На правах рукописи

МАЛИКОВ Рамиль Раильевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации – Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (ФГУП «НАМИ»).

Научный руководитель:	кандидат технических наук, доцент, **Карпухин Кирилл Евгеньевич** (ФГУП «НАМИ»)
Официальные оппоненты	**Федотов Александр Иванович** заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»
	Голубчик Тимофей Владимирович кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)»
Ведущая организация	**ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ)**

Защита диссертации состоится «25» декабря 2023 г в 14:00 на заседании диссертационного совета 31.1.008.01 при ФГУП «НАМИ», по адресу: 125438, г. Москва, Автомоторная ул., д.2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НАМИ» и на сайте www.nami.ru по ссылке: https://nami.ru/directions/scientific-activity/dissertation-council.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью организации, просим направлять по вышеуказанному адресу, ученому секретарю диссертационного совета, а копии присылать на e-mail: rinat.kurmaev@nami.ru.

Автореферат разослан «25» октября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент Курмаев Ринат Ханяфиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

На текущий момент, основной глобальной проблемой является рост выбросов от автотранспортных средств, загрязняющих атмосферу. Самым эффективным способом борьбы с выбросами являются электрифицированные транспортные средства (ЭТС) с перезаряжаемыми химическими источниками энергии, обеспечивающие нулевые выбросы. Для увеличения числа электротранспорта в городе правительство предоставляет различного рода поддержку владельцам легковых автомобилей, таких как бесплатная парковка в городе, нулевой транспортный налог и бесплатный проезд по платным федеральным трассам. Но основной вклад в снижении выбросов приносит переход городских автобусных парков с дизельных транспортных средств (ТС) на электробусы.

Перезаряжаемые химические источники энергии являются одним из основных элементов ТС, как с функциональной точки зрения, так и с экономической. Доля стоимости тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) на сегодняшний день может достигать 40 % от стоимости ТС.

Исходя из выше приведенных данных, тяговые накопители энергии всегда будут оставаться самым дорогим компонентом ЭТС. Помимо стоимости, ЭТС имеют ограниченный запас хода – это связано с удельной энергоемкостью аккумуляторных батарей, которая не превышает 200 Втч/кг на уровне контейнера и 300 Втч/кг на уровне единичного аккумулятора (ЕА).

Для решения всех вышеуказанных проблем необходимо проводить исследования эксплуатации транспортного средства на этапах формирования стратегии использования ЭТС. Исследование эксплуатации заключается в моделировании движения с учетом ездовых циклов близких к тем условиям, где планируется использовать ЭТС. Моделирование позволяет определить баланс энергии, необходимый для суточной эксплуатации автотранспорта. Помимо определения энергетического баланса, важно осуществлять проверку тяговых

свойств ТС, время зарядной сессии, температурные показатели тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) и т.д. В данной работе приведена структура построения виртуальной модели ТС, проведена её валидация, на основе модели построено регрессионное уравнение для расчета удельного расхода энергии пассажирских ТС, представлена методика анализа технических характеристик аккумуляторной батареи при проведении виртуальных испытаний, а также апробация данной методики при подборе и исследовании характеристик тяговой аккумуляторной батареи в составе пассажирского ЭТС категории М3. В результате выше изложенного, выбранная тема исследования является актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Исследования, затрагивающие темы моделирования ЭТС, приведены в работах: Бахмутова С.В., Жилейкина М.М., Карпухина К.Е., Козлова А.В. Темы, связанные с моделированием ТАБ упомянуты в работах: Куликова И.А., Строганова В.И., Сидорова К.М., Биксалеева Р.Ш., Аджиманбетова С. Б., Srinivasan V., Prasanna Mantravadi S.R., Samadani E. Проблемам повышения энергоэффективности ЭТС посвящены труды специалистов: Климова А.В., Косицына Б.Б., Оспанбекова Б.К., Дедова С.И.

Анализ научных работ показал высокий уровень проработки материалов, связанных с моделированием химических источников токов, исследованием энергопотребления ТС при движении по циклу, а также энергоэффективное использование электроэнергии. Однако работ, связанных с методикой оценки характеристик ТАБ в составе ТС не найдено. В связи с чем развитие данной темы является актуальной задачей, для решения которой необходимо связать опыт моделирования, как электрических характеристик батареи, так и аспектов, связанных с расчетом тягового баланса движения ТС.

Целью диссертационной работы является разработка методики исследования и совершенствования эксплуатационных показателей ЭТС в аспекте влияния характеристик ТАБ.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели необходимо решение ряда последовательных задач:

1. Разработать инструмент исследований в виде комплексной математической модели (ММ), позволяющей рассчитывать затраты энергии на движение ТС с учетом работы климатической системы, а также с учетом потребления энергии системой термостатирования батареи в зависимости от температурных условий.

2. Провести валидацию на основе данных, полученных экспериментальным путем для определения степени адекватности ММ.

3. Разработать регрессионную модель для упрощенного расчета удельного расхода энергии пассажирского ЭТС различной полной массой и в зависимости от температурных условий.

4. Разработать методику определения основных электрических показателей ТАБ для формирования технических требований (ТТ).

5. Разработать структурированную методику исследования влияния характеристик ТАБ на эксплуатационные свойства ТС.

6. Опробовать методику исследования влияния характеристик ТАБ на эксплуатационные свойства ТС на примере электробуса категории М3.

Объект исследования – пассажирское ЭТС категории М3 (электробус КАМАЗ 6282) оснащенное ТАБ.

Предмет исследования – влияние характеристик ТАБ на эксплуатационные свойства ЭТС.

Научная новизна

1. Представлена новая комплексная математическая модель движения ЭТС, отличающаяся тем, что позволяет рассчитывать затраты энергии на движение ТС с учетом работы климатической системы (зимой – подогрев, летом – охлаждение салона), а также с учетом потребления энергии системой термостатирования батареи в зависимости от температурных условий.

2. Разработана новая регрессионная модель для расчета удельного расхода энергии для пассажирских транспортных средств полной массой от 4,5 до 28 т с электроприводом, химическим накопителем энергии и климатической установкой.

