

На правах рукописи



Грищенко Александр Геннадьевич

ТЯГОВЫЙ ИНВЕРТОР С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ЗАРЯДНЫМ
УСТРОЙСТВОМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» на кафедре «Электротехника и электрооборудование».

Научный руководитель: **Сидоров Борис Николаевич**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)», профессор кафедры
«Электротехника и электрооборудование», Москва.

Официальные оппоненты **Гречишников Виктор Александрович**,
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО "Российский
университет транспорта" РУТ (МИИТ), учебный отдел
института транспортной техники и систем управления,
первый заместитель директора института - начальник
отдела, Москва.

Скрипко Леонид Александрович,
кандидат технических наук, ГНЦ РФ ФГУП «Центральный
ордена Трудового Красного Знамени научно-
исследовательский автомобильный и автомоторный
институт «НАМИ», отдел альтернативных источников
энергии, заведующий сектором гибридизации и
электрификации АТС, Москва.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский
политехнический университет», Москва.

Защита состоится «7» июня 2022 г. в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного
совета Д 212.217.04 при ФГБОУ ВО «СамГТУ» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская,
244, Главный корпус, ауд. 200.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО
«СамГТУ», а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу
<http://d21221704.samgtu.ru>.

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по
адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный
технический университет, главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета
Д212.217.04; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.217.04
к.т.н., доцент



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Увеличение объемов вредных выбросов от работы автомобильных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), ужесточение требований экологических стандартов и растущее потребление углеводородного топлива являются факторами, стимулирующими развитие экологически чистых и энергетически эффективных транспортных средств. К последним по праву можно отнести электромобильный транспорт, открывающий возможности к улучшению экологической ситуации. Однако сегодня электромобили сложно противопоставить обычным автомобилям в отношении стоимости и эксплуатационных показателей, определяемых характеристиками и режимами работы системы тягового электрооборудования. Кроме того, особенности климата нашей страны оказывают существенное влияние на характеристики электромобилей, такие как запас хода и ресурс тяговой аккумуляторной батареи.

Система тягового электрооборудования современных электромобилей, помимо тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) и электродвигателя (ТЭД), включает комплекс преобразователей напряжения. В частности, тяговый инвертор обеспечивает управление электрической машиной, а бортовое зарядное устройство служит для восполнения энергии ТАБ. Данные компоненты имеют своё функциональное предназначение и являются автономными. В отличие от тягового инвертора бортовое зарядное устройство (ЗУ) в режимах движения и остановок транспортного средства не используется и является узлом, фактически бесполезно загружающим транспортное средство. Кроме того, мощность таких зарядных устройств ограничена и не позволяет реализовать режим быстрого заряда тяговой аккумуляторной батареи, что увеличивает продолжительность пребывания электромобиля на зарядном пункте. Так, среднее время полного заряда ТАБ современного серийного легкового электромобиля с использованием самых распространенных типов зарядных станций (ЗС) переменного тока составляет от 4 до 12 часов. Последний факт, наряду с другой слабой стороной – запасом хода, снижает удобство эксплуатации электромобиля и не позволяет в равной мере противопоставить его обычному автомобилю, лишенному подобных недостатков. Вместе с этим ожидать на ближайшую перспективу масштабное внедрение и использование стационарных зарядных станций постоянного тока не приходится. Подобное электрооборудование для ускоренного заряда тяговых аккумуляторных батарей является дорогостоящим и остается прерогативой муниципального электромобильного транспорта – электробусов, и не совместимо как по техническим, так и по эксплуатационным причинам, с личным электромобильным транспортом, парк которого с каждым годом увеличивается в геометрической прогрессии.

Указанные обстоятельства обуславливают, с одной стороны, актуальность вопросов увеличения запаса хода электромобильного транспорта путём улучшения массогабаритных показателей тягового электрооборудования, повышения энергетической эффективности и эксплуатационных показателей электрических транспортных средств, с другой – повышают требования к качеству и количеству зарядных станций.

Решение указанных задач может быть осуществлено за счет рационализации системы тягового электрооборудования и реализации многофункциональных схемных решений в части преобразования электроэнергии. В рамках подтверждения данной гипотезы в настоящем диссертационном исследовании предложена концепция тягового инвертора напряжения с интегрированным зарядным устройством (ТИЗУ), включающая принципиальную электрическую схему и методику расчета силовой части, математическую (компьютерную) модель и конструкцию последнего.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями в области электромобильного транспорта занимались и продолжают заниматься ряд российских ученых: Е.И. Сурин, А.А. Эйдинов, В.Е. Ютт, С.В. Бахмутов, Б.Э. Павлушков, Е.М. Овсянников, К.М. Сидоров, Л.А. Скрипко и многие другие. Решению вопросов в данной области посвящены диссертационные работы, выполненные в МАДИ, ФГУП «НАМИ», МЭИ, РУТ(МИИТ), НГТУ, МГТУ им. Н. Э. Баумана и др.

Целью диссертационной работы является улучшение эксплуатационных свойств электромобильного транспорта посредством совершенствования системы тягового электрооборудования и зарядной инфраструктуры.

Для достижения поставленной цели решены следующие **основные задачи**:

1. Проведён анализ существующих решений в области преобразователей напряжения (инверторов и зарядных устройств) транспортного назначения, в том числе решений по интеграции и созданию многофункциональных систем.
2. Разработана методика расчета силовой части тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством.
3. Разработана комплексная математическая модель системы тягового электрооборудования электромобиля с ТИЗУ.
4. Разработан и изготовлен экспериментальный образец ТИЗУ.
5. Проведены экспериментальные исследования процессов функционирования экспериментального образца тягового инвертора и зарядного устройства в системе тягового электрооборудования электромобильного транспорта в эксплуатационном поле.

Объектом исследования является электротехнический комплекс, обеспечивающий преобразование электрической энергии для движения транспортного средства и восполнения энергии тяговой аккумуляторной батареи от внешнего источника.

Предмет исследования: система двунаправленного преобразования электрической энергии на борту электромобиля.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана методика расчета, отличающаяся от известных учетом взаимного влияния компонентов силовой части в условиях объединения функций тягового инвертора и устройства ускоренного заряда в едином комплексе.
2. Создана комплексная математическая модель системы тягового электрооборудования электромобиля на основе ТИЗУ, отличающаяся возможностью исследования процессов преобразования электрической энергии в

режимах движения и ускоренного заряда тяговой аккумуляторной батареи от внешнего источника.

3. Предложен рациональный алгоритм ускоренного заряда тяговой аккумуляторной батареи, обеспечивающий снижение средней токовой нагрузки и температуры тяговой аккумуляторной батареи и относительной простоте реализации.

4. Предложена схема силовой части комплекса преобразовательного электрооборудования, совмещающая функции тягового инвертора и устройства ускоренного заряда аккумуляторной батареи, получившая правовую охрану в виде патента на полезную модель.

Практическая значимость работы

1. Предложена принципиальная электрическая схема силовой части ТИЗУ, при реализации которой обеспечивается быстрый заряд бортового накопителя электрической энергии транспортного средства при значениях мощности, эквивалентных мощности тягового инвертора при одновременном улучшении массогабаритных показателей системы тягового электрооборудования и повышении эксплуатационных свойств транспортного средства.

2. Предложена рациональная конструкция силовой части и системы управления ТИЗУ, получившая правовую охрану в виде патента на изобретение.

3. Созданы технические решения для реализации алгоритмов ускоренного заряда тяговой аккумуляторной батареи при сохранении её ресурса.

4. Снижение массы и габаритных размеров системы тягового электрооборудования электромобильного транспорта за счет сокращения количества автономных блоков в составе указанной системы и совмещения функций тягового инвертора и зарядного устройства повышенной мощности в едином блоке – ТИЗУ.

Методология и методы исследования. При решении задач диссертационной работы был проведён анализ современных отечественных и зарубежных научно-технических источников; осуществлены аналитические, патентные, теоретические, расчетные и экспериментальные исследования; использовались методы решения дифференциальных уравнений, в том числе с использованием современных математических средств и методов математического моделирования.

Достоверность полученных результатов подтверждается достаточной сходимостью результатов моделирования и результатов экспериментального исследования образца ТИЗУ; обоснованным применением апробированных теорий и методов исследований, в том числе с использованием современных математических методов и средств математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Принципиальная электрическая схема силовой части тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством для электромобильного транспорта.

2. Методика расчета силовой части ТИЗУ.

3. Комплексная математическая модель энергетической системы электромобиля, включающей ТИЗУ.

4. Алгоритм ускоренного заряда тяговой аккумуляторной батареи электромобиля при использовании ТИЗУ.

5. Вариант технической реализации тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством.

6. Результаты исследования процессов функционирования системы тягового электрооборудования в поле эксплуатационных режимов легкового электромобиля.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и ее результаты докладывались и обсуждались на:

1. Международном автомобильном научном форуме (МАНФ-2020) «Наземные интеллектуальные транспортные средства и системы» (International Automobile Scientific Forum, 14.10.2020 - 15.10.2020 г., ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г. Москва.

