На правах рукописи

БИКСАЛЕЕВ Ринат Шакирович

ПРИНЦИПЫ И АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Специальность 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2021

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

Научный руководитель:	кандидат технических наук, доцент, **Карпухин Кирилл Евгеньевич** (ФГУП «НАМИ»)
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор, **Филькин Николай Михайлович** (профессор кафедры «Автомобили и металлообрабатывающее оборудование» ФГБОУ ВО ИжГТУ им. М.Т. Калашникова)
	кандидат технических наук, доцент, **Бутарович Дмитрий Олегович** (доцент кафедры «Колесные машины» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Ведущая организация:	**ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»**

Защита состоится «01» декабря 2021 г. в 13 ^{00} часов на заседании диссертационного совета Д217.014.01 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 «28» сентября 2021 года

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современное представление о будущем в автомобилестроении практически невозможно без электрифицированных автотранспортных средств (ЭАТС). В тоже время на сегодняшний день около 80 % потребляемой энергии в транспортном комплексе приходится на автомобильный транспорт, который практически полностью работает на базе нефтепродуктов, используемых в двигателях внутреннего сгорания (ДВС).

В распоряжении Правительства от 28 апреля 2018 г. №831-р «Об утверждении стратегии развития автомобильной промышленности до 2025 года» указано одним из приоритетных направлений инновационного развития автомобилестроения в РФ являются технологии электрификации транспортных средств.

Продажи ЭАТС и транспортных средств (ТС) с комбинированной энергоустановкой в мире увеличиваются, так в 2021 году ожидают что продажи таких ТС составят 16% от общих продаж легковых ТС, а к 2025 году ожидается, что продажи только ЭАТС возрастут до 14,3 миллиона. На рисунке 1 представлен прогноз увеличения парка электромобилей в мире (по данным аналитического центра *Rho Motion*).

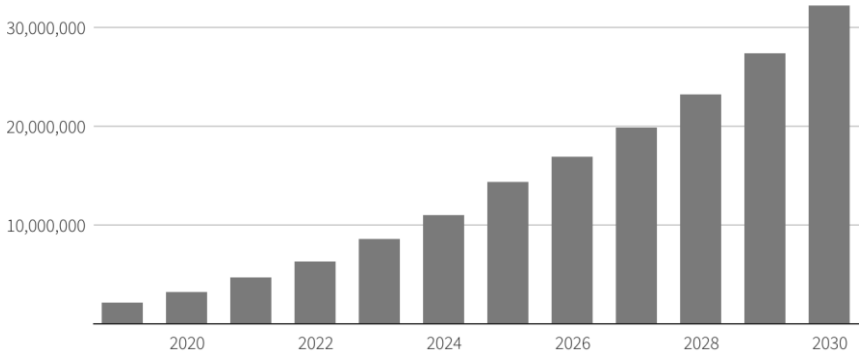

Рисунок 1 – Прогноз увеличения парка электромобилей в мире

На территории РФ по состоянию на 2018 г. парк ТС составил более 54,779 млн. единиц, т.е. 54,779 млн. источников выбросов CO_2, NO_x и т.д. Например, в Европе одно легковое ТС на 1 километр (цикл *NEDC*) в среднем выбрасывает 121,8 г/км углекислого газа в атмосферу. В последние годы ситуация меняется в худшую

сторону, так в 2019 году выбросы были такие же как в 2014, несмотря на ввод новых ограничений (рисунок 2).

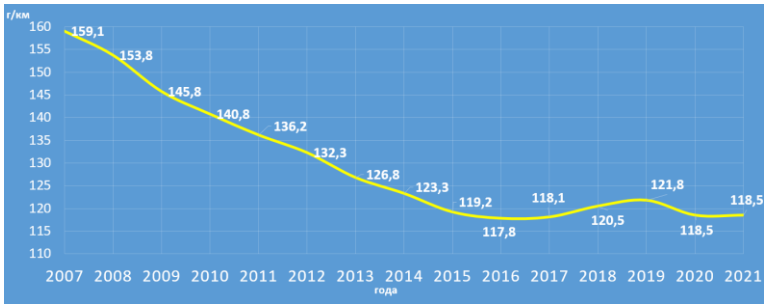

Рисунок 2 – Средние выбросы CO_2 легковых ТС в Европе

Множество исследований указывают на то, что эффективность использования энергии в ЭАТС выше в следствии более короткого топливного цикла от добычи до передачи ее на вращение колес ТС. Причем у ТС с ДВС выбросы присутствуют на всем протяжении цикла. Исследования по эффективности ТС указывают на то, что общий объем выбросов у ЭАТС значительно ниже, чем у ТС с ДВС, причем энергия для ЭАТС определяется от сжигания углеводородов рисунок 3.

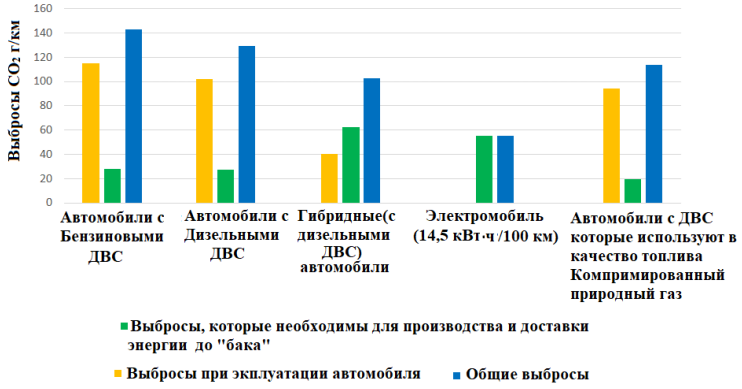

Рисунок 3 – Сравнение затраченной энергии на преодоление 100 км пути

Большинство электрохимических систем подвержено влиянию температуры, это же наблюдается и у литий-ионных аккумуляторов (ЛИА). Результаты исследований показывают, что понижение температуры эксплуатации ЛИА с +25 °С до –7°С вызывает уменьшение запаса хода на 9% и на 44% при выключенных и включенных внутренних потребителях энергии ТС. Что соответствует графику на рисунке 4, т.е. для сохранения необходимого пробега на одной зарядке необходимо поддерживать температуру тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) от +20 до +35 °С.