3. Разработана новая методика анализа характеристик аккумуляторной батареи, отличающаяся тем, что позволяет выбрать или разработать накопительную систему с энергетическими показателями, которые смогут обеспечить все потребности транспортного средства для выполнения поставленных задач в техническом задании на ТС.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработанная программная реализация комплексной математической модели транспортного средства, включающая в себя модель расчета тягового баланса ТС, теплового баланса салона, а также модель аккумуляторной батареи, может быть использована для проведения виртуальных испытаний, являющихся частью процесса создания и исследования автомобилей с тяговым электроприводом.

2. Определены коэффициенты регрессионного уравнения для расчета удельного расхода энергии для пассажирских транспортных средств с электроприводом и химическим накопителем энергии.

3. Разработана методика расчета основных электрических характеристик для формирования технических требований к накопителю энергии ЭТС.

4. Разработана методика анализа влияния характеристик тяговой аккумуляторной батареи на эксплуатационные показатели ЭТС.

Методология и методы диссертационного исследования

Теоретические исследования основаны на методах теоретической механики, теории движения автомобиля, теории электротехники, теории тепловых процессов, вычислительной математики, теории полного факторного эксперимента и математического моделирования. В качестве теоретической базы для проведения

исследований использовались фундаментальные и прикладные труды ведущих отечественных и зарубежных ученых.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика создания виртуальной математической модели движения ТС, включающая в себя: модель аккумуляторной батареи и модель климатической системы салона транспортного средства.

2. Методика определения основных электрических показателей ТАБ для формирования ТТ.

3. Методика исследования влияния характеристик аккумуляторной батареи на эксплуатационные свойства ТС в различных условиях использования.

4. Результаты дорожных испытаний и сопоставление с данными, полученными путем виртуального моделирования.

5. Методика определения структуры и коэффициентов регрессионного уравнения для расчета удельного расхода электроэнергии пассажирского ТС с применением метода полного факторного эксперимента.

6. Результаты виртуальных испытаний пассажирского ТС категории М3 для определения влияния характеристик аккумуляторной батареи на эксплуатационные показатели ЭТС.

Достоверность и обоснованность

Достоверность, полученных результатов в данной работе подтверждаются сопоставлением данных виртуального моделирования с результатами серии ездовых испытаний электрифицированного пассажирского транспортного средства категории М3.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы были представлены, обсуждены и одобрены на:

– 7-ой международной научной конференции «Проблемы механики современных машин», 25-30 июня 2018 г., Улан-Удэ;

– МАНФ–2020 «Наземные интеллектуальные транспортные средства и системы» АВТОНЕТ–2020, 14-15 октября 2020 г., Москва;

– 79-ой международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, 25-30 января 2021 г., Москва;

– Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Энергетическая эффективность автотранспортных средств: технологии, информационно-коммуникационные системы, альтернативные источники энергии», 23-24 декабря 2021 г., Воронеж;

– 110-й конференции ААИ «Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации», 2-4 июня 2021 г., Иркутск;

– 112-й конференции ААИ «Конструктивная безопасность автотранспортных средств», 8-9 июня 2022, п. Автополигон, г. Дмитров;

– Научно-практической конференции РУСБАТ 2023 «Российский рынок систем электрохимического накопления электрической энергии и батарейных систем электротранспорта. Проблемы и перспективы», 10-11 апреля 2023., г. Москва.

Реализация результатов

Концепция комплексного подхода к анализу тяговых накопителей энергии была внедрена в аналитические работы по выбору аккумуляторных систем при разработке линейки энергоэффективных пассажирских и грузовых транспортных средств КАМАЗ на предприятии ООО «Инновационный центр «КАМАЗ».

Результаты теоретических исследований диссертационной работы были использованы в учебных целях в передовой инженерной школе и на кафедре «Наземные транспортные средства» ФГАОУ ВО «Московского политехнического университета».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ: 9 научных статей в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 1 научная статья в зарубежном журнале, входящем в базу данных «Scopus», 2 патента РФ на полезную модель.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений. Диссертация имеет общий объем 217 страниц машинописного текста, 51 таблицу, 98 рисунков, список литературы с 108 наименованиями на 14 страницах, перечень сокращений на 1 странице и 22 страниц приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта проблематика и обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, а также отражены положения научной новизны, выносимые на защиту, и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе раскрывается проблематика выбора и разработки тяговых накопителей энергии для применения в ЭТС. Проведен анализ научных работ, посвященных методам анализа характеристик ТАБ и работ, связанных с оценкой параметров при выборе или разработке ТАБ.

Анализ основных эксплуатационных свойств ЭТС показал, что каждое конкретное свойство зависит от определенного параметра накопителя энергии. Так, диапазон напряжения ТАБ влияет на эффективность работы ТЭД, пиковые и длительные разрядные токи влияют динамические показатели ТС, пиковые зарядные токи на снижение затрат энергии при рекуперации, соответственно длительные токи влияют на скорость заряда, энергоемкость на максимальный пробег ТС, а ресурс ТАБ на срок службы ТС. Анализ влияния характеристик ТАБ на эксплуатационные свойства требует комплексного подхода, учитывающего параметры аккумуляторной батареи в самых тяжелых условиях эксплуатации ТС.

Анализ научных работ показал высокий уровень проработки материалов связанных с моделированием химических источников тока, исследований энергопотребления ТС при движении по циклу, а также эффективное использование электроэнергии. При этом работ, связанных с методикой оценки

характеристик ТАБ в составе ТС не обнаружено. В связи с чем развитие данной темы является актуальной задачей, для решения которой необходимо связать опыт моделирования, как электрических характеристик батареи, так и аспектов, связанных с расчетом тягового баланса движения ТС.

Большинство работ в области исследования характеристик аккумуляторных батарей в составе транспортного средства посвящены обзору основных типов химических систем, а также оценке величины пробега ЭТС с заданной емкостью накопителей энергии. Данные источники не дают понимания и взвешенной оценки параметров при выборе или разработке аккумуляторной батареи для эффективной эксплуатации ЭТС.