2. Международной научной Электроэнергетической конференции ISEPC-2019, 23.05.2019 – 24.05.2019 г., ФГАОУ ВО СПбПУ, г. Санкт-Петербург.

3. Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям Far East Con, октябрь 2018 г. и 2019 г., Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток.

4. Ежегодных международных научно-методических и научно-исследовательских конференциях МАДИ с 75-й по 78-ю в 2016-2019гг., г. Москва.

5. Конкурсе научных работ студентов, аспирантов и молодых учёных в рамках международного автомобильного научного форума (МАНФ-2020) «Наземные интеллектуальные транспортные средства и системы», 15.10.2020 г., ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г. Москва.

Внедрение результатов работы.

Методика определения параметров компонентной базы, комплексная математическая модель электромобиля и экспериментальный образец ТИЗУ внедрены в учебный процесс МАДИ и использованы в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах ООО «Инновационный центр «КАМАЗ».

Основные положения и результаты исследований самостоятельно получены автором. **Личный вклад автора** в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в разработке принципиальной электрической схемы силовой части и конструкции ТИЗУ с использованием единой элементной базы; создании методических рекомендаций для проектирования системы тягового электрооборудования электромобилей на основе интегрированных решений; разработке математической модели, учитывающей тепловые режимы работы тяговых литий-ионных аккумуляторных батарей электромобилей; предложении рационального состава, технического исполнения и характеристик основных компонентов системы тягово-энергетического оборудования электромобилей.

Публикации. Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в 12-ти научных работах, в том числе 2 статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы, один патент на полезную модель, один патент на изобретение, пять англоязычных статей, индексируемых базой данных «Scopus», включая одну «Web of Science».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 132 наименований. Текст диссертации содержит 188 страниц, 62 рисунка, 21 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, определена цель и поставлены задачи, обоснована научная новизна, сформулированы теоретическая и практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту, представлены результаты апробации и практической реализации.

В **первой главе** проведен анализ актуальных проблем эксплуатации электромобилей, выявлено, что современный электромобиль целесообразно рассматривать как одну из эффективных мер по улучшению экологической обстановки. Электромобиль не имеет локальных выбросов токсичных веществ, при этом эффективность использования энергии на борту существенно превосходит аналогичные показатели автомобилей с ДВС. В тоже время электромобиль уступает обычным автомобилям по ряду показателей, а именно по запасу хода и времени восполнения энергии. Ключом к решению указанных недостатков является система тягового электрооборудования (СТЭО) электромобиля, которая состоит из комплекса отдельных преобразователей энергии, обеспечивающих функционирование в заданных режимах. При этом наиболее значимым потребителем электроэнергии является электрический привод, а в качестве источника выступает тяговая аккумуляторная батарея, на долю которой приходится около 40% стоимости электромобиля. Восполнение энергии в ТАБ обеспечивается за счет использования внешней электрической сети при помощи зарядных устройств, которые можно разделить на два основных типа: встроенные и внешние. Анализ структуры использования и распространенности зарядных станций на примере зарубежного опыта демонстрирует низкую долю (менее 15%) использования мощных стационарных зарядных станций в общем числе объектов зарядной инфраструктуры. Наиболее распространенные зарядные станции обеспечивают заряд ТАБ при помощи бортового зарядного устройства (БЗУ) относительно низкой мощности, которое является автономным и не используется при движении. Применение БЗУ позволяет упростить аппаратную и программную части стационарных зарядных пунктов, однако накладывает ограничение на возможность сокращения времени заряда. Поскольку связанное с этим увеличение мощности БЗУ неизбежно влечет ухудшение массогабаритных показателей СТЭО.

Анализ научно-технической литературы в области СТЭО современных электромобилей позволяет выделить ряд перспективных путей улучшения характеристик электромобильного транспорта, одним из которых является создание многофункциональных решений, позволяющих объединить элементную базу тягового инвертора и бортового зарядного устройства. Для наиболее объективного сравнения существующих схемных решений предложен коэффициент степени интеграции, учитывающий количество используемых полупроводниковых элементов и степень усложнения конструкции перспективного устройства:

$$k_{\text{инт}} = \frac{n_{\text{тизу}}}{(n_{\text{ти}} + n_{\text{зу}})} + k_{\text{с}}, \quad (1)$$

где $n_{\text{ти}}$ – количество элементов тягового инвертора; $n_{\text{зу}}$ – количество элементов бортового зарядного устройства; k_c – коэффициент усложнения конструкции, $n_{\text{тизу}}$ – количество элементов интегрированной схемы.

В качестве наиболее перспективных для применения на транспорте выделены решения, использующие трехфазную сеть и стандартную элементную базу.

Во **второй главе** предложено схемное исполнение силовой части тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством, которое при использовании единой элементной базы позволяет реализовать две качественно различающиеся функции - тягового инвертора и зарядного устройства. Сущность предложенного решения отражает представленная на рисунке 1 принципиальная электрическая схема.

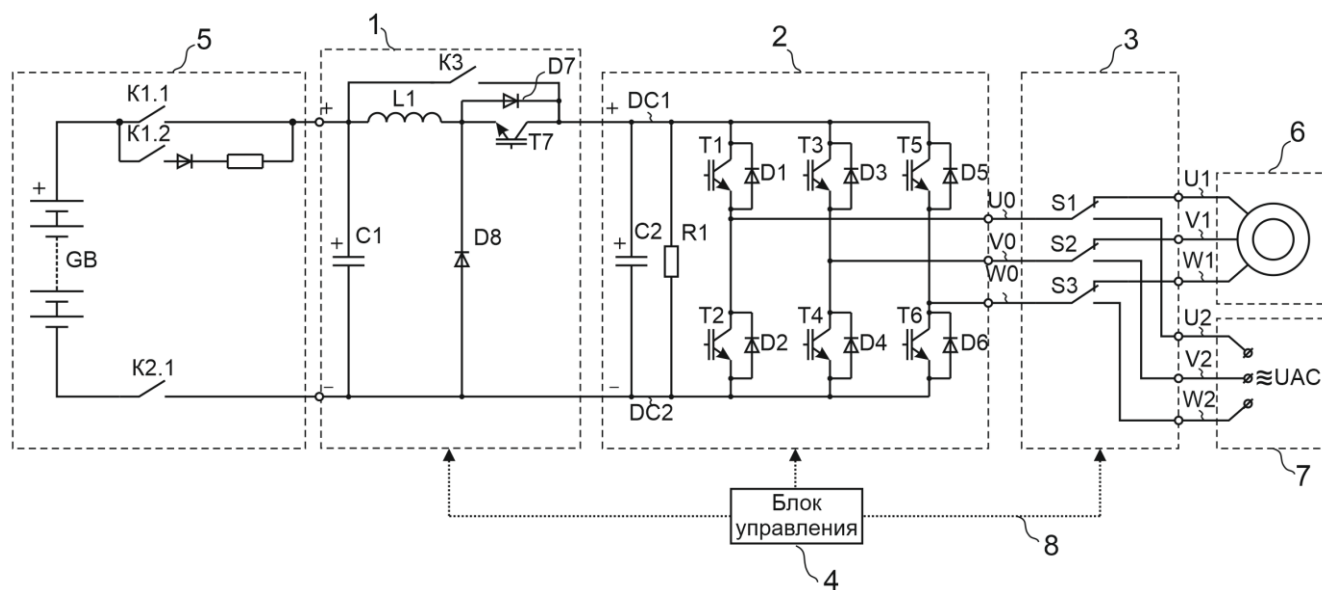


Рисунок 1 – Электрическая схема силовой цепи ТИЗУ

Приведенная схема содержит зарядное устройство (1) и тяговый инвертор (2), что позволяет: работать с электрическими машинами переменного тока (6) различного типа и исполнения; рационализировать схемное и конструктивное исполнение СТЭО; использовать для заряда ТАБ (5) трехфазные сети переменного тока (7); увеличить мощность и скорость заряда ТАБ в сравнении с типовыми зарядными; улучшить массогабаритные показатели и экономическую эффективность СТЭО электромобилей.

Во время стоянки транспортного средства (ТС) для восполнения заряда тягового накопителя электроэнергии осуществляется подключение внешнего источника к коммутационному переключателю (3). ЗУ обеспечивает преобразование выпрямленного напряжения внешнего источника в постоянное напряжение для заряда ТАБ заданной величины, а задание величины зарядного тока обеспечивается блоком управления (4), посредством каналов управления (8).

Применительно к представленной схеме ТИЗУ разработана методика расчета силовой части, базирующаяся на разделении блоков по функциональному назначению с учетом режимов работы и возможностью дальнейшей унификации при однородности структуры. Методика расчета представляет собой единый математический аппарат, структура которого изображена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Структурная схема методики расчета компонентов ТИЗУ

Требуемые характеристики ТИЗУ определяются исходя из:

- параметров ТС и результатов тягово-энергетического расчета;
- анализа требуемых характеристик тяговой электрической машины;
- исходных характеристик тяговой аккумуляторной батареи;
- анализа характеристик внешней электрической сети.