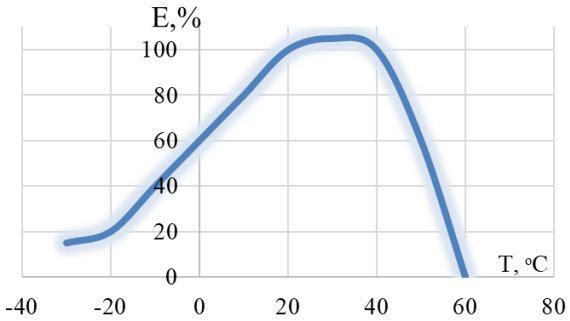

Рисунок 4 – Зависимость емкости ТАБ от температуры окружающего воздуха

Конструкция ТАБ и системы термостатирования (СТ) должны быть рассчитаны таким образом, чтобы разница температур между ЛИА в ТАБ не превышала 6–8 °С. Это один из основных показателей эффективности СТ. Не менее важным показателем является поддержание температуры ЛИА в оптимальном диапазоне. Производителями ЛИА рекомендуется температура эксплуатации от +10 до +35 °С, хотя ЛИА работоспособен при температуре от –25 и до +45 °С, а при температуре между –20 и –40 °С жидкие электролиты могут кристаллизироваться. Отрицательные температуры увеличивают сопротивление внутри ЛИА, мешая потоку ионов внутри снижая емкость и производительность. При температуре более +60 °С ЛИА становятся нестабильными и внутри ЛИА начинаются необратимые процессы, что в последствии может привести к тепловому разгону. Всё это является основной проблемой для потенциальных потребителей ЭАТС. Таким образом, можно утверждать, что критические температуры эксплуатации от –40 до –25 и от +45 до +60 °С. Эти диапазоны приведены на рисунке 5.

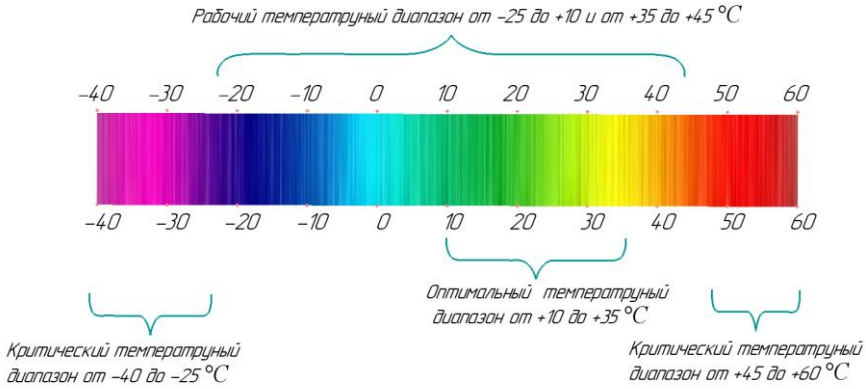

Рисунок 5 – Температурные диапазоны эксплуатации ЛИА

Целью диссертационной работы является разработка принципов и алгоритма управления системой термостатирования накопителей электрической энергии, для обеспечение температурного режима работы тяговой аккумуляторной батареи в различных условиях эксплуатации, позволяющих улучшить производительность электрифицированного автотранспортного средства (обладающего высокими экологическими характеристиками) с учетом ресурса тяговой аккумуляторной батареи на протяжении полного жизненного цикла.

Объект исследования – ЭАТС с тяговой аккумуляторной батареей и системой термостатирования.

Для достижения цели исследования поставлены и решены следующие научные **задачи**:

1. Проведение анализа климатических особенностей Российской Федерации и определение граничных условий для расчета СТ.
2. Анализ существующих систем термостатирования ТАБ.
3. Проведение анализа имеющихся видов ЛИА и определение наиболее подходящих для ЭАТС ТАБ из имеющихся на рынке предложений.
4. Разработка имитационных моделей для определения эксплуатационных режимов ТАБ.
5. Анализ методов оценки степени работоспособности ЛИА и видов деградации ЛИА.
6. Оценка *SOH* (степень работоспособности, прогноз деградации) ТАБ с учетом эксплуатационных показателей ТАБ.

Методология и методы исследований, используемые в работе, базируются на основных положениях теории автомобиля, автоматизированных систем автомобиля, основных положениях электроники и электротехники, методов исследовательских испытаний и математического анализа.

В качестве теоретической базы для проведения исследований использовались фундаментальные и прикладные труды ведущих отечественных и зарубежных ученых.

Достоверность и обоснованность. Достоверность принятых в диссертационной работе решений подтверждается согласованностью теоретических результатов с результатами исследовательских испытаний, полученных в лабораторных условиях на базе предприятия АО «НПО «КВАНТ» (г. Великий Новгород).

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана комплексная имитационная модель системы термостатирования, функционально ориентированной на моделирование выхода ТАБ в рабочий режим эксплуатации с учетом гидравлической системы и системы управления, для качественной и точной количественной оценки теплового состояния каждого ЛИА.

2. Приведена классификация методов количественной оценки степени работоспособности (прогноза деградации, *SOH*) ЛИА и взаимосвязь факторов, влияющих на деградацию ЛИА с последствиями, которые могут привести к выходу из строя ЛИА. А также выбран наиболее подходящий метод оценки ресурса ТАБ в условиях реальной эксплуатации.

3. Впервые определены факторы для ранговой оценки ТАБ из имеющихся предложений на рынке для ЭАТС категории М3. Методом априорного ранжирования определены наиболее приемлемые варианты ТАБ.

