ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«Центральный ордена Трудового Красного знамени
научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Карпухин Кирилл Евгеньевич

Москва – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ....4
ВВЕДЕНИЕ....6
ГЛАВА 1 АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ, АНАЛИЗ ТЕМАТИКИ, ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ....12
1.1 Актуальность....12
1.2 Особенности эксплуатации электрических транспортных средств в РФ....25
1.3 Конструкции систем термостатирования....33
1.4 Патентный анализ....49
1.5 Обзор работ, посвященных методам оценки состояний литий-ионных аккумуляторов и факторам, влияющих на деградацию....51
1.5.1 Методы оценки степени работоспособности тяговой аккумуляторной батареи....52
1.5.2 Анализ факторов, влияющих на деградацию литий-ионных аккумуляторов....74
1.5.3 Методы оценки состояния заряда....79
1.6 Выводы по главе....80
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВНУТРИ ТЯГОВОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ. ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ ОПИСАНИЮ СТЕПЕНИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ....82
2.1 Математическое описание тепловых процессов литий-ионных аккумуляторов....84
2.2 Основные виды теплопередачи в системе термостатирования....85
2.2.1 Передача тепла теплопроводностью....85
2.2.2 Передача тепла излучением....86
2.2.3 Передача тепла конвекцией....87
2.3 Математическое описание гидравлических процессов в системах термостатирования....91
2.3.1 Потери напора на трение по длине трубопровода....92
2.3.2 Местные потери напора в трубопроводах....92
2.3.3 Неизотермические потери....94
2.4 Математическое описание степени работоспособности литий-ионных аккумуляторов....95
2.5. Выводы по второй главе....98
ГЛАВА 3 РАСЧЕТ И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ ТЯГОВОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ....99
3.1 Выбор тяговой аккумуляторной батареи методом априорного ранжирования....99
3.2 Расчет тягово-динамических и энергетических характеристик электрических транспортных средств категории М3....106
3.2.1 Объект исследования....107
3.2.2 Исходные данные....108
3.2.3 Характеристика тягового электродвигателя привода ведущих колес....108
3.2.4 Расчет КПД привода....109
3.2.5 Определение параметров шин....109
3.2.6 Расчет сил сопротивления качения, подъему и воздуха....110
3.2.7 Расчет сил сопротивления подъему....112
3.2.8 Расчет сил сопротивления воздуха....113
3.2.9 Расчет скорости движения электрического транспортного средства....116
3.2.10 Определение потребной мощности двигателя....117

3.2.11 Расчет силы тяги на колесе....117
3.2.12 Расчет динамического фактора....119
3.2.13 Расчет характеристики разгона....121
3.2.14 Расчет тормозной характеристики....123
3.2.15 Расчет энергетического баланса и предварительные расчеты СТ....127
3.3 Расчет системы термостатирования....134
3.3.1 Исходные данные системы термостатирования, установленной на электрическом транспортном средстве категории М3....134
3.3.2 Определение общих гидравлических потерь (в трубопроводах + ТАБ)....138
3.3.3 Описание имитационной модели системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи....140
3.4 Определение времени прогрева и охлаждения тяговой аккумуляторной батареи в климатической камере....150
3.4.1 Объект исследования....151
3.4.2 Измерительная и регистрирующая аппаратура....152
3.4.3 Порядок и методы проведения испытаний....153
3.4.4 Описание климатической камеры....156
3.4.5 Обработка результатов испытаний и верификация имитационной модели....158
3.5 Выводы по третьей главе....163
ГЛАВА 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ....165
4.1 Анализ исследовательских испытаний условий работы системы термостатирования и моделирование степени работоспособности тяговой аккумуляторной батареи....165
4.2 Ранжирование факторов имитационной модели системы термостатирования....171
4.3 Рекомендации по результатам текущих исследований системы термостатирования ЭАТС категории М3....173
4.4 Выводы по четвертой главе....174
ЗАКЛЮЧЕНИЕ....175
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ....177
ПРИЛОЖЕНИЕ А Сведения о патентах на полезную модель....191
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Протокол исследовательских испытаний....193

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

BMS – Электронное устройство, управляющее или рассчитывающее электрические и тепловые функции перезаряжаемой системы хранения электрической энергии и обеспечивающее связь между перезаряжаемой системой хранения электрической энергии и другими системами транспортного средства;

CAN – (*Controller Area Network* — сеть контроллеров) — стандарт промышленной сети, ориентированный на объединение в единую сеть различных исполнительных устройств и датчиков;

CANoe – программный инструмент для разработки и тестирования от *Vector Informatik GmbH;*

CFD – вычислительная гидрогазодинамика;

DOD – глубина разряда источника тока;

Gr – Число Грасгофа;

NEDC – новый европейский ездовой цикл (*new European driving cycle*);

NMC – литий-ионный аккумулятор с активным материалом катодного материала $Li(NiMnCo)O_2$;

LTO – литий-ионный аккумулятор с пентатитанатом лития ($Li_4Ti_5O_{12}$) в качестве анода;

LFP – литий-ионный аккумулятор с материалом катодного материала $LiFePO_4$;

SOC – степень заряженности источника тока;

SOH – степень работоспособности или уровень деградации аккумулятора;

SEI – граничный слой внутри единичного аккумулятора находящийся между анодом и электролитом;

Nu – Число Нуссельта;

Pr – Число Прандтля;

PTC – позисторы, терморезисторы с положительным температурным коэффициентом;

Re – Число Рейнольдса;

Vector (*Vector Informatik GmbH*) — немецкая компания, разрабатывающая ПО широкого спектра для работы с коммуникационными сетями, используемыми в автомобильной промышленности (*CAN, FlexRay, LIN* и др.);

ДВС– двигатели внутреннего сгорания;

ИМ – имитационная модель;

ЛИА –литий-ионный аккумулятор (аккумуляторная ячейка);

НРЦ (*OCV*) – напряжение разомкнутой цепи;

СТ– система термостатирования;

ТАБ – тяговая аккумуляторная батарея, включающая перезаряжаемые модули аккумуляторных ячеек (хранение электрической энергии), а также электрические цепи, электронику, систему контроля заряда батареи, электромагнитные контакторы, блок управления ТАБ;

ТС – транспортное средство;

ЭАТС – электрическое автотранспортное средство (электромобиль), приводимое в движение исключительно электромеханическим преобразователем энергии и имеющее собственную автономную ТАБ, заряжаемую с помощью внешнего источника электроэнергии;

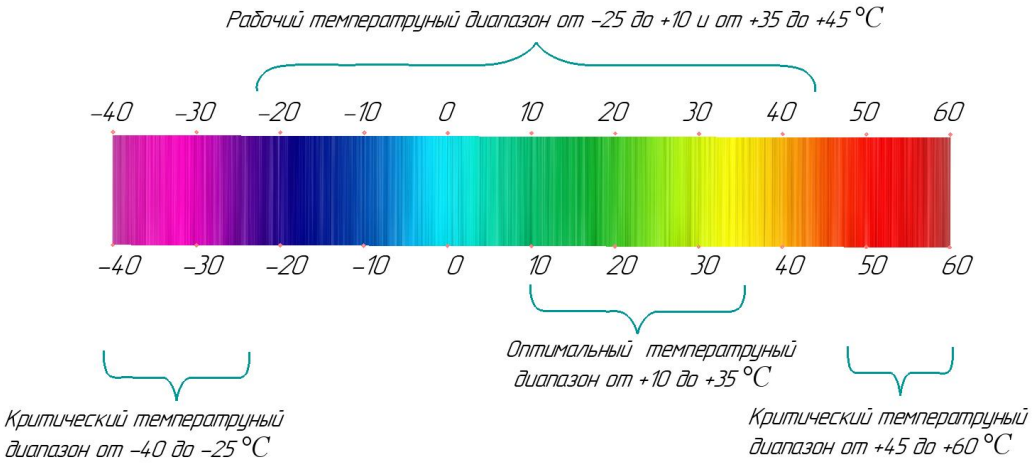
ВВЕДЕНИЕ

По прогнозам Европейской комиссии по транспорту (*Mobility and Transport-European Commission*) к 2030 году в Европе доля пассажирского и легкого коммерческого транспорта с электрическим приводом увеличится до 31%. Данная мера является вынужденной в связи с ухудшением экологической ситуации на планете, связанной с загрязнением атмосферы и глобальным потеплением. Тенденцию увеличения парка электрифицированных автотранспортных средств (ЭАТС) определяет и расширение географических зон их эксплуатации, включая северные зоны с характерными суровыми погодными условиями.

Создание передовых отечественных ЭАТС, таких как КАМАЗ 6282, ЛиАЗ-6274, Волгабас СитиРитм-12Е, КАМАЗ 1221 «Шатл», Газель NEXT electro, КАМАЗ-3373 «Челнок» и других, в климатических условиях Российской Федерации требует разработки высокоэффективных систем термостатирования тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ). При поддержании температуры ТАБ в оптимальном диапазоне сохраняются технические характеристики ТАБ (мощность, емкость, безопасность и т.д.). Способность системы термостатирования поддерживать оптимальную температуру в широком температурном диапазоне окружающей среды позволяет увеличить длительность периода эксплуатации ЭАТС, для чего и необходима активная система термостатирования ТАБ [1].

Система термостатирования (СТ) и конструкция ТАБ должны быть рассчитаны таким образом, чтобы разница температур между литий-ионным аккумулятором (ЛИА) и ТАБ не превышала 6–8 °С. Это является одним 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. При температуре между –20 и –40 °С жидкие электролиты могут кристаллизироваться. Отрицательные температуры увеличивают сопротивление внутри ЛИА, мешая потоку ионов внутри и таким образом снижая емкость и производительность. При температуре

более 60 °С ЛИА становятся нестабильными, внутри них начинаются необратимые процессы, что впоследствии может привести к тепловому разгону. Всё это является основной проблемой для потенциальных потребителей ЭАТС [2]. Таким образом, можно утверждать, что критические температуры эксплуатации — от –40 до –25 и от +45 до +60 °С. Эти диапазоны приведены на рисунке 1 [3].



Рисунок¶1 – Температурные диапазоны эксплуатации ЛИА

Новые системы термостатирования должны будут решать задачи по поддержанию технических характеристик ТАБ и позволят энергоэффективно эксплуатировать ЭАТС в течение требуемого срока службы. Однако не разработаны актуальные методики для оценки эффективности систем и подбора компонентов систем, а также оценки выхода из рабочих режимов и оценки *SOH* ТАБ.

Исследованиями в области ЭАТС занимались: Бахмутов С.В. [4–6] Котиев Г.О [7-9], Филькин Н.М. [10–11], Петленко Б.И. [12], Эйдинов А.А. [13], Нагайцев М.В. [13], Козлов А.В. [14], Селифонов В.В. [15–17] Карпухин К.Е [16,18, 6]и др [19–20].

Работы над методами расчета систем термостатирования и анализом эффективности ЭАТС велись: *Pour M. Y.* [21], *Morini L.* [22], Улитенко А.И. [23], *Hamut H.* S. [24] Курмаев Р.Х. [18], Шорин А.А. [25] и другие [26]. Проблемы энергоэффективности затронуты в работах Оспанбекова Б.К. [27], Иванова С.А. [28], Климов А.В. [29], Строганов В.И. [30]. Факторы, влияющие на деградацию

ЛИА, и методы оценки исследованы в работах Хандорина М. М. [31], Чупина Д. П. [32], *Cordoba-Arenas A.* [33], *Matasso A.* [17], *Liu D.* [34], *R. Xiong, W. Shen* [35, 36].

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 повысить производительность электрифицированных автотранспортных средств (обладающего высокими экологическими характеристиками) с учетом ресурса тяговой аккумуляторной батареи на протяжении полного жизненного цикла.

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

Для достижения поставленной цели решались следующие **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 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 диссертации представлены, обсуждены и одобрены на:

– 99-й конференции ААИ «Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации» г. Иркутск, 2017;

– 100-й конференции ААИ «Экологическая безопасность АТС» г. Дмитров, 2017;

– МАНФ-2020 Наземные интеллектуальные транспортные средства и системы. АВТОНЕТ, г. Москва, 2020;

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

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

Положения, выносимые на защиту

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. Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 9 научных работах, в том числе 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в зарубежном журнале, входящем в базу данных «Scopus», 2 патента РФ на полезную модель.

Структура и объем работы

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

ГЛАВА 1 АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ, АНАЛИЗ ТЕМАТИКИ, ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Актуальность

Современное представление о будущем автомобилестроения практически невозможно без ЭАТС и гибридных ТС. В то же время на сегодняшний день около 80% потребляемой энергии в транспортном комплексе приходится на автомобильный транспорт, который практически полностью работает на базе нефтепродуктов, используемых в ДВС [37].

В распоряжении Правительства от 28 апреля 2018 г. №831-р «Об утверждении стратегии развития автомобильной промышленности до 2025 года» одним из приоритетных направлений инновационного развития автомобилестроения в РФ названы технологии электрификации транспортных средств (электромобили, гибриды) [38].

Увеличение интенсивности развития ТС на электрической тяге наблюдалось несколько раз за всю историю автомобилестроения, однако же, учитывая стоимость нефти и малую плотность энергии аккумуляторов, широкого распространения не последовало. Первым изобретателем, сконструировавшим ЭАТС, был англичанин Роберт Дэвидсон. В 1838 году он создал первый электромобиль — и это всего лишь через шесть лет после открытия Майклом Фарадеем электромагнитной индукции [18]. К концу XIX века электромобили получили некоторое распространение за счет простоты обслуживания и надежности. В некоторых странах была создана инфраструктура обслуживания и ремонта данных ТС. Тем не менее к 20-ым годам XX века, в связи с развитием нефтяной промышленности и улучшением технологичности ДВС, электромобили почти на полвека покинули мировые выставки автотранспорта. С наступлением нефтяного кризиса 1970-х годов, проблемы, связанные с топливными ресурсами, стали наиболее острыми, и научные институты приступили к работе над энергоэффективностью и созданием альтернативных видов транспорта.

Проблемы экологии в конце XX века и в начале 2000-х годов направили развитие автомобильной промышленности на путь уменьшения токсичности выхлопных газов ДВС и ужесточения требований к выбросам вредных веществ в окружающую среду, что фактически стало определяющим фактором развития современного грузового, пассажирского и легкового транспорта. В 1988 году появились, и далее только ужесточались, требования к выбросам ДВС. В отношении автомобильной техники, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, введены в действие требования по ограничению выбросов:

- экологического класса 2 - с 2006г.;
- экологического класса 3 - с 1 января 2008 г.;
- экологического класса 4 - с 1 января 2010 г.;
- экологического класса 5 - с 1 января 2014 г;

Требования Евро-2 введены в странах Европейского союза с 1995 г., Евро-3 с 2000 г., Евро-4 с 2005 г., Евро-5 с 2009 г. [39], Евро-6 с 2015 г. [40].

С появлением на рынке новой технологии накопления энергии при помощи ЛИА автопроизводители начали создавать серийные ТС, успешное производство которых наблюдается в таких компаниях как *Tesla, Nissan, Mitsubishi*, КАМАЗ и т.д.

По прогнозам, объем мировых продаж гибридных и ЭАТС в 2021 году составит 16% от общих продаж легковых машин против 11% в 2020 году на фоне растущего спроса на ЭАТС [41]. К 2025 году ожидается, что мировые продажи вырастут до 14,3 миллиона ЭАТС. На рисунке 2 представлен прогноз увеличения парка электромобилей в мире (по данным аналитического центра *Rho Motion* [42]).

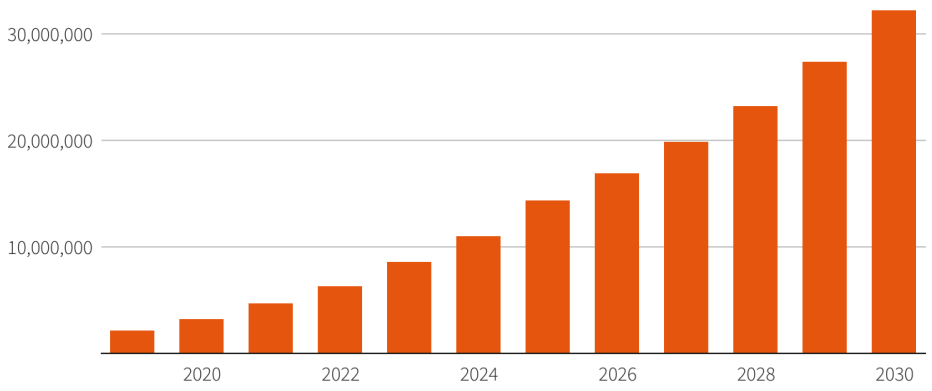
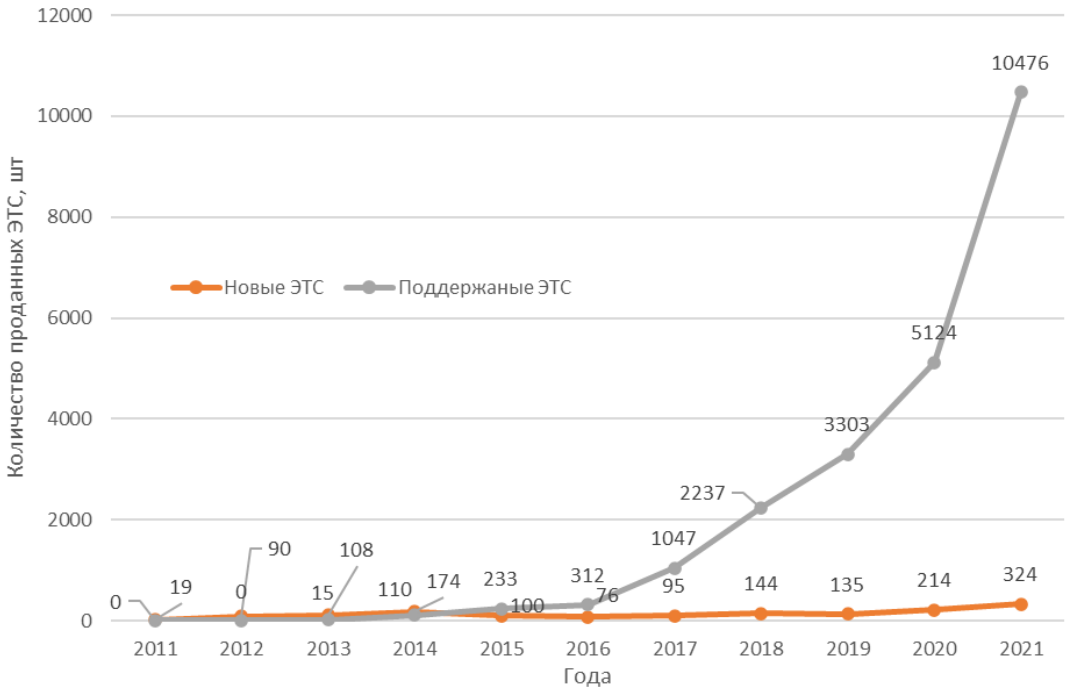


Рисунок ¶₽ – Прогноз увеличения парка электромобилей в мире

Согласно данным аналитического агентства «АВТОСТАТ», на январь 2021 года в нашей стране было зарегистрировано 10800 электромобилей. 83% всех электромобилей приходится на *Nissan Leaf* – в России насчитывается чуть более 9 тысяч экземпляров этой модели. Более 6% всех электрокаров в РФ относится к марке *Tesla* (модели 3, *S, X, Y* – суммарно почти 700 единиц), а еще около 4% – это *Mitsubishi i-MiEV* (400 шт.). Кроме них, свыше 100 транспортных средств на электротяге имеют *Jaguar* и *Audi*. У оставшихся брендов данный показатель меньше, а на долю каждого из них приходится менее 1%. [41].

На рисунке 3 видно, что численность электромобилей за последние пять лет в нашей стране увеличилась: по сравнению с 2016 годом наблюдается стремительный рост парка (примерно в 30 раз), что демонстрирует довольно большой потребительский интерес у граждан РФ.

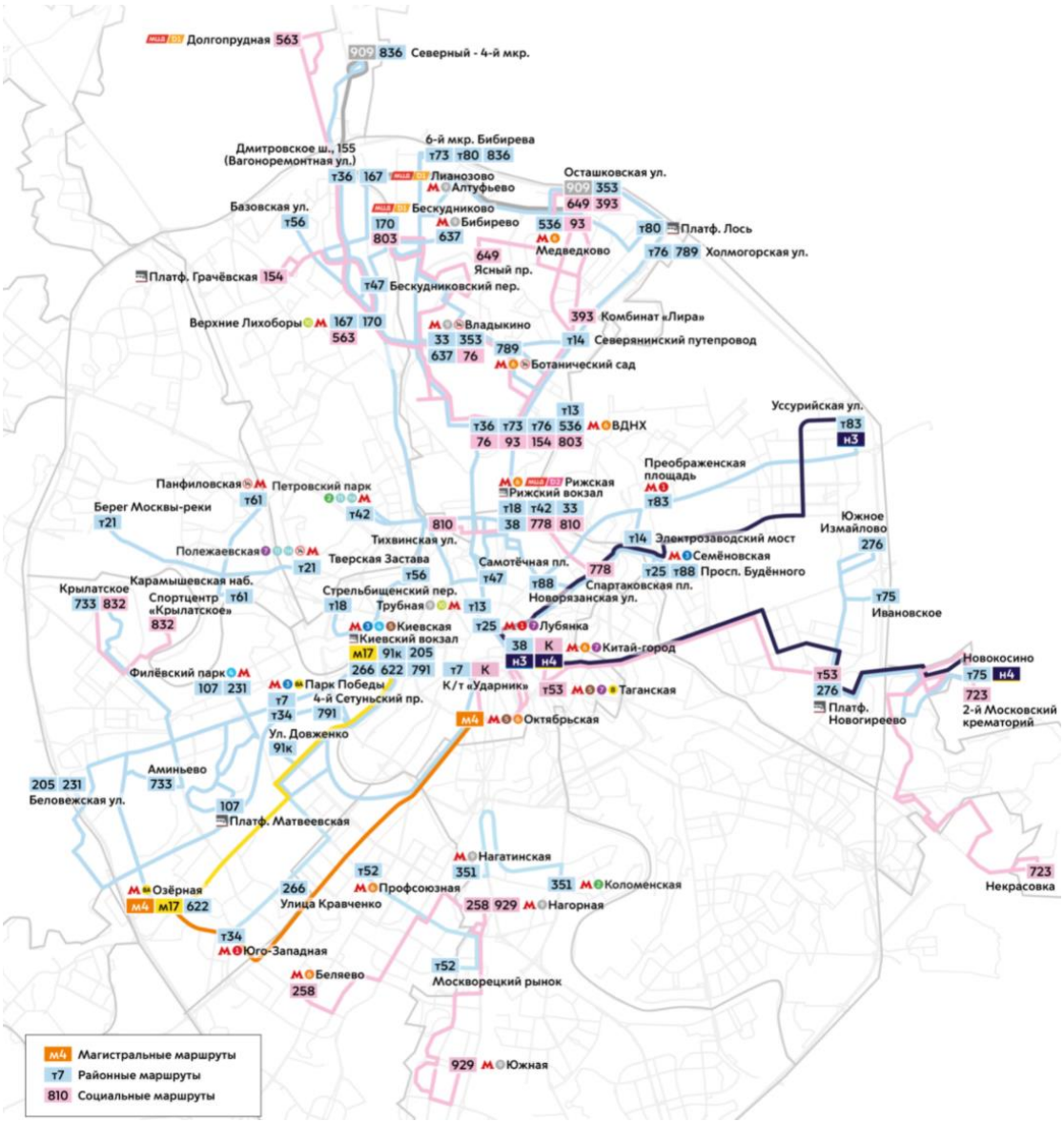


Рисунок¶3 – Парк и динамика рынка электромобилей в РФ

При этом возрастание заинтересованности происходит не только в отношении личного транспорта, но и коммерческого. В конце 2019 года в г. Москве в ГУП «Мосгортранс» курсировало 300 ЭАТС категории М3 [43], а уже к 2023 году планируется эксплуатировать 2350 (рисунок 4) ЭАТС категории М3 [44]. С 2021 года планируется полный отказ от закупок дизельных автобусов [45] и замена почти всего троллейбусного парка [46] на ЭАТС. На рисунке 5 показаны действующие маршруты ЭАТС категории М3 в г. Москве. Также к 2023 году в г. Санкт-Петербурге планируют увеличить количество ЭАТС категории М3 до 50 единиц, на данный момент число ЭАТС равно 10-ти [47]. Также увеличивается количество зарядных станций, к 2023-му году планируется увеличить их число до 300 [48].

	2020	2021	2022	2023	Итог	Обновление, %
Автобус	1345	888			2233	100
Трамвай	70	60	144	50	324	100
ЭТС кат. М3	**300**	**600**	**650**	**800**	**2350**	**Новый вид транспорта**
Вагон метро	551	337	336	328	1552	80
Вагоны пригородных	441	184	352	605	1582	80

Рисунок ¶ –Инвестирование в обновление подвижного состава в г. Москве



Рисунок¶5 –Схема маршрутов ЭАТС категории М3 [49]

По прогнозам Европейской комиссии по транспорту (*Mobility and Transport-European Commission*) к 2030 году количество ЭАТС достигнет 31% от общего числа ТС такого типа [50]. По оценкам *Bloomberg NEF*, к 2040 году на ЭАТС будут приходиться 54% всех продаж новых легковых ТС во всем мире [51]. Известными компаниями *Bollinger* и *Toyota* в Северной Америке, *Tata* в Индии, а также *BYD* и *Chanje* в Китае были анонсированы новые модели грузовых электрифицированных ТС, которые изображены на рисунке 6. В октябре 2019 года компания *Daimler Trucks*, крупнейший в мире производитель грузовых электрифицированных ТС, обязалась к 2039 году выпускать на продажу только ЭАТС и полностью отказаться от разработки грузовых ТС с ДВС, работающих на природном газе. Руководство *Volvo* и *Scania* выразило мнение, что электрификация большегрузных коммерческих ТС является жизнеспособной и важной стратегией для достижения уменьшения выбросов и улучшения экологической ситуации. *Volvo Trucks* и *Renault Trucks* начали производство электрифицированных грузовых ТС в 2019 году. В начале 2020 года *Scania* представила два городских грузовика с ТАБ и полной массой 27 тонн [52].