Требуемая мощность на валу тяговой электрической машины P_2 является функцией, учитывающей базовые параметры транспортного средства и условия движения, в том числе: массу ТС m_a , площадь фронтальной проекции S_a , аэродинамические свойства кузова c_x , зависимость скорости V_a и ускорения a от времени, характеристики дорожного покрытия (коэффициент трения качения f), углы подъема или спуска α , КПД механической трансмиссии η_{MT} и ТЭД $\eta_{ТЭД}$:

$$P_2 = \frac{1}{9550} \cdot \left(\frac{f \cdot m_a \cdot g \cdot \cos \alpha + m_a \cdot a \cdot \delta + \frac{\rho}{2} \cdot c_x \cdot S_a \cdot V_a^2 + m_a \cdot g \cdot \sin \alpha}{\eta_{MT}} \cdot \frac{30 \cdot V_a}{\pi} \right). \quad (2)$$

Мощность на выходе ТИЗУ, Вт:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_{ТЭД}}, \quad (3)$$

при этом $\eta_{ТЭД}$ в функции момента M и частоты вращения ротора n_2 может быть определён из многопараметровой характеристики $\eta_{ТЭД} = f(M, n_2)$.

На основании результатов тягово-энергетического расчета выполняется оценка максимального тока через ключи инвертора I_{Cmax} , который является одним из основных показателей, определяющих работу IGBT-модуля в составе тягового инвертора:

$$I_{Cmax} = \frac{P_2 k_1 \sqrt{2} k_2}{\eta_{ТЭД} \cos \varphi \sqrt{3} U_2}, \quad (4)$$

где P_2 – мощность тяговой электрической машины, принимаемая равной максимальному значению в наиболее нагруженном цикле движения ($P_2 = P_{2max}$), Вт; k_1 – коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току,

о.е.; k_2 – коэффициент допустимой мгновенной пульсации тока, о.е.; $\eta_{ТЭД}$ – номинальный КПД ТЭД, о.е.; U_2 – номинальное линейное напряжение электрической машины, В.

Важным параметром зарядного устройства является максимальная мощность, которая определяется по предельной зарядной характеристике аккумуляторной батареи:

$$P_{зmax} = I_{зmax} \cdot U_b, \quad (5)$$

где $I_{зmax}$ – максимальный зарядный ток, А.

Для определения потерь в IGBT-модуле зарядного преобразователя ТИЗУ необходимо определить время заряда ТАБ. Производители аккумуляторных батарей ограничивают максимальный ток заряда аккумулятора при степени заряженности (ϵ_3) выше 80% исходя из соображений сохранения ресурса. В случае отсутствия зарядной характеристики для расчета времени заряда используется следующая зависимость:

$$t_3 = \frac{A \cdot W_1}{\int_0^{t_{cc}} P_3 dt} + \frac{(1 - A) \cdot W_1}{\int_0^{t_{cv}} P_3 dt}, \quad (6)$$

где W_1 – запас энергии, Вт·ч; $P_{3у}$ – мощность зарядного устройства, Вт; A – коэффициент, характеризующий состояние аккумулятора при заряде в режиме постоянного тока, о.е.; t_{cc} – время заряда при постоянном токе, с; t_{cv} – время заряда при постоянном напряжении, с.

Основу расчета дросселя как неотъемлемого элемента зарядного преобразователя ТИЗУ составляет ряд зависимостей, среди которых максимальная амплитуда колебаний тока в дросселе

$$\Delta i_L = D_3 \cdot (1 - D_3) \cdot \frac{U_{rv}}{f_3 \cdot L_1}, \quad (7)$$

а также максимальный ток в дросселе:

$$i_{Lmax} = U_{rv} \cdot \left(\frac{I_3 \cdot D_3}{U_1} + \frac{D_3 \cdot (1 - D_3)}{2 \cdot f_3 \cdot L_1} \right), \quad (8)$$

где D_3 – коэффициент заполнения, о.е.; f_3 – частота коммутации заданная, Гц; L_1 – расчетная индуктивность дросселя, Гн.

Для уменьшения потерь мощности рекомендуется выбирать дроссель с наименьшим значением активного сопротивления и максимально возможной индуктивностью. При этом значение критической индуктивности (минимально возможная индуктивность дросселя) соответствует следующему выражению, Гн:

$$L_{1кр} \geq D_{3min} \cdot (1 - D_{3min}) \cdot \frac{U_{rv}}{2 \cdot I_3 \cdot f_3}. \quad (9)$$

При выборе дросселя необходимо учитывать разброс расчетных значений и параметров реальных элементов, что отражается увеличением запаса по току до 20% от расчетного значения.

Приведенные выше характеристики определяют максимальный ток коллектора управляемого элемента зарядного преобразователя – транзистора Т7:

$$I_{сVT7} = k_1 \cdot \left(i_{Lmax} + \frac{\Delta i_L}{2} \right), \quad (10)$$

где k_1 – коэффициент перегрузки по току. При этом максимальный прямой ток диода D8 должен быть больше или равен максимальному току I_{cVT7} .

Параметры ТИЗУ могут изменяться в зависимости от условий его функционирования в установленных пределах, обеспечивающих безопасную рабочую температуру полупроводниковых устройств. Обобщенные значения этих параметров, как правило предоставляемые изготовителем, зачастую не являются достаточно точными для установления корректных тепловых зависимостей. Для уточнения параметров используются аналитические модели, позволяющие определить приближенные температурно-мощностные зависимости полупроводниковых устройств, используемые для проектирования систем охлаждения преобразователей напряжения с учетом потерь энергии.

Выражения для потерь в IGBT в интегральном виде для:

– потерь проводимости

$$P_{totave} = f_0 \int_0^{1/f_0} [U_{ce/F}(I) \cdot i_{chip}(t) \cdot D_3(t)] dt, \quad (11)$$

где $i_{chip}(t)$ – среднее значение тока, протекающего через кристалл, А; $D_3(t)$ – коэффициент заполнения транзистора или диода, о.е.; t – время, с; $U_{ce/F}$ – напряжение на транзисторе или диоде, В; I – ток нагрузки, А; f_0 – частота коммутации, Гц.

– потерь при переключении

$$P_{SWave} = f_{sw} \int E_{sw/rr}(I_{ce/F}) dt, \quad (12)$$

где $E_{sw/rr}$ – энергия переключения, Дж; $I_{ce/F}$ – соответствующий ток нагрузки, А, f_{sw} – частота коммутации, Гц.

Одной из основ правильного выбора IGBT-модуля, определяющего эффективность работы, массогабаритные показатели и надежность преобразователя напряжения, являются конструктивные требования по теплоотводу. Как правило, в паспорте IGBT-модуля представлен показатель P_{tot} – суммарная мощность рассеивания для одного ключа при температуре 25 °С. Однако в процессе реальной эксплуатации температура модуля оказывается существенно выше и лежит в диапазоне от 60 до 100 °С, что снижает эффективность теплоотвода. С учетом этого в методике расчета ТИЗУ предложен коэффициент запаса мощности рассеивания k_{sf} :

$$k_{sf} = \frac{P_{calc}}{P_{tot}}, \quad (13)$$

где P_{calc} – расчетные потери в IGBT-модуле. Рекомендуемый диапазон значений для коэффициента лежит в пределах от 0,6 до 0,8. При значениях коэффициента до 0,6 использование полупроводникового модуля неэффективно, что негативно сказывается на массогабаритных показателях, а при значениях свыше 0,8 снижается надежность, ввиду большей теплонагруженности полупроводника.

Критерии выбора IGBT-модулей и коэффициент запаса мощности рассеивания k_{sf} позволяют осуществить наиболее рациональный выбор полупроводниковых элементов, определяемый следующими закономерностями:

– для тягового инвертора

$$\begin{cases} I_C \geq I_{Cmax} \\ U_{CE} \geq \frac{U_{dmax/rvmax}}{0,7} \\ I_F \geq I_{vm} \\ 0,6 \geq k_{sf} \geq 0,8 \end{cases} ; \quad (14)$$

– для интегрированного зарядного устройства:

$$\begin{cases} I_{C3} \geq I_{cVT7} \\ I_C \geq I_{pc} \\ U_{CE} \geq \frac{U_{rvmax}}{0,7} \\ 0,6 \geq k_{sf} \geq 0,8 \end{cases} , \quad (15)$$

где U_{CE} – максимально допустимое напряжение коллектор-эмиттер; I_F – постоянный прямой ток обратного диода; I_{vm} – максимальный рабочий ток прибора; U_{rvmax} – максимальное обратное напряжение.