4. Определены критические температуры необходимые для расчета СТ, с учетом прогнозов изменения климата и регионов, где наиболее вероятна эксплуатация ЭАТС.

Практическая ценность.

Внедрение в производство разработанных принципов и алгоритма управления системой термостатирования накопителей электрической энергии для обеспечения температурного режима работы ТАБ в различных условиях эксплуатации ЭАТС, а также рекомендаций по созданию ЭАТС позволят значительно улучшить эксплуатационные свойства транспортных средств, что подтверждается теоретическими расчетами и исследовательскими испытаниями.

Реализация результатов. Результаты диссертационной работы реализованы на предприятии ООО «Инновационный центр «КАМАЗ» при разработках энергоэффективных ЭАТС. Разработанный подход позволяет определить характеристики СТ и ТАБ в составе ЭАТС категории М3.

В учебных целях, при проведении занятий по курсу «Электромобили и зарядная инфраструктура» для студентов, обучающихся по специальности 13.03.02 «Электрооборудование автомобилей и электромобили» в ФГБОУ ВО «МАДИ».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались на:

1. 99-й конференции ААИ «Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации» г. Иркутск, 2017.
2. 100-й конференции ААИ «Экологическая безопасность АТС» г. Дмитров, 2017.
3. МАНФ-2020 Наземные интеллектуальные транспортные средства и системы. АВТОНЕТ, г. Москва, 2020.
4. 79-ой международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, г. Москва, 2021.
5. 110-й конференции ААИ «Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации», г. Иркутск, 2021.

На защиту выносятся положения научной новизны, выводы и результаты исследований:

1. Методы оценки *SOH* ЛИА и оценка *SOH* в реальных условиях эксплуатации.
2. Климатические воздействия, которым подвергаются компоненты ЭАТС в регионах РФ, где наиболее вероятна эксплуатация ЭАТС.
3. Результаты расчетных и исследовательских испытаний системы термостатирования ТАБ ЭАТС категории М3 в различных температурных режимах эксплуатации.
4. Результаты расчета эксплуатационных характеристик системы термостатирования предложенной конструкции.

Публикации по теме диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 11 научных работах, в том числе 6 научных статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 научная статья в зарубежном журнале, индексируемом в международной базе Scopus, 2 патента РФ на полезную модель.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, а также списка литературы. Текст диссертации содержит 163 рисунка, 33 таблицы, 2 приложения, которые размещены на 195 страницах.

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 защиты, и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе проведен анализ научных трудов, посвященных энергосбережению, анализу конструкций систем термостатирования, оценке ресурса ТАБ.

Работами в области ЭАТС занимались: Бахмутов С.В., Котиев Г.О., Филькин Н.М., Петленко Б.И., Эйдинов А.А., Нагайцев М.В., Козлов А.В., Селифонов В.В., Карпухин К.Е и др.

Работы над методами расчета систем термостатирования и анализом эффективности ЭАТС занимались: Pour M. Y., Morini L., Улитенко А.И., Hamut H. S., Курмаев Р.Х., Шорин А.А. и другие. Проблемы энергоэффективности затронуты в работах Оспанбекова Б.К., Иванова С.А., Климова А.В., Строганова В.И. Факторы, влияющие на деградацию литий-ионного аккумулятора, и методы оценки исследованы в работах Хандорина М. М., Чупина Д. П., Cordoba-Arenas A., Matasso A., Liu D., R. Xiong, W. Shen.

Анализ источников, содержащих информацию о ранее проведенных работах, показал огромную, многостороннюю проработку вопроса оценки эффективности систем термостатирования, а также стратегий термостатирования, но всё ещё недостаточную особенно в отечественной литературе. Учитывая специфику климата Российской Федерации, для того чтобы электрифицированное транспортное средство эксплуатировалось на всей территории нашей огромной страны в любое время, система получилась бы сложной и переразмеренной. Поэтому были определены регионы, где развитие электрифицированных транспортных средств наиболее вероятно. Для этих регионов определены экстремальные температуры, а изменения температуры в течении этих суток взяты как исходные для расчета системы термостатирования.

Проанализированы удельные характеристики нескольких видов ЛИА. Принято решение, что для ЭАТС с небольшим пробегом с быстрой зарядной наиболее подходящими являются ТАБ с активными материалами на основе литий-титаната (*LTO*), а для ЭАТС с длительным пробегом и медленной зарядкой литий-никель марганец-кобальт (*NMC*).

Проведен анализ основных типов теплообменников внутри ТАБ и определены основные типы СТ, применяемые в ЭАТС. Наиболее перспективным с точки зрения термостатирования является теплообменник, находящийся непосредственно между ЛИА и теплообменник, находящийся снизу ЛИА. Проведенный патентный анализ показал, что требуется проведение дополнительных исследований по темам: использование двухфазной жидкости и использование непосредственного нагрева ЛИА.

Накапливаемая энергия, мощность и внутреннее сопротивление ЛИА являются основными показателями степени работоспособности (*SOH*). Методы оценки *SOH* можно разделить на два основных метода: модельно-ориентированный и экспериментальный. К наиболее перспективным методам относятся: метод дифференциального анализа напряжения и емкости, измерения внутреннего сопротивления источника тока на переменном токе. В данной работе использован эмпирический метод использующий данные испытаний, конкретный метод оценки

определен априорным экспертным ранжированием. Затронуты вопросы факторов, влияющих на деградацию ЛИА и методы оценки состояния заряда.

Таким образом в анализе литературы затронуты вопросы которые требуют тщательной проработки, формированию новых методик и подходов к моделированию состояния систем и управлению ими.

Во второй главе приведено теоретическое описание основных тепловых процессов внутри ЛИА и гидравлических процессов внутри теплообменников в ТАБ, а также выбраны методы оценки *SOH* для выбранных типов ЛИА.