Во второй главе приведено теоретическое описание к моделированию движения ТС с учетом характеристик ТАБ и с учетом затрат энергии на климатическую систему салона и систему термостатирования аккумуляторной батарей.

Описание ММ аккумуляторной батареи.

Схема замещения характеризуется уравнением падения напряжения под нагрузкой U_{Dyn}:

$$U_{Dyn} = U_{OCV} - IR_{DCIR}, \quad (1)$$

где U_{OCV} – напряжение разомкнутой цепи в зависимости от уровня заряда ТАБ (state of charge SOC) и температуры, В; I – ток разряда или заряда, А; R_{DCIR} – внутреннее сопротивление ячейки зависимости от SOC и температуры, Ом.

Тепловая модель накопителя энергии построена на основе энергетического баланса системы. На рисунке 1 условно изображена модель теплового воздействия на аккумуляторную сборку, находящуюся в контейнере. На аккумуляторную сборку воздействует: внутренний нагрев в результате заряда или разряда, теплопроводность через многослойную стенку контейнера, внешний конвективный и радиационный теплообмен с окружающей средой, и мощность термостатирования через теплоотводящую пластину.

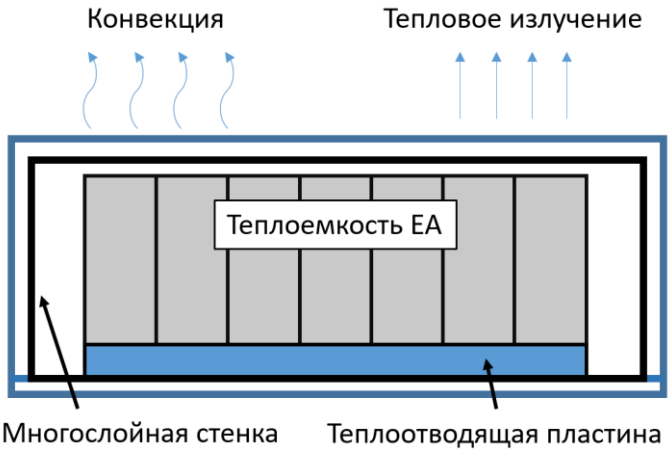

Рисунок 1 – Условное изображение тепловой модели ТАБ

Для определения теплового состояния аккумуляторной батареи используется уравнение теплового баланса:

$$N_{Bat} = N_{Amb} + N_{Heat} + N_{TMS}, \quad (2)$$

где N_{Bat} – мощность воздействия на теплоемкость аккумуляторной сборки, Вт; N_{Amb} – воздействие окружающей среды, Вт; N_{Heat} – тепловая мощность генерируемая зарядом или разрядом накопителя энергии, Вт; N_{TMS} – тепловая мощность работы системы термостатирования через теплоотводящую пластину, Вт.

Описание ММ движения ЭТС.

Для расчета энергии, затрачиваемой на движение ЭТС, была выбрана модель прямолинейного движения на основе уравнения тягового баланса. Расчетная схема действия сил при движении ЭТС представлена на рисунке 2.

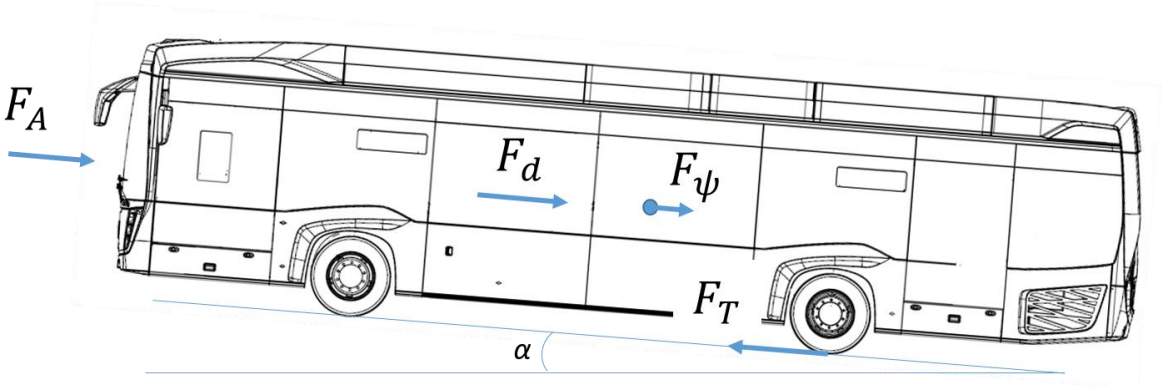

Рисунок 2 – Расчетная схема действия сил на ЭТС при прямолинейном движении

Для определения момента и скорости вращения электродвигателя необходимо определить силы сопротивления движению. Движение ТС характеризуется уравнением тягового баланса:

$$F_T = F_\psi + F_A + F_d, \quad (3)$$

где F_T – сила тяги на колесе, необходимая для преодоления сопротивления движению, Н; F_ψ – сила сопротивления дороги, включающая в себя сумму из сил сопротивления качению и сил сопротивления подъему, Н; F_A – сила сопротивления воздуху, Н; F_d – сила сопротивления разгону поступательно движущихся масс и вращающихся масс, Н.

Сила сопротивления дороги F_ψ рассчитывается следующим образом:

$$F_\psi = G_a\left(f cos\alpha\left(1 + A_f v^2\right) + sin\alpha\right), \quad (4)$$

где G_a – вес транспортного средства, Н; f – коэффициент сопротивления качению; α – уклон дороги, °; A_f – коэффициент влияния скорости на сопротивление качению, с^2/м^2; v – скорость транспортного средства, м/с.

Сила сопротивления воздуху F_A равна:

$$F_A = C_x \rho \frac{v^2}{2} A, \quad (5)$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления (коэффициент обтекаемости); ρ – плотность воздуха, кг/м^3; A – площадь лобового сечения, м^2.

Сила сопротивления разгону поступательно движущихся масс и вращающихся масс F_d находится по формуле:

$$F_d = \delta M_a a, \quad (6)$$

где δ – коэффициент учета вращающихся масс; M_a – масса транспортного средства, кг; a – ускорение транспортного средства в направлении движения, м/с^2.