Разработанная методика учитывает базовые характеристики транспортного средства как объекта применения ТИЗУ, особенности и условия движения; позволяет определить параметры основных компонентов силовой части, к которым относятся: транзисторно-диодные модули (IGBT-модули), охладители силовых полупроводниковых элементов, сглаживающие фильтры, защитные конденсаторы, накопительный дроссель, силовые шины постоянного и переменного тока.

В третьей главе предложена комплексная математическая модель, системы тягового электрооборудования электромобиля, в основе которой лежат математические зависимости, коммутационные функции, массивы экспериментальных данных и схемы замещения, что позволяет проводить исследования электрических, электромеханических, мощностных, энергетических и прочих характеристик СТЭО электромобильного транспорта. Представленная на рисунке 3 математическая модель позволяет имитировать процессы, протекающие в ТИЗУ при различных режимах работы, в том числе в режиме реального времени.

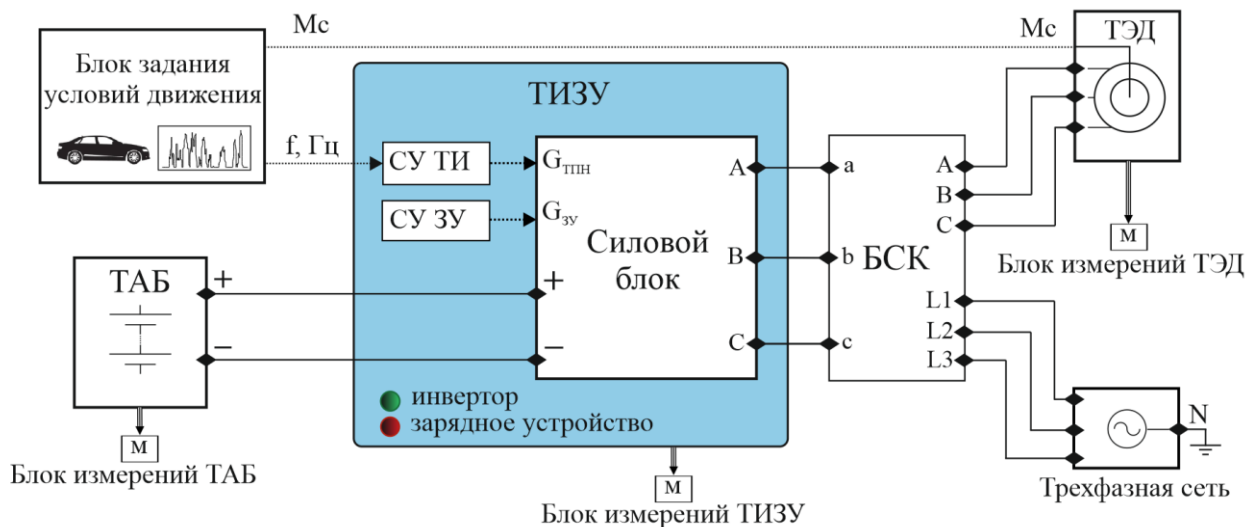


Рисунок 3 – Функциональная схема комплексной математической модели СТЭО

Модель выполнена в виде компьютерной программы с пользовательским интерфейсом, включающим диалоговые окна настройки основных блоков.

Блок тяговой аккумуляторной батареи реализован в виде общей динамической модели, позволяющей осуществлять расчет напряжения батареи в режимах заряда $U_{\bar{6}3}$ и разряда $U_{\bar{6}p}$, а также обеспечивать контроль температуры ТАБ. Аналитические зависимости, отражающие суть математической модели, представлены в виде системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\bar{6}p} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - It} \cdot i - K \cdot \frac{Q}{Q - It} \cdot It + A \cdot \exp(-B \cdot It) \\ U_{\bar{6}3} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{It + 0,1 \cdot Q} \cdot i - K \cdot \frac{Q}{Q - It} \cdot It + A \cdot \exp(-B \cdot It) \\ \dot{Q} = R \cdot I^2 + \sum_{n=1}^n R_i I_i^2 \\ \frac{dT}{dt} = \frac{\dot{Q} - Sh \cdot (T - T_0) - \sigma \varepsilon FS \cdot (T^4 - T_0^4)}{m \cdot c} \end{array} \right. \quad (16)$$

Основу модели ТАБ составляет метод описания разрядных и зарядных характеристик, предложенный Шефердом, отличающиеся тем, что в составе модели дополнительно реализован расчет температуры T аккумуляторной батареи. Детальность рассмотрения температурных режимов продиктована условиями ускоренного заряда ТАБ, в процессе которого токи превышают номинальные значения.

Блок описания силовых компонентов инвертора основан на схемах замещения и известных зависимостях. Основной управляемый элемент силовой части – IGBT-модуль, который состоит из полупроводникового ключа и обратного диода, и включает в свой состав идеальные ключи, воспроизводящие основной режим работы – коммутацию; активные сопротивления R_{on} и источники ЭДС U_f , определяющие падение напряжения на открытом переходе коллектор-эмиттер; индуктивности L_{on} , обуславливающие переходные процессы при коммутации; демпферную RC-цепочку, описывающую работу снабберного конденсатора, а схема его замещения представлена на рисунке 4.

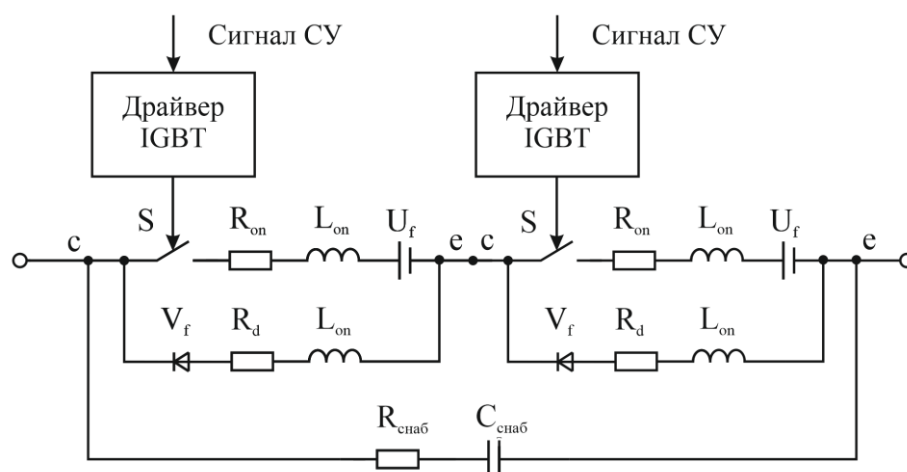


Рисунок 4 – Схема замещения транзисторно-диодного модуля (полумост)

Блок системы управления тяговым инвертором основан на реализации коммутационных функций идеальных ключей в схеме замещения транзисторных модулей. При этом в настоящей работе воспроизведен вариант синусоидальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с пропорциональным законом управления ТЭД, однако модель универсальна и позволяет не ограничиваться реализованными решениями.

Блок системы управления зарядным устройством обеспечивает формирование сигнала управления идеальным ключом в схеме замещения полупроводникового транзистора Т7 в виде коммутационной функции. При этом в канале регулирования тока заряда используется обратная связь по фактическому току батареи, позволяющая реализовать замкнутую систему автоматического поддержания заданного тока.

Значение входного сигнала задания зарядного устройства $u_{\text{зу}}^*(t)$ формируется согласно передаточной функции вида

$$u_{\text{зу}}^*(t) = \frac{((i_3 + i_3 \cdot k_u) - i) \cdot \mu_{\text{pi}} + (i_3 + i_3 \cdot k_u)}{i_3}, \quad (17)$$

где k_u – коэффициент снижения задания по току, определяющий поддержание заданного уровня напряжения; i_3 – ток заданный, А; i – ток фактический (с датчика обратной связи), А. При этом

$$k_u = \left(U_{1\text{max}} - \frac{U_6}{n_s} \right) \cdot \mu_{\text{pu}}, \quad (18)$$

где μ_{pi} и μ_{pu} – передаточные функции, которые применяются для снижения статической ошибки в установившемся режиме.

Сигнал управления транзисторным ключом в режиме широтно-импульсного регулирования (ШИР) формируется с помощью коммутационной функции вида

$$f_{\text{зу}}(t) = \text{sign} \left(\text{sign} \left(u_{\text{зу}}^*(t) - u_{\text{опзу}}(t) \right) + 1 \right), \quad (19)$$

где $u_{\text{опзу}}$ – опорное напряжение пилообразной формы, представленное в виде ряда Фурье:

$$u_{\text{опзу}}(t) = \frac{U_{m_оп_зу}}{2} - \frac{U_{m_опзу}}{\pi} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin(k2\pi f_{\text{зу}} t). \quad (20)$$

Значение амплитуды $U_{m_оп_зу}$ и частота коммутации $f_{\text{зу}}$ определяется исходя из оптимального режима работы понижающего преобразователя. Для улучшения качества регулирования схема может быть дополнена элементами фильтрации в линиях обратной связи по току и напряжению.