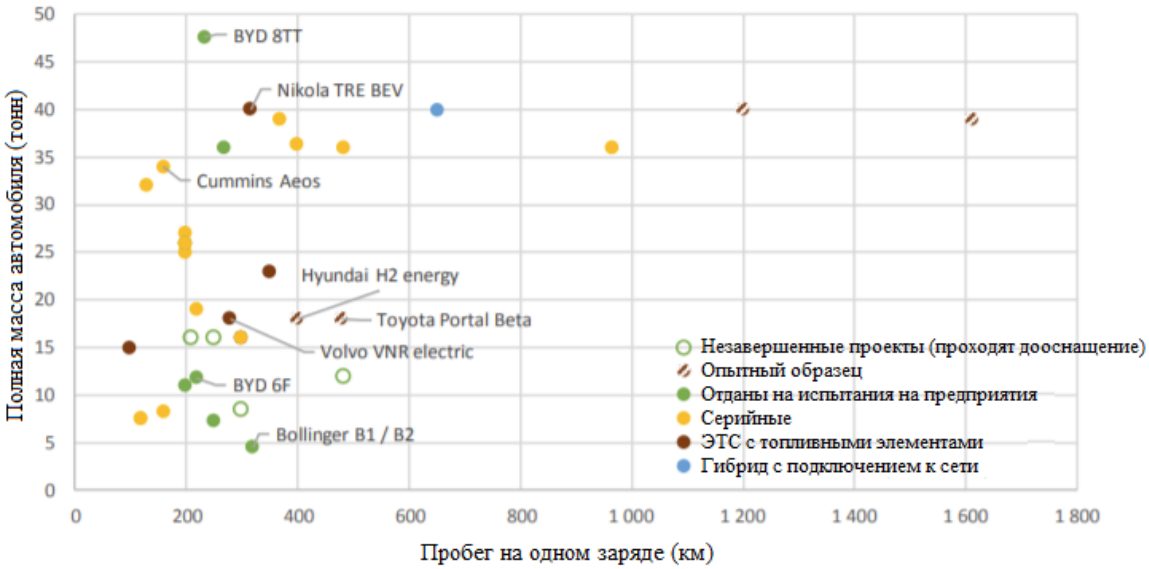


Рисунок ¶6 – Средние и тяжелые модели грузовых электрифицированных ТС

Представленная на рисунке 7 гистограмма отражает ситуацию в мире с выбросами CO_2 от сжигаемого топлива [53]. На протяжении последних 15 лет в

мире увеличилось количество выбросов CO_2 более чем на 20%. Вследствие стремительного развития экономики стран Азии (за последние 40 лет), а также большого парка транспортных средств с ДВС, больше всего выбросов приходится на азиатский регион. Именно поэтому на сегодняшний день в этом регионе стало уделяться большое внимание электрифицированным транспортным средствам. На рисунке 8 показан график изменения массы выбросов в мире в зависимости от глобальных событий в мире. Так, по оценкам специалистов, в 2020 году из-за новой коронавирусной инфекции *Covid-19* выбросы CO_2 должны были снизиться на 8% [54]. Среднегодовое значение на станциях РФ, расположенных в фоновых условиях, превысило 415 млн$^{-1}$ и достигло очередного максимума [55].

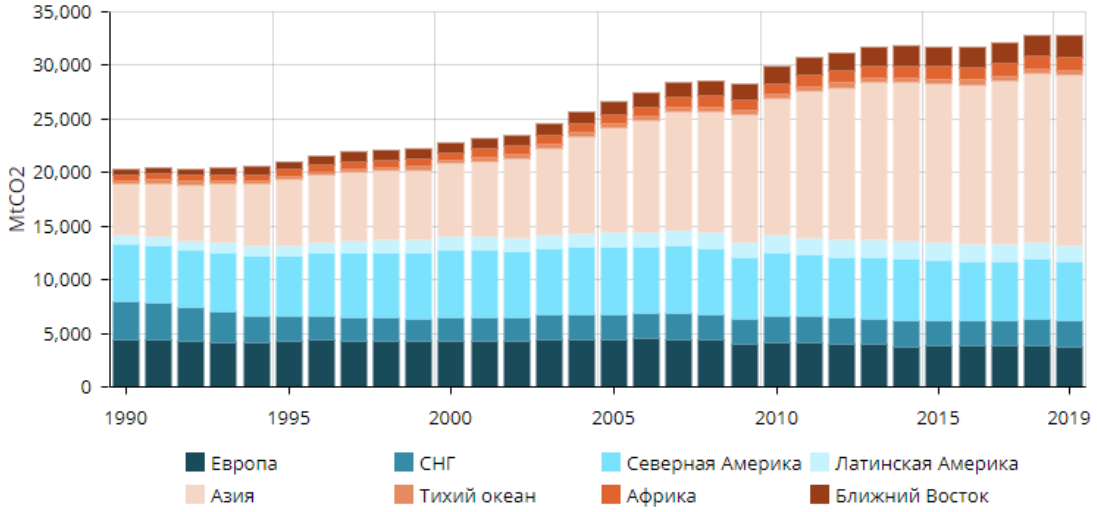


Рисунок ¶7 – Масса выбросов CO_2 от сжигаемого топлива по регионам

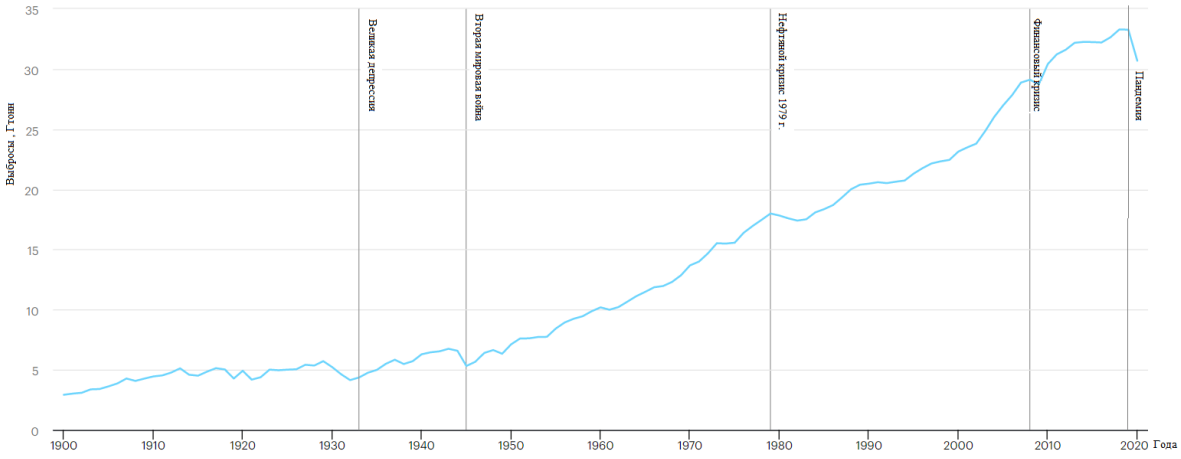


Рисунок ¶8 – Масса выбросов CO_2, 1900-2020 год

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 [56]. В последние годы ситуация меняется в худшую сторону: в 2019 году наблюдается тот же уровень выбросов, что и в 2014 году, несмотря на ввод новых ограничений по выбросам (рисунок 9). Характер изменения выбросов парниковых газов на рисунке 7 подобен изменению средней температуры (рисунки 22 и 24) на нашей планете.

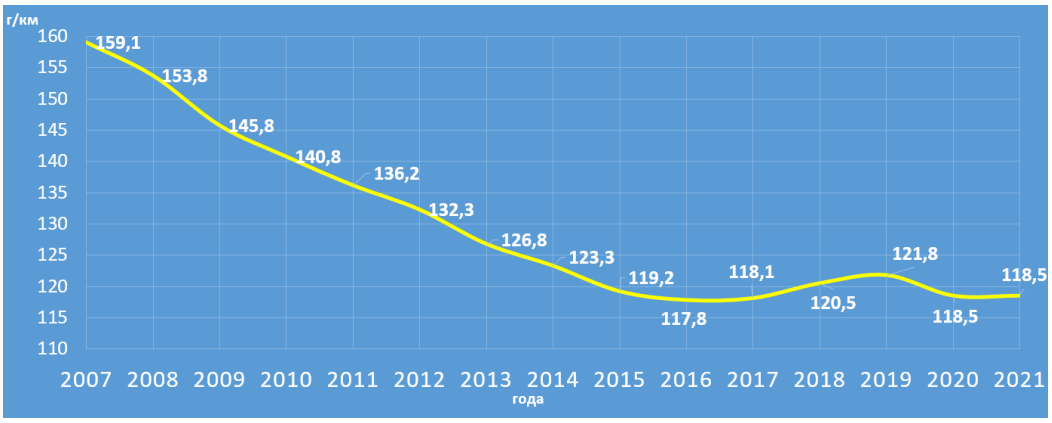


Рисунок ¶ – Средние выбросы CO_2 легковых ТС в Европе

Множество исследований указывают на то, что эффективность использования энергии в ЭАТС выше вследствие более короткого топливного цикла от добычи до передачи ее на вращение колес ТС, что наглядно представлено на рисунке 11. Причем у ТС с ДВС выбросы присутствуют на всем протяжении цикла. Следовательно, ЭАТС выбрасывают меньше парниковых газов (учитывая полный цикл получения полезной энергии) и других загрязнений, чем ТС с ДВС. Исследования по эффективности ТС указывают на то, что общий объем выбросов у ЭАТС значительно ниже, чем у ТС с ДВС [57], причем энергия для ЭАТС определяется от сжигания углеводородов (рисунок 10). Аналогичные выводы приведены в работе [58]. Выбросы CO_2 ЭАТС составляют 52% от выбросов аналогичного автомобиля с ДВС, с оценкой общих выбросов «от скважины до колеса».

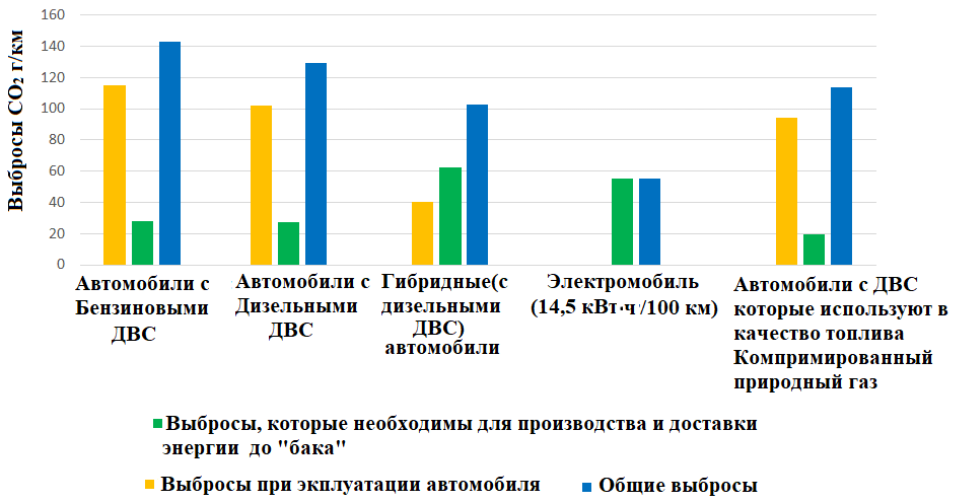


Рисунок ¶10 – Сравнение затраченной энергии на преодоление 100 км пути

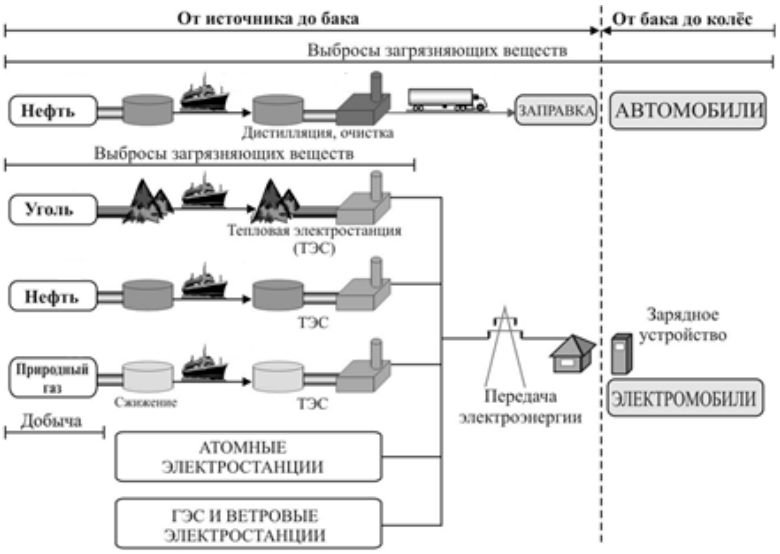


Рисунок ¶1 – Структура топливного цикла

По данным 2019 года, в РФ доля энергии, полученной от сжигания углеводородов, составляет около 63 %. (рисунок 12) [59].

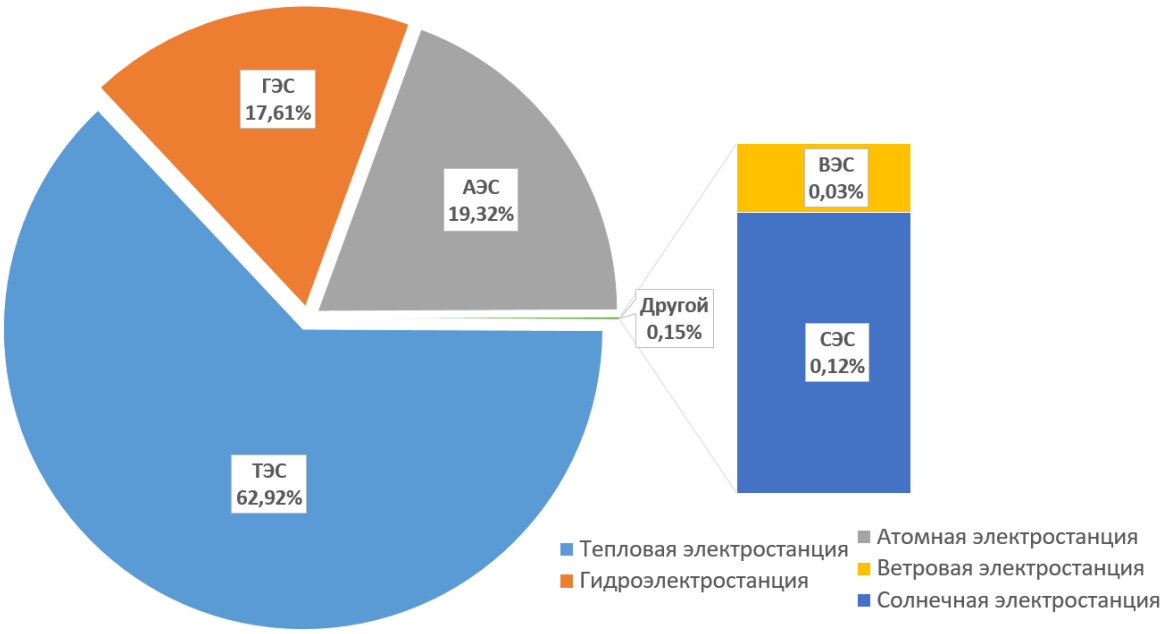


Рисунок ¶12 – Выработка электроэнергии по видам электростанций

Помимо большого количества выбросов парниковых газов существует проблема пылевого загрязнения и загрязнения почвы от истирания тормозной системы ТС, а также неправильной утилизации горюче-смазочных материалов. Необходимо обратить внимание на то, что соединение металлов поступает в атмосферный воздух в состоянии мелкодисперсной фракции с диаметром частиц 2,5–6 мкм, длительно пребывающих во взвешенном состоянии, при этом не учитывается процесс вторичного пылеобразования.

Мелкодисперсные фракции продуктов эксплуатационного износа долгое время могут сохраняться в приземных слоях атмосферного воздуха, на поверхности дорожного покрытия и в верхних слоях почвы, изменяя ее характеристики, а также провоцируют процесс вторичного пылеобразования, попадают в органы дыхания, оказывая неблагоприятное воздействие на здоровье человека [60]. С использованием ЭАТС данная проблема полностью не устранится, но выбросы мелкодисперсных фракции сократятся за счет рекуперации.

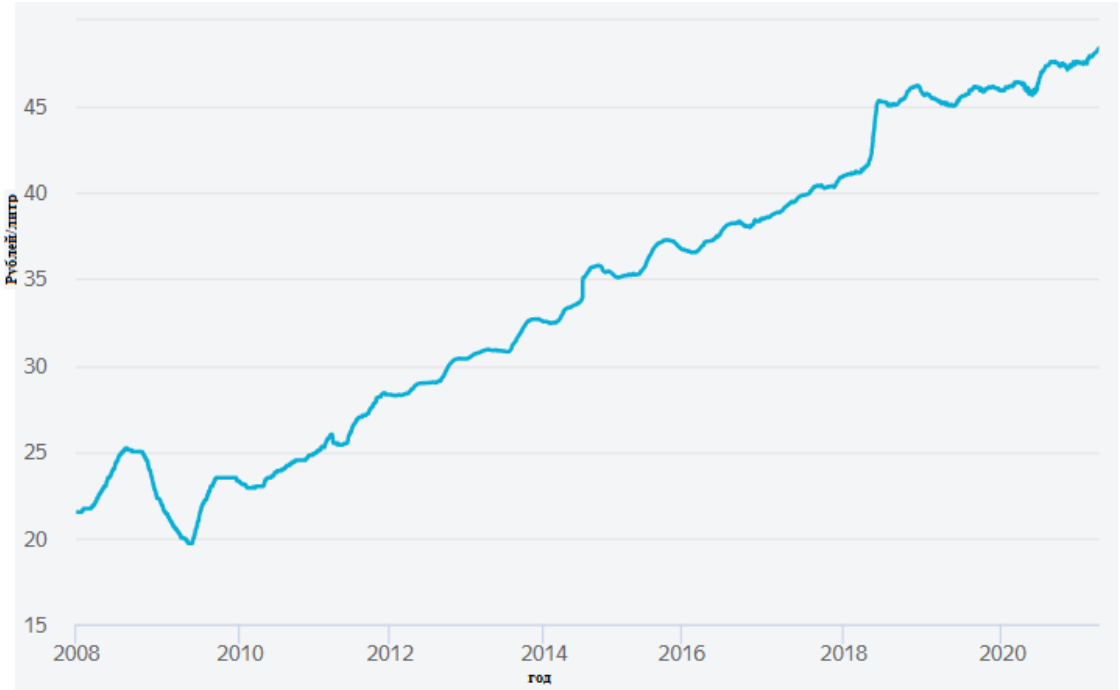
В настоящее время происходит активное развитие технологий в области ЭАТС. Это обусловлено следующими факторами:

1. Экологический фактор (сильная загрязнённость мегаполисов в большей степени из-за ТС с ДВС);

2. Совершенствование характеристик (удельных и ресурсных) ЕА и ТАБ;

3. Высокая стоимость углеводородного топлива (с учетом цен на нефть ситуация не во всех странах однозначная, что следует из рисунков 13 и 14).

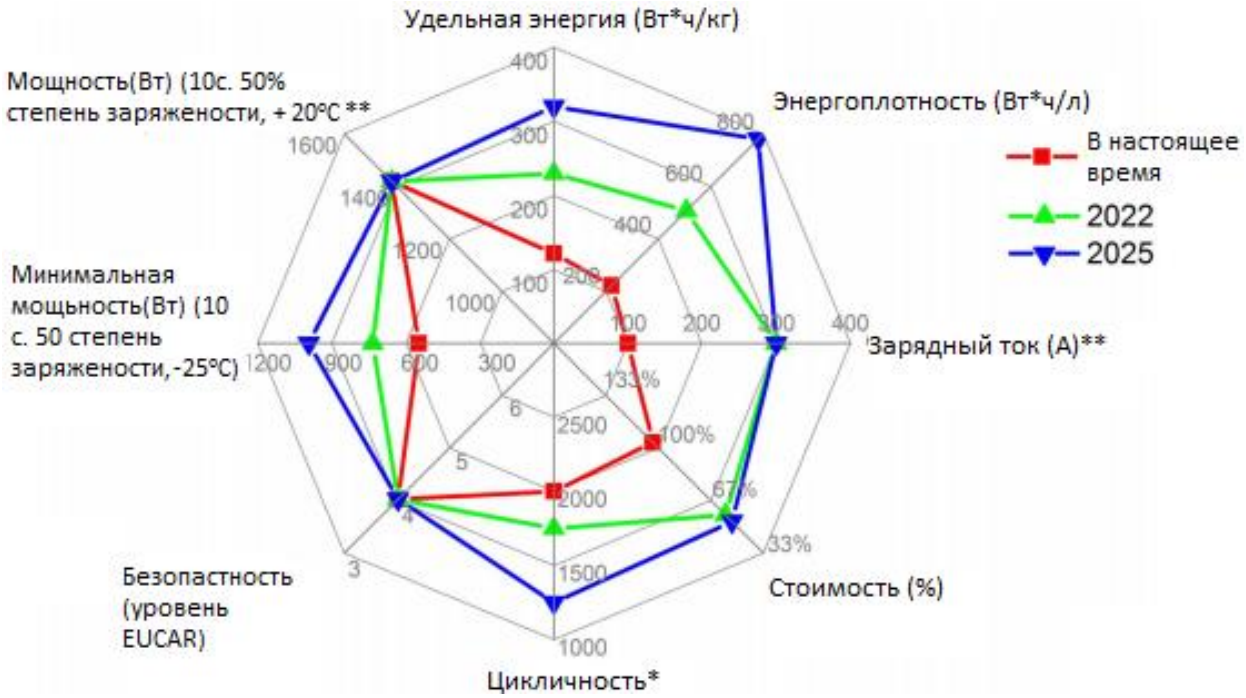
Рисунок¶13 – Динамика розничных цен на бензин в США ($ за галлон) и сырую нефть ($ за баррель) [61]



Рисунок¶14 - Динамика розничных цен на бензин АИ-95 в РФ [62]

Химические источники тока являются наиболее часто используемым средством накопления энергии. На ранних этапах развития автомобилестроения использовались свинцово-кислотные аккумуляторы, далее железоникелевые аккумуляторы, а во второй половине XX века появилось множество различных видов аккумуляторных батарей. На сегодняшний день лидирующее место занимают ЛИА.

По прогнозам специалистов, к 2025 году удельные показатели ЛИА [63] возрастут (рисунок 15). Для потребителя с увеличивающимися ожиданиями необходимо, чтобы система термостатирования надежно осуществляла контроль температуры ТАБ.



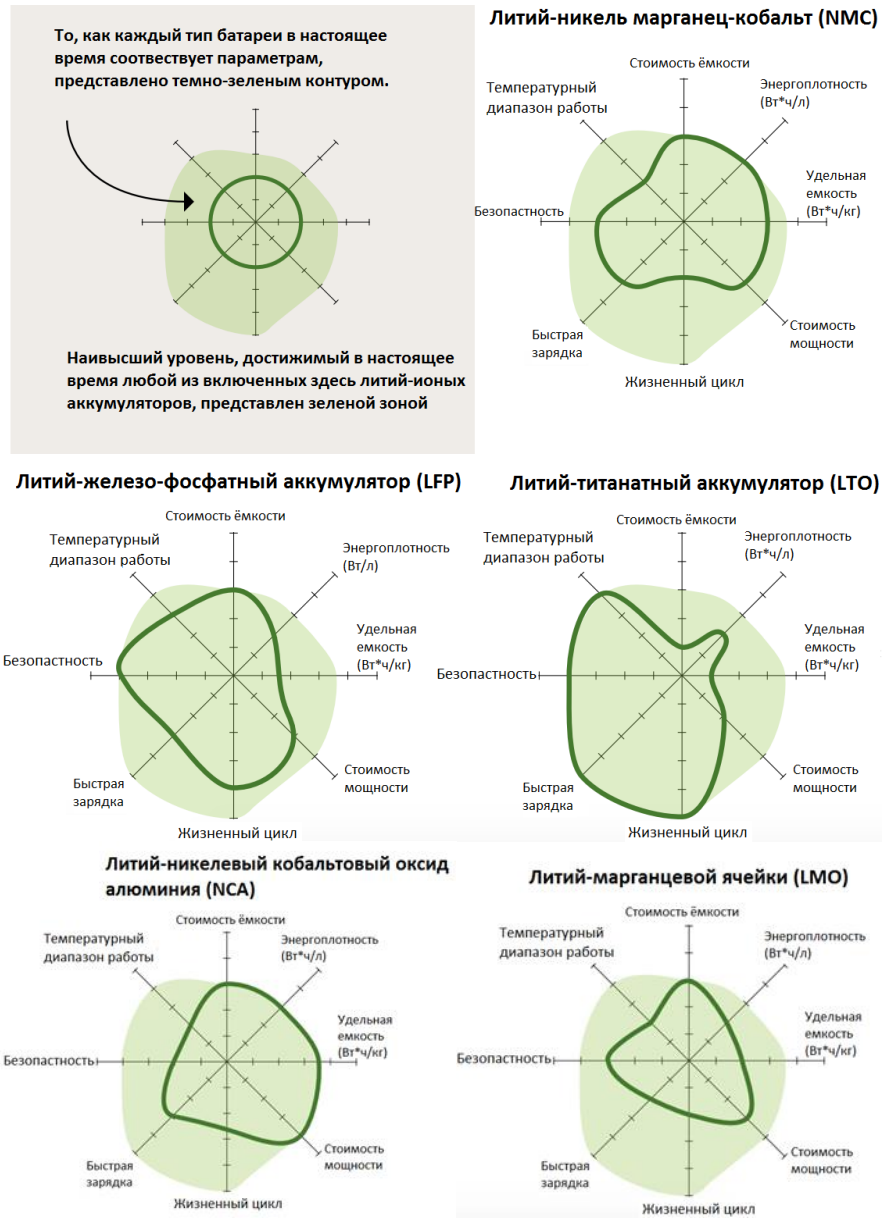
* Ожидается, что в будущем аккумуляторы будут более энергоёмкими, что затем приведет к уменьшению количество используемых циклов.

