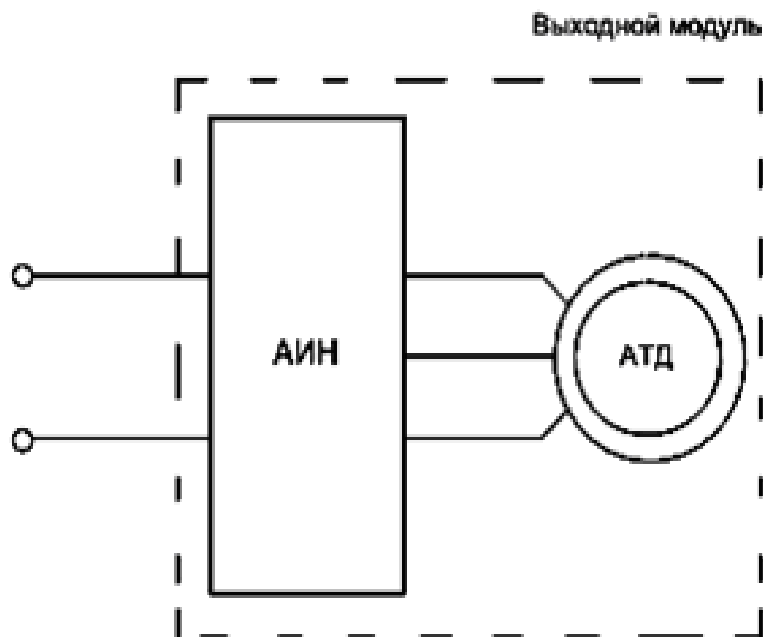


Рисунок 1 - Структура выходного модуля электрической части ТЭП

Поскольку в данной работе основное внимание уделено вопросам повышения энергоэффективности тягового подвижного состава, а именно, снижению расхода электроэнергии на тягу поездов за счёт уменьшения потерь мощности в выходном модуле тягового электропривода, в диссертации проанализированы только потери мощности в выходном модуле и его КПД при несинусоидальных токах и напряжениях.

В рассматриваемом случае потери мощности в модуле равны:

$$\Delta P_m = \Delta P_{\text{АИН}} + \Delta P_{\text{АТД}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{АИН}}$ - потери мощности в АИН; $\Delta P_{\text{АИН}} = \Delta P_{\text{кз}} + \Delta P_{\text{су}}$; $\Delta P_{\text{кз}}$ - потери мощности в ключевых элементах силовой цепи АИН; $\Delta P_{\text{су}}$ - мощность системы управления; $\Delta P_{\text{АТД}}$ - потери мощности в АТД.

Вторая глава посвящена исследованию и расчёту потерь мощности в конденсаторах выходного фильтра при питании от 4 q-S (четырёхквadrантного)

преобразователя. На выходе этих преобразователей (на входе АИН) включены фильтровые конденсаторы C и резонансная цепочка L_2, C_2 (рисунок 2). Потери мощности в этих конденсаторах также влияют на потребление электроэнергии на тягу электроподвижным составом. Поэтому их необходимо учитывать при определении энергоэффективности тяговых электроприводов.

На схеме замещения (рисунок 2) трансформатор обозначен через L_1, R_1 и E_1 .