Расчетные исследования и компьютерное моделирование электромобиля в условиях стандартизированных ездовых циклов, а также разгона с максимальным ускорением, позволяют определить параметры основных узлов СТЭО. Моделирование с учетом параметров компонентной базы ТИЗУ позволяет получить: зарядные характеристики ТАБ; осциллограммы и зависимости, отражающие характер переходных процессов, форму токов и напряжений применительно к основным составляющим компонентам СТЭО.

В качестве объекта исследований рассмотрен легковой электромобиль массой 1,75 т. Сводные результаты моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сводные результаты тягово-энергетического расчета

№	Параметр	Режим движения			
		US06	NEDC	WLTP	Разгон
1	Средняя скорость движения, км/ч	77,3	33,4	46,5	145,0
2	Максимальная скорость в цикле, км/ч	129,2	120,0	131,3	200,0
3	Пробег транспортного средства в цикле (расчетный), м	12843	11027	23209	1200
4	Максимальная мощность на валу тягового электродвигателя, кВт	105,3	47,6	59,5	250,0
5	Средняя (эквивалентная) мощность разряда тяговой аккумуляторной батареи, кВт	23,0	6,6	10,4	72,0
6	Максимальный момент тягового электродвигателя, Н·м	534,2	176,2	164,7	700,0
7	Максимальная частота вращения тягового электродвигателя, мин ⁻¹	4587	4238	4654	7180
8	Максимальный ток разряда батареи, А	406,5	136,0	126,4	500,0
9	Максимальная температура тяговой аккумуляторной батареи, °С (при T ₀ =18°С)	43,1	28,4	27,2	28,1
10	Расход электрической энергии тяговой аккумуляторной батареи, Вт·ч	3831,5	2147,1	5208,0	822,0
11	Расчетная энергия рекуперации, Вт·ч	730,2	393,3	1184,0	-
12	Доля энергии рекуперации тяговой аккумуляторной батареи в цикле, %	19,0	18,3	22,7	-
13	Удельный расход энергии тяговой аккумуляторной батареи, Вт·ч/км	241,5	194,7	173,4	685

Некоторые результаты моделирования в виде графических зависимостей для цикла WLTP представлены на рисунках 5 – 6, где n_{23} , n_2 – заданная и фактическая частоты вращения ротора ТЭД соответственно.

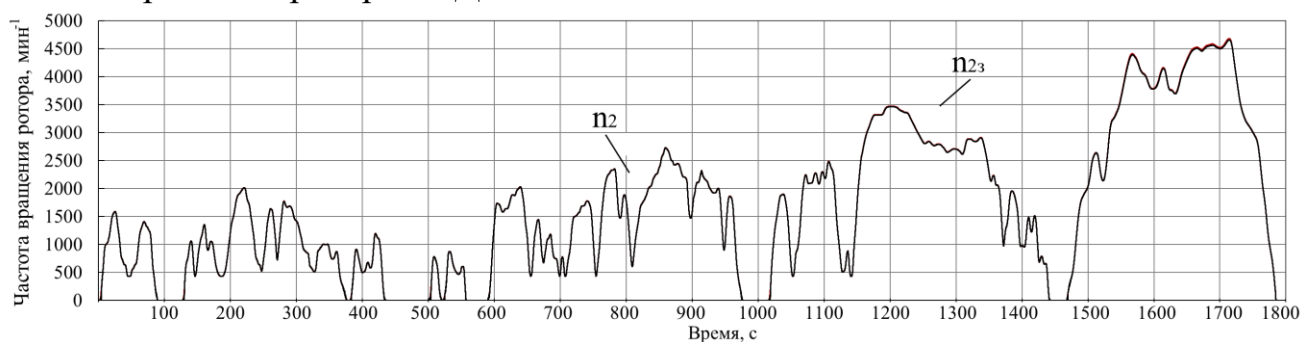


Рисунок 5 – Требуемая частота вращения ротора ТЭД в цикле WLTP

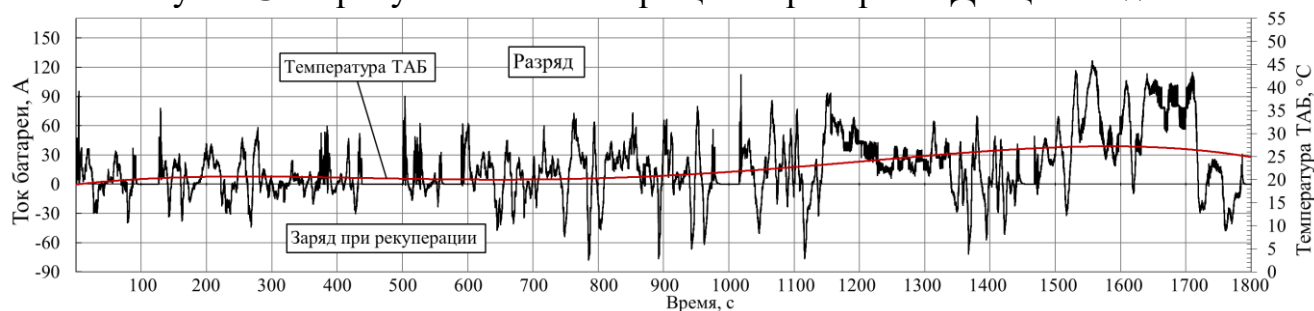


Рисунок 6 – Расчетный ток разряда/заряда тяговой батареи в цикле WLTP

В ходе теоретических исследований осуществлен расчет основных показателей работы СТЭО легкового электромобиля в стандартизированных ездовых циклах, приближенных к реальным условиям городского и загородного движения. Установлено, что наиболее энергетически нагруженным циклом движения является комбинированный цикл US06, отражающий интенсивное движение в городе и на транспортной магистрали. Максимальная мощность на валу ТЭД в указанном цикле составила 105 кВт при удельном расходе электрической энергии ТАБ 241,5 Вт·ч/км.

Неотъемлемая часть работы ТИЗУ – использование в режиме зарядного устройства (ЗУ). В процессе заряда алгоритм работы должен быть адаптирован к зарядным характеристикам литий-ионных аккумуляторов с учетом допустимого диапазона рабочих температур, максимального зарядного тока и напряжения. Реализация зарядного режима ТАБ является одним из факторов, определяющих срок службы.

Алгоритмы заряда существенно отличаются друг от друга по ряду критериев. Например, традиционный алгоритм заряда при поддержании постоянного тока, а затем постоянного напряжения (ПТ/ПН), обеспечивает максимальную скорость заряда, но имеет недостатки в части снижения срока службы. Компромиссным решением является использование предложенного в рамках настоящей работы трехступенчатого алгоритма заряда 3ПТ/ПН. Алгоритм 3ПТ/ПН нацелен на одновременное увеличение срока службы и скорости заряда литий-ионного аккумулятора (ЛИА). Данный алгоритм наряду с типовым ПТ/ПН реализован как в комплексной математической модели, так и в экспериментальном образце ТИЗУ.

С использованием указанной модели осуществлён расчет зарядных режимов ТАБ. Основные результаты выводятся в виде массива данных, объём которого зависит от длительности цикла и выбранной дискретности расчета. Сводные результаты моделирования в режимах заряда тяговой аккумуляторной батареи, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сводные результаты работы комплексной модели при заряде

№	Параметр	Алгоритм заряда			
		ПТ/ПН	ПТ/ПН	2ПТ/ПН	3ПТ/ПН
1	Мощность источника электроэнергии максимальная, кВт	21	160	160	160
2	Средняя мощность сети в цикле, кВт	20,4	104,5	96,4	92,7
3	Максимальный ток заряда, А	40,8	300,0	300,1	300,1
4	Средний ток заряда, А	32,5	181,8	178,4	170,4
5	Время заряда, мин	112,1	23,7	24,1	25,2
6	Энергия, расходуемая на заряд ТАБ, кВт·ч	38,22	38,74	38,77	38,68
7	Температура ТАБ, °С	24,8	42,9	39,6	37,4

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что реализованный в модели ТИЗУ алгоритм ускоренного заряда ТАБ отличается меньшим (на 6,3%) значением средней токовой нагрузки в сравнении с типовым алгоритмом заряда (ПТ/ПН). Предложенный алгоритм позволяет снизить среднюю температуру ТАБ в процессе заряда на 12,8 % при несущественном увеличении (на 1,5 мин) времени заряда, что оказывает положительное влияние на ресурс ТАБ.

Результаты расчетных исследований позволили установить требуемые характеристики ТИЗУ для легкового электромобиля при условии реализации максимальных тягово-динамических характеристик прототипа - существующего экспериментального образца электромобиля. При этом требуемая расчетная мощность тягового инвертора составила 249,5 кВт при максимальном действующем значении фазного тока 417,8 А. С учетом характеристик ТАБ электромобиля определены требуемые параметры интегрированного зарядного устройства, максимальная выходная мощность которого составила 160 кВт при максимальном токе заряда 300 А.