Общая тепловая модель батареи является сложной из-за неравномерного распределения температур. Тепловыделения на батарее можно разделить на два компонента (Q_p омическое тепло и тепло реакции Q_s), и они определяются как,

$$Q_s = \int - I \cdot T \frac{dV_{OCV}}{dT} \cdot dt, \quad (1)$$

$$Q_p = \int I^2 \cdot R_{int} \cdot dt, \quad (2)$$

где I – ток заряда или разряда, V_{ocv} – напряжение разомкнутой цепи, R_{int} – внутреннее сопротивление ЛИА.

Внутреннее сопротивление ЛИА не является константой и увеличивается по мере уменьшения степень заряженности *(SOC)* в процессе разряда, а также от температуры.

Закон сохранения энергии связывает скорость изменения температуры аккумулятора с генерации тепла и распространения тепла на поверхности аккумулятора, как:

$$m \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = - hA_{eff}(T - T_{amb}) + Q_s + Q_p, \quad (3)$$

где m – масса, C_p – удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)), A_{eff} – эффективная площадь поверхности, h – коэффициент теплопередачи (Вт/(м^2·К)) между поверхностью и теплоносителем, T – температура поверхности теплообмена, T_{amb} – температура окружающей среды.

Для создания имитационная модель (ИМ) движения ЭАТС используется программное обеспечение *MATLAB/Simulink.* Для математического описания ЛИА используется метод Шеферда. Наиболее известным и широко распространенным

является метод аналитического описания разрядных характеристик ЛИА предложенный Шефердом. Данный метод позволяет описать аналитическим уравнением зависимость $U = f(I, t)$:

$$E = E_s - k \cdot \frac{Q}{Q - I \cdot t} \cdot I - N \cdot I + A \cdot exp\left(\frac{I \cdot t}{B \cdot Q}\right) - C \cdot I \cdot t, \quad (4)$$

где E_s – начальное напряжение разряда, В; k – коэффициент поляризации, Ом·см; N – внутреннее сопротивление элемента, Ом·см; Q – количество (емкость) активного материала, А·ч/элемент; I – ток разряда, А; t – время разряда, ч; A – эмпирический коэффициент, В; B – эмпирический коэффициент (А = – 4,013 В; В =1,76 В); C – коэффициент, В·см/(А·с).

В основном теплопередача осуществляется:

- теплопроводностью (описывается законом Фурье);

$$\vec{q} = -\lambda \cdot gradT, \quad (5)$$

где, $\vec{q}$ – вектор плотности теплового потока λ — коэффициент теплопроводности среды; $gradT$ – градиент температуры.

- конвекцией (характеризуется дифференциальным уравнением Ньютона-Рихмана);

$$dQ = \alpha \cdot \Delta T \cdot dA, \quad (6)$$

где, α – коэффициент теплоотдачи dA –площадь поверхности теплообмена, ΔT перепад температуры между поверхностью тепла и теплоносителем.

- излучением (при исполнении ТАБ У1 по ГОСТ 15150, описывается законом Стефана – Больцмана).

$$q^* = \sigma \cdot T^4, \quad (7)$$

где Т - абсолютная температура (К) поверхности, σ - постоянная Стефана – Больцмана.

Сопротивление жидкостей изменению своей формы характеризуется их динамической вязкостью (внутренним трением). Сила внутреннего трения в жидкости τ на единицу площади определяется по закону Ньютона:

$$\tau = \pm\mu \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (8)$$

где (∂u/∂y) – градиент скорости в направлении, перпендикулярном течению; μ – абсолютная или динамическая вязкость жидкости.

Гидромеханический расчет систем термостатирования основывается на уравнении Бернулли. Замкнутые жидкостные магистрали должны оснащаться резервуаром, компенсирующим тепловое расширение теплоносителя, его наличие позволяет определить абсолютное давление на входе нагнетателя:

$$P_1 = P_0 + \rho \cdot g \cdot \Delta\lambda, \quad (9)$$

где P_0 - атмосферное давление; $\Delta\lambda$ - превышение уровня свободной поверхности теплоносителя в расширителе относительно входного патрубка нагнетателя.

Полные гидравлические потери – это сумма всех видов потерь давления во всех элементах устройства. Они определяются по формуле:

$$\Delta p_{\sum} = \Delta p_л + \Delta p_м + \Delta p_c + \Delta p_н, \quad (10)$$

где $\Delta p_л$ – потери давления на трение по длине, $\Delta p_м$ – местные потери давления, Δp_c и $\Delta p_н$ – неизотермические потери.

Выбор используемой в работе математической модели *SOH* осуществлялся методом априорного ранжирования. Для ранговой оценки при подборе ТАБ были определены следующие факторы: охват диапазона степени разряженности (*DOD)* или *SOC*, охват диапазона температуры, охват диапазона кратностей тока (*C-Rate)*, емкость описываемой ячейки, точность указания химического состава ЛИА, учет календарного старения, учет напряжения, количество циклов испытания ЛИА.

Для ЛИА с *NMC* выбрана наиболее подходящая модель, над которой работали группа авторов *John Wang, Justin Purewal, Ping Liu, Jocelyn Hicks-Garner и др:*

$$Q_{loss;\%} = (a \cdot T^2 + b \cdot T + c) \exp\left[(d \cdot T + e) \cdot I_{rate}\right] \cdot \mathrm{Ah}_{\mathrm{thr.}} + f \cdot t^{0,5} \cdot \exp[-Ea/RT], \quad (11)$$

где a = 8.61·10^{-6} (1/А·ч-К^2), b = 5.13·10^{-3} (1/А·ч-К), c = 7.63·10^{-1} (1/А·ч), E_a = 24.5 (кДж/моль), d = – 6.7·10^{-3} (1/К-(С-rate)), R = 8.314 (Дж/(моль·К), e = 2.35 (1/(С-rate)), T – температура эксплуатации (К).