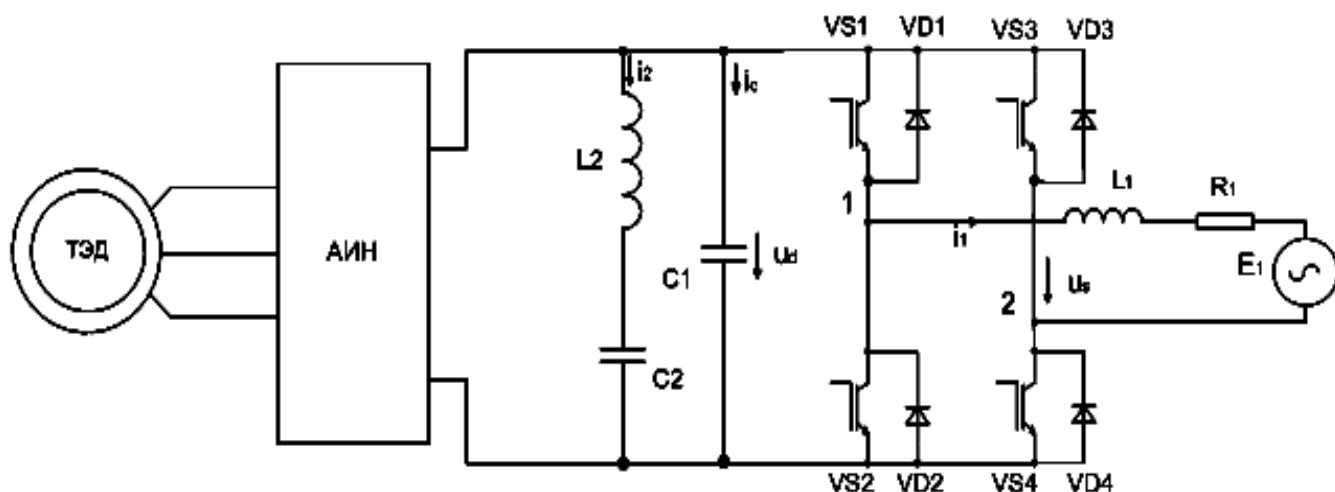


Рисунок 2 – Расчётная схема 4q-S преобразователя

В диссертации на модели конденсатора, предложенной проф. В.В. Ермуратским, для имеющей значительные искажения кривой выходного напряжения 4 q-S преобразователя, выполнен сравнительный расчёт и анализ потерь мощности в промежуточных фильтрах, укомплектованных конденсаторами различных фирм – изготовителей.

Применительно к электровозу типа ЭП20 («Олимп») конденсатор, установленный на выходе 4 q-S преобразователя, имеет ёмкость, равную 3200 мкФ при напряжении в промежуточном контуре, равном 4 кВ.

Такой фильтр может быть сформирован из трёх параллельно соединённых конденсаторов типа К 75 – 88 или также из трёх конденсаторов типа DKTFM4000 I 1097 (фирма AVX, Франция), имеющих такие же параметры. В результате расчётов было установлено, что потери мощности в фильтре укомплектованном конденсаторами типа К75 – 88, составили 68.6 Вт (на один ТЭД); в фильтре укомплектованном конденсаторами типа DKTFM4000 I 1097, потери мощности

составили 9.3 Вт, т.е. на 86 % меньше, чем потери мощности в фильтре, укомплектованном отечественными конденсаторами. Это приводит к увеличению КПД входного преобразователя на 4.8 % и соответствующему снижению расхода электроэнергии на тягу поездов.

Третья глава посвящена анализу энергоэффективности выходных модулей перспективного тягового подвижного состава.

При этом были проанализированы следующие виды АИН: двухуровневый АИН с амплитудной модуляцией (АМ) выходного напряжения, двухуровневый АИН с ШИМ выходного напряжения, трёхуровневый АИН с ШИМ выходного напряжения.

Силовые цепи современных АИН комплектуют IGBT – модулями. Потери мощности в транзисторе модуля ΔP_{IGBT} состоят из статических $\Delta P_{IGBT-ST}$ и динамических $\Delta P_{IGBT-SW}$ потерь. Встречно – параллельно каждому транзистору АИН подключен диод, потери мощности в котором $\Delta P_{VD} = \Delta P_{VD-ST} + \Delta P_{VD-SW}$.

Для двухуровневых АИН, укомплектованных транзисторными модулями типа CM600HG - 130HE фирмы Mitsubishi Electric, были рассчитаны потери мощности и КПД АИН.

Расчёт потерь мощности и КПД трёхуровневого АИН был выполнен на примере АИН, укомплектованного модулями типа CM1000HC-66R фирмы Mitsubishi Electric, поскольку напряжение, прикладываемое к модулям трёхуровневого АИН, вдвое меньше напряжения, прикладываемого к модулям двухуровневых АИН.

Результаты сравнительных расчётов потерь мощности и КПД АИН различных видов, отнесённых к одному АТД мощностью 1200 кВт, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Потери мощности и КПД АИН различных видов

Тип преобразователя	Двухуровневый АИН с АМ	Двухуровневый АИН с ШИМ	Трёхуровневый АИН с ШИМ
Общие потери, кВт	6,1	7,5	5,9
КПД преобразователя	99,5	99,4	99,6

В работе были рассчитаны потери мощности и КПД асинхронного тягового двигателя при питании его от различных инверторов.

Количественная оценка влияния несинусоидальности кривых выходного напряжения и тока АИН выполнена применительно к Т-образной схеме замещения асинхронного электродвигателя, в которой дополнительно учтены высшие гармонические составляющие токов обмоток статора и ротора.

Для получения кривых фазного тока с помощью средств программного пакета "MatLab Simulink" была использована модель асинхронного тягового двигателя в пакете MatLab. В блок Asynchronous Machine были заложены характеристики асинхронного двигателя типа ДТА-1200А, применяемого на электровозах типа ЭП20.

Тяговый электродвигатель имеет следующие основные технические характеристики (для синусоидальных напряжений и токов) при частоте 50 Гц: номинальная мощность $P = 1200$ кВт, номинальное фазное напряжение $U_{\phi} = 891$ В, номинальный фазный ток $I_{\phi} = 358$ А, коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,861$, коэффициент полезного действия $\eta = 0,963$.