Для определения затрат энергии на движение ЭТС необходимо определить электрическую мощность электродвигателя. Электрическая мощность электродвигателя ЭТС определяется, как:

$$N_{эл} = \frac{M_{эд} \cdot \omega_{эд}}{\eta_{инв} \cdot \eta_{эд}}, \quad (7)$$

где $M_{эд}$ – крутящий момент электродвигателя, Н·м; $\omega_{эд}$ – скорость вращения ротора электродвигателя рад/сек; $\eta_{инв}$ – КПД инвертора; $\eta_{инв}$ – КПД электродвигателя.

Описание тепловой ММ салона ТС.

Температура воздуха в салоне транспортного средства зависит от многих факторов, таких как:

- прямое и рассеянное солнечное излучение;
- выделяемое тепло пассажирами в салоне;
- работа климатической системы;
- вентиляция салона воздухом из окружающей среды;
- смешивание салонного воздуха с уличным при открытии дверей;
- теплопередача через кузов и стекла транспортного средства.

Все эти факторы должны быть учтены при расчете теплового баланса салона транспортного средства (рисунок 3).

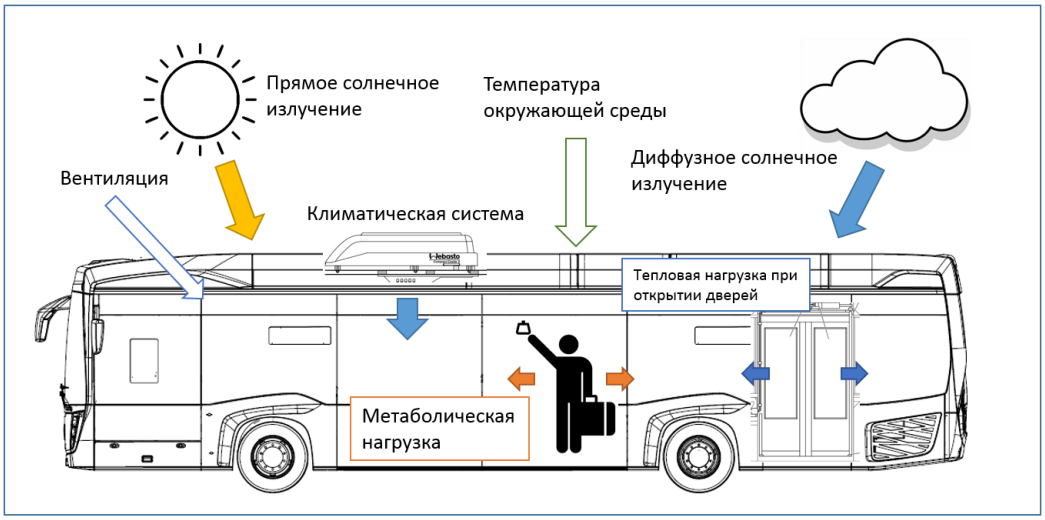

Рисунок 3 – Тепловое воздействие на температуру воздуха в салоне

Сумма мощности воздействия различных факторов равна мощности тепловой нагрузки воздуха в салоне N_{Tot}:

$$N_{Tot} = N_{Sol} + N_{Met} + N_{Amb} + N_{Ven} + N_{Opd} + N_{Clim}, \quad (8)$$

где N_{Sol} – мощность воздействия солнечных лучей, Вт; N_{Met} – суммарный метаболизм людей находящихся в салоне, Вт; N_{Amb} – мощность тепловых потерь в окружающую среду, Вт; N_{Ven} – мощность тепловых потерь связанных с

вентиляцией, Вт; N_{Opd} – мощность воздействия температуры окружающей среды при открытии двери, Вт; N_{Clim} – мощность от климатической установки, Вт.

Регрессионная модель определения удельного расхода энергии ЭТС.

С помощью метода полного факторного эксперимента определено регрессионное уравнение, которое позволяет определять расход энергии любого пассажирского ТС полной массой от 4,5 до 28 т, с учетом таких исходных данных, как температура окружающей среды, начальная температура салона, загрузка, полная и снаряженная масса ТС. Коэффициенты регрессионного уравнения определены на основе результатов моделирования с помощью имитационной модели (ИМ).

Уравнение регрессии для определения удельного расхода ЭТС в диапазоне температур от -30 °С до +10 °С имеет следующий вид:

$$
\begin{aligned}
y = {} & 1.726 + 0.1201\frac{(z_1-50)}{50} - 0.4930\frac{(z_2+10)}{20} - 0.1342\frac{(z_3-50)}{50} + 1.1681\frac{(z_4-16250)}{11750} + \\
& 0.1513\frac{(z_5-65)}{15} - 0.0061\left(\frac{(z_1-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_2+10)}{20}\right) - 0.0058\left(\frac{(z_1-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_3-50)}{50}\right) + \\
& 0.0955\left(\frac{(z_1-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_4-16250)}{11750}\right) + 0.0226\left(\frac{(z_1-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_5-65)}{15}\right) + \\
& 0.0574\left(\frac{(z_2+10)}{20}\right)\left(\frac{(z_3-50)}{50}\right) - 0.3193\left(\frac{(z_2+10)}{20}\right)\left(\frac{(z_4-16250)}{11750}\right) + \\
& 0.0003\left(\frac{(z_2+10)}{20}\right)\left(\frac{(z_5-65)}{15}\right) - 0.0984\left(\frac{(z_3-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_4-16250)}{11750}\right) + \\
& 0.0006\left(\frac{(z_3-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_5-65)}{15}\right) + 0.0006\left(\frac{(z_4-16250)}{11750}\right)\left(\frac{(z_5-65)}{15}\right) + \\
& 0.0066\left(\frac{(z_1-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_2+10)}{20}\right)\left(\frac{(z_3-50)}{50}\right) - 0.0073\left(\frac{(z_1-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_2+10)}{20}\right)\left(\frac{(z_4-16250)}{11750}\right) - \\
& 0.001\left(\frac{(z_1-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_2+10)}{20}\right)\left(\frac{(z_5-65)}{15}\right) + 0.0372\left(\frac{(z_2+10)}{20}\right)\left(\frac{(z_3-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_4-16250)}{11750}\right) - \\
& 0.0015\left(\frac{(z_2+10)}{20}\right)\left(\frac{(z_3-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_5-65)}{15}\right) - 0.0001\left(\frac{(z_3-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_4-16250)}{11750}\right)\left(\frac{(z_5-65)}{15}\right) + \\
& 0.0062\left(\frac{(z_1-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_2+10)}{20}\right)\left(\frac{(z_3-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_4-16250)}{11750}\right) - \\
& 0.0002\left(\frac{(z_1-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_2+10)}{20}\right)\left(\frac{(z_3-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_5-65)}{15}\right) + \\
& 0.0002\left(\frac{(z_2+10)}{20}\right)\left(\frac{(z_3-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_4-16250)}{11750}\right)\left(\frac{(z_5-65)}{15}\right) - \\
& 0.0001\left(\frac{(z_1-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_2+10)}{20}\right)\left(\frac{(z_3-50)}{50}\right)\left(\frac{(z_4-16250)}{11750}\right),
\end{aligned}
\tag{9}
$$