** Максимальные токи заряда ограничены возможностями инфраструктуры.

Рисунок ¶5 – Основные показатели ТАБ на уровне ЭАТС в настоящее время и прогнозируемые показатели

На рисунке 16 изображены основные критерии, по которым можно разделить ТАБ электромобилей по видам ЛИА [64]. На мой взгляд, для ЭАТС можно рассматривать две концепции развития:

- ЭАТС с небольшим пробегом (на одной зарядке) и возможностью быстрой зарядки;
- ЭАТС с большим пробегом и продолжительной зарядкой ТС (например, в ночное время).



Рисунок¶16 – Основные критерии на уровне ТС для существующих ТАБ

Для таких ЭАТС наиболее подходящими являются ТАБ с активными материалами (литий-никель марганец-кобальт (*NMC*) и литий-титаната (*LTO*).

1.2 Особенности эксплуатации электрических транспортных средств в РФ

В РФ наблюдается увеличение парка гибридных и электрических транспортных средств, что влечет расширение географических зон эксплуатации таких видов ТС, включая северные зоны с низкими температурами в течение длительного зимнего периода [50]. Наша страна отличается суровым климатом, а также России принадлежит температурный рекорд минимальной температуры в Европе и Азии [65].

Основываясь на данных о плотности населения (рисунок 18 [66]) и климатической карте (рисунок 17 [67]), можно констатировать, что большая часть населения проживает на территории во влажном континентальном климате с теплым летом. Поэтому для исследования взяты именно эти климатические условия, соответствующие ГОСТ 15150-69 исполнение У1.

Рисунок ¶7 – Классификация климатов В.П. Кёппена в РФ

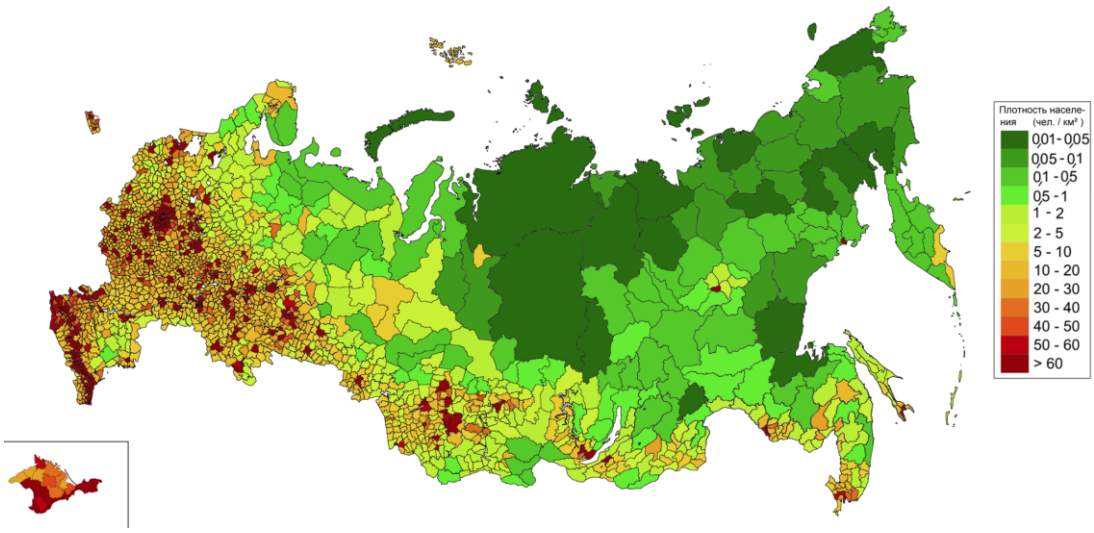
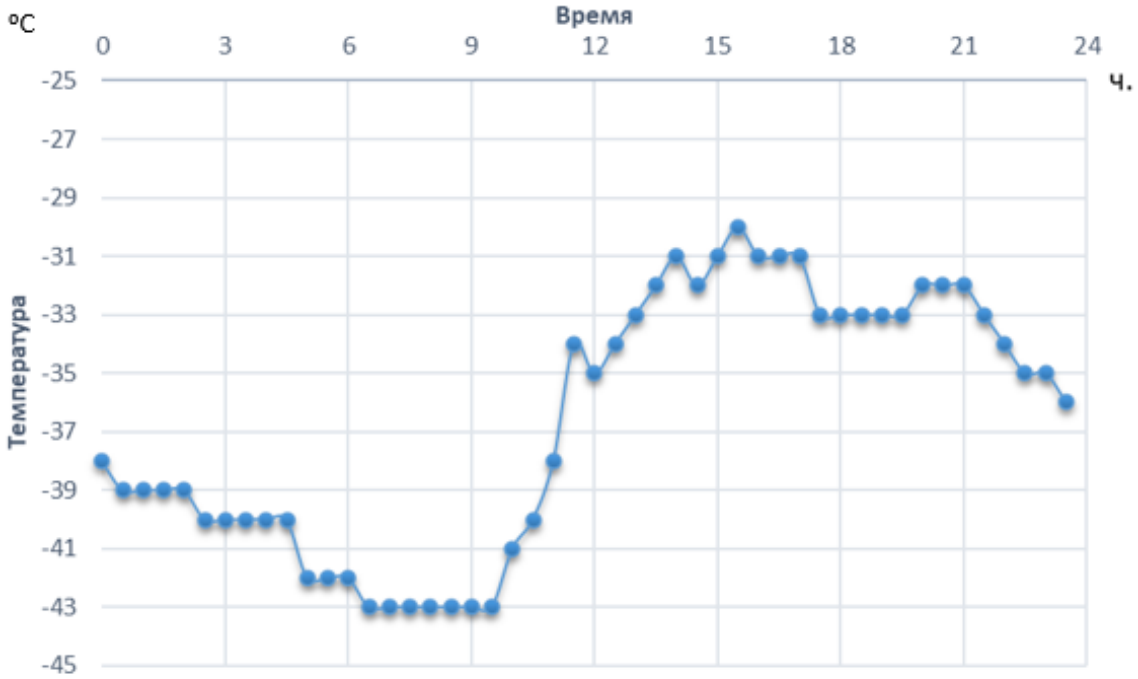


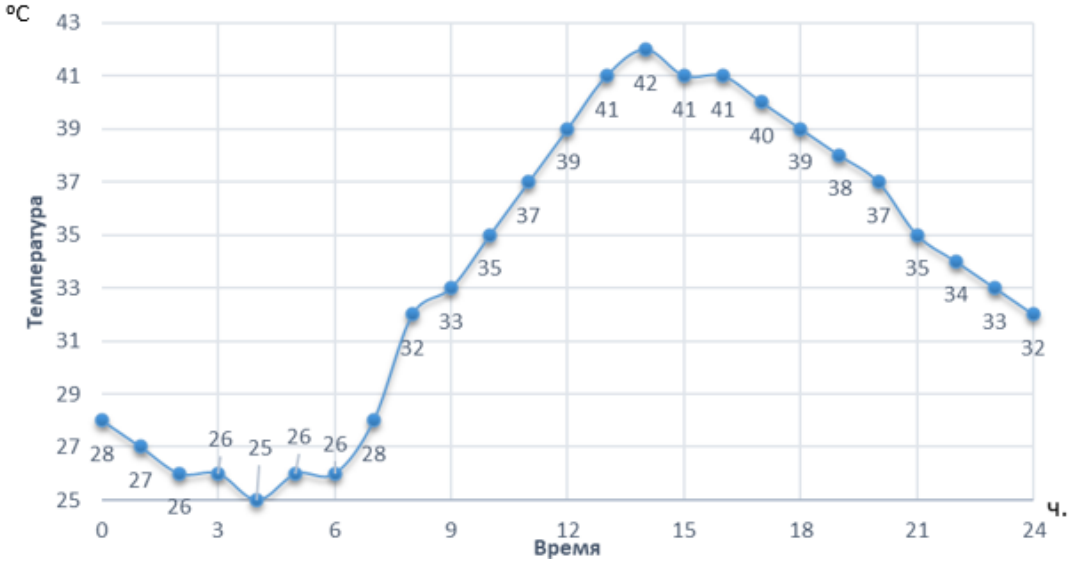
Рисунок ¶8 – Плотность населения РФ

Основным недостатком ЭАТС при эксплуатации в РФ является уменьшение пробега на одной зарядке при отрицательных температурах. В работе [68] указано, что при низких температурах ТАБ имеет низкую производительность, что приводит к снижению пробега на одном заряде до 36% в холодном климате. В работе [69] проанализировано потребление вспомогательных систем и отмечено уменьшение пробега до 24 % при низких температурах. Также существенным недостатком при эксплуатации ЭАТС является недостаточная развитость зарядной инфраструктуры [70]. Эксплуатировать ЭАТС только с ТАБ рациональнее в крупных городах применительно к доступности зарядной инфраструктуры. Поэтому для расчета систем термостатирования необходимо выбирать расчетные случаи (изменение температуры окружающей среды в 24 часов) только в отношении крупных городов РФ (мегаполисов и центральных субъектов).

В настоящей работе для наблюдения за экстремальными температурами был выбран период наблюдения с 2010 по 2020 год. В г. Красноярске температурный минимум за 10 лет достиг – 43 °С (рисунок 19), а в г. Астрахани в тот же период равен +42 °С (рисунок 20).



Рисунок¶19 – Рекорд температуры в г. Красноярск 04.02.2019 год



Рисунок¶20 – Рекорд температуры в г. Астрахань 02.07.2018 год

Показатели этих графиков приняты исходными данными для расчета систем термостатирования. Экстремальные температуры для указанных регионов встречаются довольно редко, а период воздействия таких температур небольшой. В г. Омске температура воздуха опускалась менее –40°С 5 раз за 90 лет наблюдений, а в г. Астрахани температура воздуха более +40°С поднималась в 7 раз за 115 лет наблюдения [71].

Поэтому основное время эксплуатации ЭАТС происходит в более щадящих условиях, и при воздействии экстремальных температур ЭАТС должны быть работоспособными с ограничениями. Например, ограничениями пробега и мощности.

Результаты исследований показали, что понижение температуры окружающей среды с +25 °С до –7°С вызывает уменьшение запаса хода на 9% и на 44% при выключенных и включенных внутренних потребителях энергии соответственно [50], что отражается в графике [72] на рисунке 21. Так, для сохранения необходимого пробега на одной зарядке необходимо поддерживать температуру ТАБ от +20 до +35 °С.

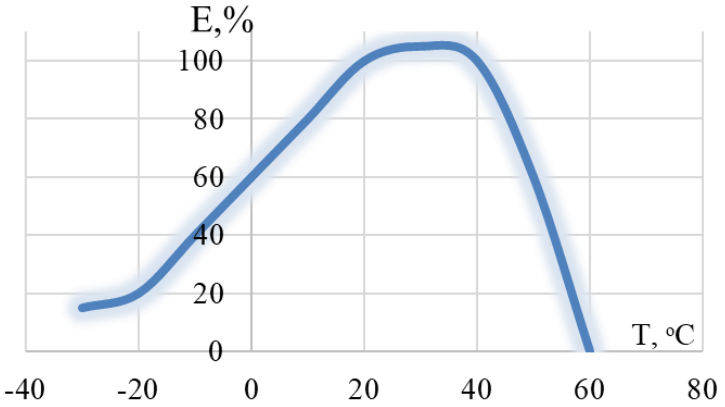


Рисунок 21 – Зависимость емкости ТАБ от температуры окружающего воздуха

На территории РФ некоторые предприятия, а также владельцы ЭАТС сталкиваются с уменьшением пробега ЭАТС на одной зарядке в период эксплуатации зимой.

В последние 50 лет сохраняется тенденция повышения средней температуры, что отражено на рисунке 22, в связи с этим в работе был рассмотрен десятилетний период наблюдений, предшествующий исследованию. Частота и интенсивность воздействия экстремальных температур в летнее время значительно увеличились в большинстве средних и северных широт в период наблюдения с 1960 по 2012 годы. Учитывая хорошо установленную причинную связь между общим потеплением и антропогенными выбросами, можно сделать вывод о важной

роли антропогенного глобального потепления в этих наблюдаемых изменениях [73].

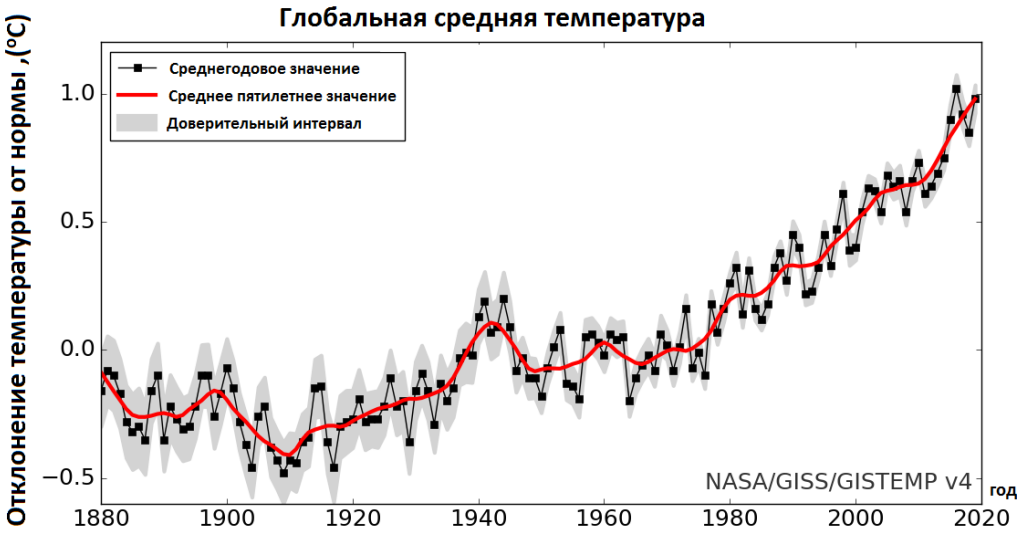


Рисунок 22 – Повышение температуры поверхности Земли с конца XIX века [74]

На рисунке 23 изображена карта, изменения количества дней с отклонением средней температуры от нормы, а также отклонения экстремальных температур.

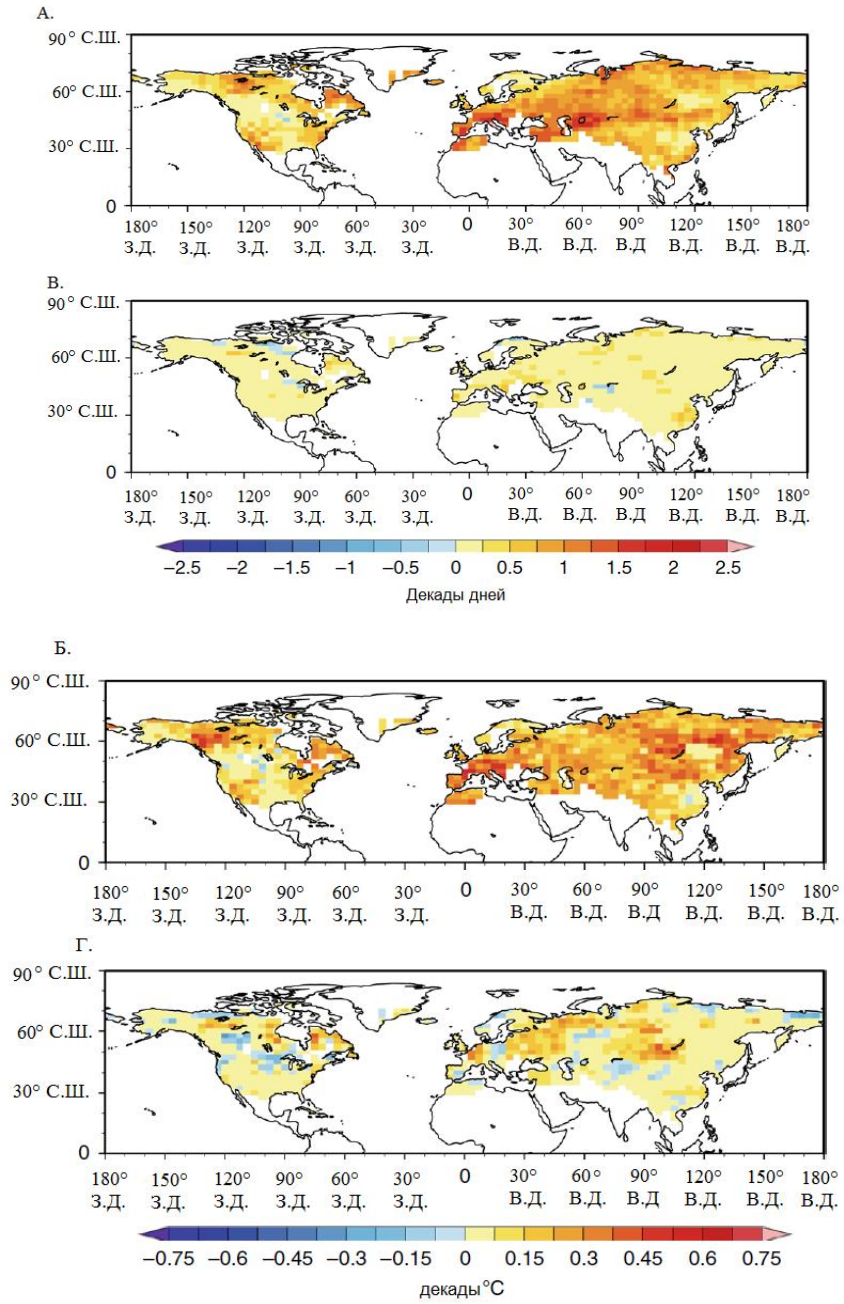


Рисунок 23 – Наблюдаемое изменение частоты дней с более высокой средней(А) и экстремальной(В) температурой в летний сезон; наблюдаемое изменение средней (Б) и экстремальной(Г) температуры в летний сезон

На рисунке 24 изображены прогнозируемые изменения температур приземного воздуха на территории РФ в период с января по март [75]. На этом рисунке видно, что в области влажного континентального климата с теплым летом (по рисунку 17) ожидается увеличение температуры в зимнее время от 3 до 6 °С. Потепление продолжается на всей территории России в целом за год и во все

сезоны. За период 1976-2020 гг. скорость роста усреднённой по РФ температуры составила 0.51 ^{0} С/10 лет. Наиболее быстрый рост наблюдается весной (0.66 ^{0} С/10 лет), но на фоне межгодовых колебаний тренд больше всего прослеживается летом (0.39 ^{0} С/10 лет: описывает 64% суммарной дисперсии) [55].

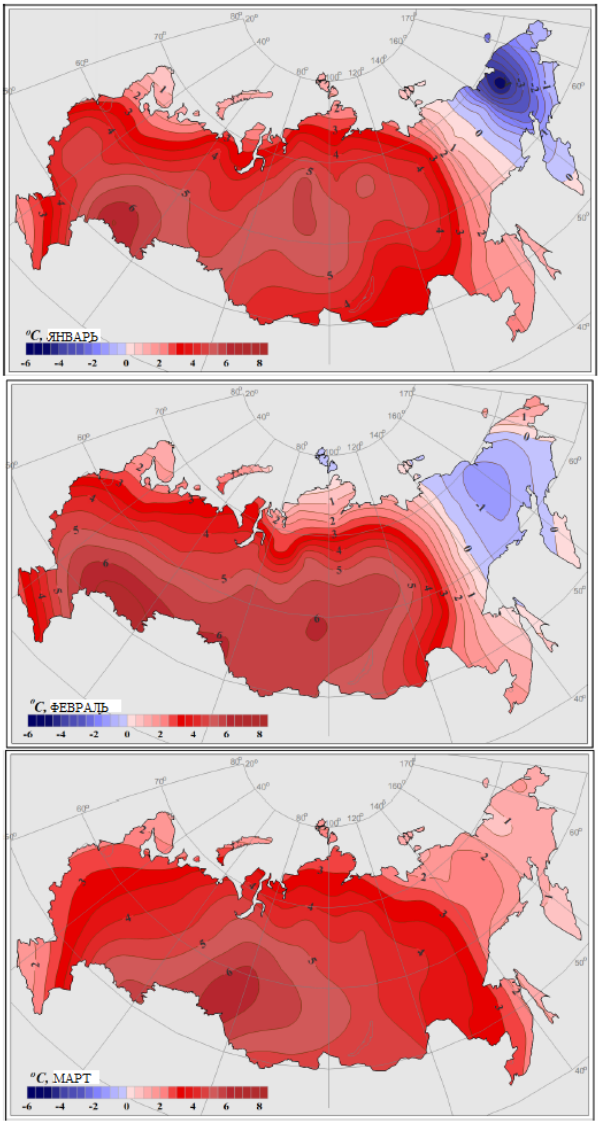
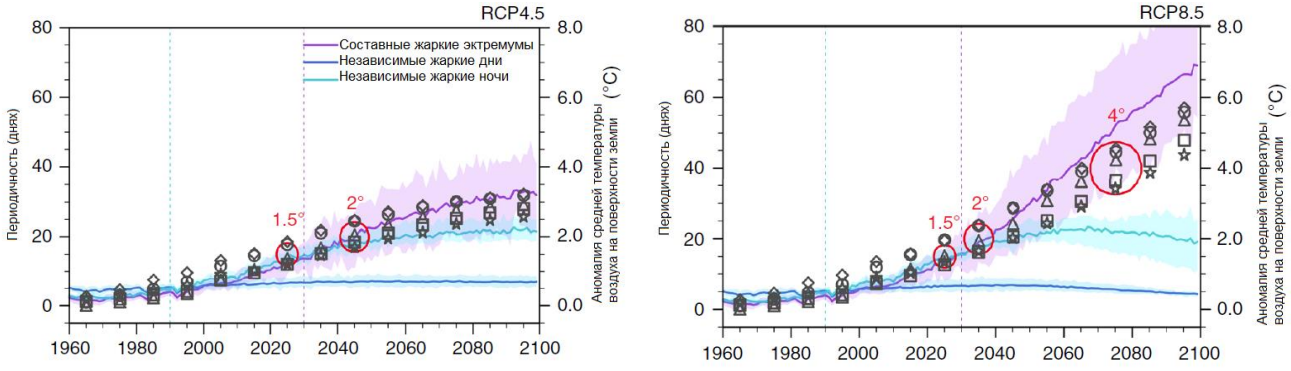


Рисунок 24 – Оценки ожидаемых изменений температуры приземного воздуха на территории РФ с января по март

На рисунке 25 приведены графики прогнозируемых экстремальных летних температур в зависимости от прогнозируемого объема выбросов. На рисунке 25 *а* изображен оптимистичный прогноз, а на *б* — его противоположность.



а. б.

Рисунок 25 – Прогнозы экстремальных летних температур

Исходя из прогнозируемых летних температур, представленных на рисунке 25, и учитывая, что пассажирские ЭАТС поставляются с контрактом жизненного цикла на 15-летний срок [76], необходимо скорректировать исходные данные для расчета системы термостатирования. К графику изменения температуры в г. Астрахани прибавить 2 °С, т.к. по рисунку 25 в 2035 году прогнозируется изменение экстремальных температур. Так, получаем исходные данные для расчета в летнее время (рисунке 26).