Для ЛИА с *LTO* была выбрана математическая модель оценки степени работоспособности следующих авторов: *Emil Namor, Dimitri Torregrossa, Fabrizio Sossan, Rachid Cherkaoui, Mario Paolone*:

$$Q_{loss} = \left(\frac{C_{rate} \cdot E_0}{\mathrm{T}} \cdot 0{,}11 + 0{,}57\right) Ah_{thr}, \quad (12)$$

где C_{rate} – кратность тока разряда (С), E_0 – Начальная емкость ЛИА(А·ч), R – универсальная газовая постоянная; T– абсолютная температура единичного аккумулятора, $Ah_{thr.}$– общая выработанная емкость (А·ч).

Третья глава посвящена расчету и внедрению системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи.

Проведен анализ поставщиков ТАБ, выбраны подходящие ТАБ для применения на ЭАТС категории М3 и удельные показатели приведены таблице 1. Для удобства ТАБ с химией *LTO* и *NMC* разделены цветами, голубой и светло-розовый, соответственно.

Таблица 1 – Исходный данные ТАБ

ТАБ / Параметр	LTO 1	NMC 1	NMC 2	NMC 3	NMC 4	NMC 5	NMC 6	NMC 7	NMC 8	LTO 2	LTO 3	LTO 4	NMC 9
Удельная энергоемкость, Втч/кг	56	88	108	86	106	78	98	92,5	138	61	53	68	84
Удельная энергоплотность, Втч/л	59	130	140	122	141	64	80	110	182	43	159	58	100,2
Удельная длительная мощность , Вт/кг	196	190	210	219	180	390	190	277	0	244	131	296,2	339
Удельная кратковременная мощность Вт/кг(время в 10 сек.)	360	270	210	434	318	540	290	461	168	490	153	670	567
Удельная мощность, Вт/л	60	327	280	307	240	321	160	303	-	172	395	252,4	400,9
Ресурс в, циклов(DoD 80%)	40000	8000	3000	7000	3100	12350	6200	8000	-	50000	12000	-	-
Стоимость на уровне ТАБ $/кВт·ч*	1391	712,2	777	1611	-	1142	914	1280	721	1710	-	-	-
Срок гарантии	5		1	1	1	1	1	1	6	1	1	1	1

В качестве экспертов выступают руководители, ученые, специалисты, инженеры: МАДИ (ГТУ), ООО «ИЦ «КАМАЗ» и ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». Для ранговой оценки при подборе ТАБ были определены следующие факторы: удельная энергоемкость (Вт·ч/кг), удельная энергоплотность (Вт·ч/л), удельная длительная мощность (Вт/кг), удельная кратковременная мощность (Вт/кг) (время в 10 сек.),

удельная мощность (Вт/л), ресурс, циклов (*DoD* 80%), стоимость на уровне ТАБ ($/кВт· ч), срок гарантии(лет).

Исходя из анализа технико-экономических факторов методом априорного ранжирования, можно сделать вывод, что ТАБ *NMC 1* и *LTO 1* обладают оптимальным набором параметров, поэтому целесообразно для ЭАТС использовать эти решения.

Для решения задач исследования были сформированы две математические модели. Первая представлена на рисунке 6, и она позволяет определить: тягово-динамические характеристики ЭАТС, токовые нагрузки ТАБ при движении ЭАТС, приближенные тепловое состояние ТАБ, мощность системы термостатирования, минимальную степень разряда в процессе эксплуатации.

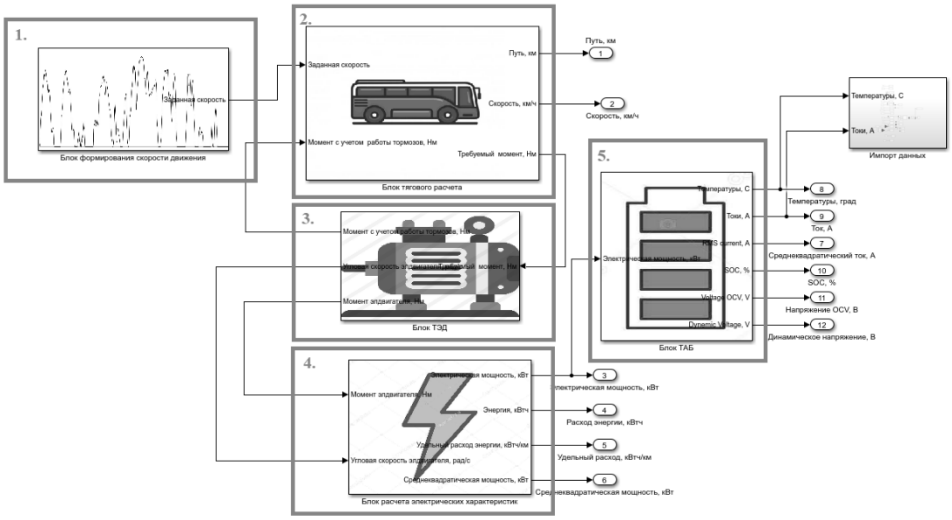

Рисунок 6 – Общий вид имитационной модели ЭАТС

Вторая позволяет определить: точное тепловое состояние ТАБ, режим работы СТ в зависимости от температуры ЛИА, параметры радиатора пассивного охлаждения, проверка достаточности мощности СТ, оценка достаточности расхода теплоносителя, потребление энергии СТ, отработку алгоритма работы СТ. Общий вид данной модели изображен на рисунке 7.