В четвертой главе описана конструкция экспериментального образца ТИЗУ. Данное решение отличается: компланарной конструкцией силовых шин постоянного тока, обеспечивающей снижение активного сопротивления и индуктивности рассеяния; возможностью охлаждения конденсаторов звена постоянного тока; размещением компонентов системы управления, обеспечивающим минимизированную длину сигнальных цепей; помехозащитное исполнение системы управления; жидкостное охлаждение полупроводниковых элементов ТИЗУ; унифицированное исполнение IGBT-модулей тягового инвертора и зарядного устройства.

Выбор элементной базы экспериментального образца (ЭО) основан на функциональных требованиях, результатах расчетных исследований и математического моделирования.

Изображение конструкции разработанного и изготовленного экспериментального образца ТИЗУ представлено на рисунке 7.

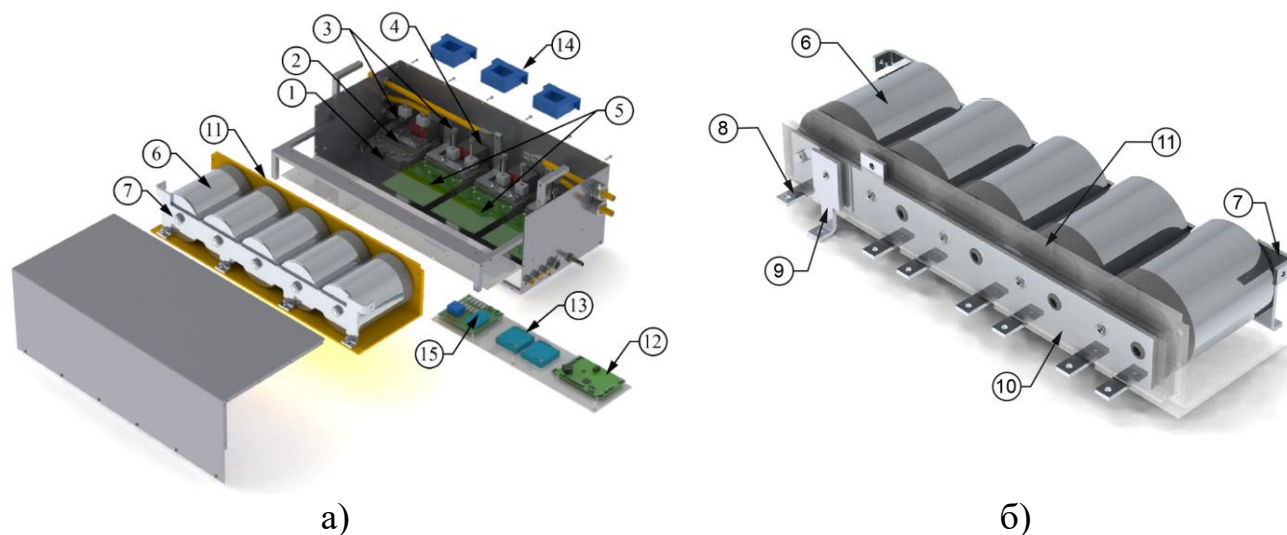


Рисунок 7 – Изображение конструкции (а) экспериментального образца ТИЗУ, (б) блока входных конденсаторов

ЭО состоит из плиты жидкостного охлаждения (1) с размещенными на ней полупроводниковыми транзисторно-диодными модулями (2). Для создания электрических связей между выводами IGBT-модулей используются силовые шины (3) заданной конфигурации. Защитные конденсаторы (4) расположены

непосредственно на силовых выводах полупроводниковых модулей, что положительным образом влияет на их эффективность. Драйверы полупроводниковых ключей (5) расположены непосредственно на управляющих выводах, что обеспечивает надежное электрическое соединение управляющих цепей. Силовые конденсаторы (6) закреплены в металлическом держателе (7) с одной стороны и крепятся непосредственно к силовым токопроводящим шинам постоянного тока (8)-(10) с другой стороны, при этом обеспечивается электрическое соединение выводов конденсаторов с шинами. Токопроводящие шины блока конденсаторов имеют компланарную конструкцию – положительная и отрицательная силовая шина располагается точно друг над другом, при этом для обеспечения жесткости конструкции и повышения электробезопасности шины разделены полимерными изоляторами заданной конфигурации (11).

Для проведения опытных исследований изготовлен экспериментальный образец ТИЗУ, отражающий практическую реализацию разработанных технических решений и отвечающий следующим основным характеристикам:

- максимальная расчетная мощность – 249,5 кВт;
- максимальное рабочее постоянное напряжение – 900 В;
- максимальный действующий выходной ток – 850 А;
- максимальный КПД – 95%;
- габаритные размеры и масса – 600 x 285 x 200 мм, 20 кг;
- удельная мощность – 12,5 кВт/кг.

Внешний вид ЭО ТИЗУ представлен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Внешний вид экспериментального образца ТИЗУ

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований, которые осуществлялись с использованием стенда комплексных испытаний ТИЗУ в двух основных режимах: управление тяговым электродвигателем в условиях, приближенных к реальному движению автомобиля, и заряд тягового источника энергии.

Экспериментальные исследования предусматривают неотъемлемое использование специализированных контрольно-измерительных средств, регистрирующих устройств, приборов и комплексных агрегатов.

На рисунке 9 представлена структурная схема стенда, где обозначены:

ТАБ – тяговая аккумуляторная батарея; УБК – устройство контроля батареи; БСК – блок силовой коммутации; ПИУ – пульт управления и индикации; ПУ – переключающее устройство; КДС – комплексный динамометрический стенд; АТР – автотрансформатор регулируемый; ПК – персональный компьютер; БСК – блок силовой коммутации; УУБСК – устройство управления блоком силовой коммутации; ПУ – переключающее устройство.

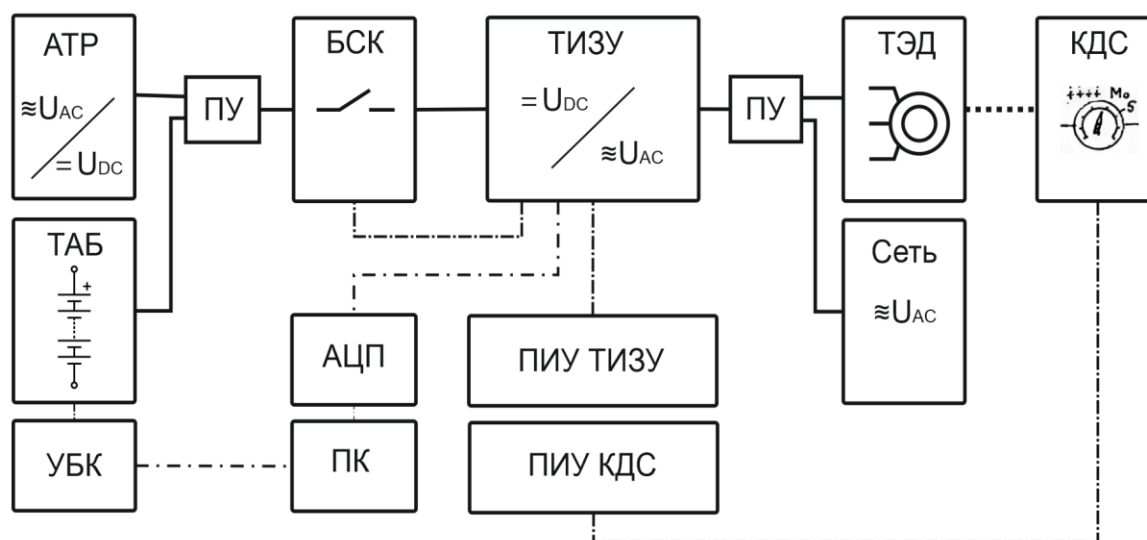


Рисунок 9 – Структурная схема стенда комплексных испытаний

Программа экспериментальных исследований состояла из двух этапов, при этом предварительно проводилась проверка измерительной аппаратуры в соответствии с метрологическим требованиям. В рамках первого этапа осуществлялась оценка работы в тяговом режиме. В качестве источника энергии использовалась трехфазная сеть с последующим выпрямлением переменного напряжения для питания тягового инвертора. Нагрузка обеспечивалась тяговым асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором и динамометрическим нагрузочным устройством.

При этом производилась оценка следующих режимов работы:

- предварительный заряд входной ёмкости;

- воспроизведение динамического режима работы тягового электропривода с чередованием характерных участков движения: разгон, установившаяся скорость, выбег, торможение. Воспроизведение которого выполнялось посредством задания фазного тока ТЭД с использованием пульта оперативного управления. При этом разгон сопровождался плавным заданием тока фазы от минимального до максимального значения с последующим снижением при достижении установившейся скорости вращения ротора. На выбеге задание по току снижалось до нуля, а в режиме торможения осуществлялось аналогично разгону, но с отрицательным моментом. Результаты испытаний в динамическом режиме отражают зависимости, представленные на рисунке 10.