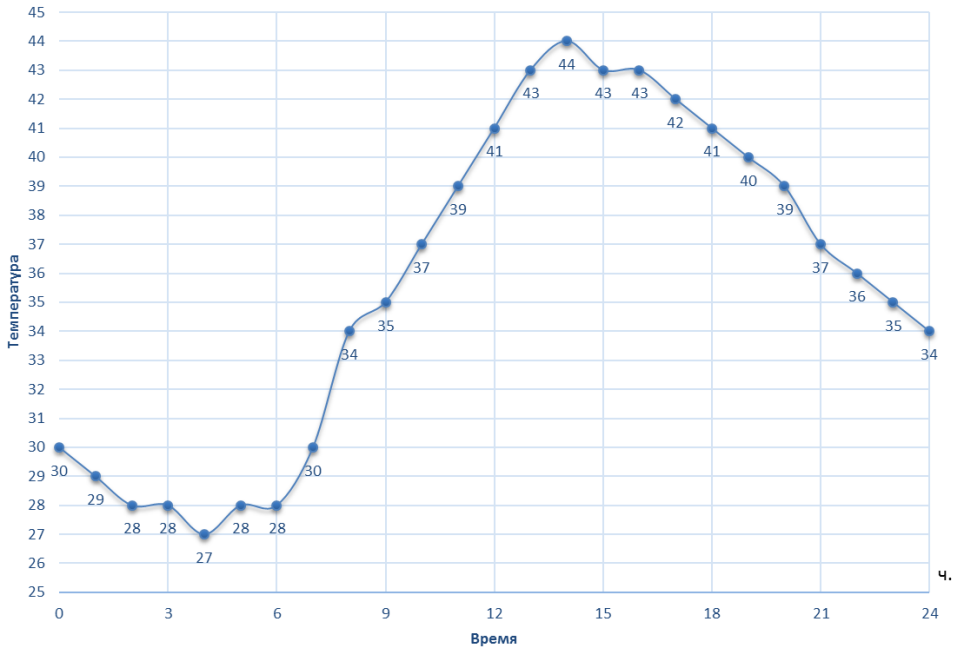


Рисунок 26 – График изменения температуры окружающей среды для расчета СТ

Таким образом, значения внешних температур на ТАБ изображены на рисунках 19 и 26.

1.3 Конструкции систем термостатирования

Конструкции систем термостатирования ТАБ классифицируют по типу теплосъема от ЛИА, по типу теплоносителя и т.д. В данном случае основными параметрами выбора типа теплосъема, теплоносителя и организации термостатирования являются следующие:

а) коэффициент теплообмена (Вт/(м^2·°С));

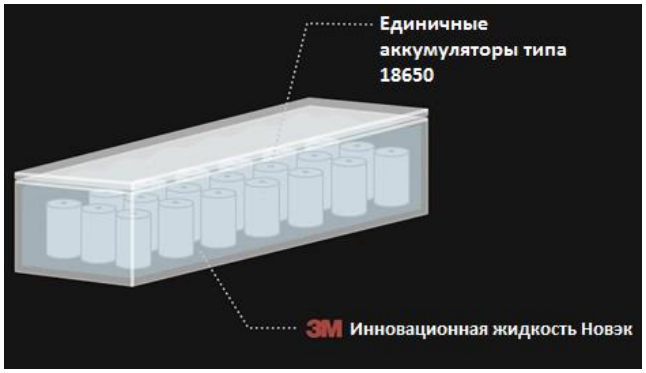
б) удельная теплоемкость ТАБ (Дж/(кг·°С));

в) требуемая мощность подогрева и охлаждения ТАБ в эксплуатации в требуемых климатических условиях.

1.3.1 Классификация конструкций теплообмена ЛИА с теплоносителем

1.3.1.1 ЛИА, находящиеся в непосредственном контакте с теплоносителем

На рисунке 27 (*а, б)* изображен модуль с непосредственным контактом ЛИА с теплоносителем. На рисунке 27 *б* изображен продукт компании *Xing Mobility Inc* [77]. В этом исполнении предъявляются особые требования к диэлектрическим свойствам. Электрическая прочность диэлектрика 35 кВ в зазоре 2,5 мм [78]. Такие разработки, целесообразно использовать для ТАБ с постоянными колебаниями мощности и большим тепловыделением ЛИА (например, гоночные и специальные ТС). Преимущество этой конструкции: отличный теплообмен ЛИА с теплоносителем. Недостатки: сложность производства модулей, трудоемкость обслуживания, удельные (массовые) характеристики модуля, безопасность, высокая стоимость.



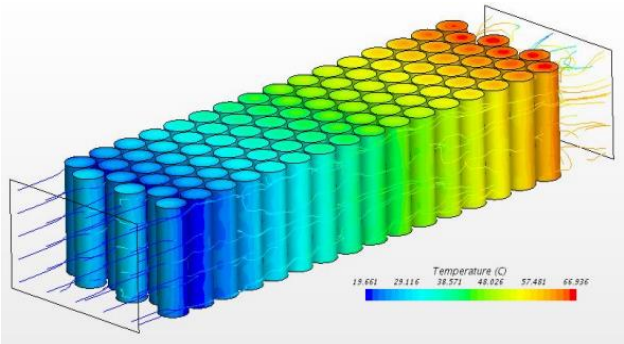
а)

б)

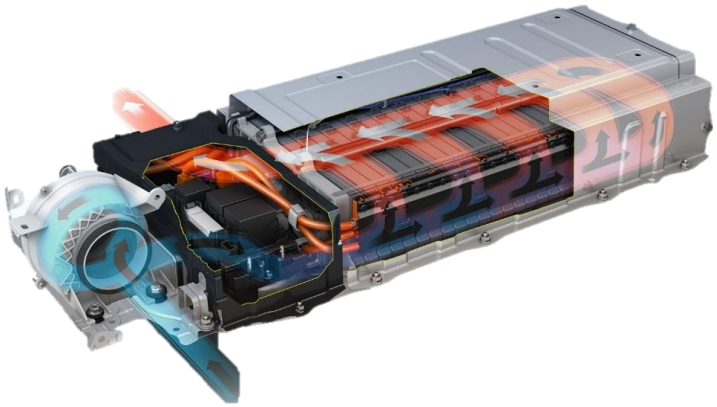
Рисунок¶27 – ЛИА в непосредственном контакте с теплоносителем (жидкость 3М Новэк)

а –схема; б – модуль аккумуляторных ячеек

Непосредственный обдув воздухом — наиболее распространенный способ теплообмена ЛИА, изображенный на рисунках 28 и 29. Преимущества данной конструкции: простота устройства и его обслуживания. Недостатки: снижение удельных характеристик (объем), худший теплообмен по сравнению с жидкостью (удельная теплоемкость воды и воздуха отличается).



Рисунок¶28 – ЛИА в непосредственном контакте с теплоносителем (воздух)



Рисунок¶29 – Модуль с непосредственным охлаждением ЛИА

1.3.1.2 Теплоотводящая пластина

Теплоотводящая пластина, находящаяся между ЛИА, отводит тепловую энергию от их стенок (рисунок 30). Преимущества: равномерное распределение температуры в местах контакта ЛИА с пластиной, простота конструкции, массогабаритные характеристики. Недостатки: система инертна (т.е. не рассчитана на резкие изменения температуры), теплообмен происходит только через пластину.

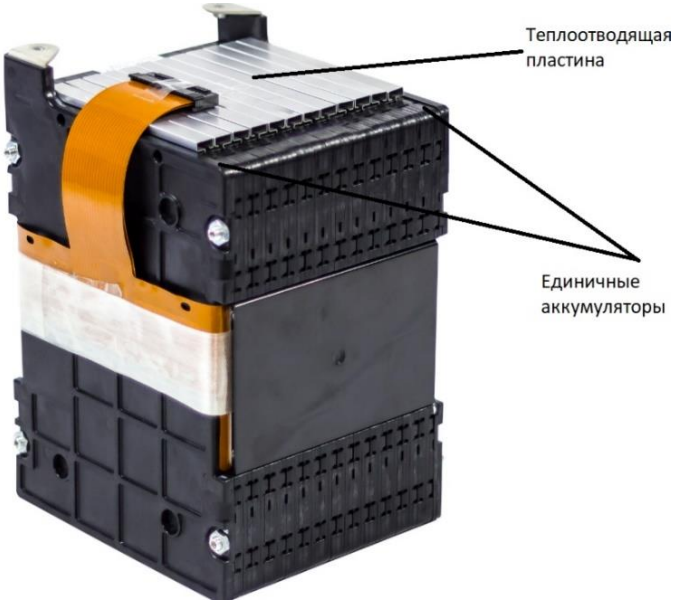
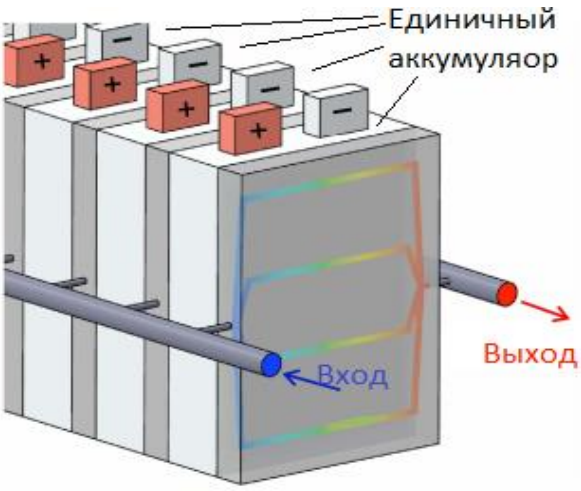


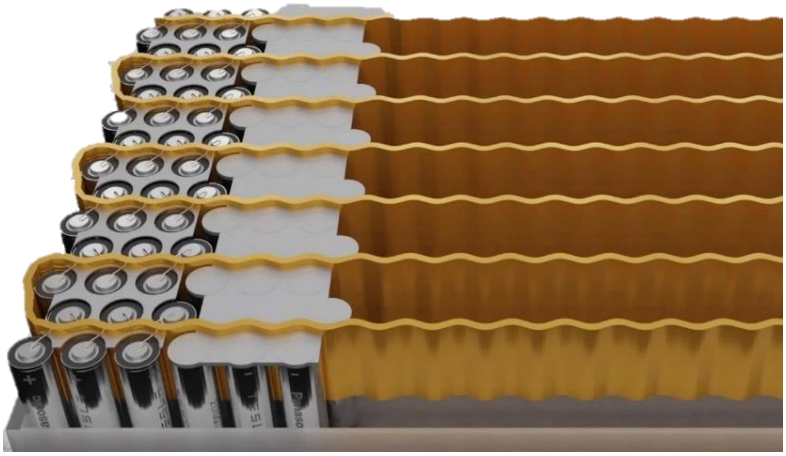
Рисунок 30 – Между ЛИА устанавливается теплоотводящая пластина

1.3.1.3 Теплообменник, находящийся непосредственно между ЛИА

Теплоноситель проходит непосредственно через каналы теплообменника [79], находящегося между ЛИА (рисунки 31 и 32). Преимущества: хороший контроль температуры. Недостатки: сложность конструкции, удельная масса, вероятность утечек.



Рисунок¶31 – Между ЛИА находится теплообменник



Рисунок¶32 – Теплообменник находится между ЛИА (*Tesla*)

1.3.1.4 Теплообменник находящийся снизу ЛИА

На рисунках 33 и 34 [80] изображены теплообменные пластины, находящиеся снизу ЛИА. Из-за небольшого гидравлического диаметра микроканальные трубы передают тепло более эффективно, чем традиционные круглые медные трубы [81]. Микроканальные трубки используются также в теплообменниках, показанных в п. 1.3.1.3. Они уже применяются на серийных ЭАТС благодаря соответствия характеристикам безопасности, стоимости, а также хорошему распределению и отведению тепла от ЛИА [82].

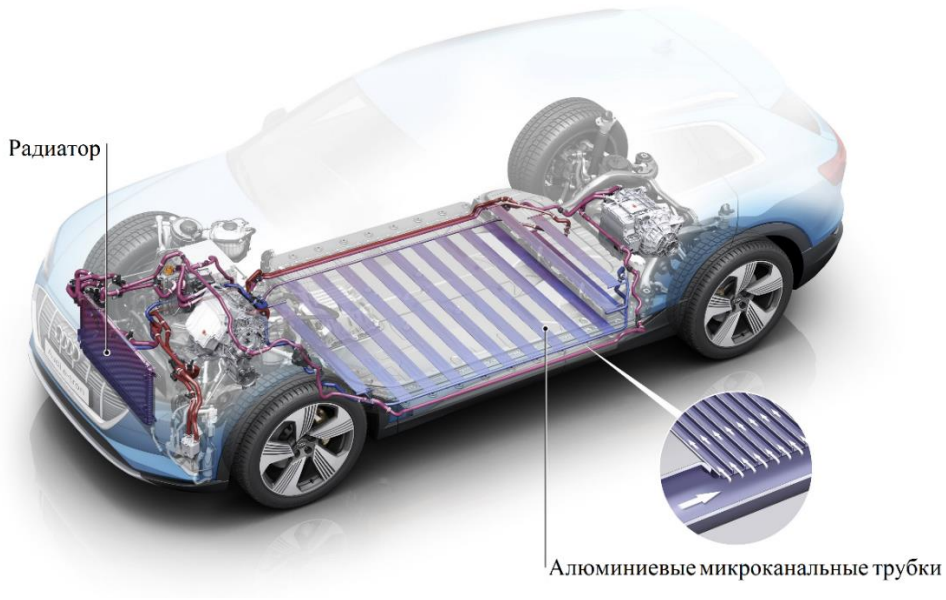


Рисунок ¶3 – Теплообменники, находящиеся снизу ЛИА

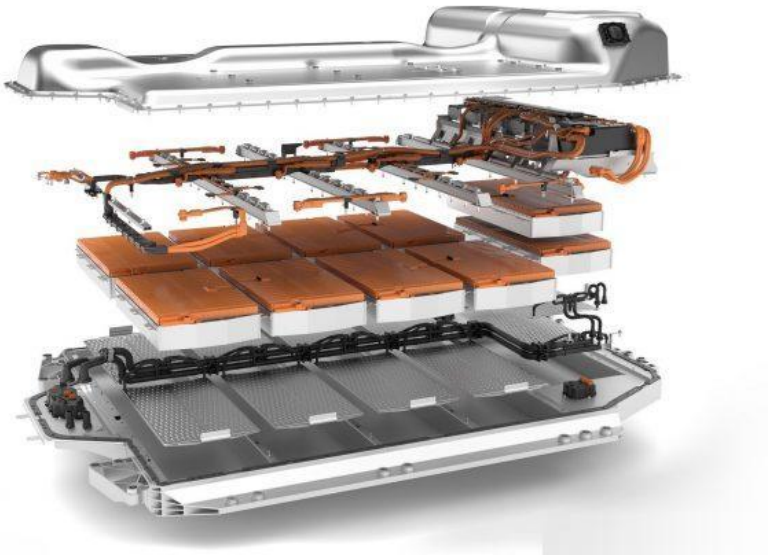
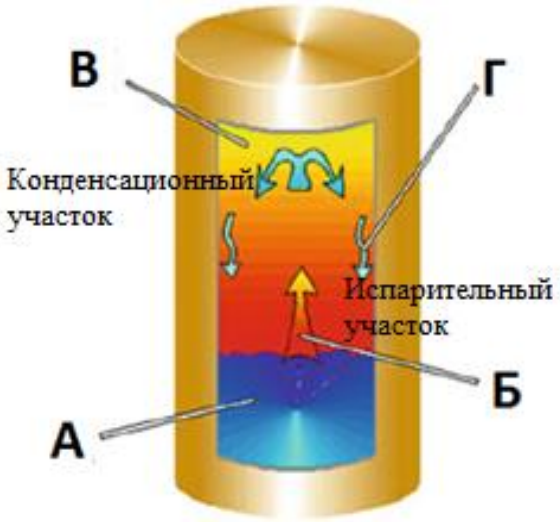


Рисунок ¶4 – Теплообменник, находящийся снизу ЛИА для серийного ТС

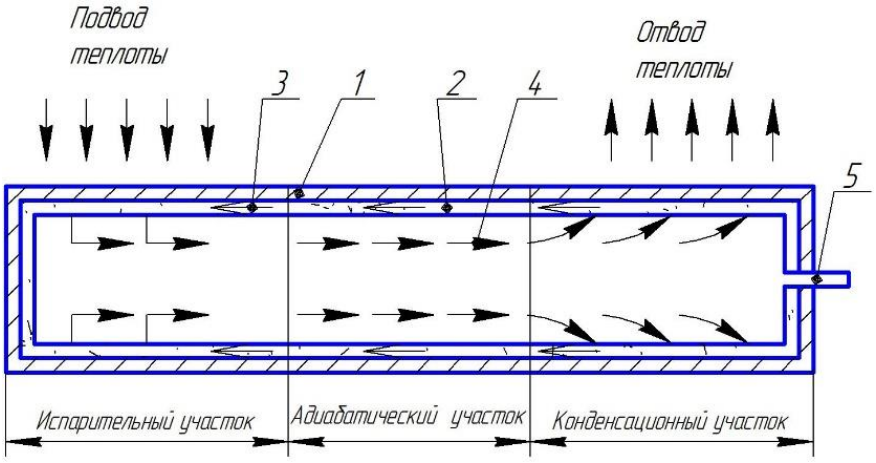
1.3.1.5 Теплообменником является тепловая трубка, которая располагается между ЛИА.

Теплообмен происходит через тепловую трубку (рисунок 35), заполненную испаряемой жидкостью. (А) Тепло поглощается в секции испарения. (Б) Жидкость кипит до паровой фазы. (В) Тепло выделяется из верхней части цилиндра в окружающую среду; пар конденсируется в жидкую фазу. (Г) Жидкость

возвращается под действием силы тяжести в нижнюю часть цилиндра (в испарительную секцию).



а)



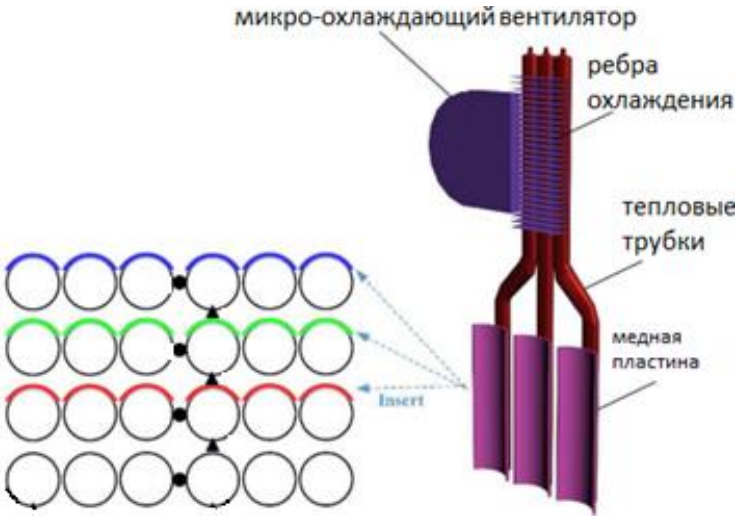
1 – Корпус; 2 – Капилярная структура; 3 – поток жидкости
4 – поток пара; 5 – штенгель

б)

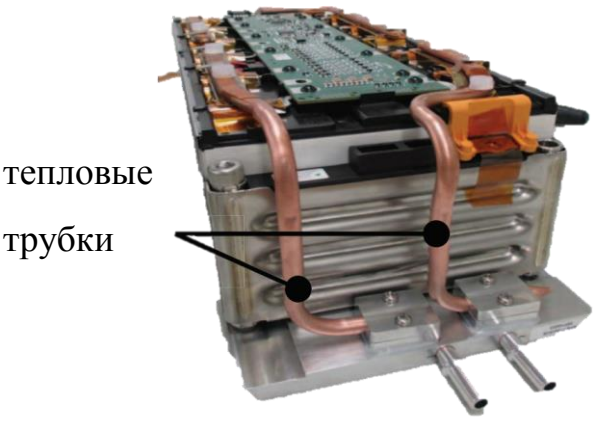
Рисунок 35 – Схема тепловой трубки

Примеры такой конструкции представлены в экспериментальных работах [83], изображённых на рисунках 36 и 37. Данный тип используется в компактных системах охлаждения портативной электроники, например, в ноутбуках. Практическое применение изображено на рисунке 38 и в работе [84]. Преимущества: контроль температуры, высокий теплообмен. Недостатки: сложность конструкции, удельная масса, работа при отрицательных температурах, стоимость.

Рисунок ¶В6 – Экспериментальное применение тепловых трубок



Рисунок¶В7 –Применение тепловых трубок



Рисунок¶В8 – Практическое применение тепловых трубок

В статье [85] из Ноттингемского университета описано проведение исследования по охлаждению и нагреву ТАБ с помощью тепловых трубок. Система охлаждения/подогрева относится к жидкостным системам. Схема представлена на рисунке 39. Для исследования были приняты сценарии цикла движения, представленные в таблице 1.

Таблица¶1 – Протокол цикла испытания ТАБ

Сценарий №	Длительность, с	Q_{batt}, Вт	Ток разряда (Р) / заряда(З) , С	Условия работы ТС
1	10	88,04	6С – Р	ускорение
	900	41,27	4С – Р	агрессивное вождение
	18000	5,50	2С – З	максимально быстрая зарядка
2	1800	11,92	2С – Р	режим максимального пробега
	1800	5,50	2С – З	максимально быстрая зарядка

Результаты представлены в виде фотоснимков с тепловизора при различных токах разряда — эти фотоснимки представлены на рисунке 40.

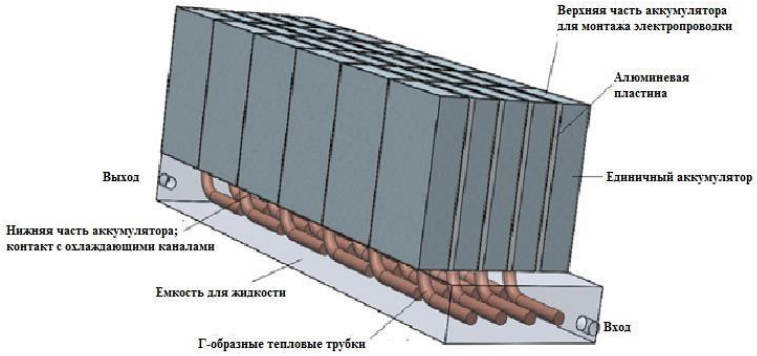


Рисунок ¶39 – Жидкая система термостатирования

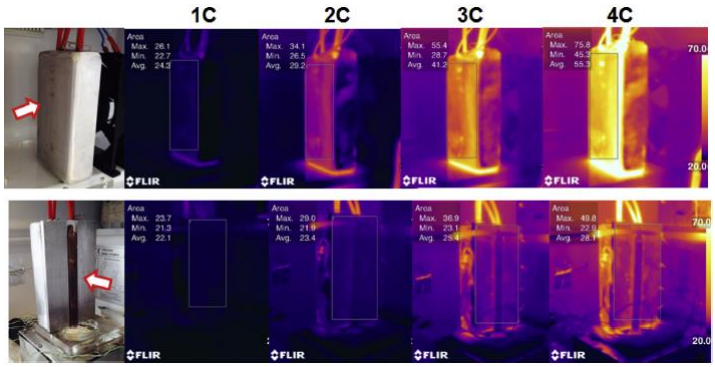


Рисунок ¶40 – Эффективность использования жидкой системы

1.3.1.6 Пульсационная тепловая трубка, находящаяся непосредственно между ЛИА

Разновидностью тепловых трубок являются пульсационные тепловые трубки, уникальной особенностью которых является то, что они имеют простую конструкцию, содержат капиллярно-пористую структуру, клапаны и т.д., но при этом способны передавать тепловую энергию при любой ориентации в поле сил тяжести. Механизм теплопереноса внутри пульсационных тепловых трубок осуществляется за счет испарительно-конденсационного цикла (рисунок 41). При подводе теплового потока в зоне нагрева возникает паровой пузырь, который в процессе роста и отрыва толкает весь парожидкостный поток. Далее поток двигается по инерции, перенося энергию в зону конденсации. Одновременно холодная часть теплоносителя из зоны конденсации поступает в зону нагрева, в результате чего температура в испарительном участке снижается [86]. Пример использования трубок для термостатирования ЛИА изображен на рисунке 42.