где z_1 – загрузка транспортного средства $k_{загр}$ (%), $z_{1min} = 0$, $z_{1max} = 100$; z_2 – температура окружающей среды $T_{окр}$ (°С), $z_{2min} = -30$, $z_{2max} = +10$; z_3 – начальная

температура салона в зависимости от температуры окружающей среды $T_{нач}$ (%), $z_{3min} = 0$ (-30), $z_{3max} = 100$ (+21); z_4 – полная масса транспортного средства $M_{полн}$ (кг), $z_{4min} = 4\,500$, $z_{4max} = 28\,000$; z_5 – доля снаряженной массы транспортного средства от полной $k_{снар}$ (%), $z_{5min} = 50$, $z_{5max} = 80$.

Определены переменные, которые оказывают наибольшее влияние на удельный расход энергии ЭТС. Выявлено, что основное влияние оказывает полная масса ТС. Для температур ниже +10 °С, наибольшее влияние оказывают: 1) температура окружающей среды, 2) снаряженная масса ТС и 3) начальная температура салона. Для температур выше +10 °С: 1) загрузка ТС и 2) снаряженная масса.

В третей главе приводятся результаты испытаний электробуса КАМАЗ 6282 (рисунок 4), необходимых для валидации разработанной ММ. В связи с этим были проведены серия ездовых испытаний по дорогам общего пользования и в Дмитрове на полигоне НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ».

Рисунок 4 – Электробус КАМАЗ 6282

В ходе исследования были проведены следующие испытания:

1. Разгон – рекуперативное торможение;
2. Имитация городского цикла движения по ровной дороге;
3. Движение по маршруту № 911 рейсового электробуса;
4. Зарядная сессия;

5. Прогрев салона электробуса при экстремально низкой температуре;
6. Прогрев ТАБ при низкой температуре.

Разработанная ИМ была валидирована с приемлемой погрешностью, подтверждая адекватность блока расчета тягового баланса движения ТС, что обосновывается следующими результатами:

- средней нормированной погрешностью 4,6 % по мощности при испытании «Разгон-торможение»;

- средней нормированной погрешностью 7,3 % по мощности при испытании «Имитация городского цикла движения по ровной дороге»;

- средней нормированной погрешностью 8,3 % по мощности при езде по маршруту № 911.

Методами стационарных испытаний на полный цикл заряда была подтверждена адекватность ИМ ТАБ, которая показала среднее значение отклонения от эксперимента в 1,37 % по току.

Подтверждена адекватность тепловой модели ТАБ, что обосновывается низким значением среднего нормированного отклонения по температуре - 1,2 %, от экспериментальных данных, полученных при разогреве ТАБ в условиях окружающей среды -25 °С.

По результатам проведённых экспериментальных исследований в термокамере при -40 °С, обоснована адекватность расчета ИМ климатической системы ТС, что подтверждается погрешностью сравнения с экспериментальными данными по электрической мощности 6,35 %, а по температуре салона ТС 1,52 %.

В четвертой главе приводится методика расчета основных электрических характеристик накопителя энергии для формирования технических требований к ТАБ. На основе расчетных характеристик представлена методика предварительного анализа, которая позволяет определить варианты ТАБ наиболее близкие к удовлетворению ТТ. Приводится методика исследования влияния характеристик аккумуляторной батареи на эксплуатационные свойства ЭТС. На основе проведенных расчетов представлен метод многокритериальной оценки,

позволяющий определить вариант ТАБ наиболее близко соответствующий эксплуатационным параметрам ЭТС.

Структура методики исследования ТАБ в составе ЭТС представлена на рисунке 5.