Уравнения электрической части двигателя имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} u_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} - \omega \psi_{ds}; \\ u_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \omega \psi_{qs}; \\ u'_{qr} &= R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \psi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \psi'_{dr}; \\ u'_{dr} &= R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \psi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \psi'_{qr}; \\ T_e &= 1.5 (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}$, $\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}$, $\psi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}$, $\psi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}$, $L_s = L_{ls} + L_m$, $L'_r = L'_{lr} + L_m$.

d - проекция переменной на ось d ; q - проекция переменной на ось q ; r - индекс, обозначающий параметр или переменную ротора; s - индекс, обозначающий параметр или переменную статора; L_s - индуктивность рассеяния; L_m - индуктивность цепи намагничивания.

Механическая часть машины описывается двумя уравнениями:

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_m - T_m); \quad (3)$$

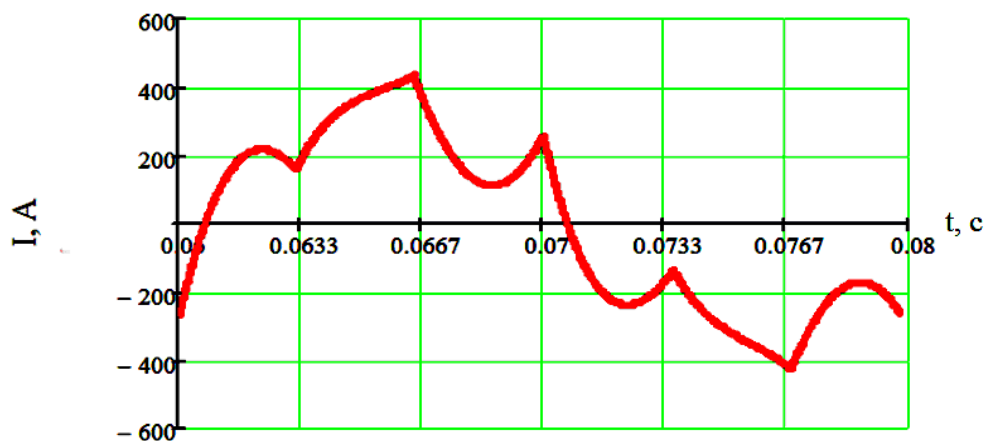
$$\frac{d}{dt}\Theta_m = \omega_m, \quad (4)$$

где: R_s, L_{ls} – активное сопротивление и индуктивность рассеяния статора; R'_r, L'_{lr} – активное сопротивление и индуктивность рассеяния ротора; L_m – индуктивность цепи намагничивания; L_s, L'_r – полные индуктивности статора и ротора; U_{qs}, i_{qs} – проекции напряжения и тока статора на ось q ; u'_{qr}, i'_{qr} – проекции напряжения и тока ротора на ось q ; u_{ds}, i_{ds} – проекции напряжения и тока статора на ось d ; u'_{dr}, i'_{dr} – проекции напряжения и тока ротора на ось d ; Y_{qs}, Y_{ds} – проекции потокосцепления статора на оси d и q ; ψ'_{dr}, ψ'_{qr} – проекции потокосцепления ротора на оси d и q ; ω_m – угловая частота вращения ротора; Θ_m – угловое положение ротора; p – число пар полюсов; ω_γ – электрическая угловая частота вращения ротора ($\omega_m \times p$); Θ_γ – электрическое угловое положение ротора ($\Theta_m \times p$); T_e – электромагнитный момент; T_m – механический момент на валу; J – суммарный момент инерции двигателя и нагрузки; H – суммарная инерционная постоянная двигателя и нагрузки; F – суммарный коэффициент вязкого трения (двигателя и нагрузки).

Одним из способов повышения энергетических показателей асинхронных двигателей, питающихся от АИН, является применение в АИН широтно-импульсной модуляции кривой выходного напряжения.