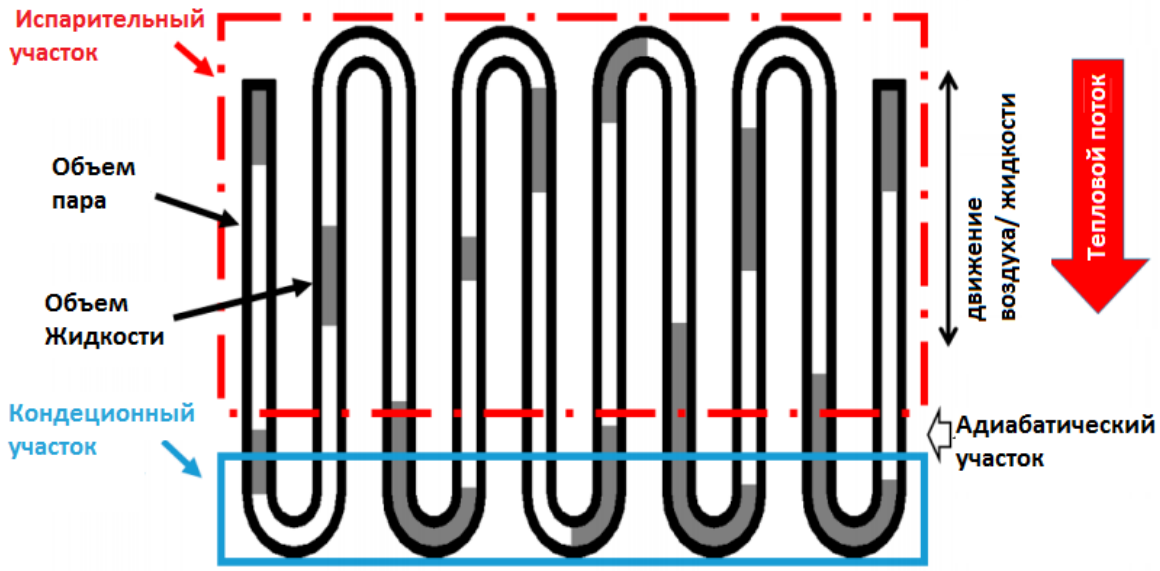


Рисунок 41 – Схема пульсационной тепловой трубки

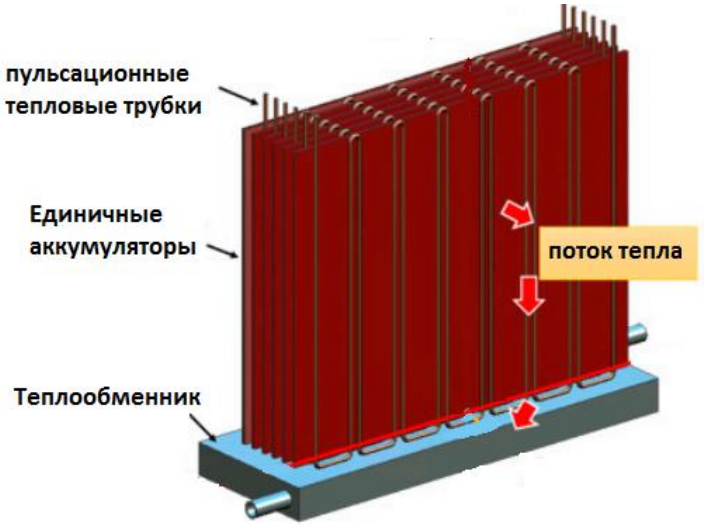


Рисунок 42 – Пульсационные тепловые трубки между ЛИА

1.3.2 Классификация по типу теплоносителя

Классификация по типу теплоносителя приведена в таблице 2. Очевидно, что конвекция с изменением фазы является лучшим решением из тех, которые представлены в таблице. Однако такие решения применяются только в лабораторных условиях, т.к. основной сложностью их внедрения является высокая стоимость конструкции и частота обслуживания. Диапазоны общих коэффициентов теплоотдачи для различных теплоносителей и режимов охлаждения приведены на рисунке 43 [87]. По прогнозу [2] к 2030 году более 500 ГВт·ч в ЭАТС будут с жидкостным теплоносителем, но всё же это оставляет большую часть рынка для других методов охлаждения.

Таблица 2 - Значения коэффициента конвекционного теплообмена [88]

Процесс	коэффициента теплообмена h (Вт/(м^2·°С))
Свободная конвекция	
газ	2-25
жидкость	50-1000
Принудительная конвекция	
газ	25-250
жидкость	100-20000
Конвекция с изменением фазы	
Кипение или конденсация	25000-100000

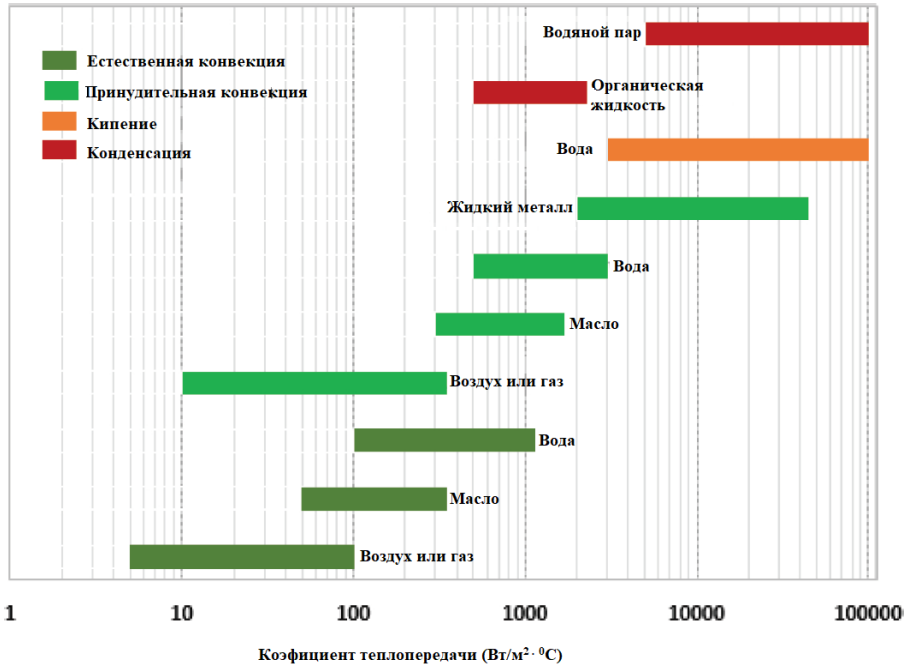


Рисунок 43 – Диапазон общих коэффициентов теплоотдачи для различных теплоносителей и режимов охлаждения

1.3.3 Классификация по организации теплообмена ТАБ.

На уровне ТАБ возможна организация теплообмена СТ, который разделен на два основных вида:

а. пассивный теплообмен;

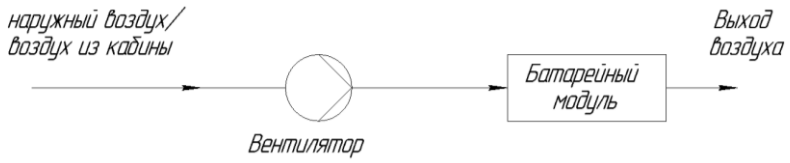
б. активный теплообмен.

1.3.3.1 Схемы пассивных систем теплообмена

Схемы пассивных систем изображены на рисунках 44, 45, 46 и 47. Их основными преимуществами являются простота конструкции и низкая стоимость. Недостатками — ограниченная эксплуатация в сложных климатических условиях, ограничение мощности по выделению тепла с каждого ЛИА (как следствие необходимо учитывать эти ограничения и увеличивать электрическую мощность ТАБ, массу ТАБ).

Вариант пассивного теплообмена представлен на рисунке 47, более наглядно изображен на рисунке 48. Основными недостатками данного решения

являются увеличение массогабаритных параметров, требования к герметичности и диэлектрической проницаемости.



Рисунок¶4 –Воздушная система пассивного охлаждения

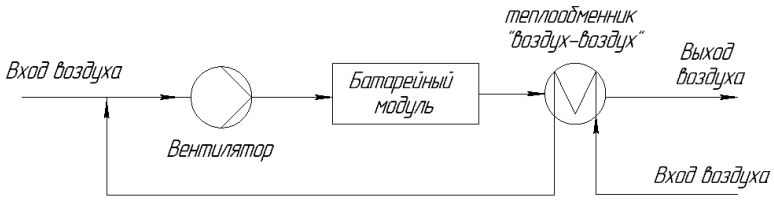


Рисунок ¶5 – Принудительная система с рекуперацией тепла

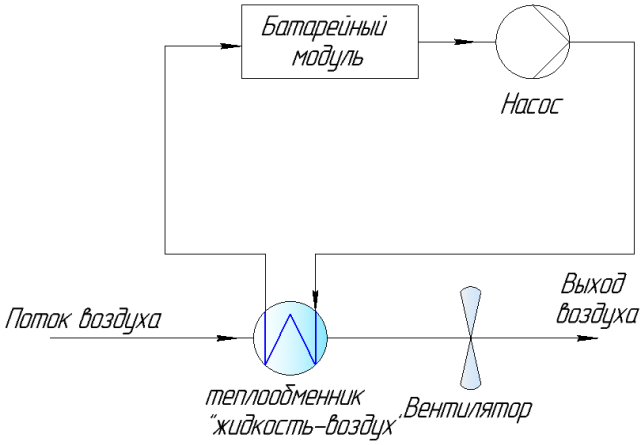


Рисунок ¶6 –Жидкостная система пассивного охлаждения

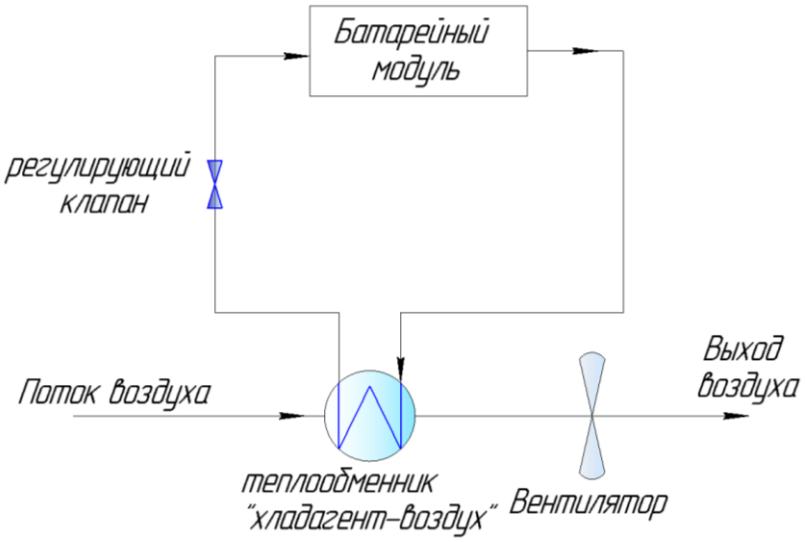


Рисунок ¶7– Непосредственный пассивный теплообмен с хладагентом

Рисунок 48 – Непосредственное пассивное охлаждение ЛИА

1.3.3.2 Схемы активных систем теплообмена

Схемы принудительных систем изображены на рисунках 49, 50 и 51. Их основное преимущество — эксплуатация в широком температурном диапазоне. Недостатками являются ограниченная эксплуатация в сложных климатических условиях, ограничение мощности по выделению тепла с каждого ЛИА (как следствие необходимо учитывать эти ограничения и увеличивать электрическую мощность ТАБ, следовательно, и массу ТАБ).

Вариант пассивного теплообмена изображен на рисунке 47, более наглядно — на рисунке 48. Основными недостатками данного решения являются увеличение массогабаритных параметров, требования по герметичности и диэлектрической проницаемости.

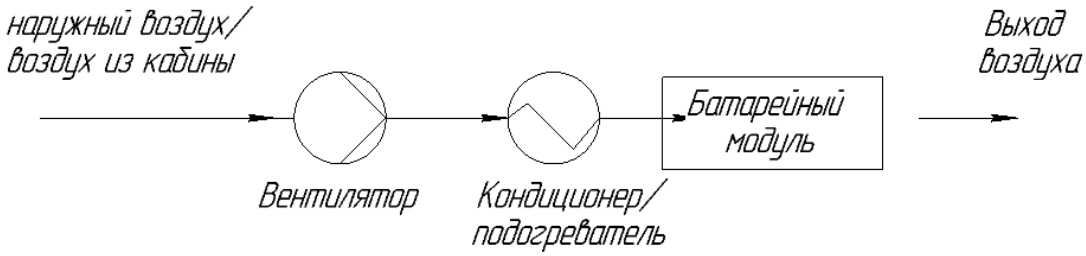


Рисунок 49 – Воздушная активная система теплообмена

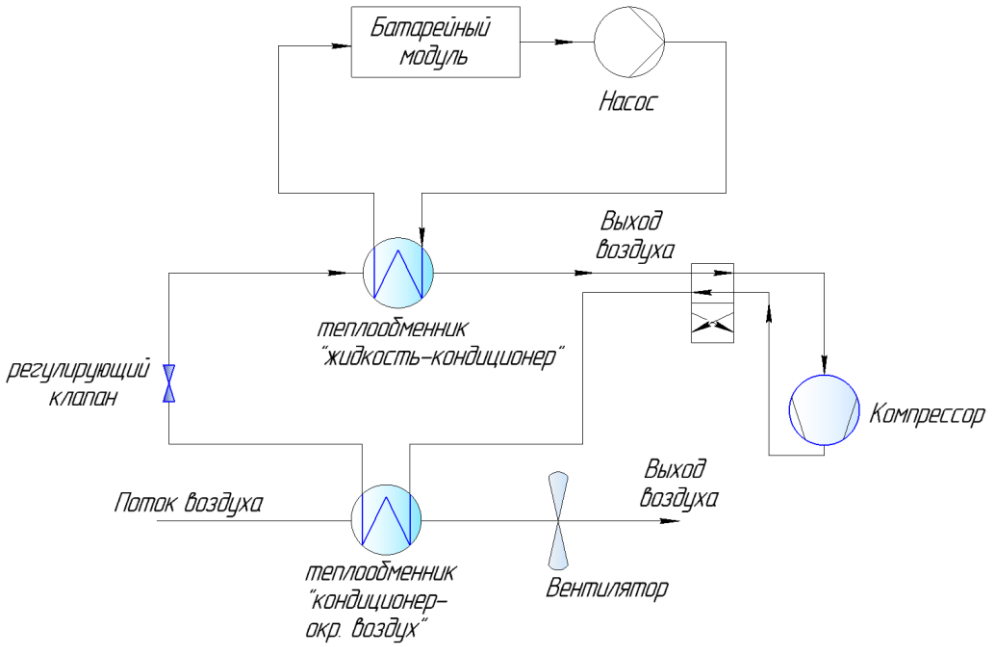


Рисунок ¶0 –Жидкостная активная система теплообмена

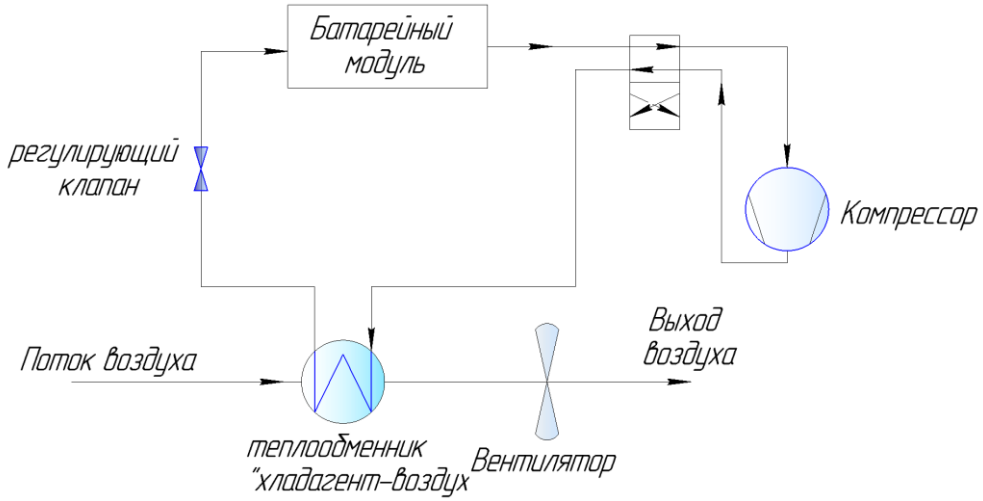


Рисунок ¶1 – Непосредственное принудительный теплообмен с хладагентом

В работе [83] проводится сравнение жидкостной и воздушной системы, системы с тепловыми трубками и системы естественного охлаждения аккумуляторов. На рисунке 52 показана гистограмма изменения температуры при различных токах разряда и системах охлаждения.

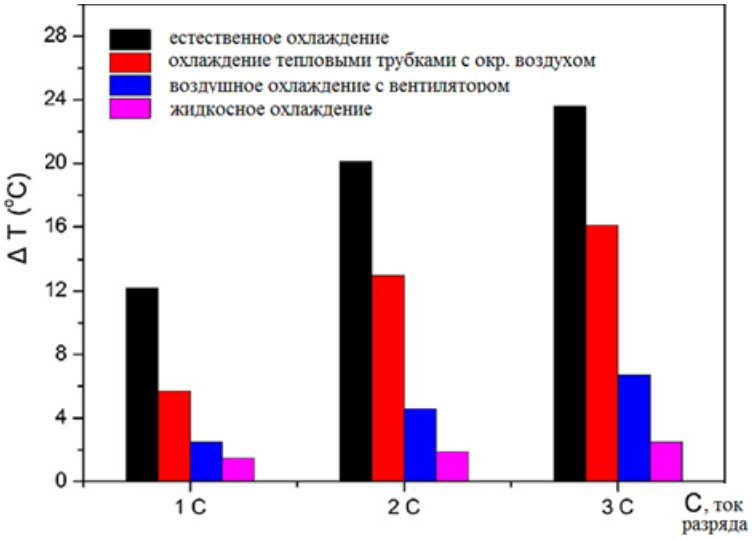


Рисунок ¶2– Эффективность систем охлаждения

На рисунке 52 наглядно продемонстрировано, что естественное охлаждение в большей мере неэффективно, а жидкостное наиболее эффективно.

Из этого следует, что при повышенных температурах жидкости на поверхности теплообменника появляются пузыри, которые резко уменьшают его эффективность. Для их устранения необходимо увеличивать скорость потока теплоносителя и использовать пеногасители.

В работе [89] сформирована сравнительная таблица методов охлаждения, которая приведена ниже в таблице 3, где 1 – это плохо, 2– средне, 3 – хорошо, 4 – отлично.

Таблица¶3 – Сравнение различных методов охлаждения

	Жидкостное охлаждение		Воздушное охлаждение		Охлаждение с использованием плавящихся рабочих веществ		Тепловые трубки	
	П	А	П	А	Стандартные	Поддерживающие форму	С использованием вентилятора	Жидкостное
Простота конструкции	4	4	3	2	3	2	4	3
Эффективность	1	2	3	4	2	4	3	4
Способность к уменьшению температуры	1	2	3	4	2	3	3	4
Способность к равномерному распределению температуры	1	2	4	4	4	4	3	4
Сложность использования	4	3	3	2	3	2	3	3
Срок службы	4	4	2	2	4	4	4	4
Стоимость	4	4	4	2	2	2	3	2
Сумма баллов	19	21	22	20	20	21	23	24
П – пассивное; А –активное								

Исходя из приведенной выше таблицы, можно сделать вывод, что тепловые трубки с жидкостным охлаждением являются лучшим решением по сравнению с жидкостным пассивным охлаждением. При выборе какого-либо конструктивного решения наибольшее влияние оказывают:

- условия окружающей среды;
- тепловая мощность, которую необходимо утилизировать;
- технические требования по массогабаритным характеристикам системы.

На массогабаритные характеристики отчасти оказывает влияние термическое сопротивление. На рисунке 53 можно увидеть зависимость термического сопротивления от типа используемой системы [90].

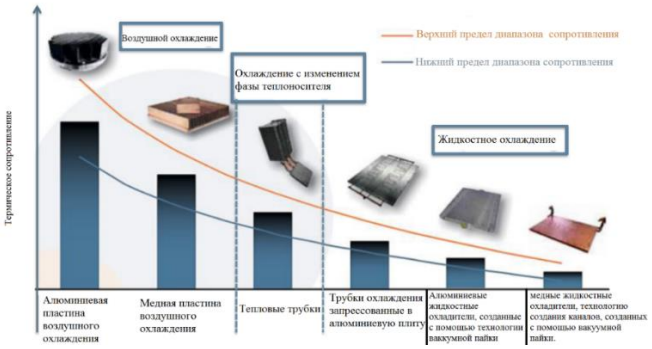
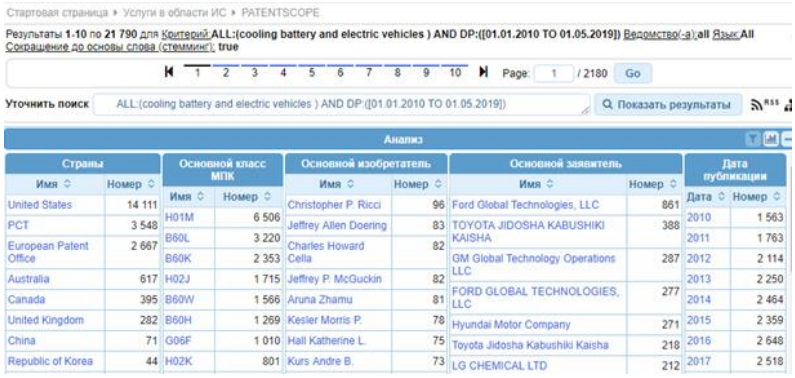


Рисунок ¶3 – Зависимость термического сопротивления от типа системы

Рисунок 53 демонстрирует зависимость уменьшения термического сопротивления с изменением воздушного охлаждения на жидкостное, между которыми располагаются системы с фазными переходами, в частности, тепловые трубки.

1.4 Патентный анализ

В современном мире большое внимание уделяется изучению и развитию ЭАТС, а показателями распространения такой тенденции являются множество статей в научной литературе, а также заметно большая патентная активность (рисунок 54). Анализируя данные официального сайта Всемирной организации интеллектуальной собственности (*WIPO*), можно заметить тенденцию к увеличению количества патентов с 2010 года. Основными заявителями являются всем известные производители ТС. Странами с наибольшей патентной активностью являются США, Австралия, Канада, Китай, Южная Корея и страны Европы, в том числе Великобритания. В свою очередь, произведенный патентный поиск показал, что наибольшее количество патентов наблюдается в патентном ведомстве Европейского союза ESPACENET (693 патента из них релевантных патентов 98%), далее патентное ведомство соединенных штатов USPTO (360 патентов при релевантности в 94%), далее патентное ведомство Германии DEPATISNET (120 патентов при релевантности в 98%). В отечественном патентом ведомстве было обнаружено 72 патента на данную тематику, из них 85% релевантных. В числе них есть патент RU 174 819 U1 [91], который отчасти является результатом данного исследования.



Стартовая страница ▸ Услуги в области ИС ▸ PATENTSCOPE

Результаты 1-10 по 21 790 для Критерий:ALL:(cooling battery and electric vehicles) AND DP:([01.01.2010 TO 01.05.2019]) Ведомство(-а):all Язык:All Сокращение до основы слова (стемминг): true

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Page: 1 / 2180 Go

Уточнить поиск ALL:(cooling battery and electric vehicles) AND DP:([01.01.2010 TO 01.05.2019]) Показать результаты

Анализ

Страны		Основной класс МПК		Основной изобретатель		Основной заявитель		Дата публикации	
Имя	Номер	Имя	Номер	Имя	Номер	Имя	Номер	Дата	Номер
United States	14 111	H01M	6 506	Christopher P. Ricci	96	Ford Global Technologies, LLC	861	2010	1 563
PCT	3 548	B60L	3 220	Jeffrey Allen Doering	83	TOYOTA JIDOSHA KABUSHIKI KAISHA	388	2011	1 763
European Patent Office	2 667	B60K	2 353	Charles Howard Cella	82	GM Global Technology Operations LLC	287	2012	2 114
Australia	617	H02J	1 715	Jeffrey P. McGuckin	82	FORD GLOBAL TECHNOLOGIES, LLC	277	2013	2 250
Canada	395	B60W	1 566	Aruna Zhamu	81	Hyundai Motor Company	271	2014	2 464
United Kingdom	282	B60H	1 269	Kesler Morris P.	78	Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha	218	2015	2 359
China	71	G06F	1 010	Hall Katherine L.	75	LG CHEMICAL LTD	212	2016	2 648
Republic of Korea	44	H02K	801	Kurs Andre B.	73			2017	2 518

Рисунок ¶5 4 – Анализ с сайта WIPO

По результатам патентного поиска определены незапатентованные конструктивные решения. Варианты конструктивных решений системы термостатирования внесены в таблицу 4.

Таблица ¶4 - Результаты патентного поиска

№	Варианты термостирования	использование тепловых трубок	Использование двухфазной жидкости	использование межпластинчатых радиаторов (пластин)	Использование непосредственного нагрева	Использование отдельного блока термостатирования	Модульность
1	Пассивное термостирование	С	-	С	-	-	С
2	Активное воздушное термостирование	С	•	•	•	С	•
3	Активное жидкостное термостирование	С	•	С	•	С	•

вариант существует	С
возможен, но не существует	•
вариант невозможен	-

Вариант решает актуальную техническую задачу	•
Для ответа на вопрос о решении ТЗ необходимо проведение дополнительных исследований	•

Исходя из таблицы наблюдается, что существует обширная часть вариантов исполнения систем термостатирования, которые не описаны в патентах, в связи с чем возникает необходимость проведения исследований в этой области.

1.5 Обзор работ, посвященных методам оценки состояний литий-ионных аккумуляторов и факторам, влияющих на деградацию

Безопасность ЛИА напрямую связана с температурным диапазоном эксплуатации. В свою очередь, мощность тепловыделения является одним из важнейших факторов, которые играют определяющую роль в выборе данного вида накопителей энергии. Для сохранения долговечности аккумуляторных батарей необходимо поддерживать оптимальную температуру ТАБ.

Так как ТС используется в разных условиях эксплуатации, для полноценного использования ТАБ необходимы специальные условия и контроль состояния ТАБ.

ТАБ составляет от 30 до 50 % стоимости всего ЭАТС. Электрические характеристики ТАБ ухудшаются на протяжении всего срока службы, причем даже когда ЭАТС не эксплуатируется.

Основные процессы старения связаны с затвердеванием электролита, потерями активного материала и металлизацией лития. Степень работоспособности в течение срока эксплуатации ЛИА уменьшается, а скорость уменьшения в основном зависит от температуры, глубины разряженности и величины тока разряда [26].

Большинство производителей ТАБ и ЭАТС считают, что аккумулятор вышел из строя, если его емкость (мощность) уменьшается на 20 %, а его сопротивление увеличивается на 200 % [92].