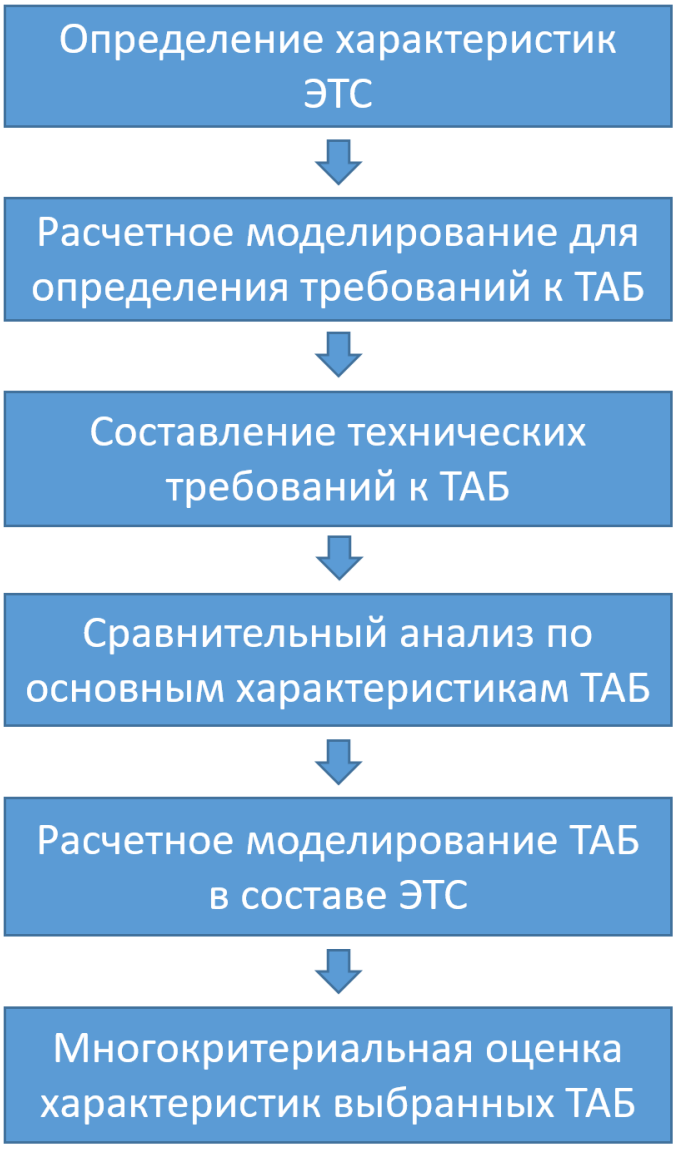

Рисунок 5 – Структура методики исследования ТАБ

Предложена новая методика, определения характеристик ТАБ с помощью упрощенного способа с использованием регрессионного уравнения и уравнений тягового баланса. Методика отличается тем, что позволяет сформировать основные требования к аккумуляторной батарее, учитывая при этом техническое задание к ЭТС. Данная методика отличается тем, что не требует большого количества данных

о ТС и времени на проведение расчетов. Тем самым позволяет сократить время на разработку технических требований к накопителю энергии.

Представлена новая методика предварительной сравнительной оценки ТАБ по основным характеристикам, отличающаяся тем, что позволяет с применением функции принадлежности на начальном этапе определить удовлетворяющие требованиям накопители энергии, а также сравнить различные накопители энергии и выбрать наилучший вариант для конкретного ТС.

Представлена новая методика анализа влияния характеристик ТАБ на эксплуатационные свойства ЭТС, отличающаяся тем, что позволяет при помощи проведения виртуальных испытаний оценить динамические показатели ЭТС, максимальный пробег в различных условиях, длительность заряда, а также срок службы.

Перечень расчетов необходимых для проверки эксплуатационных показателей (рисунок 6).

Параметры ТАБ	Расчетные случаи
Диапазон напряжения →	Динамическое напряжение при заряде и разряде
Пиковая мощность разряда →	Динамические показатели ТС
Длительная мощность разряда →	Максимальная скорость ТС
Пиковая мощность заряда →	Тормозной путь при рекуперативном торможении
Длительная мощность заряда →	Время заряда ТАБ
Энергоемкость →	Дневная эксплуатация при различных температурах
Диапазон температур использования ТАБ →	Время выхолаживания ТАБ Времени прогрева аккумуляторной батареи
Ресурс →	Пропускная способность за время эксплуатации

Рисунок 6 – Перечень расчетных случаев

Результаты серии проведенных виртуальных испытаний должны быть оценены с помощью функции оценки параметров (рисунок 7), где Y_{max} – это допустимое значение выше или ниже которого, параметр удовлетворяет ТТ и соответственно оценивается, как 1. Y_{min} – это не допустимое значение выше или ниже которого, параметр не удовлетворяет ТТ и оценивается как 0.

Рисунок 7 – Функция оценки параметров

По итогам проведенных виртуальных испытаний формируется сравнительная таблица, учитывающая вес каждого оцениваемого критерия, на основе которой принимается решение о выборе аккумуляторной системы.

В пятой главе проводится апробация, представленной методики анализа влияния характеристик аккумуляторной батареи на эксплуатационные свойства ТС, на примере электробуса категории М3 с суточным пробегом.

На основе параметров технического задания к ТС путем проведения расчетов с помощью регрессионного уравнения и имитационного моделирования, формируются основные ТТ к аккумуляторной батарее, а также предельно допустимые значения. На следующем этапе необходимо сформировать сравнительную таблицу параметров, анализируемых ТАБ, а также сравнить соответствие заданным ТТ (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительная таблица параметров

№	Параметр	Доп. знач.	Пред. доп. знач.	ТАБ 1	ТАБ 2	ТАБ 3	ТАБ 4	ТАБ 5
1	Минимальное напряжение, В	550	520	515	550	522	555	550
2	Максимальное напряжение, В	750	780	760	783	680	705	750
3	Доступная энергия ТАБ, кВт·ч	380	373	320	295	416	400	200
4	Пиковая мощность разряда, кВт	370	354	520	350	800	700	280
5	Пиковая мощность заряда, кВт	215	205	520	250	800	700	300
6	Длительная мощность разряда, кВт	165	152	320	280	520	500	150
7	Длительная мощность заряда, кВт	320	300	300	200	150	500	150
8	Пропускная способность ТАБ, МВт·ч	1200	1152.3	800	900	1300	1500	1500
9	Сухая масса, не более, кг	2900	3200	1700	1800	3250	2890	2400
10	Минимальная температура, °С	-40	-30	-20	-30	-30	-30	-30
11	Максимальная температура, °С	+40	+35	+40	+36	+50	+50	+50
12	Стоимость, р/кВт·ч	7200	12000	14000	11500	8000	10400	13000

В приведенной таблице сравнительного анализа цветовой градацией выделены характеристики, соответствующие ТТ – зеленым, не соответствующие – красным. Данный способ оценки дает возможность визуально оценить параметры приведенных ТАБ, согласно допустимым значениям основных технических требований. Для более точного анализа проводится расчет с применением линейной функции принадлежности и с учетом веса критерия. В таблице 2 представлена многокритериальная оценка ТАБ с учетом веса критериев.