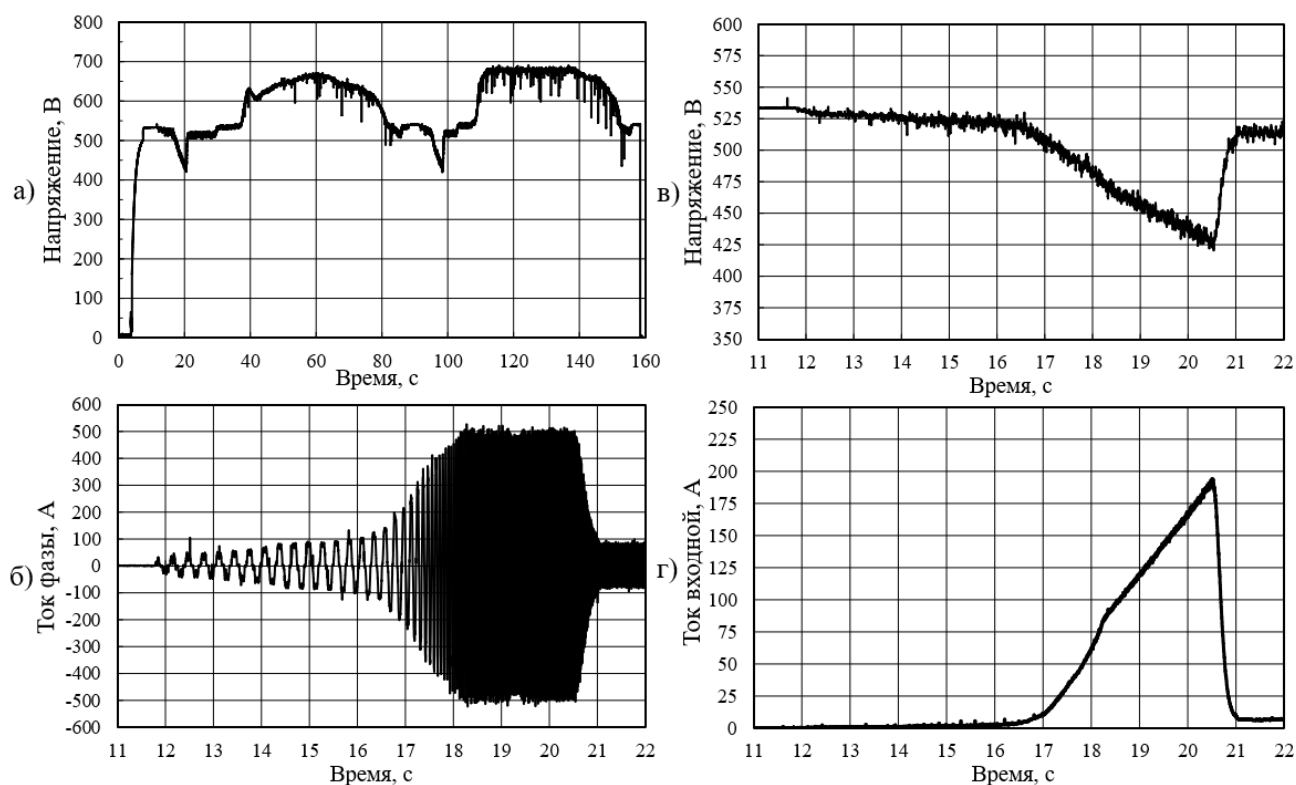


Рисунок 10 – Изменение (а) входного напряжения ТИЗУ в режиме тяги, (б) фазного тока в процессе разгона тягового электропривода, (в) входного напряжения и (г) входного тока в процессе разгона тягового электропривода

Исследование в длительном режиме работы производилось при заторможенном роторе. В этом режиме реализовывалось максимальное задание по фазному току и моменту ТЭД, а также контролировалась температура охлаждающей жидкости на выходе жидкостного охладителя тягового инвертора. Изменение сопротивления датчика температуры в процессе нагрузочных испытаний показало, что температура охлаждающей жидкости не превысила значение 60°C при средней эквивалентной мощности на входе ТИЗУ 29,7 кВт и продолжительности проведения испытаний 600 с. Указанные значения согласуются с параметрами стандартизированного цикла смешанного движения US06 и позволяют сделать заключение об эффективности реализованной системы охлаждения. Полученные показатели и зависимости в режимах тяги и генераторного торможения свидетельствуют о корректной работе экспериментального образца тягового инвертора напряжения.

Экспериментальные исследования ТИЗУ в зарядном режиме осуществлялись на реальном объекте – экспериментальном образце легкового автомобиля. Работоспособность предложенных технических решений в части ЗУ оценивалась при реализации двух алгоритмов заряда – стандартного ПТ/ПН и предложенного ЗПТ/ПН.

Результаты экспериментальных исследований в виде временных зависимостей представлены на рисунке 11. Оценка адекватности математической модели в рамках настоящей работы осуществляется путем сопоставления экспериментальных данных с расчетными, полученными при компьютерном моделировании аналогичных режимов заряда.

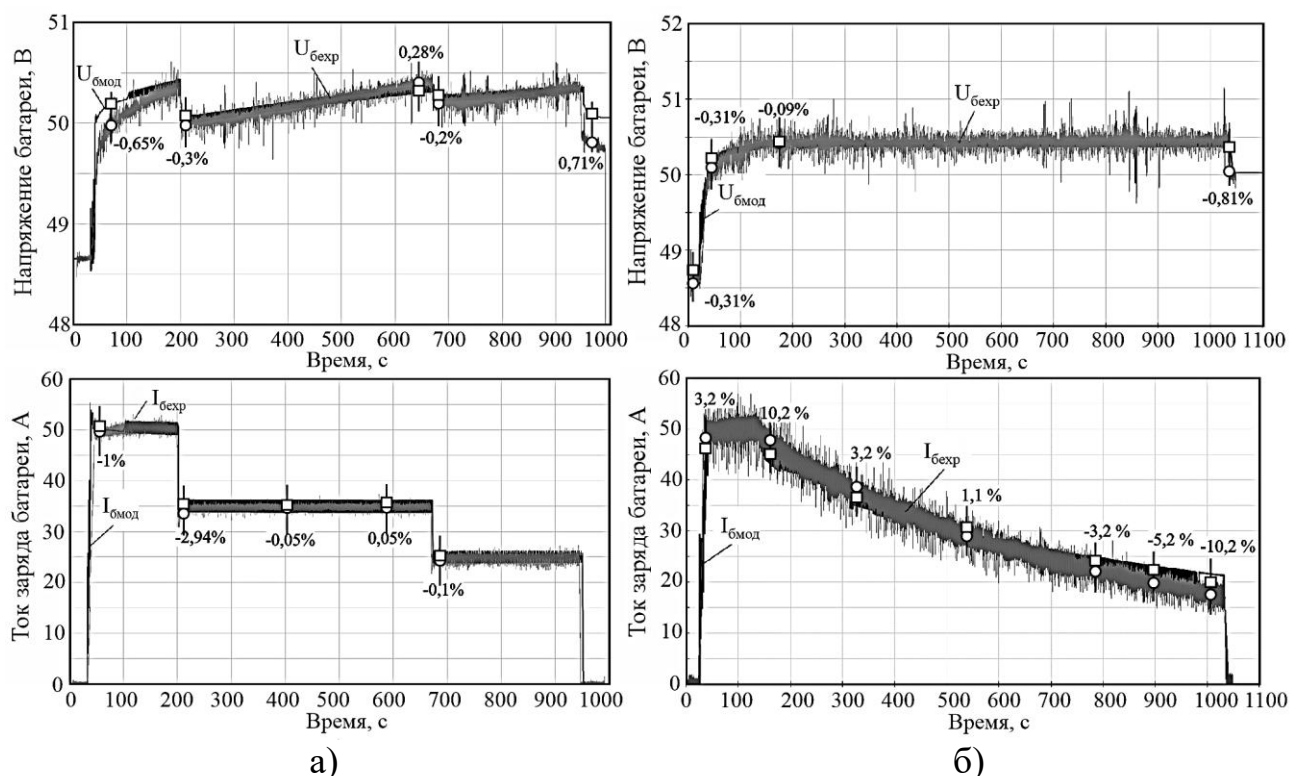


Рисунок 11 – Изменение напряжения и тока в процессе заряда аккумуляторного модуля при использовании алгоритмов: (а) ЗПТ/ПН; (б) ПТ/ПН

КПД ТИЗУ при использовании предложенного алгоритма трехступенчатого заряда ЗПТ/ПН составил 85,5 %, аналогичный показатель для алгоритма ПТ/ПН установился на уровне 80 %. При этом максимальная температура ТАБ при реализации алгоритма ЗПТ/ПН составляет 25,3 °С, а аналогичный показатель в типовом алгоритме ПТ/ПН составляет 28 °С.

С учетом того, что серийно-производимые аналоги ТИЗУ не известны из имеющихся данных о текущем состоянии рынка, а удельная себестоимость изготовленного ТИЗУ находится на уровне 1440 руб./кВт, что более чем в два раза ниже аналогичного показателя монофункциональных тяговых инверторов зарубежного производства, полученные результаты подтверждают возможность достижения положительного экономического эффекта при производстве конечной продукции.