Литий-ионные технологии продолжают развиваться, в связи с чем надежность источников тока улучшается. Важно иметь возможность обнаружить деградацию и рассчитать, как скоро ЛИА выйдет из строя или потеря емкости (мощности) достигнет уровня, который не может гарантировать удовлетворительную работу. При этом, ЛИА большой емкости имеют более низкую термическую стабильность.

1.5.1 Методы оценки степени работоспособности тяговой аккумуляторной батареи

Накапливаемая энергия ЛИА и мощность, внутреннее сопротивление являются основными показателями *SOH*. Эти показатели на протяжении жизненного цикла ухудшаются, что снижает пробег на одной зарядке и увеличивает тепловые потери (что ведет к увеличению расхода энергии на утилизацию этих потерь), в свою очередь, *SOH* является важным параметром ЭАТС для потребителя. Под степенью работоспособности ТАБ понимается *SOH* ТАБ, деградация ТАБ и по её характеру возможно определить ресурс ТАБ и срок службы.

Из-за случаев возгорания и взрыва ЛИА в портативной электронике и в ЭАТС [93], [94], производители ТС стали уделять особое внимание безопасности ТАБ и всего ЭАТС. Безопасность ЛИА напрямую связана с выделением тепла ЛИА. Сохранение долговечности аккумуляторных батарей может быть достигнуто при поддержании оптимальной температуры батарей, что является одной из важных задач, определяющих развитие данного вида накопителей энергии.

Учитывая потребности владельцев ЭАТС в динамике, быстрой зарядке, а также грузоподъёмности, к ТАБ предъявляются требования повышения удельной мощности. При больших токовых нагрузках возникают тепловые потери на ЛИА, которые негативно сказываются на технических характеристиках ЛИА или даже могут вызвать пожар.

Учитывая природные условия нашей страны, для сохранения потребительских качеств ЭАТС, необходимо термостатирование ТАБ. Для решения данного комплекса проблем необходимо использовать активную систему термостатирования ТАБ в ЭАТС.

Методы оценки степени работоспособности (*SOH*) состояния изображены на рисунке 55. Можно разделить два основных метода: модельно-ориентированный и экспериментальный.

При модельно-ориентированном методе оценки *SOH* обсуждаются те параметры батареи, которые чувствительны к разложению элемента батареи в

течение всей ее работы в режиме реального времени, затем на основе полученных данных строят схемы замещения или математические модели. При экспериментальном методе анализируют накопленные данные параметров, которые напрямую или косвенно влияют на *SOH* во время ее эксплуатации.

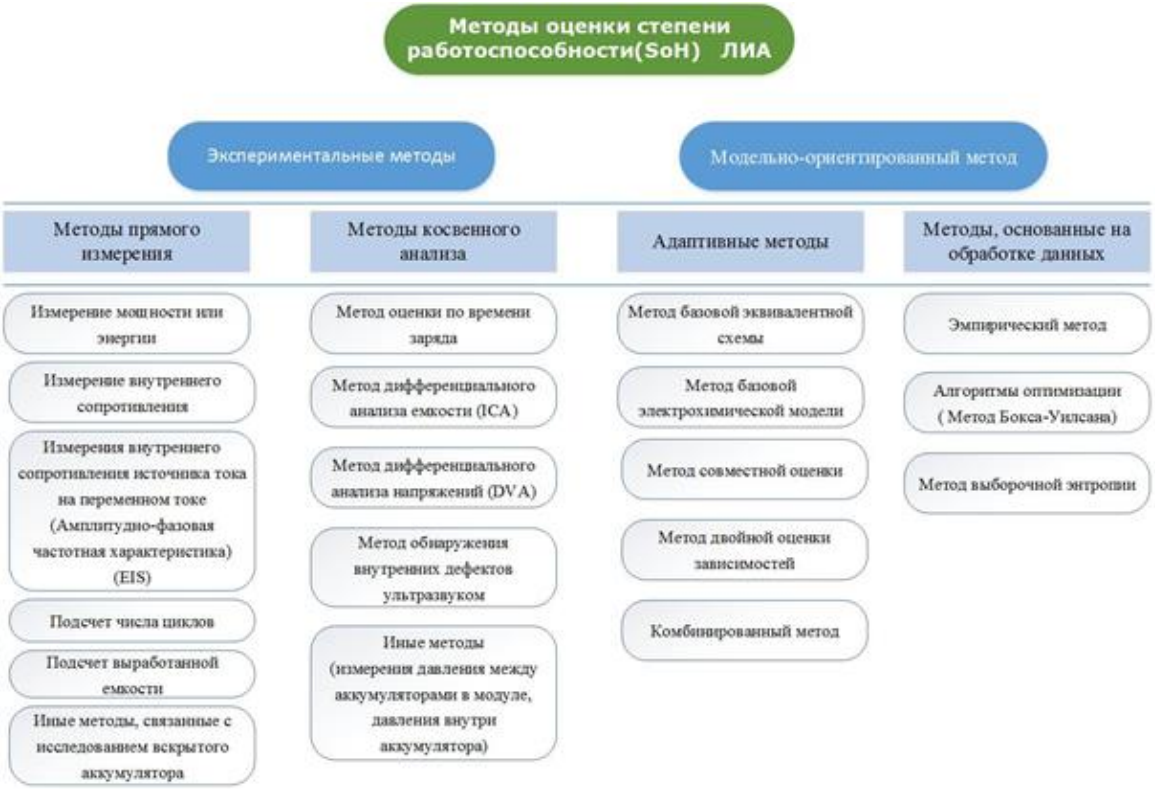


Рисунок ¶5 – Методы оценки *SOH* ТАБ

<u>Экспериментальные методы</u>

При экспериментальном методе контролируют характеристики ЛИА, анализируя полный спектр экспериментальных данных по напряжению, току и температуре ЛИА. Разделить экспериментальный метод можно на методы прямого измерения и косвенного анализа.

1.5.1.1 Методы прямого измерения

<u>Измерение мощности или энергии</u>

SOH можно определить по емкости / энергии ТАБ. Счетчик ампер-часов (А·ч) обычно используется для расчета емкости / энергии ТАБ посредством высокоточного измерения тока, а также напряжения. *SOH* определяется исходя из отношения емкости или энергии, в настоящее время к показателям в начале эксплуатации [95].

Этот метод подходит для лабораторных исследований. Проблема адаптации состоит в том, что емкость / энергия в ТАБ не может быть измерена в режиме реального времени на ЭАТС. Хотя существуют разработки *BMS*, которые предлагают ряд методов онлайн-оценки и комбинированных методов, использующих как анализ накопленных измерений, так и онлайн-оценку [35].

Измерение внутреннего сопротивления

Если внутреннее сопротивление ЛИА увеличивается в 2 раза по сравнению с новым ЛИА, то данные аккумуляторы рекомендуют заменить [92]. Внутреннее сопротивление ЛИА включает в себя омическое сопротивление и сопротивление поляризации. Омическое сопротивление определяется материалом электрода и электролита, сопротивлением сепаратора и контактным сопротивлением. В нормальных рабочих условиях омическое сопротивление в основном способствует падению напряжения, которое в основном линейно зависит от плотности тока.

На рисунке 56 представлен график тока и напряжения в разряде и заряде импульса. Сопротивление определяется по формуле (1) и обычно промежуток времени t_1 принимается равным 10 с.

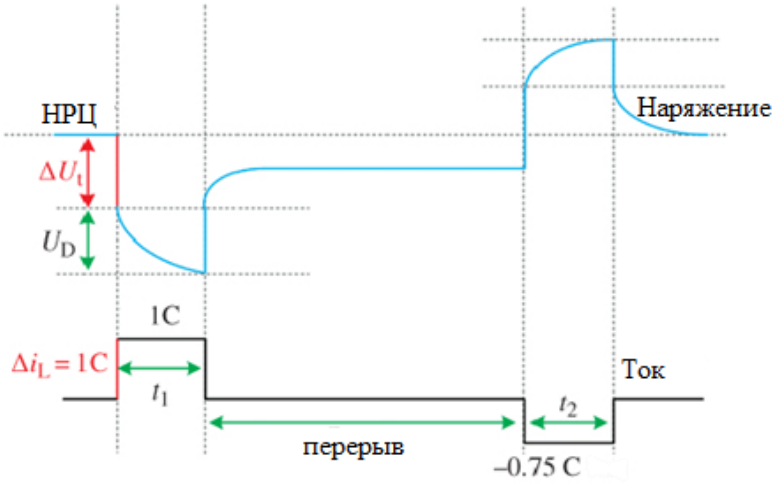


Рисунок ¶56 – Профиль тока и напряжения при импульсе разряда/заряда

$$\boldsymbol{R_i} = \frac{\Delta \boldsymbol{U_t}}{\Delta \boldsymbol{i_L}}, \qquad ¶ \qquad (1)$$

где Δi_L обозначает импульсный ток, ΔU_t обозначает импульсное падение напряжения.

На рисунках 56 и 57 можно увидеть, что при кратковременной нагрузке тока происходит дополнительное падение напряжения, которое определяет напряжение поляризации U_D. Отмечено, что кроме импульса тока и напряжения на *SOH* также может повлиять и омическое сопротивление на основе моделей эквивалентных цепей в режиме реального времени.

При тестировании источника тока с кратковременной нагрузкой тока большой величины напряжение на клеммах аккумулятора *U* имеет сложный характер (рисунок 57). Оно может быть выражено уравнением [32]:

$$U = U_{НРЦ} - IR = U_{НРЦ} - I(R_a + R_{пол}), \qquad (2)$$

где $U_{НРЦ}$ – напряжение разомкнутой цепи, *I* – ток разряда, *R* – полное сопротивление аккумулятора, R_a – активное сопротивление, определяемое токоподводящими деталями электродов, их активными массами и сопротивлением электролита, $R_{пол}$ – поляризационное сопротивление, отражающее скорость электрохимических реакций.

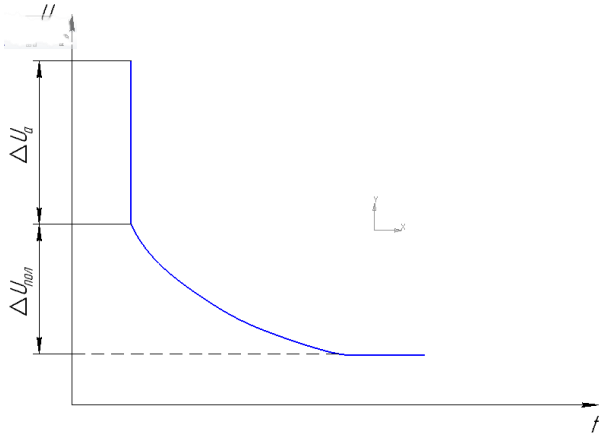


Рисунок 57 –Зависимость напряжения на клеммах аккумулятора *U* от времени *t* при разряде постоянным током *I*

<u>Измерения внутреннего сопротивления источника тока на переменном токе (Амплитудно-фазовая частотная характеристика)</u> (*EIS*)

Метод спектроскопии импеданса заключается в измерении в переменном электрическом поле частотных зависимостей действительной *Re(Z)* и мнимой *Im(Z)* компонентов комплексного импеданса [96]. Амплитудно-фазовая частотная характеристика — удобное представление частотного отклика линейной

стационарной динамической системы в виде графика в комплексных координатах. Данный график объединяет на одной плоскости амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики. Измерения внутреннего сопротивления источника тока на переменном токе позволяют получить более детальное представление о поляризационной составляющей $R_{пол}$. Особенность этой составляющей в том, что ток через ЛИА протекает как Фарадеевский, за счет электрохимических реакций, и как ток заряжения двойного слоя, образованный на границе сред электрод/электролит [32]. Протекание окислительно-восстановительных реакций электрохимической системы в простейшем случае является эквивалентной схемой источника тока (рисунке 58). В нее входят активное сопротивление источника тока R_a, емкость двойного электрического слоя $C_{дв}$, сопротивление переноса заряда через границу электрод/электролит R_0 и диффузионный импеданс Варбурга Z_w, определяемый кинетикой активных частиц [32] .

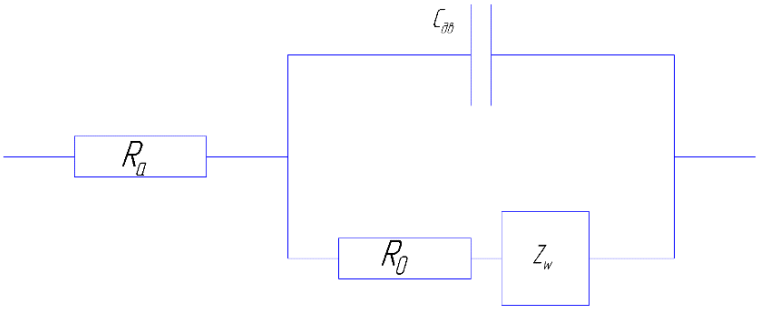


Рисунок ¶8 – Эквивалентная схема источника тока

Для анализа состояния ЛИА строятся импедансная диаграмма, на которой изображена зависимость *f(Re(Z); Im(Z))* в декартовых координатах. Принято на горизонтальную ось наносить данные для *Re(Z)*, а на вертикальную *Im(Z)* с отрицательным знаком. Такая диаграмма является основной общепринятой формой для изображения электрохимического импеданса. Чтобы отразить и частотную информацию, специально выделяют декадные точки 10^{-3}; 10^{0}; 10^{3}; 10^{6} Гц. На рисунке 59 приведена импедансная диаграмма электрохимической системы [32]. Импедансная диаграмму приводят в виде годографа и графиков Найквиста.

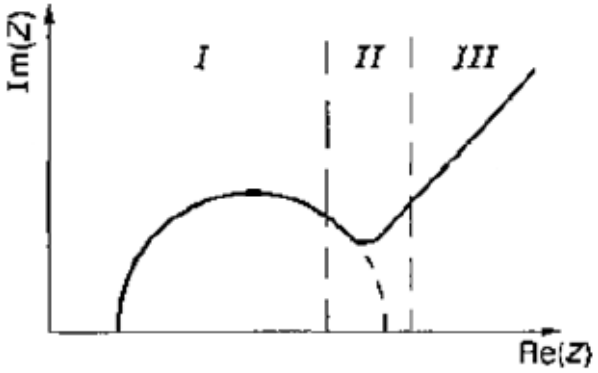
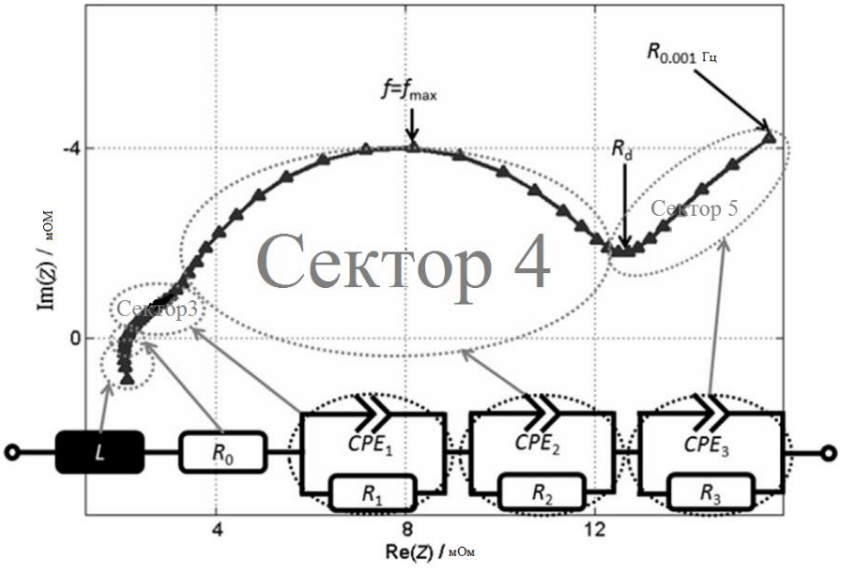


Рисунок ¶9 – Диаграмма импеданса электрохимической системы

На рисунке 59 обозначены области годографа: I - область кинетического контроля; II - переходная область; III - область диффузионного контроля. Специфика процесса преодоления энергетического барьера при переносе заряда, неоднородность поверхности электрода отражаются в уплощении высокочастотного полукруга (область I). При более низких частотах из области кинетического контроля (I) часто формируются "хвосты", характер которых зависит от меры неоднородности поверхности электрода. Они могут приобретать даже вид петли, когда $Im(Z)$ становится положительным, а $Re(Z)$ уменьшается с уменьшением частоты. При частотах $\omega \to 0$ годограф плавно, почти по траектории полуокружности, снижается до предельного значения, определяемого параметрами диффузионного процесса. Адсорбционные процессы более всего сказываются в переходной области импеданса (II). Наклон годографа в диффузионной области (III) зависит от типа электрода. Для пористого электрода — угол наклона составляет $\pi/8$. Кроме того, по диаграмме можно оценить величину активного сопротивления в точке пересечения кривой диаграммы с осью $Re(Z)$ (рисунок 59).

График Найквиста для ЛИА [97], измеренного при 20 ^{0} С и 50% SoC, частотный диапазон: 5 кГц - 1 мГц (рисунок 60).



Рисунок¶60 – диаграмма Найквиста для ЛИА

Измеренный импеданс можно разделить на 5 секторов:

- Сектор 1, соответствует индуктивности ЛИА на высоких частотах;
- Сектор 2, соответствует омическому сопротивлению ЛИА;
- Сектор 3, соответствует процессам на границе раздела твердого электролита;
- Сектор 4, соответствует процессам переноса заряда;
- Сектор 5, соответствует диффузии и оставшимся конвекционных процессам.

EIS является одним из наиболее перспективных методов определения эффектов деградации ЛИА. Полное сопротивление среднего частотного диапазона увеличивается со временем эксплуатации и указывает на *SOH* [35], как показано на рисунке 61 [98]. *EIS* предоставляет информацию о различных механизмах старения и может использоваться в качестве диагностического инструмента.

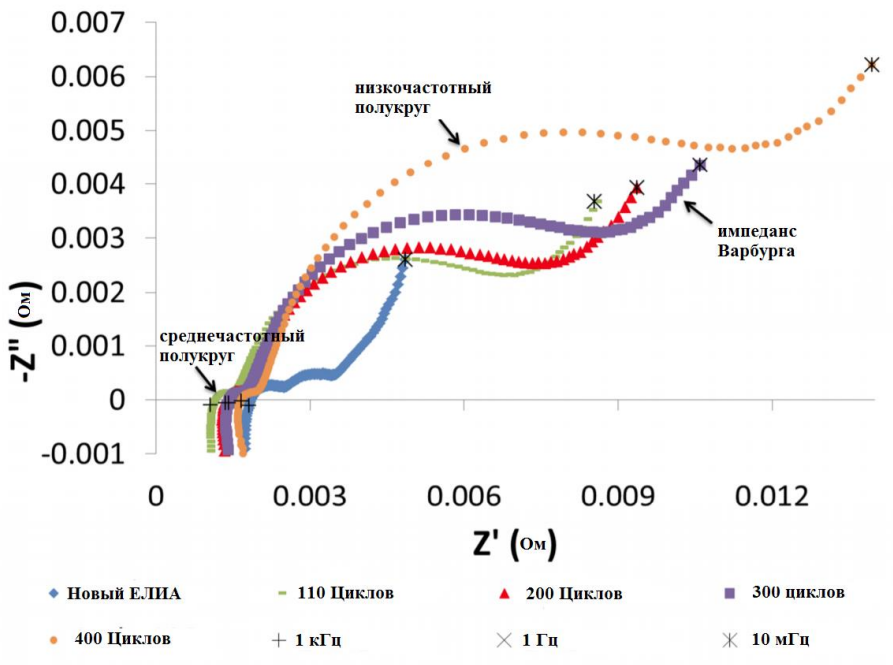


Рисунок ¶1 – Диаграмма импеданса электрохимической системы в зависимости от циклов при 100% *SOC* (4.1 В)

Подсчет числа циклов

Количество циклов или накопленный заряд на протяжении всего жизненного цикла батареи можно считать основой для модели деградации. В общем, один цикл интерпретируется, как полностью заряженная ТАБ с помощью метода зарядки (*CC/CV*) при постоянном зарядном токе 1С и полностью разряженная с постоянным током разряда 1С. Если общее число жизненных циклов ($N_{общ}$) ТАБ (обычно указывается производителями), а текущее число циклов, которое испытывает батарея, равно $N_{тек}$, то значение SOH можно рассчитать по формуле (3):

$$SOH = \frac{N_{общ} - N_{тек}}{N_{общ}} \P \quad (3)$$

Иные методы

Эти методы могут применяться только тогда, когда эксплуатация ЛИА больше не планируется т.к. для этих методов необходима полная разборка ЛИА. После разборки сканируют поверхности электронным микроскопом (*SEM*), просвечивают электронный микроскоп, используют рентгеновскую

фотоэлектронную спектроскопию, Рамановскую спектроскопию, Рентгеновскую дифракцию и циклическую вольтамперометрию. Например, метод *SEM* используется для получения изображений слоев, составляющих ЛИА (Рисунок 62). Можно наблюдать, как с увеличением числа циклов в активных частицах создается напряжение, которое накапливает трещины на границе зерен частиц, что приводит к механическому разрушению материалов анода. Эти методы можно проводить только в лаборатории.

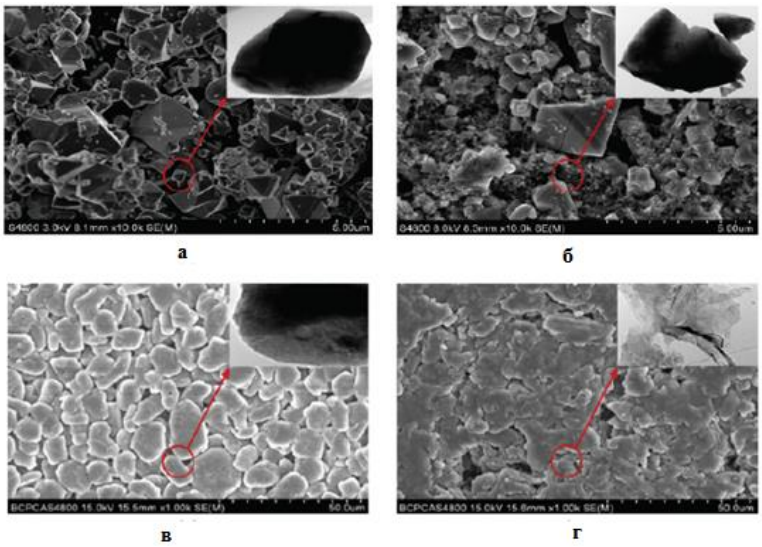


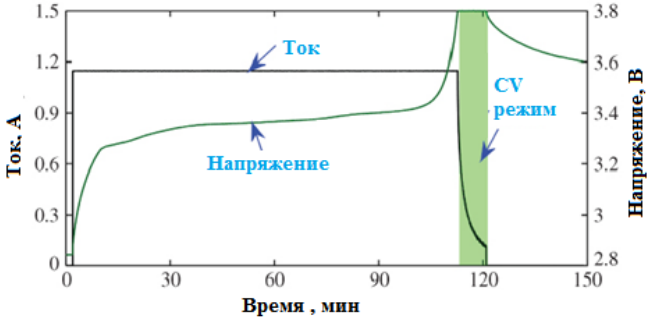
Рисунок ¶62 – SEM изображения на начало и конец эксплуатации ЛИА: (а) катод в начале эксплуатации; (б) катод в конце эксплуатации; (в) анод в начале эксплуатации; (г) анод в конце эксплуатации

1.5.1.2 Методы косвенного анализа

Как правило, методы косвенного анализа — это многоэтапные методы оценки параметров, использующие параметры работоспособности, тесно связанные с уменьшением емкости аккумулятора или с его внутренним сопротивлением. После установления взаимосвязи между параметрами работоспособности и *SOH* параметры работоспособности можно использовать для оценки *SOH*. Параметры состояния включают в себя траекторию напряжения или время зарядки *CC/CV*, анализ инкрементной емкости (*ICA*) и анализ дифференциального напряжения (*DVA*).

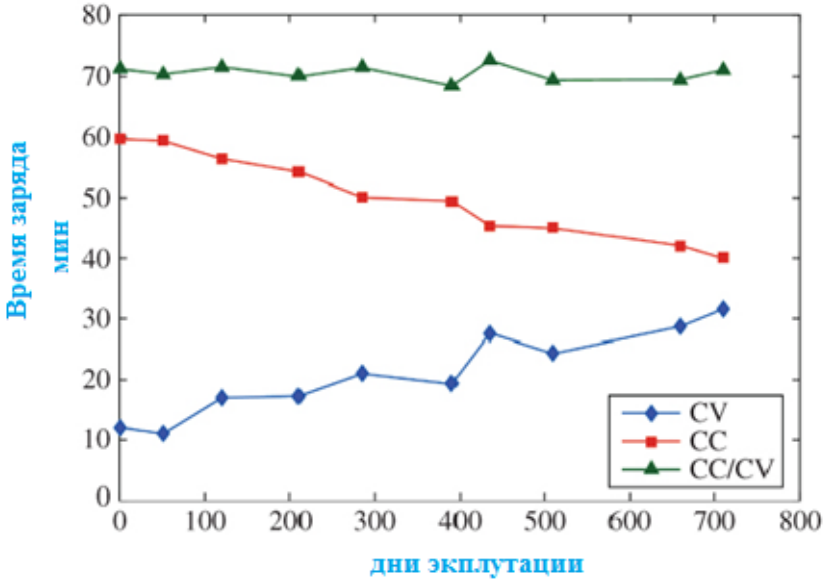
<u>Метод оценки по времени заряда</u>

Напряжение на клеммах ЛИА может использоваться для характеристики SOH. Зарядка методом *CC/CV* широко используется. На рисунке 63 показан пример профиля зарядки для литиево-фосфатного единичного аккумулятора. Способ зарядки состоит из двух этапов: этап постоянного тока (*CC*), на котором применяется *CC* для зарядки аккумулятора до достижения верхнего предельного напряжения аккумулятора; и затем шаг *CV*, при котором батарея остается в режиме с верхним напряжением, пока ток не достигнет минимального порога тока, как правило, в диапазоне 1/10 C –1/30 C.