Таблица 2 – Оценка параметров с применением веса критерия

№	Параметр	Вес критерия	ТАБ 1	ТАБ 2	ТАБ 3	ТАБ 4	ТАБ 5
1	Минимальное напряжение, В	7	0	7	6.5	7	7
2	Максимальное напряжение, В	7	4.67	0	7	7	7
3	Доступная энергия ТАБ, кВт·ч	10	0	0	10	10	0
4	Пиковая мощность разряда, кВт	5	5	0	5	5	0
5	Пиковая мощность заряда, кВт	5	5	5	5	5	5
6	Длительная мощность разряда, кВт	5	5	5	5	5	0
7	Длительная мощность заряда, кВт	5	5	0	0	5	0
8	Пропускная способность ТАБ, МВт·ч	10	0	0	10	10	10
9	Сухая масса, не более, кг	8	8	8	0	8	8
10	Минимальная температура, °С	8	0	0	0	0	0
11	Максимальная температура, °С	8	8	6.4	8	8	8
12	Стоимость, р/кВт·ч	9	0	9,4	7,5	3	0
Суммарная оценка			40,7	32,3	69	73	45

На основе суммарной оценки сделано заключение о выборе вариантов ТАБ 3 и ТАБ 4 для дальнейшего исследования в составе ТС. ТАБ 4 является наилучшим вариантов за счет превалирующего значения сухой массы.

Проведен ряд виртуальных испытаний ТАБ 3 и ТАБ 4 в составе электробуса. Была проведена оценка результатов испытаний и сформирована сравнительная таблица с учетом веса каждого критерия (таблица 3).

Таблица 3 – Оценка критериев

№	**Критерий**	**Оценка**		**Вес критерия**	**Количественная оценка**	
		ТАБ 3	**ТАБ 4**		**ТАБ 3**	**ТАБ 4**
1	Время разгона	0.83	0.83	6	5	5
2	Длительное поддержание скорости	0.81	0.86	6	4.9	5.2
3	Тормозной путь	0.42	0.42	8	3.3	3.3
4	Время заряда	0	0.73	5	0	3.6
5	Пробег ТС	0.97	0.97	10	9.7	9.7
6	Время выхолаживания	1	1	4	4	4
7	Время прогрева	1	1	4	4	4
8	Масса	0	1	8	0	8
9	Стоимость	0.8	0.3	9	7.2	2.7
10	Ресурс	1	1	10	10	10
	Сумма	**0.68**	**0.81**	**70**	**48.1**	**55.5**

На основе проведенного анализа сделан вывод, что ТАБ 3 с технической точки зрения является наилучшим вариантом для применения в качестве накопителя энергии на электробусе с суточным пробегом.

Методом имитационного моделирования был выполнен расчет энергобаланса электробуса в наиболее тяжелых условиях движения по одному из московских маршрутов № 189 с перерывами и при низких температурах окружающей среды. Было выявлено, что на начало жизненного цикла батареи (beginning of life BOL) и при температуре -15 °С электробус способен проехать 172 км. При температурах ниже -15 °С и на конец жизненного цикла (end of life EOL) ТАБ, требуется дневная подзарядка ТАБ мощностью 300 кВт. Выявлено, что 40 минут заряда достаточно, для проезда требуемого пробега 172 км.

С помощью ИМ были проведены расчеты удельного расхода энергии при движении по маршруту № 189 в диапазоне температур от -30 до +40 °С с переменной загрузкой (рисунок 8). В результате представлен график удельных расходов энергии в зависимости от температуры и загрузки: наименьший расход 1,3 кВт·ч/км при температурах +10 °С с минимальной загрузкой, наибольший расход энергии при температуре -30 °С с максимальной загрузкой – 3,178 кВт·ч/км. В летнее время самый большой расход энергии при температуре +40 °С – 2,18 кВт·ч/км.

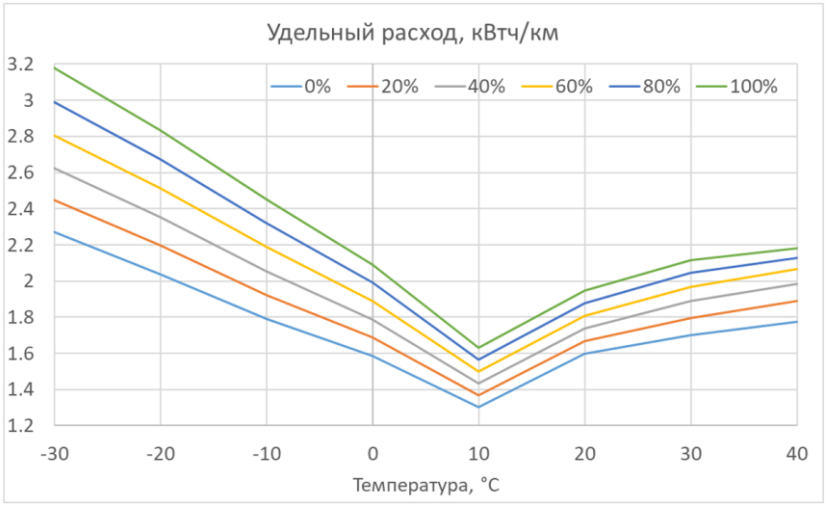

Рисунок 8 – Удельный расход энергии в зависимости от температуры окружающей среды и загрузки электробуса

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана новая комплексная математическая модель движения транспортного средства, отличающаяся тем, что позволяет рассчитывать затраты энергии на движение транспортного средства с учетом работы климатической системы (зимой – подогрев, летом – охлаждение салона), а также с учетом потребления энергии системой термостатирования батареи в зависимости от температурных условий.

2. Экспериментальными исследованиями установлено, что при ездовых испытаниях погрешность модели от 4,6 % до 8,3 %, при испытании на заряд ТАБ погрешность составила 1,37 %, при испытаниях на прогрев салона - 1,52 %, при испытаниях на прогрев ТАБ отклонение - 1,2 %. Таким образом, подтверждена адекватность блоков тягового расчета, климатической системы и расчета характеристик ТАБ.

3. Впервые получено регрессионное уравнение, которое позволяет определять расход энергии любого пассажирского ТС полной массой от 4,5 до 28 т, с учетом таких исходных данных, как температура окружающей среды, начальная температура салона, загрузка, полная и снаряженная масса ТС.