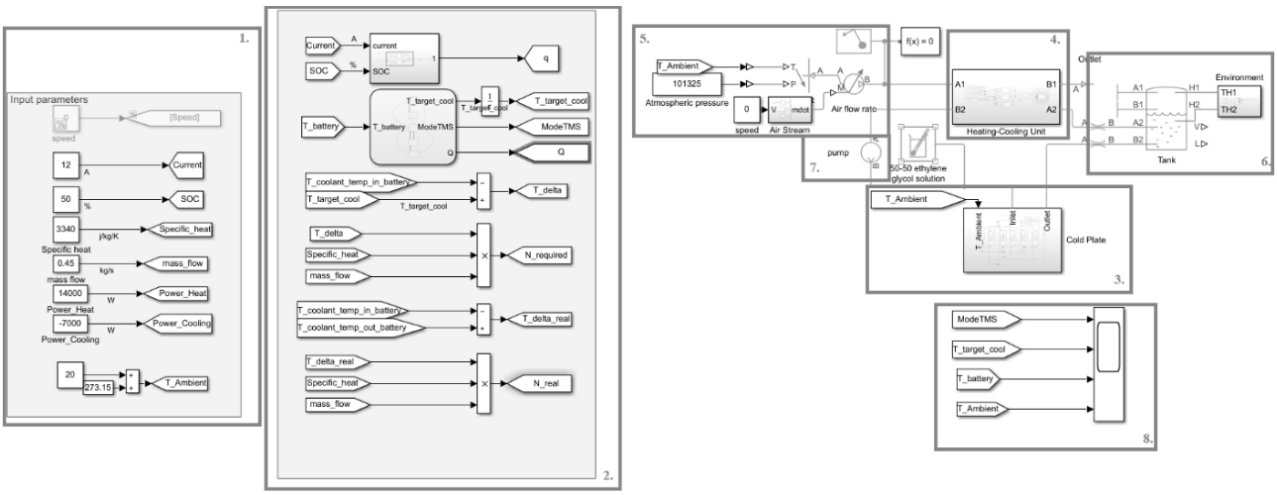

Рисунок 7 – Общий вид имитационной модели СТ

Для рационального выбора компонентов СТ для ЭАТС необходимо проанализировать и учитывать специфические особенности условий эксплуатации. Это возможно осуществить путем анализа данных, которые получены в исследовательских испытаниях.

Основными целями исследовательских испытаний ЭАТС в климатической камере является:

– определение времени выхода на рабочий режим тяговой аккумуляторной батареи с помощью системы термостатирования;

– определение расхода энергии на термостатирование тяговой аккумуляторной батареи.

Основными задачами исследования являются:

– подготовить измерительное оборудование;

– осуществить выход ЭАТС на рабочий режим после выдерживания в климатической камере;

– получить массив регистрируемых данных температур (ТАБ, теплоносителя, воздуха в салоне) и потребляемого тока компонентов;

– осуществить статистическую обработку массива данных.

Объектами исследования являются СТ и ТАБ, установленные на крыше ЭАТС. Исследовательские испытания проводились на ЭАТС КАМАЗ категории М3, внешний вид и габаритные размеры которого представлены на рисунке 8. Основные

технические характеристики представлены в таблице 2. Испытания проводились на базе АО «НПО «КВАНТ». В ходе исследовательских испытаний для определения времени прогрева и охлаждения ТАБ было проведено 7 испытаний при температурах окружающей среды +40, +30, +10, -10, -20, – 30 и – 40 °С.

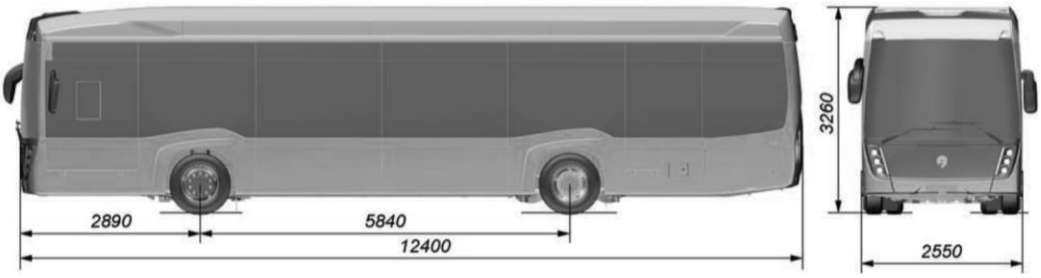

Рисунок 8 – Внешний вид и габаритные размеры ЭАТС КАМАЗ категории М3

Таблица 2 – Технические характеристики ЭАТС КАМАЗ категории М3

Параметр	Значение (размерность)
Полная масса ТС	18000 (кг)
Количество пассажирских мест	85
Сидячих мест	35
Максимальная скорость	80 (км/ч)
Тяговый электродвигатель	
Тип	асинхронный
Мощность	2 х 125 (кВт)
Крутящий момент	2 х485 (Н·м)
Система охлаждения	жидкостная (этиленгликоль)
Тяговая аккумуляторная батарея	
Тип ЛИА	литий-титанатные
Энергетическая емкость	149 (кВт·ч)
Масса	1700 (кг)
Максимальный запас хода	100 (км)
Время восстановления заряда	10-20 (мин)
Прочее	
Размер шин	275/70 R22,5

На рисунке 9 изображен ЭАТС внутри климатической камеры. Исследовательские испытания подтвердили соответствие СТ ТАБ требованиям ТЗ 10.4 ГУП «Мосгортранс» предъявляемые к ЭАТС категории М3.

Рисунок 9 – ЭАТС внутри климатической камеры

Исходные данные системы термостатирования, установленной на электрическом транспортном средстве категории М3. Полная энергия выбранной ТАБ на начало эксплуатации 149 кВт·ч, а масса ТАБ составляет 1700 кг. На рисунке 10 изображена общая гидравлическая схема подключения. Основные технические характеристики приведены в таблице 3.