Рисунок¶63 –Профили тока и напряжения метода зарядки *CC/CV*

Для оценки *SOH* используется время режимов заряда (*CC/CV*). Например, на рисунке 64 изображены графики изменения времени заряда от количества дней эксплуатации ЛИА, таким образом, возможно обнаружить зависимость времени режимов заряда от функции *SOH*.



Рисунок¶64 – Время зарядки для режимов *CC, CV и CC/CV* для ЛИА *NMC*

Метод дифференциального анализа емкости *(ICA)*

Метод ICA используется для получения коррелированного по времени поведения деградации в условиях циклирования [35]. Получены ступенчатые кривые скорости изменения емкости от напряжения (*dQ/dV*), связанные изменением напряжения при заряде/разряде. Каждый из пиков на кривой *IC*, представляющий электрохимический процесс, происходящий внутри ячейки, имеет уникальную форму, интенсивность и положение. Любое изменение положения и формы пиков на графике является признаком деградации ЛИА. На рисунке 65 показаны кривые изменения емкости от напряжения и скорость изменения емкости от напряжения. Данные испытания проводят при малых токах и при одинаковой температуре, например, изменение зарядного тока, используемого во время измерения емкости, от 1/5 С до 1/2 С, может привести к изменению экстремума кривой на 15%, а изменение температуры с 15 до 30 °С может привести к 20% [99]. На рисунке 66 изображены графики измерения *ICA* кривых в зависимости от длительности эксплуатации.

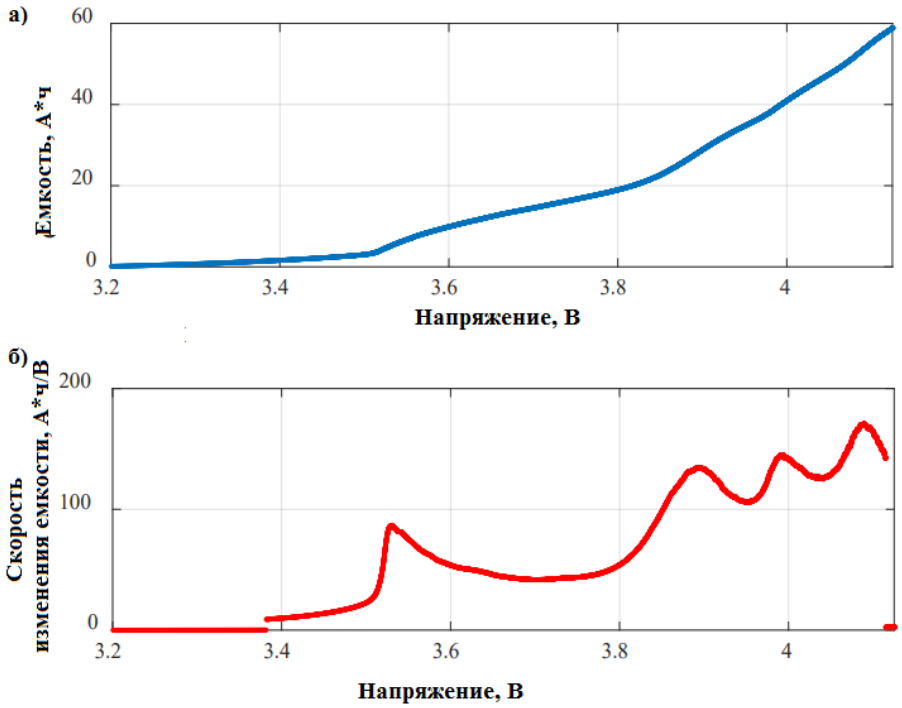


Рисунок ¶5 – Кривые (а) емкость–напряжение и (б)скорость изменения емкости

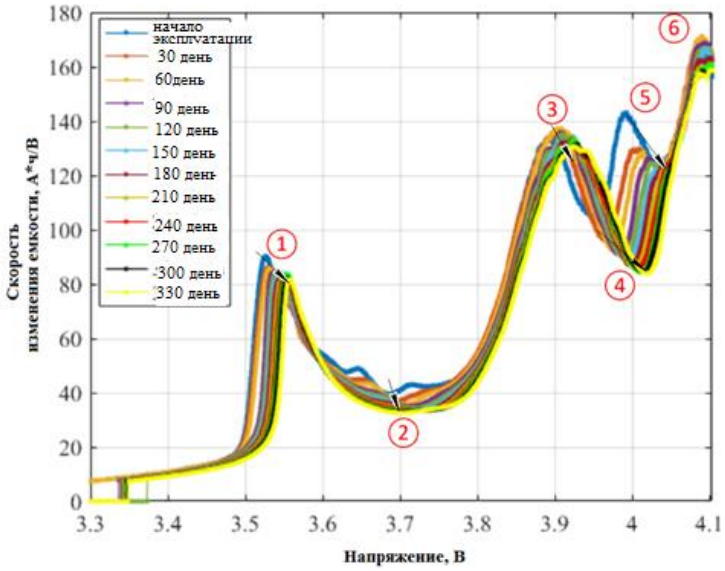


Рисунок ¶6 – Кривые скорости изменения емкости от напряжения на протяжении 330 дней эксплуатации

Метод дифференциального анализа напряжений (*DVA*)

Метод дифференциального анализа напряжений также может быть использован для анализа деградации батареи. Одним из уникальных преимуществ данного метода является то, что на кривой *DVA* появляются четко идентифицируемые пики. Механизмы включают потерю активного материала катода, потерю активного материала анода и потерю ионов лития. Рисунок 67 показывает кривую напряжение-емкость и кривую *DVA* при 1/3 С и температуре 25 °С. Соответственно кривая *DVA* разделена на три области с пиками. На рисунке 68 изображены графики измерения *DVA* кривых в зависимости от цикла при эксплуатации.

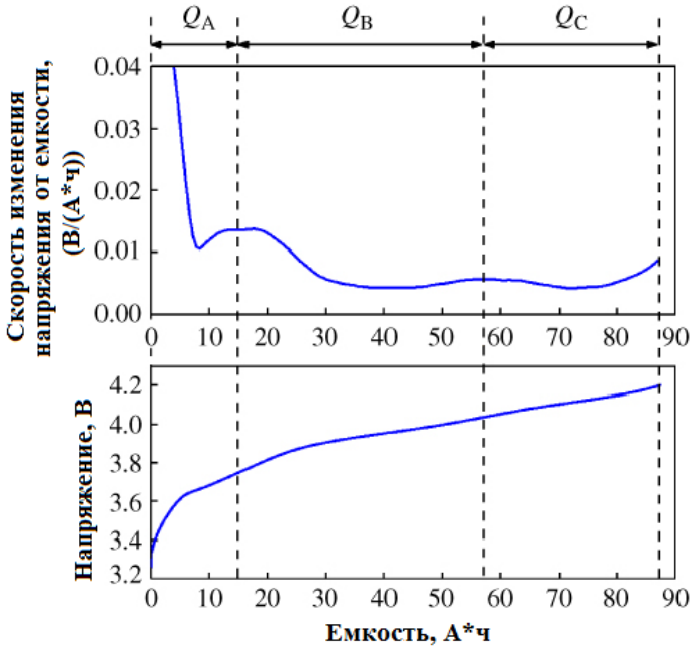


Рисунок ¶7 – Кривая напряжение от емкости и кривая DVA (зарядки постоянным током) при 1/3C и 25 °C

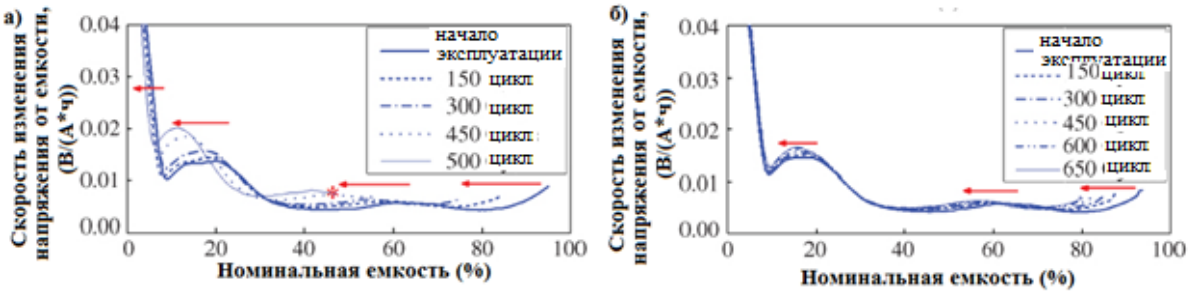
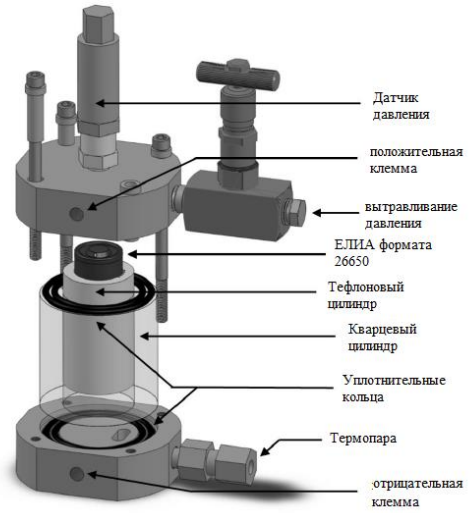


Рисунок ¶8 – Кривые DVA для разных циклов эксплуатации, при DOD 50% при (а) 40 °C и (б) 10 °C

<u>Измерение внутреннего давления ЛИА</u>

Этот косвенный метод оценки внутреннего давления ЛИА в зависимости от потери емкости ЛИА был описан в работе [36]. На рисунке 69 изображён стенд для измерения давления ЛИА. Результаты для ЛИА представлены на рисунке 70.



Рисунок¶69 – Испытательная камера, предназначенная для изучения изменения давления внутри ЛИА

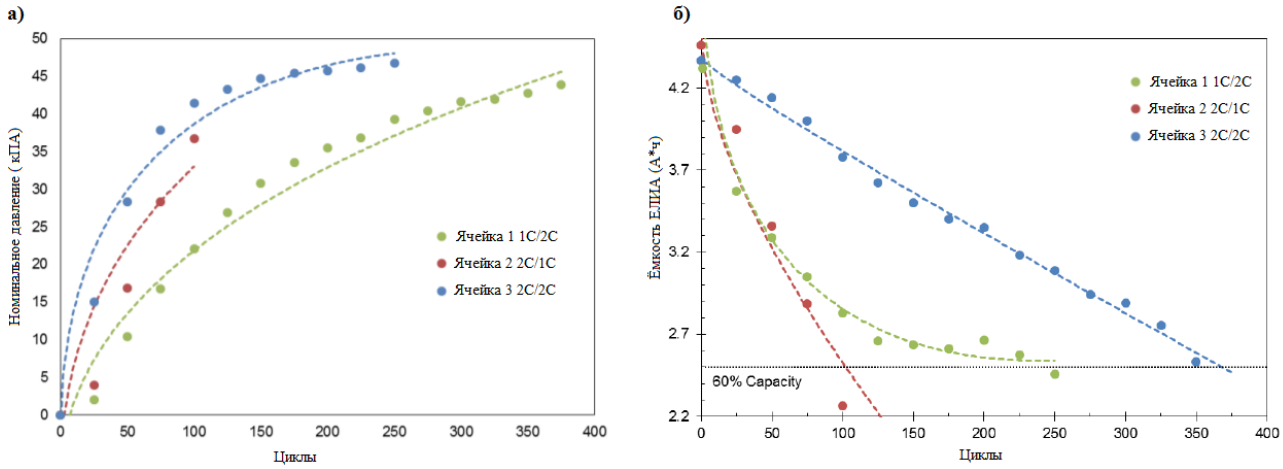


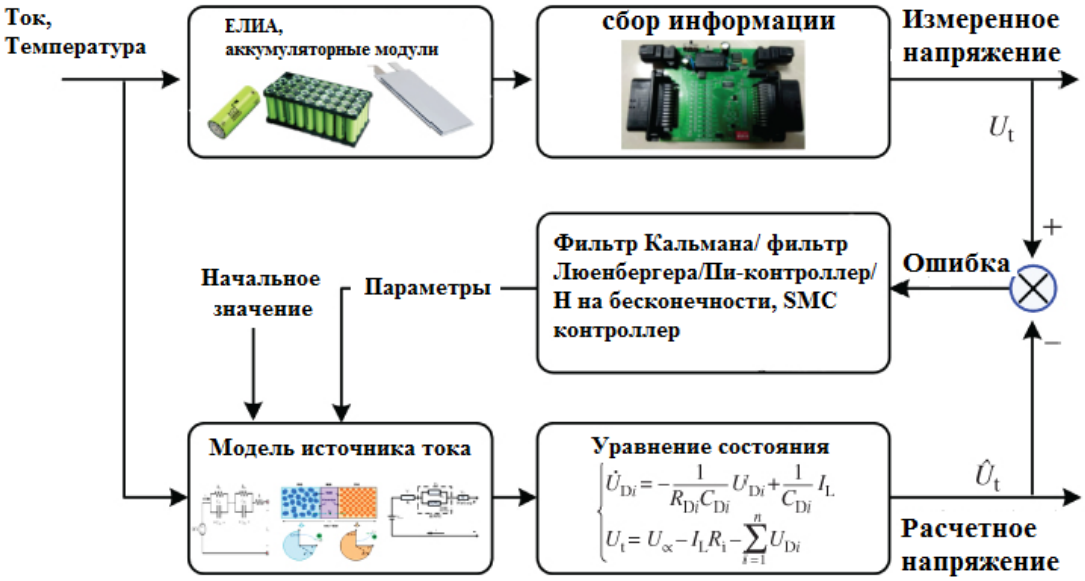
Рисунок ¶70 – Изменение внутреннего давления(а) и емкости (б) ЛИА при различных скоростях заряда и разряда

<u>Модельно-ориентированный метод</u>

Методы оценки на основе моделей можно далее разделить на методы адаптивной оценки состояния и методы, основанные на управлении данными. Методы адаптивной оценки рассматривают состояния емкости, сопротивления и др. источника тока с состоянием модели, которая включает в себя управление с обратной связь. Эти параметры оцениваются для расчета *SOH*. Методы, основанные на данных, моделируют накопленные данные параметров батареи, влияющих на срок службы батареи, используя модели «черного ящика», машинное обучение и интеллектуальные алгоритмы оптимизации.

1.5.1.3 Адаптивные методы

Адаптивные методы оценки степени работоспособности перспективны при использовании онлайн-*BMS* в ЭАТС. С установленными сопротивлениями, полным сопротивлением, НРЦ и другими характеристическими параметрами можно получить функцию зависимости *SOH*. На рисунке 71 показана общая схема работы для определения параметров модели батареи с помощью алгоритмов различных фильтров.



Рисунок¶71 – Общая схема работы для определения параметров модели источника тока

Для оценки параметров и состояний модели батареи наиболее часто используется фильтр Калмана (различные его вариации). Например, можно использовать алгоритмы адаптивного расширенного фильтра Калмана чтобы установить параметры для модели источника тока (например, модель Тевенина). Далее на основании уравнений состояния, матрицы перехода состояний и алгоритму оценки состояния, некоторые параметры, особенно сопротивление (например, на рисунке 72), могут быть рассчитаны в режиме реального времени [35]. Следовательно, батарея *SOH* может быть рассчитана по расчетному сопротивлению.

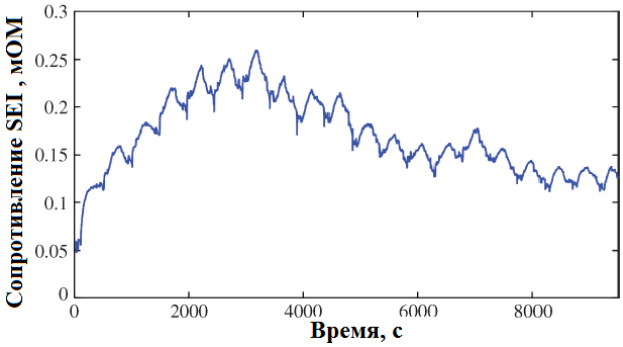


Рисунок ¶2 – Расчетное сопротивление *SEI*

Проводятся испытания на деградацию ЛИА, график снижения емкости представлен на рисунке 73. Емкость деградированной ячейки монотонно уменьшается с увеличением числа циклов. Стоит отметить, что емкость значительно уменьшается между 400 и 550 циклами.

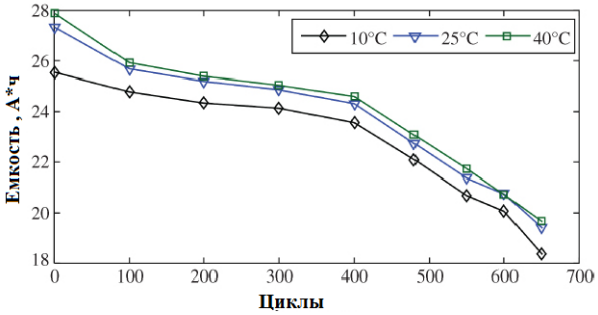


Рисунок ¶3 – Снижение емкости ЛИА при эксплуатации

Корреляция между сопротивлением *SEI* и доступной емкостью показана на рисунке 74. Показано, что среднее сопротивление *SEI* имеет монотонную зависимость с доступной емкостью. Такая же тенденция наблюдается и в других ЛИА. Чтобы установить такую связь, необходимо воспользоваться аппроксимированной функций, которая должна быть построена таким образом, чтобы она проходила через точку (1, 1), что показано на рисунке 74. Эту функцию можно выразить:

$$\boldsymbol{R_{SEI} = ae^{bQ_e}}, \qquad ¶ \quad (4)$$

где Q_e доля остаточной емкости, а R_{sei} обозначает сопротивления *SEI*, a и b являются коэффициентами функции. Определенные коэффициенты функции подставляются в уравнение (4) для получения конечных результатов.

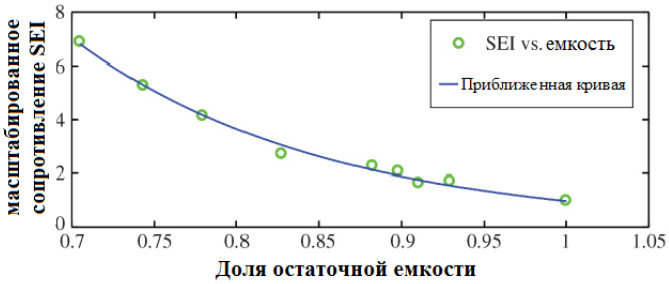


Рисунок ¶4 – Взаимосвязь результатов испытаний и функции, описывающей уменьшение емкости

1.5.1.4 Методы, основанные на обработке данных

Методы, основанные на обработке данных (из испытаний в различных режимах) для оценки *SOH*. Эти методы не нуждаются в математической модели для описания физико-химических процессов внутри ЛИА. Вместо этого они устанавливают функцию для описания деградации ЛИА, зависящей только от данных деградации при испытаниях.

Эмпирические и аппроксимирующие методы

Эмпирические и аппроксимирующие методы используют данные испытаний о деградации для оценки срока службы ЛИА без подробного описания электрохимических свойств и характеристик материала ЛИА. Полиномиальные, экспоненциальные, степенные, логарифмические и тригонометрические функции обычно используются в качестве эмпирических и аппроксимирующие моделей. Передовые алгоритмы и методы машинного обучения также широко используются для прогнозирования срока службы батареи и оценки *SOH*. Простота эмпирических или аппроксимирующих моделей обычно обеспечивает более быстрые вычисления. Уравнение Аррениуса характеризует зависимость температуры и скорости химической реакции. Термодинамическое соотношение Аррениуса позволяет устанавливать температурно-временные закономерности для широкого круга физико-химических процессов и превращений [23]. Время, протекающее от начала эксплуатации до разрушения или достижения иного предельного состояния любого технического объекта, можно выразить [23]:

$$t = \tau_0 \cdot exp\left(\frac{b}{T}\right) \qquad ¶5)$$

где b – некоторый постоянный коэффициент, величина которого устанавливается опытным путем, $\boldsymbol{\tau_0}$ – масштаб времени, T – температура.

Уравнение Аррениуса — одно из важнейших уравнений физической химии. В современной интерпретации это уравнение определяет температурную зависимость коэффициента скорости процесса k (например, коэффициента скорости химической реакции, коэффициента диффузии и т. п.) в следующей простой форме:

$$k(T) = A\,exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)\P \tag{6}$$

где предэкспоненциальный множитель A является частотным фактором, E_a — (аррениусовская) энергия активации, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Первоначально область применимости уравнения Аррениуса была ограничена динамикой химических реакций [100].

Уравнение Аррениуса также используется для определения температурной скорости деградации электрохимических элементов. Основное уравнение выглядит следующим образом [35]:

$$\frac{d\mathrm{C}}{dn} = \boldsymbol{\Lambda e}^{-\frac{\Delta E}{R_g T}} = \boldsymbol{\Lambda e}^{\frac{\lambda}{T}}, \qquad \P \tag{7}$$

где dC/dn – это скорость изменения емкости ЛИА по отношению к циклу старения, Λ – предэкспоненциальный коэффициент, а R_g – универсальная газовая постоянная (т. е. 8,314 Дж/(моль·К)). E – энергия активации (в Дж /моль) и T – абсолютная температура эксплуатации. Λ и $\lambda = \Delta E / R_g$ - два неизвестных параметра, которые необходимо подобрать. Если проинтегрировать обе части уравнения, то получаем уравнение продолжительности службы ЛИА:

$$\mathrm{C}_{\boldsymbol{r}} = -\boldsymbol{\Lambda n_c e}^{-\frac{\lambda}{T}}, \qquad \P \tag{8}$$

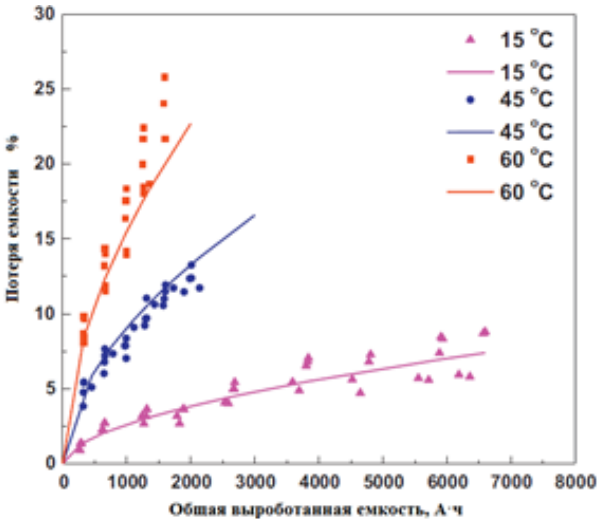
где C_r - порог уменьшения емкости до отказа ЛИА, а n_c - срок службы в циклах. Для разных температур (T_1 и T_2, где $T_1 > T_2$) и для вычисление срока службы в циклах:

$$\boldsymbol{n_c} = \frac{\boldsymbol{C_r}}{\boldsymbol{\Lambda}}\left(\boldsymbol{e}^{-\frac{\lambda}{T_1}} - \boldsymbol{e}^{-\frac{\lambda}{T_2}}\right), \qquad \P \tag{9}$$

Уравнение (9) представляет собой количественное влияния градиента температуры на срок службы ЛИА. Параметры уравнения Аррениуса определены при разработке функции *SOH* для ЭАТС *Yang, Y., Hu, X., Qing, D., и Chen, F*. [101].

Материал катода *LPF*

Исследование емкости ЛИА *LFP* с большим количеством экспериментальных данных [102], матрица циклических испытаний, включает три важных параметра: температуру (от – 30 до 60 °C); *DOD* (90–10%); скорость разряда (C-скорость, в диапазоне от 1/2 C до 10C). Показано, что снижение емкости происходит по экспоненциальному закону при температурах от 15 °C до 60 °C (рисунок 75). Устанавливается зависимость и строится функция потери емкости (т.е. *SOH*), как показано в таблице 5, где общая выработанная ёмкость определяется как: количество циклов × *DOD* × полная емкость ЛИА ($Ah_{thr} = N_{цикл.} \cdot DOD \cdot Ah_{нач}$) [102].



Рисунок¶75 – Зависимость потерь ёмкости от общей выработанной ёмкости

Таблица ¶5– Описание функций в модели в зависимости от скорости разряда

Кратность тока разряда (C–rates)	Потеря емкости	
0.5C	$Q_{loss}=30330 \cdot exp(-31500/RT) \cdot (Ah_{thr.})^{0.552}$	(10)
2C	$Q_{loss}=19300 \cdot exp(-31000/RT) \cdot (Ah_{thr.})^{0.554}$	(11)
6C	$Q_{loss}=12000 \cdot exp(-29500/RT) \cdot (Ah_{thr.})^{0.56}$	(12)
10C	$Q_{loss}=11500 \cdot exp(-28000/RT) \cdot (Ah_{thr.})^{0.56}$	(13)

Материал катода *NMC*

В исследовании группы ученых *J. Wang, J. Purewal, P. Liu, J. Hicks-Garner, S. Soukazian, E. Sherman, A. Sorenson, L. Vu, H. Tataria, , M. Verbrugge* создана математическая модель ((14) *SOH* [103]. На рисунке 76 представлена матрица тестирования для ускоренного изучения жизненного цикла. В данной статье разрабатывается полуэмпирическая модель деградации аккумуляторной батареи.