4. Предложена новая методика определения характеристик ТАБ с помощью упрощенного способа с использованием регрессионного уравнения и уравнений тягового баланса, отличающаяся тем, что позволяет сформировать основные требования к аккумуляторной батарее, учитывая при этом техническое задание к ЭТС. Представленная методика отличается тем, что не требует большого количества данных о ТС при расчете, а также не требует большего количества времени на проведение расчетов, что позволяет сократить время на разработку технических требований к накопителю энергии.

5. Представлена новая методика предварительной сравнительной оценки ТАБ по основным характеристикам, отличающаяся тем, что позволяет с применением функции принадлежности на начальном этапе определить

удовлетворяющие требованиям накопители энергии, а также сравнить ТАБ и выбрать наилучший вариант для конкретного ТС.

Представлена новая методика анализа влияния характеристик ТАБ на эксплуатационные свойства ЭТС, отличающаяся тем, что позволяет при помощи проведения виртуальных испытаний оценить: динамические показатели ЭТС, эффективность рекуперации при торможении, максимальный пробег в различных условиях, длительность заряда, а также срок службы.

6. Представленные методики были внедрены в исследовательские работы ООО «Инновационный центр «КАМАЗ» и применены при анализе эксплуатационных характеристик, разрабатываемого электробуса КАМАЗ 6282 с суточным пробегом. Использование данных методик позволило:

- определить основные электрические параметры технических требований к ТАБ;
- определить наиболее подходящие варианты ТАБ для данного проекта на начальном этапе подбора;
- определить варианты ТАБ, наиболее близкие к соответствующим характеристикам технических требований;
- оценить динамические показатели, эффективность рекуперативного торможения, зарядные характеристики, а также максимальные пробеги;
- определить наилучший вариант ТАБ для применения на электробусе с суточным пробегом;
- провести расчеты дневной эксплуатации электробуса в наиболее тяжелых условиях.

Выявлено, что на начало жизненного цикла батареи BOL и при температуре -15 °C, электробус способен проехать требуемые 172 км. При температурах ниже -15 °C и на конец жизненного цикла EOL ТАБ, требуется дневная подзарядка мощностью 300 кВт. Выявлено, что 40 минут дневного заряда достаточно, для проезда необходимого пробега 172 км.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Маликов Р.Р., Климов А.В., Смирнов А.А., Оценка возможности рекуперации энергии колебаний в системе подрессоривания двухосного грузового автомобиля // Известия МГТУ «МАМИ». - 2016. - №4 (10). - С.42-49. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

2. Маликов Р.Р., Биксалеев Р.Ш., Климов А.В., Карпухин К.Е., Влияние солнечной радиации на накопители энергии электрифицированного транспортного средства // Автомобильная промышленность. - 2021. - №8. - С.19-24. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

3. Маликов Р.Р., Биксалеев Р.Ш., Карпухин К.Е., Климов А.В., Влияние работы климатической системы на удельный расход энергии электробуса категории М3 // Труды НАМИ. - 2022. - №1. - С.68-81. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

4. Маликов Р.Р., Климов А.В., Биксалеев Р.Ш., Карпухин К.Е. Имитационное моделирование тяговой аккумуляторной батареи в составе транспортного средства // Автомобильная промышленность. - 2022. - №5. - С.8-13. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

5. Биксалеев Р.Ш., Карпухин К.Е., Климов А.В., Маликов Р.Р., Имитационная модель системы охлаждения в среде Matlab, позволяющая анализировать тепловое состояние аккумуляторного модуля // Труды НАМИ. - 2019. - №4 (279). - С.61-69. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

6. Биксалеев Р.Ш., Карпухин К.Е., Климов А.В., Маликов Р.Р. Имитационная модель системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи с пассивным охлаждением // Труды НАМИ. - 2020. - №4. - С.42-51. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

7. Биксалеев Р.Ш., Карпухин К.Е., Климов А.В., Маликов Р.Р., Рябцев Ф.А., Об аспектах проектирования электрифицированных транспортных средств с комбинированной энергоустановкой на основе топливных элементов // Труды НАМИ. - 2021. - №1. - С.47-58. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

8. Biksaleev R.Sh., Klimov A.V., Malikov R.R., Karpukhin K.E., Operational features of battery-powered electric vehicles in Russia and methods of assessing a state of health of traction batteries // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2021. - (2061). - P.1-10. **Издание входит в базу Scopus.**

9. Биксалеев Р.Ш., Маликов Р.Р., Карпухин К.Е., Климов А.В., Бурганов Р.М., Исследование потоков воздуха при движении электробуса с целью определения его коэффициента обтекаемости и коэффициентов теплопередачи высоковольтных компонентов // Автомобильная Промышленность. - 2021. - №6. - С.15-19. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

10. Шайхатдинов Ф.А., Филимонова А.А., Хохонов А.А., Трапезников А.Н., Климов А.В., Маликов Р.Р. Анисимов В.Р., Создание электрического автобуса с водородными топливными элементами в Российской Федерации // Надежность и безопасность энергетики. - 2022. - №3. - С.81-89. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

Патенты Российской Федерации на полезную модель:

1. Электрическое колесное транспортное средство: пат. 191010 Рос. Федерация: B60K 1/04, B60R 16/04, B60L 50/60, B62D 21/02/ Климов А.В., Скутар Р.Д., Биксалеев Р.Ш., Седенков С.Д., Максименко Э.В., Маслянников И.К., Куковинец О.В., Долгий И.О., Маликов Р.Р. заявитель и патентообладатель ПАО «КАМАЗ». – № 2019103737 заявл. 11.02.2019 опубл. 18.07.2019 Бюл. № 20.

2. Тяговый электрический привод для грузового аккумуляторного электрического колесного транспортного средства: пат. 191010 Рос. Федерация: B60K 1/04, B60R 16/04, B60L 50/60, B62D 21/02/ Климов А.В., Маликов Р.Р. заявитель и патентообладатель ПАО «КАМАЗ». – № 2018100889 заявл. 10.01.2018 опубл. 24.08.2018 Бюл. № 24.