Частота выходного напряжения АИН, равная 25 Гц, была выбрана для всех видов АИН для исключения влияния на форму кривой выходного напряжения инверторов ЭПС устройств железнодорожной автоматики, использующих рельсовые цепи. Кривые выходных напряжений и токов АИН (см. рисунки 3,4,5) были подвергнуты гармоническому анализу, в результате которого получены гармонические составы, этих кривых.

a)



б)

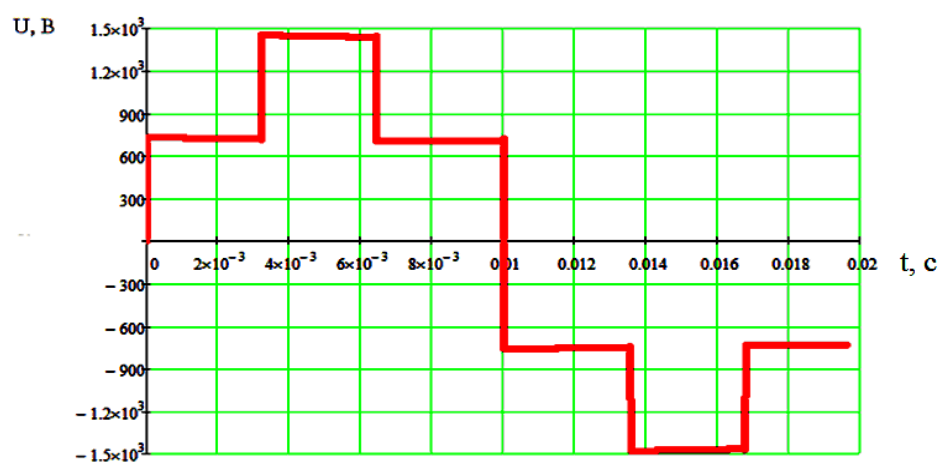
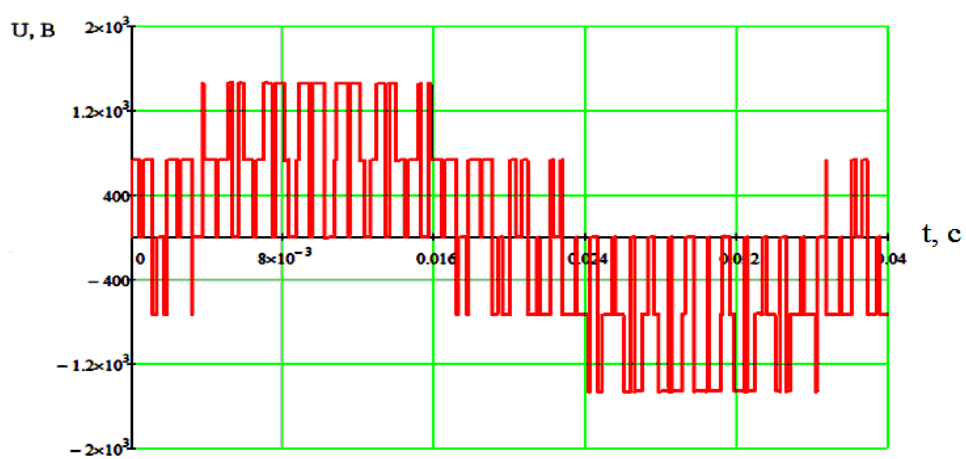


Рисунок 3 – Кривые выходного тока (а) и напряжения (б) трёхфазного АИН с амплитудной модуляцией

а)



б)

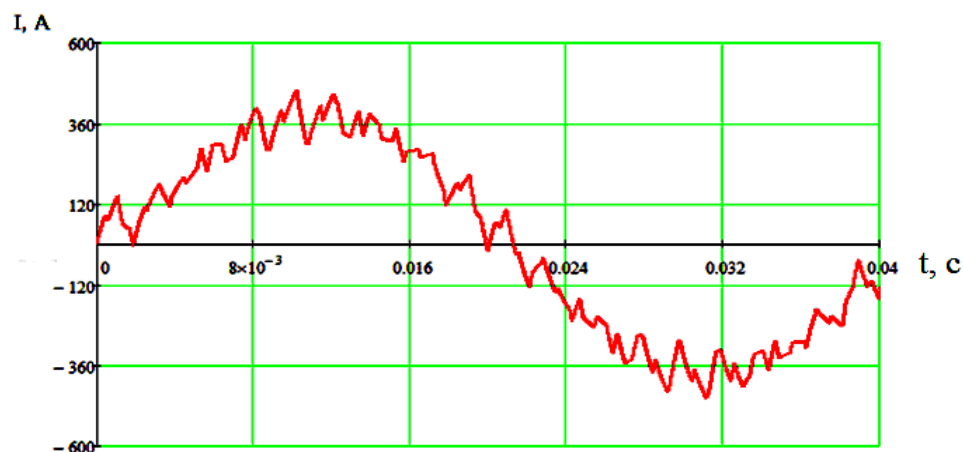
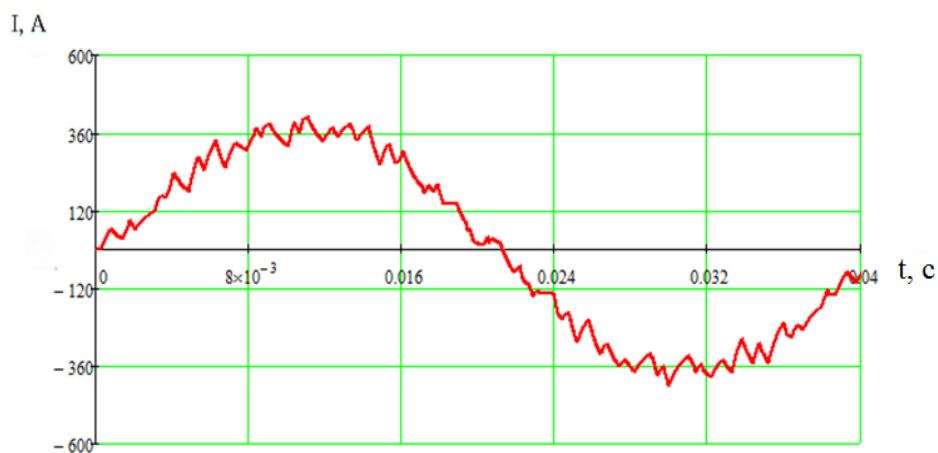