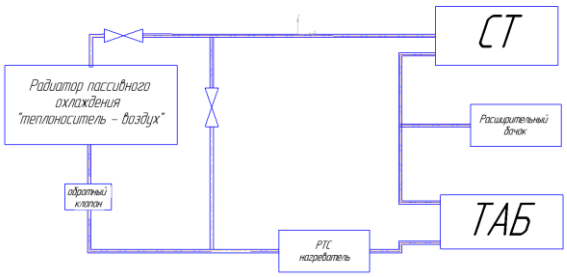

Рисунок 10 – Общая гидравлическая схема СТ ТАБ

Таблица 3 – Технические характеристики СТ ТАБ

№ п/п	Параметр	Ед. изм	Значение
1	Максимальная мощность охлаждения (тепловая/ электрическая)	кВт	7/3,8
2	Максимальная мощность нагрева (тепловая/ электрическая)	кВт	14/14
Входные электрические параметры по высоковольтной и низковольтной части			
3	Диапазон входного напряжения	В	520 - 750
4	Номинальное напряжение питания	В	24±8
Температуры при эксплуатации			
5	Рабочая температура воздуха при эксплуатации	°С	От –40 до +55
6	Предельная рабочая температура воздуха при эксплуатации	°С	От –50 до +60
Прочие			
7	Степень защиты (ГОСТ 14254-2015 (IEC 60529:2013))	IP	65DH
8	Масса СТ	кг	50

Система термостатирования устанавливает температуру теплоносителя в зависимости от температуры ЛИА. Система термостатирования имеет два уровня функционирования. Блок схема алгоритма работы СТ ТАБ изображена на рисунке 11.

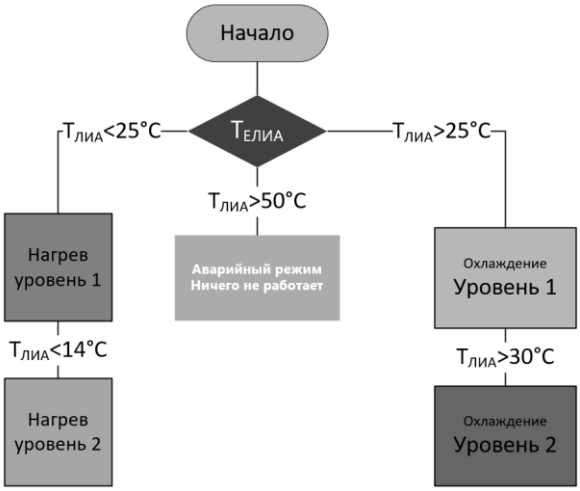

Рисунок 11 – Блок схема работы СТ ТАБ

Режимы работы СТ: циркуляция теплоносителя, охлаждение, подогрев.

Разработанная имитационная модель при верификации с результатами натурных испытаний в составе ТС показала адекватность получаемых результатов. Погрешность расхождения расчетных и получаемых параметров не превысила 2%.

Алгоритм работы системы управления СТ ТАБ должен исключать выход ЛИА из рабочего температурного диапазона эксплуатации и стремиться поддерживать температуру ЛИА ТАБ в оптимальном температурном диапазоне (рисунок 5). Базовые принципы управления СТ должны основаны на: контроле и минимизации разницы температур ЛИА внутри модуля и ТАБ, контроль за температурой ЛИА и обеспечение эксплуатации в безопасном температурном диапазоне и поддержании теплового «запаса» ТАБ для обеспечения работы ТАБ в пиковом режиме в течение требуемого времени.

В **четвертой главе** проводился анализ результатов исследовательских испытаний, оценка эффективности системы термостатирования с помощью имитационной модели.

Имитационное моделирование СТ ТАБ при рекордных температурах показало эффективность работы СТ. При стоянке при температуре – 40 °С (в сухую

безветренную погоду) в течение 12 часов ТАБ остывает до 9,2°С. Время нагрева до рабочей температуры (до +10°С) составляет 8,3 мин). Таким образом требование, предъявляемые к СТ ТАБ по выходу на рабочий режим, выполняется с 70 % запасом.

Проведена оценка степени работоспособности (*SOH*, в процентах в зависимости от циклов) двух видов ТАБ. Уменьшении емкости ТАБ до 80% произойдёт через 7,5 лет эксплуатации в г. Москва для ТАБ с *NMC*, а для ТАБ с *LTO* через 15 лет. Исходя из сроков контракта жизненного цикла (15 лет) замена ТАБ с *NMC* потребуется 1 раз, а ТАБ с *LTO* замена не потребуется.

На рисунке 12 и 13 изображены графики потерь ёмкости с разными активными материалами на основе литий-никель марганец-кобальт (*NMC*) и литий-титаната (*LTO*), соответственно.

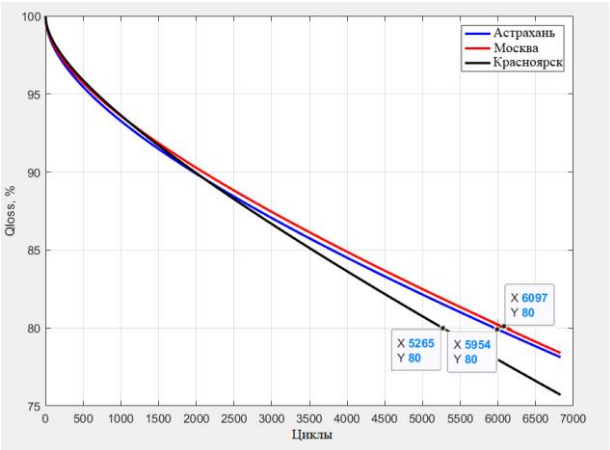

Рисунок 12 – Потеря емкости при эксплуатации в городах РФ для ТАБ с *NMC*

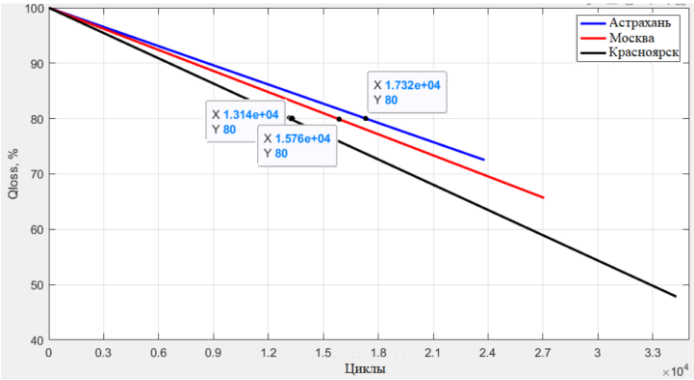

Рисунок 13 – Потеря емкости при эксплуатации в городах РФ для ТАБ с *LTO*

Вариация значений в городах Москва и Астрахань составляет 2 и 9 %, а между городами Москва и Красноярск составляет 13,6 и 24,1 % для *NMC* и *LTO*,

соответственно. Данный показатель можно назвать одним из важнейших показателей конструкции СТ.