Область применения результатов работы - автотранспортный комплекс, отвечающий перспективным требованиям по сохранению невозобновляемых природных ресурсов и улучшению экологической ситуации в масштабе крупных городов, в том числе: городские электробусы; грузовые транспортные средства средней и большой грузоподъемности; специализированные ТС муниципальных служб, коммунального хозяйства и центров организации дорожного движения; легковые ТС малого и среднего класса; коммерческие ТС.

Таким образом, целевой сегмент использования результатов работы включает основных производителей перспективных транспортных средств, нацеленных на повышение энергетической и экономической эффективности, а также улучшение массогабаритных показателей тягового электрооборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен обзор и дан анализ существующих технических решений в области преобразователей напряжения (инверторов и зарядных устройств) транспортного назначения. Для сравнительной оценки вариантов предложен коэффициент степени интеграции, учитывающей количество используемых полупроводниковых элементов и степень усложнения конструкции.
2. Предложено схемное исполнение силовой части ТИЗУ, которое при использовании единой элементной базы позволяет реализовать две качественно различающиеся функции - тягового инвертора и зарядного устройства. Рассмотренное схемное решение в одном функционально законченном блоке позволяет рационализировать СТЭО электромобиля, использовать для заряда доступные трехфазные сети переменного тока без дорогостоящего стационарного преобразовательного электрооборудования, увеличить мощность и скорость заряда ТАБ по меньшей мере в 7 раз в сравнении с типовыми зарядными станциями переменного тока, улучшить массогабаритные показатели и экономическую эффективность СТЭО электромобильного транспорта.
3. Разработана методика расчета силовой части тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством, учитывающая базовые характеристики транспортного средства как объекта применения ТИЗУ и служащая руководящим материалом для выполнения расчетной оценки характеристик ТИЗУ.
4. Разработана комплексная математическая (компьютерная) модель системы тягового электрооборудования электромобиля, которая учитывает особенности температурных режимов при эксплуатации ТАБ.
5. В ходе теоретических исследований осуществлен расчет основных показателей работы СТЭО легкового электромобиля в стандартизированных ездовых циклах. При этом максимальная мощность на валу ТЭД в наиболее энергетически нагруженном цикле составила 105 кВт при удельном расходе электрической энергии ТАБ 241,5 Вт·ч/км.
6. Предложен и реализован в комплексной математической модели СТЭО трехступенчатый алгоритм ускоренного заряда ТАБ, который отличается меньшим (на 6,3%) значением средней токовой нагрузки в сравнении с типовым режимом заряда. Предложенный алгоритм позволяет снизить среднюю температуру ТАБ в процессе заряда на 12,8 % при несущественном увеличении времени заряда.
7. Предложены технические решения в части ТИЗУ, позволяющие рационализировать конструкцию тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством. При этом возможно снижение удельной себестоимости, которая для экспериментального образца ТИЗУ находится на уровне 1440 руб./кВт, что в два раза ниже стоимости инверторов зарубежного производства.
8. На основании результатов расчетных исследований и компьютерного моделирования осуществлен выбор компонентной базы и изготовлен экспериментальный образец ТИЗУ, отвечающий следующим характеристикам: максимальная расчетная мощность инвертора 250 кВт, максимальная выходная мощность интегрированного зарядного устройства 160 кВт, максимальное рабочее

постоянное напряжение 900 В, максимальный фазный ток 850 А, удельная мощность 12,5 кВт/кг.

9. Проведены экспериментальные исследования ТИЗУ, в ходе которых подтверждены функциональные и параметрические характеристики изготовленного ЭО, при этом, с учетом возможностей стенда, в динамическом режиме работы электропривода реализованы следующие показатели: максимальный выходной фазный ток ТИЗУ – 355 А, номинальное входное напряжение – 540 В, максимальная мощность в режиме разгона – 83 кВт.

10. В ходе экспериментальных исследований осуществлены нагрузочные испытания ТИЗУ в длительном режиме работы, эквивалентном движению легкового автомобиля в стандартизированном цикле интенсивного дорожного движения (US06). Установленное значение температуры охлаждающей жидкости ТИЗУ при этом не превысило 60 °С, что свидетельствует об эффективности реализованной системы охлаждения.

11. С использованием ТИЗУ осуществлен процесс заряда ТАБ реального легкового автомобиля. КПД ТИЗУ при использовании предложенного трехступенчатого алгоритма заряда составил 85,5 %, аналогичный показатель для типового алгоритма установился на уровне 80 %. Максимальная температура ТАБ при реализации предложенного алгоритма составила 25,3 °С, что ниже на 2,7 °С аналогичного показателя для типового варианта заряда.

12. Полученные результаты позволили дать оценку адекватности предложенной математической модели СТЭО путем сопоставления экспериментальных данных с расчетными. При этом выявлено, что максимальная ошибка расчетной оценки напряжения для трехступенчатого алгоритма заряда составила 0,71 %, а тока 1 %.

Список опубликованных работ по теме диссертационного исследования:

а) в периодических рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Ютт, В.Е., Сидоров К.М., Расчетные исследования температурных режимов тяговых аккумуляторных батарей электромобилей / В.Е. Ютт, К.М. Сидоров, А.Г. Грищенко // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2019. №2. – с.10-14.
2. Грищенко, А.Г., Математическое моделирование и расчетные исследования процесса заряда тяговой литий-ионной аккумуляторной батареи легкового автомобиля / А.Г. Грищенко // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. Вып. 9 – с. 549-555.
3. Сидоров К.М., Комплексная модель автономной энергетической установки на основе стабилизирующих преобразователей напряжения / К.М. Сидоров, Б.К. Оспанбеков, А.Г. Грищенко, В.И. Строганов, В.Е. Ютт // Телекоммуникации и транспорт – 2021 – ТОМ 15. №10 – с. 18-28.

б) в периодических рецензируемых научных изданиях

4. Грищенко А.Г., Математическое моделирование и экспериментальная апробация устройства ускоренного заряда в составе тягового инвертора для электромобиля / А.Г. Грищенко, К.М. Сидоров // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. – 2021. Т. 11. № 3. – с. 82-84.

5. Сидоров К.М., Расчет энергетических показателей электромобиля в различных условиях движения / К.М. Сидоров, А.Г. Грищенко, Н.Н. Коновалов // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. – 2021. Т. 11. № 4. – с. 68-71.

в) в изданиях, входящих в международную базу цитирования «Scopus»

6. Izotova, T.V. Thermal Analysis of Voltage Converter for Autonomous Power Plant / T.V. Izotova, K.M. Sidorov, A.G. Grishchenko // FarEastCon2019. IEEE. – 2019.

7. Sidorov, K.M. An Experimental Investigation of Electrical and Thermal Performance of Battery Pack for Zero Emission Vehicle K.M. / K.M. Sidorov, A.G. Grishchenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019.

8. Sidorov, K.M. Traction inverter with integrated charger: practical realisation and experimental study/ K.M. Sidorov, A.G. Grishchenko, B.N. Sidorov //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019.- Vol.643, No. 1 – Vol. 272

9. Sidorov, K.M. Electric Propulsion System Simulation as Basis for the Electric Vehicle Digital Twin Development / K.M. Sidorov; A.G. Grishchenko; B.N. Sidorov; V.I. Stroganov// 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. IEEE, 10.1109

г) в изданиях, входящих в международную базу цитирования «Web of Science»

10. Sidorov, K.M. Practical implementation of the concept of converted electric vehicle with advanced traction and dynamic performance and environmental safety indicators / K.M. Sidorov, V.E. Yutt, A.G. Grishchenko, T.V. Golubchik // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. - № 315 (012026). – С.1-9.

д) зарегистрированные объекты интеллектуальной собственности

11. Пат. 175680 Российская Федерация, МПК H02J 7/00 B60L 11/18. Тяговый преобразователь напряжения с интегрированным зарядным устройством / Сидоров К.М., Ютт В.Е., Голубчик Т.В., Грищенко А.Г.; заявитель и патентообладатель ФБОУ ВО "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)" (RU) - №2016151270; заявл. - 2016.12.26 опубл. 2017.12.01. Бюл. № 35 – 11 с. : ил.

12. Пат. 2706337 Российская Федерация, МПК H02M 7/21 H05K 7/20 H02M 1/00. Преобразователь напряжения с охлаждаемой батареей конденсаторов / Сидоров К.М., Грищенко А.Г.; заявитель и патентообладатель ФБОУ ВО "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)" (RU) - №2018145181; заявл. - : 19.12.2018 опубл : 18.11.2019. Бюл. № 32 – 13 с. : ил.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.04
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 5 от 29.03.2022)

Подписано к печати 29.03.2022 г.
Объем 1,5 п.

Заказ № 42 Формат 60х90 /16
Тираж 100 экз.