Рисунок 4 – Кривые выходного напряжения (а) и тока (б) двухуровневого АИН с широтно-импульсной модуляцией при частоте 25 Гц

а)



б)

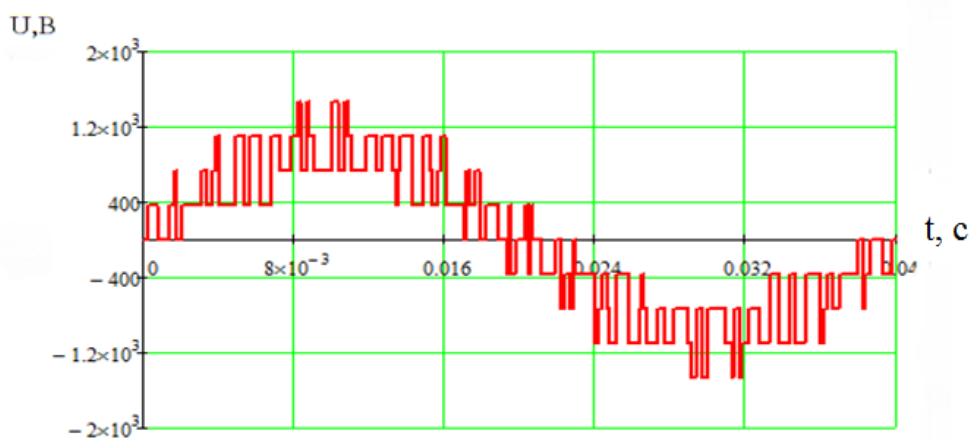


Рисунок 5 – Кривая выходного тока (а) и напряжения (б) трёхуровневого автономного инвертора напряжения с ШИМ при частоте 25 Гц

При питании асинхронного тягового двигателя от АИН потери мощности в нём можно определить по соотношению:

$$\Delta P = \Delta P_{sin} + \Delta P_{доб}, \quad (5)$$

где ΔP_{sin} - потери мощности в двигателе при питании его от источника синусоидального напряжения; $\Delta P_{доб}$ – добавочные потери мощности, обусловленные высшими гармоническими тока.

Таблица 5 - Основные технические характеристики двигателя типа ДТА-1200А при питании от двухуровневого АИН с амплитудной модуляцией

U_{ϕ}' В	I_{ϕ}' А	P_{nom} , кВт	η'
1430	396,6	57,14	0,955

Таблица 6 - Основные технические характеристики двигателя типа ДТА-1200А при питании от двухуровневого АИН с широтно-импульсной модуляцией

U_{ϕ}' В	I_{ϕ}' А	P_{nom} , кВт	η'
984	386	53,224	0,957

Из сравнения результатов, приведённых в таблицах 5 и 6, видно, что при питании асинхронного двигателя от двухуровневого АИН с амплитудной модуляцией потери мощности в нём составляют 57,14 кВт или возрастают по сравнению с потерями мощности при синусоидальном напряжении на 32,7 % (соответственно коэффициент полезного действия снижается до 0,955 или на 0,9 %). Применение ШИМ в АИН уменьшает КПД АД до 0,957.

Таблица 7 - Основные технические характеристики двигателя типа ДТА-1200А при питании от трёхуровневого АИН с широтно-импульсной модуляцией

U_{ϕ}' В	I_{ϕ}' А	P_{nom} , кВт	η'
979	377	51,65	0,959

Переход к трёхуровневым АИН с ШИМ уменьшает КПД до 0,959.

В четвёртой главе выполнена оценка способов повышения энергетической эффективности, которую можно получить при внедрении в тяговых электроприводах выходных модулей с АИН разных видов и различных алгоритмов формирования кривых выходного напряжения.