По результатам исследования установлено, что наибольшее влияние на температуру ТАБ оказывает температура окружающей среды.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В диссертационной работе решена значимая и актуальная научно-техническая задача комплексной оценки эффективности СТ. В результате теоретических и исследовательских испытаний определены базовые принципы системы управления СТ и функции алгоритма управления СТ ТАБ.

2. Наиболее перспективными, с точки зрения термостатирования, является теплообменник, находящийся непосредственно между ЛИА и теплообменники, находящиеся снизу ЛИА. Патентный анализ показал, что требуется проведение дополнительных исследований по темам: использования двухфазной жидкости и использование непосредственного нагрева ЛИА.

3. Определены методы оценки степени работоспособности и виды деградации ЛИА. К наиболее перспективным относятся: методы дифференциального анализа напряжения и емкости, измерения внутреннего сопротивления источника тока на переменном токе. Выбрана функция *SOH* с учетом эксплуатационных факторов, влияющих на ресурс ТАБ.

4. Данное исследование позволило определить температуру ТАБ при эксплуатации в экстремальных температурах РФ. Погрешность разработанной комплексной имитационной модели СТ ЭАТС составила не более 2 %. По результатам моделирования в экстремальных температурах СТ функционирует штатно и выполняет требования, предъявляемые к СТ ТАБ по достижению оптимального температурного диапазона с 70 % запасом.

5. Вычислен срок службы ТАБ (*SOH*) по средне-эксплуатационным показателям. ТАБ с активными материалами на основе литий-никель марганец-кобальт (*NMC*) необходимо заменить 1 раз на протяжении всего контракта

жизненного цикла, а для ТАБ на основе литий-титаната (*LTO*) замена ТАБ не потребуется.

6. Расчетным путем определено суммарное гидродинамическое сопротивление трубопроводов, подключённых к СТ ТАБ ЭАТС, при прохождении охлаждающей жидкости с расходом Q = 45 л/мин, при работе в режиме термостатирования (t=15 °C), оно составляет 24,6 кПа.

7. Определены значения внешних температурных воздействий на ТАБ для определения параметров системы термостатирования.

8. Проведен анализ имеющихся на рынке ТАБ и методом априорного ранжирования определены лучшие решения.

9. Определены базовые принципы системы управления СТ и функции алгоритма управления СТ ТАБ.

10. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение возможности объединения климатической системы ЭАТС, СТ и системы охлаждения тягового электродвигателя в целях энергоэффективности, уменьшения массы ЭАТС и увеличения ресурса (система будем работать дольше, но с меньшей частотой включения), исследования работы СТ в режиме «опережения» тепловых потерь или внешних температурных воздействий, а также на оценку вероятности появления экстремальных температур.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Карпухин К.Е., Биксалеев Р.Ш., Климов А.В., Оспанбеков Б.К. Об аспектах безопасности тяговых аккумуляторных батарей электрифицированных транспортных средств. Анализ факторов, влияющих на их ресурс, и некоторые методы его оценки // Журнал автомобильных инженеров. 2017. № 6 (107). С. 26-29. **Издание входит в перечень ВАК РФ**.

2. Карпухин К.Е., Биксалеев Р.Ш., Маликов Р.Р., Климов А.В. Имитационная модель системы охлаждения в среде *Matlab*, позволяющая анализировать тепловое

состояние аккумуляторного модуля // Труды НАМИ выпуск № 4 (279), 2019, с. 61 – 69. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

3. Биксалеев Р.Ш., Карпухин К.Е., Климов А.В., Маликов Р.Р. Имитационная модель системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи с пассивным охлаждением //Труды НАМИ выпуск № 4 (283), 2020, с. 42 – 51. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

4. 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 (284). С. 47-58. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

5. Биксалеев Р.Ш., Маликов Р.Р., Климов А.В., Бурганов Р.М. Исследование потоков воздуха при движении электробуса // Автомобильная промышленность, выпуск № 6, 2021, с. 15-19. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

6. Biksaleev R.Sh. Operational features of battery-powered electric vehicles in Russia and methods of assessing a state of health of traction batteries/ R.Sh. Biksaleev, A.V. Klimov, R.R. Malikov, K.E. Karpukhin// Journal of Physics: Conference Series 2021 **Издание входит в перечень Scopus.**

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

8. Биксалеев Р.Ш. Об аспектах перспективных решений по формированию энергоэффективной системы термостатирования тяговых аккумуляторных батарей электрофицированных транспортных средств/ Биксалеев Р.Ш., Карпухин К.Е., Климов А.В.// Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации. Материалы 99-й Международной научно-технической конференции. Иркутский национальный исследовательский технический университет; под общей редакцией А.И. Федотова. 2017. С. 215-224.

9. Маликов, Р.Р. Математическая модель автомобиля с расширителем пробега / Р.Р. Маликов, А.В. Климов, Р.Ш. Биксалеев // Проблемы механики современных

машин. Материалы VII Международной конференции (Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, 25-30 июня 2018). – 2018. – Том 2. – С. 152-156.

Патенты Российской Федерации на полезную модель:

1. Модульная система терморегулирования состояния тяговых аккумуляторных батарей: пат. 174819 Рос. Федерация: МПК B60L 11/00/ Климов А.В., Биксалеев Р.Ш., Оспанбеков Б.К. заявитель и патентообладатель ПАО «КАМАЗ». – № 2017116587 заявл. 11.05.2017 опубл. 03.11.2017 Бюл. № 31.

2. 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.