Одной из составляющих стоимости жизненного цикла подвижного состава, предложенной в "Методике определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем" (ОАО "Российские железные дороги", 2008 г.) являются технико-эксплуатационные показатели, включающие в себя в качестве основного компонента расход электроэнергии на тягу поездов.

В данной диссертационной работе на основании сравнительного анализа несколько вариантов структур выходных модулей «АИН-АТД» предложена наиболее рациональная с точки зрения минимизации потерь мощности структура выходного модуля и алгоритм формирования кривой выходного напряжения АИН, обеспечивающие минимальные потери мощности в АИН и АТД. В данном разделе определено снижение расхода электроэнергии на тягу поездов электровозом, оборудованным предлагаемым выходным модулем по сравнению с расходом электроэнергии на тягу поездов электровозами, оборудованными выходными модулями других проанализированных в диссертации видов.

Функции формирования трёхфазного напряжения для питания асинхронного тягового двигателя реализует АИН, выполняемый в большинстве случаев на основе классических двухуровневых инверторов. Вместе с тем при высоких напряжениях в звене постоянного тока, а также при особенно жёстких требованиях к качеству формируемого напряжения на выходе АИН приходится использовать более сложные структуры инверторов с последовательным соединением ключей в стойке. Такие инверторы строят как многоуровневые АИН.

Мощность автономного инвертора напряжения

Мощность АИН рассчитана для трёх случаев:

а) При питании АТД от двухуровневого АИН с амплитудной модуляцией

$$P_{АИН1} = \frac{1200}{\eta_{АТД}} = \frac{1200}{0.95} = 1263 \text{ кВт}$$

где $\eta_{АТД}$ – К.П.Д асинхронного тягового двигателя.

б) При питании АТД от двухуровневого АИН с широтно-импульсной модуляцией

$$P_{АИН2} = \frac{1200}{\eta_{АТД}} = \frac{1200}{0.957} = 1254 \text{ кВт}$$

в) При питании АТД от трёхуровневого АИН с широтно-импульсной модуляцией

$$P_{АИН3} = \frac{1200}{\eta_{АТД}} = \frac{1200}{0.959} = 1251 \text{ кВт}$$

КПД АИН рассчитываем, исходя из мощности АИН и потерь мощности в АИН. Потери мощности были рассчитаны в зависимости от кратности частоты модуляции.

а) двухуровневый АИН с амплитудной модуляцией

$$\eta_{АИН1} = \frac{P_{АИН1}}{P_{АИН1} + \Delta P_{АИН}} = \frac{1263}{1263 + 6.1} = 99.5$$

где $\Delta P_{АИН}$ - потери мощности в АИН.

б) двухуровневый АИН с широтно-импульсной модуляцией

$$\eta_{АИН2} = \frac{1254}{1254 + 7.5} = 99.4$$

в) трёхуровневый АИН с широтно-импульсной модуляцией

$$\eta_{АИН3} = \frac{1251}{1251 + 5.9} = 99.6$$

Мощность на входе тягового блока "АИН – АТД"

а) двухуровневый АИН с амплитудной модуляцией

$$P_{АИН-АТД} = \frac{P_{АИН1}}{\eta_{АИН1}} = 1270 \text{ кВт}$$

б) двухуровневый АИН с широтно-импульсной модуляцией

$$P_{АИН-АТД} = \frac{P_{АИН}}{\eta_{АИН2}} = 1261 \text{ кВт}$$

в) трёхуровневый АИН с широтно-импульсной модуляцией

$$P_{АИН-АТД} = \frac{P_{АИН}}{\eta_{АИН3}} = 1257 \text{ кВт}$$

В качестве примера рассмотрена возможность повышения энергоэффективности тягового электропривода за счёт реализации сформулированных в диссертации предложений применительно к электровозу типа ЭП20 (без учёта потерь энергии во входных звеньях преобразовательных структур)

Шестиосный магистральный пассажирский двухсистемный электровоз пятого поколения ЭП20 имеет два независимых канала питания тяговых двигателей тележки, поэтому расчёт расхода электроэнергии на входе тягового блока «АИН-АТД» производился для каждой оси отдельно.

Установлено, что при применении в выходном модуле двухуровневого АИН с амплитудной модуляцией расход энергии на тягу составил 7620 кВт ч. При применении двухуровневого АИН с ШИМ этот расход составил 7556 кВт ч, а при применении трёхуровневого АИН с ШИМ – 7542 кВт ч, т.е. на 11 % меньше, чем в первом случае. Это ещё раз подтверждает целесообразность применения в выходных модулях перспективного ЭПС с АД трёхуровневых АИН с ШИМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разнообразие структур тяговых электроприводов с исполнительными двигателями трёхфазного переменного тока для железнодорожных транспортных средств обусловило необходимость выполнения сравнительного анализа и оценки этих структур с целью разработки рекомендаций по созданию энергоэффективных тяговых электроприводов перспективных железнодорожных транспортных средств. Эта задача приобретает ещё большую актуальность в связи с наметившейся в России тенденцией к увеличению объёма железнодорожных перевозок, что в условиях рыночной экономики не может быть реализовано без высокoэкономичного тягового подвижного состава.

Основными показателями энергоэффективности тяговых электроприводов, в том числе, и железнодорожного транспорта являются потери электроэнергии в этих приводах. Для определения потерь электроэнергии необходимо найти составляющие этих потерь в электроприводах, что в ранее выполненных работах производилось только для конкретных структур электроприводов (без сравнительного анализа).

Такой подход не позволял дать сравнительную оценку энергоэффективности различных электроприводов и определить расход электроэнергии на тягу поездов ЭПС, использующим электроприводы различного типа.

Объективная сравнительная оценка потерь электроэнергии в тяговых электроприводах различного типа может быть выполнена только на основании анализа электромагнитных процессов в этих электроприводах, для чего в работе была предложена обобщённая структура силовой части тягового электропривода различных транспортных средств. В ней выделены узлы (модули), потери электроэнергии в которых в основном определяют энергоэффективностью тягового электропривода.

Поскольку независимо от типа транспортного средства с АТД эти двигатели подключены к автономным инверторам напряжения, которые осуществляют передачу и регулирование параметров потока энергии, потребляемой АТД, то вид и алгоритм формирования кривой выходного напряжения АИН в основном определяет потери электроэнергии в модуле «АИН-АТД». Поэтому основное внимание в данной диссертации было уделено оценке энергоэффективности этого модуля.

2. На входе АИН тягового электропривода электроподвижного состава переменного тока со входным 4 q-S преобразователем устанавливают фильтрующие конденсаторы, потери мощности в которых во многом определяют энергоэффективность электропривода. Применительно к электровозу типа ЭП20 ("Олимп") конденсатор, установленный на выходе 4q-S преобразователя, имеет ёмкость, равную 3200 мкФ при напряжении в промежуточном контуре, равном 4 кВ. Такой фильтр может быть скомплектован из трёх параллельно соединённых конденсаторов типа К75 – 88 или также из трёх конденсаторов типа DKTFM4000 I 1097 (фирма AVX, Франция) имеющих такие же параметры. Выполненные в работе сравнительные расчёты потерь мощности в выходных фильтрах всех конденсаторах 4 q-S преобразователя, изготовленных указанными производителями, показали, что потери мощности в фильтрах укомплектованных конденсаторами типа К75 – 88 составили 68.6 Вт (на один ТЭД); в преобразователе укомплектованном конденсаторами типа DKTFM4000 I 1097, потери мощности составили 9.3 Вт, т.е. на 86 % меньше, чем потери мощности в фильтре укомплектованном отечественными конденсаторами. Это приводит к увеличению КПД входного преобразователя на 4.8 % и соответствующему снижению расхода электровозом электроэнергии на тягу поездов.

В промежуточном звене двухзвенных преобразователей ЭПС постоянного тока устанавливают конденсаторные фильтры. Сравнение потерь мощности в фильтрах промежуточного звена, выполненных на конденсаторах различных фирм позволяет сделать следующие выводы.

При коэффициенте заполнения импульсного цикла $\gamma = 0,5$ потери мощности в фильтрах, выполненных на отечественных конденсаторах К75-88, составляет 220 Вт, а потери мощности в аналогичном фильтре, выполненном на конденсаторах

типа DKTFM4000 I 1097, составляют 12.5 Вт. Это позволяет рекомендовать конденсаторы DKTFM4000 I 1097 для применения в статическом преобразователе постоянного напряжения.

3. Анализ потерь мощности в АИН, выполненный с использованием модели ключа, рекомендованной фирмами Siemens и Hitachi, показал, что потери мощности в двухуровневом АИН с АМ при базовой мощности АТД, равной 1200 кВт, составляют 6,1 кВт. Потери мощности в двухуровневом АИН с ШИМ и трёхуровневом АИН с ШИМ при десятикратной частоте модуляции (при которой имеются наибольшие потери мощности), составляют соответственно 7,5 кВт и 5,9 кВт. Это позволяет рекомендовать для применения в тяговых электроприводах перспективных транспортных средств трёхуровневые АИН с ШИМ.

4. Анализ потерь мощности и КПД АТД выполнялся в программе Matlab Simulink и Mathcad. При этом был использован блок энергетической системы из пакета расширения Power System Blockset "Asynchronous Machine", в котором в кривой напряжения на статорной обмотке двигателя были учтены высшие гармонические составляющие. Расчёты показали, что потери мощности в АТД номинальной мощностью 1200 кВт, питающемся от двухуровневого АИН с амплитудной модуляцией при частоте выходного напряжения, равной 25 Гц, составляют 57,14 кВт, что приводит к уменьшению коэффициента полезного действия АТД до 0,955 (или на 0,9 % по сравнению с питанием двигателя от источника синусоидального напряжения).

При питании АТД от двухуровневого АИН с широтно-импульсной модуляцией при частоте 25 Гц показал, что потери мощности в двигателе составляют 53,224 кВт, это приводит к уменьшению коэффициента полезного действия АТД до 0,957 (или на 0,7 % по сравнению с питанием двигателя от источника синусоидального напряжения).

И наконец потери мощности в АТД, питающемся от трёхуровневого АИН с ШИМ при частоте 25 Гц составляют 51,65 кВт, что приводит к уменьшению коэффициента полезного действия АТД до 0,959 (или всего на 0,5 % по сравнению с питанием двигателя от источника синусоидального напряжения).

Таким образом, и с точки зрения обеспечения лучшей энергоэффективности АТД трёхуровневый АИН с ШИМ оказывается более эффективным по сравнению с двумя другими видами автономных инверторов.

5. Сравнительный расчёт потерь электроэнергии в выходном модуле выполнялся применительно к электровозу ЭП20. Было установлено, что при применении в выходном модуле тягового электропривода двухуровневого АИН с амплитудной модуляцией расход энергии на тягу составил 7620 кВт·ч. При применении двухуровневого АИН с ШИМ этот расход составил 7556 кВт·ч, а при применении трёхуровневого АИН с ШИМ – 7542 кВт·ч, т.е. на 11 % меньше чем в первом случае. Это ещё раз подтверждает целесообразность применения в выходных модулях перспективного ЭПС с АТД трёхуровневых АИН с ШИМ.

6. В последнее время были разработаны методы управления двух – и трёхуровневых АИН, получившие название широтно-импульсной модуляции базисных векторов (пространственно-векторная ШИМ), поэтому перспективным по дальнейшей разработке темы диссертации является исследование энергетических показателей тяговых электроприводов с асинхронными двигателями с пространственно-векторным управлением автономными инверторами напряжения.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

а) в рецензируемых научных изданиях:

1. Иньков, Ю. М. Внешние характеристики системы "Синхронный генератор-выпрямитель" автономного транспортного средства [Текст] / Ю. М. Иньков, Т. Н. Фадейкин, Я. А. Бредихина // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – №5. – С. 2 - 4.

2. Иньков, Ю. М. Потери мощности в конденсаторах фильтра управляемого выпрямителя электроподвижного состава [Текст] / Ю. М. Иньков, Т. Н. Фадейкин, Я. А. Бредихина // Практическая силовая электроника. – 2013. – №4(52). – С. 51-56.

3. Иньков, Ю. М. Потери мощности в асинхронных тяговых двигателях перспективного электроподвижного состава [Текст] / Ю. М. Иньков, Т. Н. Фадейкин, Я. А. Бредихина // Электротехника. – 2014. - №8. – С. 44 – 47.

б) в материалах конференций и изданиях:

4. Фадейкин, Т. Н. Моделирование элементов тягового электропривода автономных транспортных средств [Текст] / Т. Н. Фадейкин // Труды XIV Международной научно-технической конференции «Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, образование и практика». – 2013. - С. 336.

5. Фадейкин, Т. Н. Симплексное управление автономным инвертором напряжения [Текст] / Т. Н. Фадейкин // Труды научно-практической конференции «Наука МИИТа – транспорту 2011». - 2011. - С. III-108 - III-109.

6. Фадейкин, Т. Н. Моделирование элементов тягового электропривода автономных транспортных средств [Текст] / Т. Н. Фадейкин // Труды XVI Международной научно-технической конференции «Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, образование и практика ICPEES 2015». – 2015. - С. 98.

7. Inkov, Yu. M. Simulation of Processes in Traction Electric Actuators of Autonomous Vehicles / Yu. M. Inkov, E. V. Sachkova, Ya. A. Korobanova, T. N. Fadeikin // JITA. – 2015. - № 6. p. 5 – 13.

Фадейкин Тимофей Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С
АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ДЛЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать	2016г.	Заказ №	Формат 60X84/16	Тираж 80 экз.
Усл. – печ. л. – 1,5				

УПЦ ГИ МИИТ, 127944, Россия, г. Москва ул. Образцова, дом 9, стр.9