		Температура			
глубина разряда		10	22	34	46
	10	0,5C/3,5C/6,5C	0,5C/2C/3,5C/5C/6,5C	0,5C/3,5C/6,5C	0,5C/3,5C/6,5C
	30	-	3,5C	2C/3,5C/5C	3,5C
	50	0,5C/3,5C/5C/ 6,5C	0,5C/2C/3,5C/5C/6,5C	0,5C/2C/5C/6,5C	0,5C/2C/3,5C/5C/6,5C
	70	-	3,5C/	2C/3,5C/5C	3,5C
	90	0,5C/ 3,5C/6,5C	0,5C/2C/3,5C/5C/6,5C	0,5C/3,5C/6,5C	0,5C/3,5C/6,5C

Рисунок ¶6 – Тест матрица для ускоренного изучения жизненного цикла. По два единичных аккумулятора при каждом условии испытаний

В эксперименте участвовал коммерчески доступный ЛИА компании *Sanyo* емкостью 1,5 А·ч, цилиндрические аккумуляторы *NMC (UR18650W).*

На рисунке 77 изображены зависимости потерь емкости от температуры в зависимости от скорости разряда, на рисунке 78 представлены результаты испытаний при различных глубинах разряда.

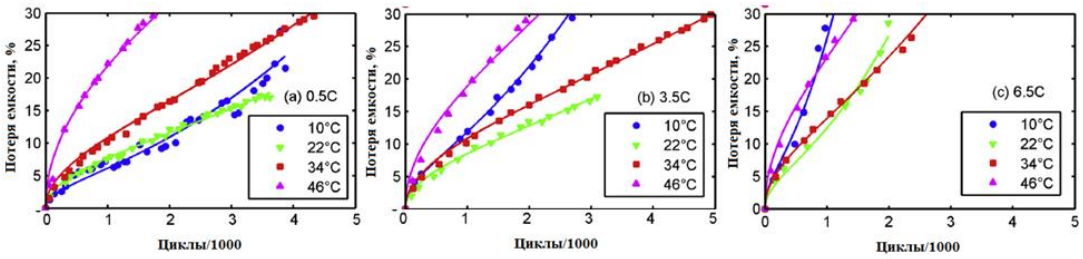


Рисунок ¶7 – Частичные результаты испытаний при различных температурах и токах: a) 0,5C b) 3,5C c) 6,5C

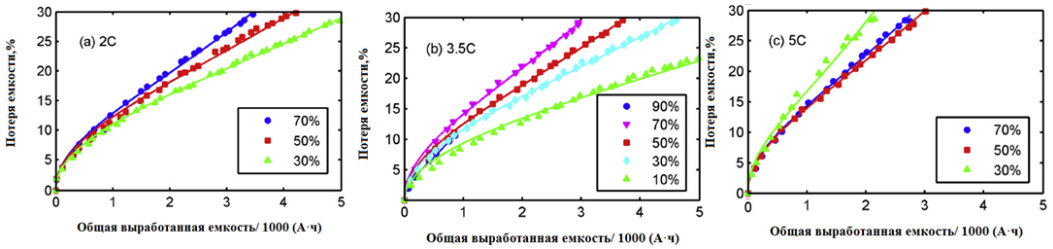


Рисунок ¶8 – Частичные результаты испытаний при разных глубинах разряда и при различных токах: a) 2C b) 3,5C c) 5C

Функции деградации ёмкости ЛИА по времени (таблице 6) показаны на рисунке 79, а указанные точки — это экспериментальные значения. За основное уравнение принято уравнение Аррениуса, которое устанавливает зависимость константы скорости химической реакции от температуры.

Таблица¶6 – Описание функций в модели в зависимости от температур

Температура, °C	Функция потерь ёмкости в циклах	Функция потерь ёмкости по времени
10	$[0{,}0021\ exp(0.4278 \cdot rate)]\ Ah_{thr.}$	$14876(дни)^{0.5}\ exp(-E_a/RT)$ (14)
20	$[0{,}0008\ exp(0.3903 \cdot rate)]\ Ah_{thr.}$	
34	$[0{,}0010\ exp(0.3107 \cdot rate)]\ Ah_{thr.}$	
46	$[0{,}0045\ exp(0.1826 \cdot rate)]\ Ah_{thr.}$	

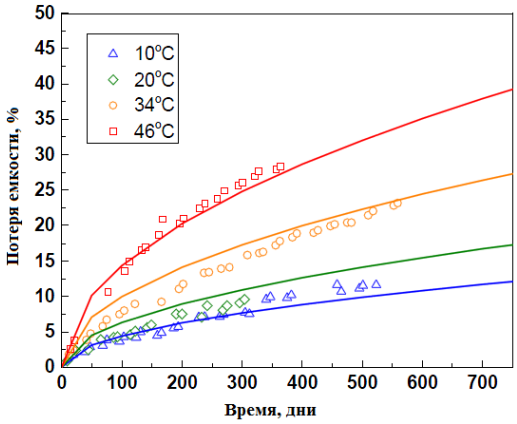


Рисунок ¶9 – Зависимость потерь емкости от времени

В таблице 6 заданы функции, где переменные *rate* – кратность тока разряда (C), E_a – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная; T– абсолютная температура единичного аккумулятора, $Ah_{thr.}$– общая выработанная емкость (А·ч). Основная функция уравнение Аррениуса устанавливает зависимость константы скорости химической реакции от температуры.

Функцию потерь ёмкости в циклах, которая представлена в таблице 6, можно записать в виде:

$$Q_{loss,\%} = B_1 \cdot exp(B_2 \cdot rate) \cdot Ah_{thr.} \quad (15)$$

где коэффициент B_1 – фактор частоты и B_2 – это показатель экспоненциальной функции. Зависимость факторов B_1 и B_2 от температуры можно наблюдать на рисунке 81. График изображен на рисунке 80.

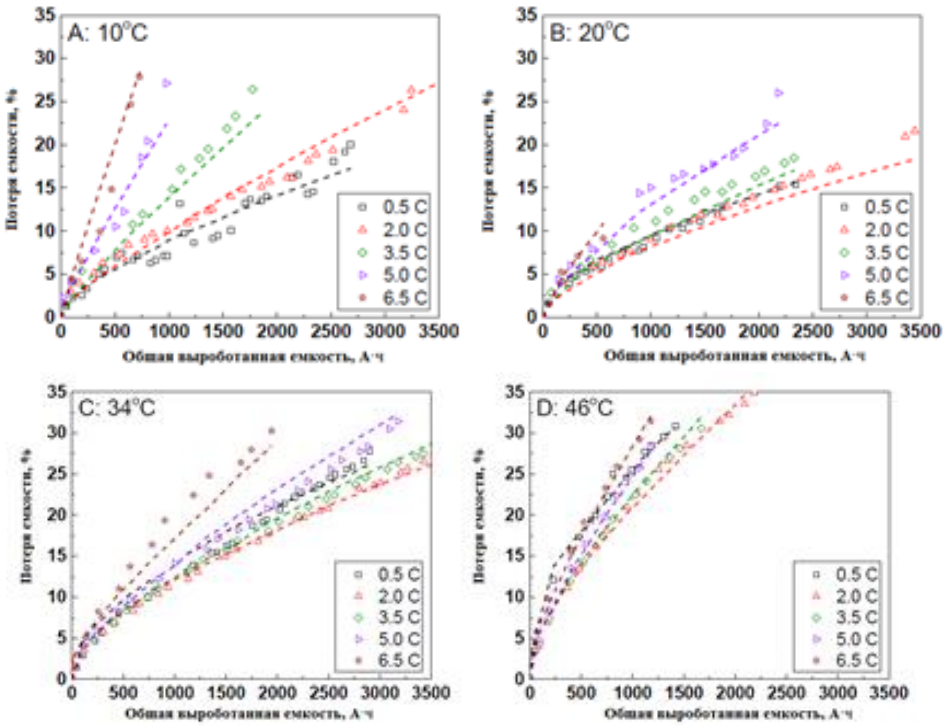


Рисунок ¶0 – Зависимости общей выработанной емкости к потерям емкости при различных токах разряда и температурах A) 10 °C, B) 20 °C, C) 34 °C, D) 46 °C

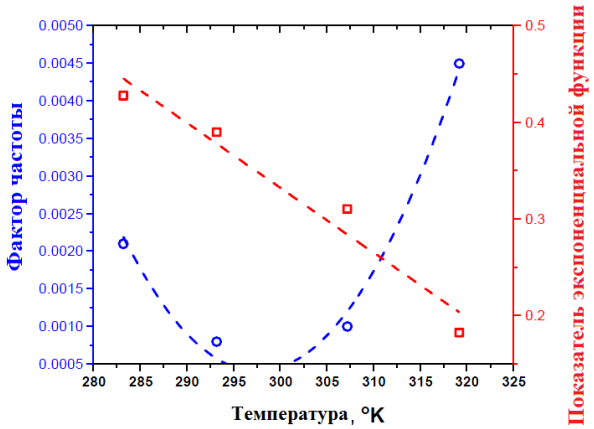


Рисунок ¶1 – Зависимость фактора частоты и показателя экспоненциальной функции от температуры

При использовании данных функции возможно получение общей функции, которая записана в виде:

$$Q_{loss;\%} = (a \cdot T^2 + b \cdot T + c)\ \exp\left[(d \cdot T + e) \cdot I_{rate}\right] \cdot \mathrm{Ah}_{\mathrm{thr.}} + f \cdot t^{0,5} \cdot \exp[-Ea/RT], \quad ¶(16)$$

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

Результатом являются зависимости потерь емкости от скорости разряда и общей выработанной емкости, показанные на рисунке 82. Синим цветом обозначена полная потеря степени работоспособности аккумулятора, красным изображена функция потерь ёмкости в циклах, зеленым — функция потерь ёмкости по времени.

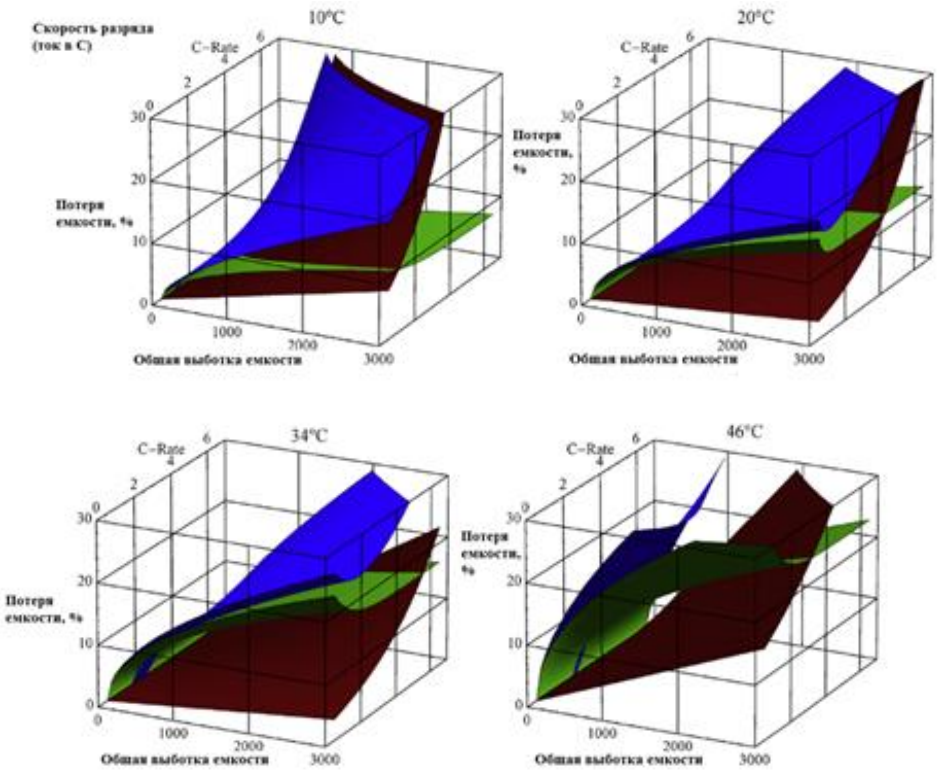


Рисунок 82 – Зависимости потерь емкости от скорости разряда и общей выработанной емкости

1.5.2 Анализ факторов, влияющих на деградацию литий-ионных аккумуляторов

ЛИА – это электрохимический источник энергии на борту ЭАТС, и для её безопасной эксплуатации необходимо поддержание в её определенных условиях. На рисунке 83 [104] изображены диапазоны температур и напряжений химических реакций, происходящих при выходе из нормального режима работы ЛИА. Данные приведены для ЛИА с катодным материалом *NMC622*.

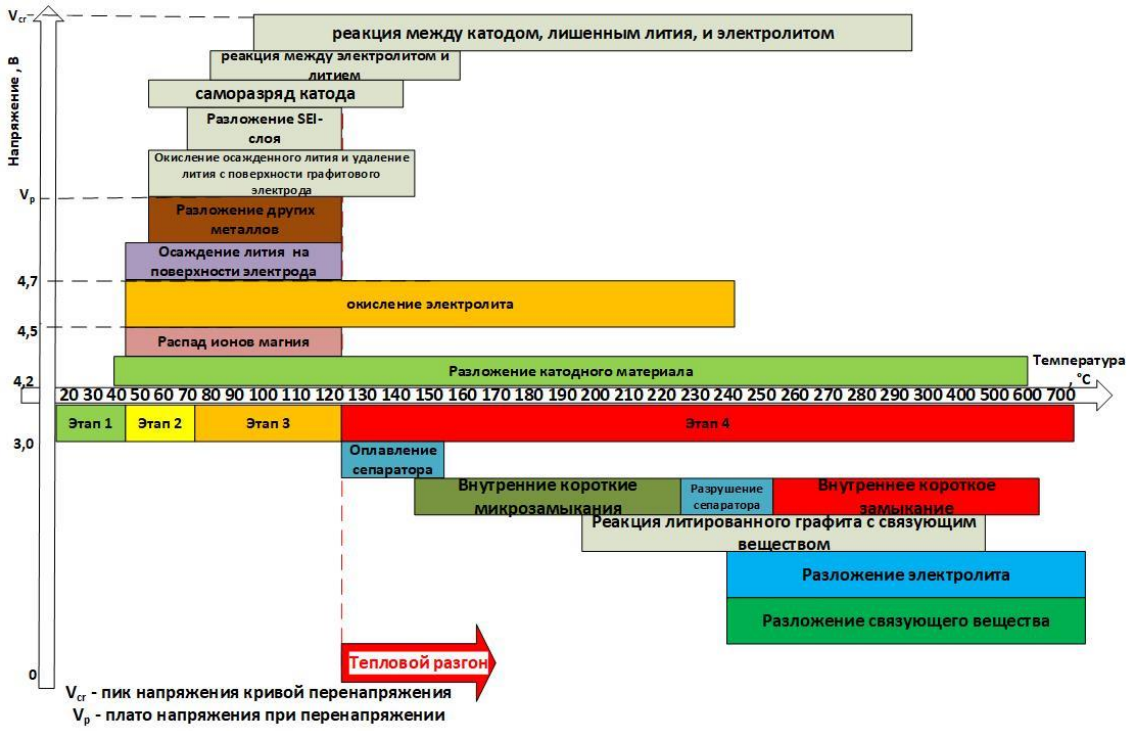


Рисунок 83 –Диапазоны температур и напряжений химических реакций при перезаряде ЛИА

1.5.2.1 Деградация углеродистых анодов

Графит является самым распространённым анодным материалом в ЛИА. Эффект деградации анодной части, связанный с изменениями на границе электрода/электролита (рисунок 84), т.е. с процессом образования *SEI* (рисунок 85 [105]), которые покрывают поверхность анода, происходит в основном в начале первого цикла [106].

Элементный состав слоев *SEI* показал, что этот слой изменяется по толщине. Содержание кремния и кислорода доминирует в слое, расположенном ближе к подложке. По данным максимумы концентрации масс-ионов, соответствующих соединениям Li_xSiO_y и LiO_x, находятся вблизи границы раздела электрод/электролит. Вдали от поверхности электрода *SEI* в основном состоит как из органических, так и неорганических (LiF, $P_xO_yF_z$) веществ, например, об увеличенном содержании углерода, фтора и кислорода в верхнем слое *SEI* [107].

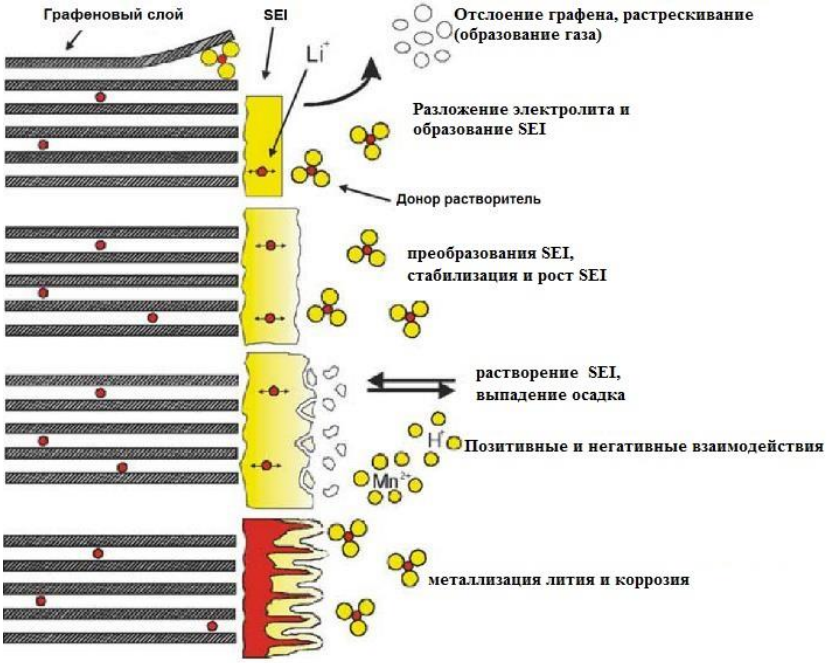


Рисунок 84 – Основные причины деградации анода

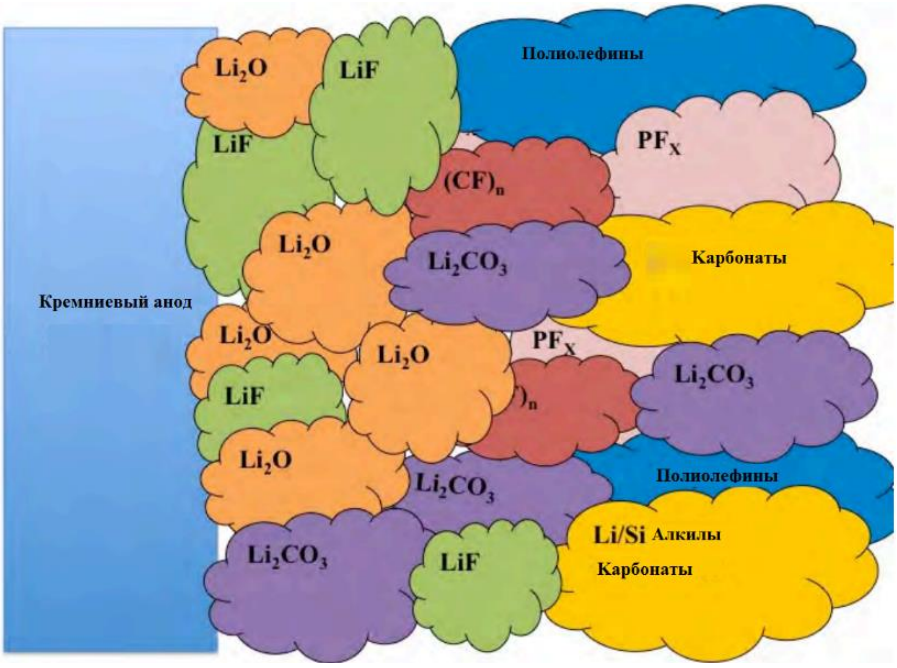


Рисунок 85 – Схема SEI на кремниевых анодах

В таблице 7 представлены причины уменьшения степени работоспособности ЛИА, а также воздействия, которые способствуют деградации или уменьшают ее.

Таблица¶7 – Причины деградации

Причина	Результат	Последствия	Уменьшает	Усиливает
Разложение электролита	Потери лития; Увеличение сопротивления	Потеря емкости;* Потеря мощности*	Добавки (которые повышают стабильность *SEI*);	Высокие температуры при большом *SOC*
Выделение газа и последующее образование трещин в частицах	Потеря активного материала (отшелушивания графита); Потеря лития	Потеря емкости	Добавки (которые повышают стабильность *SEI*)	Перезаряд
Уменьшение доступной площади поверхности из-за непрерывного роста *SEI*	Увеличение сопротивления	Потеря мощности*	Стабильные *SEI* (добавки)	Высокие температуры при большом *SOC*
Изменения в пористости из-за изменений объема, формирования *SEI*	Увеличение сопротивления при перенапряжении	Потеря мощности	Внешнее давление; Добавки (которые повышают стабильность *SEI*)	Высокое циклирование при большом *SOC*
Потеря частиц активного материала из-за изменений объема во время циклирования	Потеря активного материала	Потеря емкости	Внешнее давление	Высокое циклирование при большом (глубина разряда)*DOD*
Разложение связующего вещества	Потеря лития; Потеря механической устойчивости	Потеря емкости	Правильный выбор связующего вещества	Высокой *SOC* Высокая температура
коррозия токоприемника	Перенапряжения; Увеличение сопротивления; Неоднородное распределение тока и потенциала	Потеря мощности; Усиление других механизмов старения	Обработка токоприемника	Перезаряд; Низкий *SOC* (высокий потенциал)
разложение электролита с помощью металлизации *Li*	Потеря лития (потеря электролита)	Потеря емкости; Потеря мощности	Уменьшает диапазон напряжений	Низкая температура Высокие скорости циклирования; Плохой баланс клеток; Геометрические несоответствия

* – помечены наиболее сильные последствия.

Основные механизмы деградации анодов на основе углерода ниже:

– формирование и рост *SEI* приводит к росту сопротивления на аноде;

– с ростом *SEI* происходит коррозия лития в активном графите, что приводит к саморазряду и уменьшению мобильности лития;

– формирование и рост *SEI* приводит к постепенной потере контакта внутри составного анода (рисунок 84 верхний часть), и, таким образом, увеличивает сопротивление во всей ячейке;

– образование лития, который реагирует с электролитом, что приводит к ускорению процессов деградации (рисунок 86 [63]).

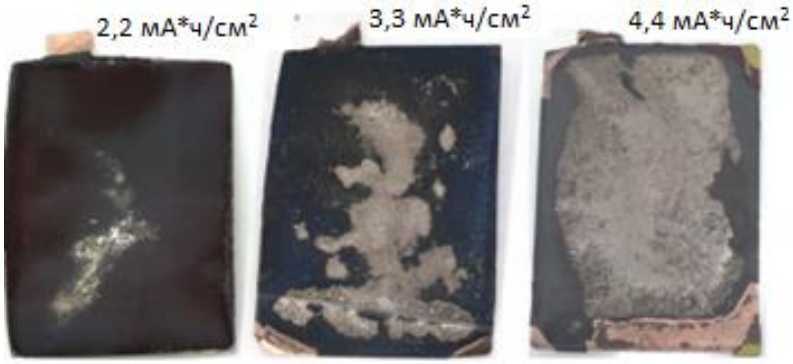


Рисунок 86 - Изображения графитового электрода (анода) в ЛИА *NMC622/Gr* [63]. Металлический литий в виде отложений на поверхности электрода

1.5.2.2 Деградация катодов оксидов лития

Изменения на катоде также влияют на срок службы литий–ионного элемента (рисунок 87 и 88):

– деградация или изменения компонентов электродов, как проводящих реагентов связующего вещества;

– коррозия катода;

– старение активного материала;

– окисление компонентов электролита и образование поверхностной пленки;

– взаимодействие продуктов деградации с катодом.

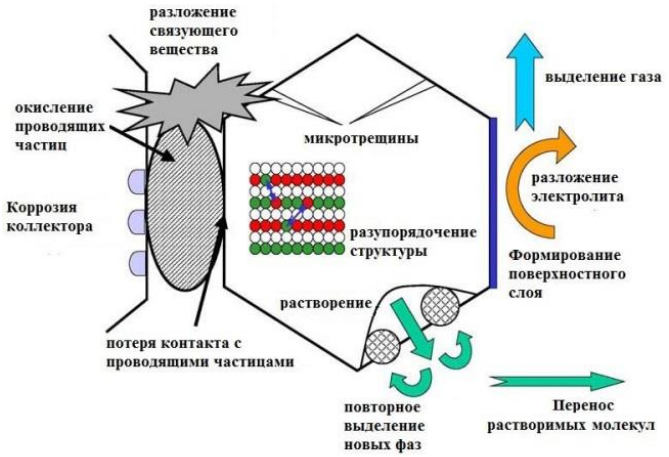
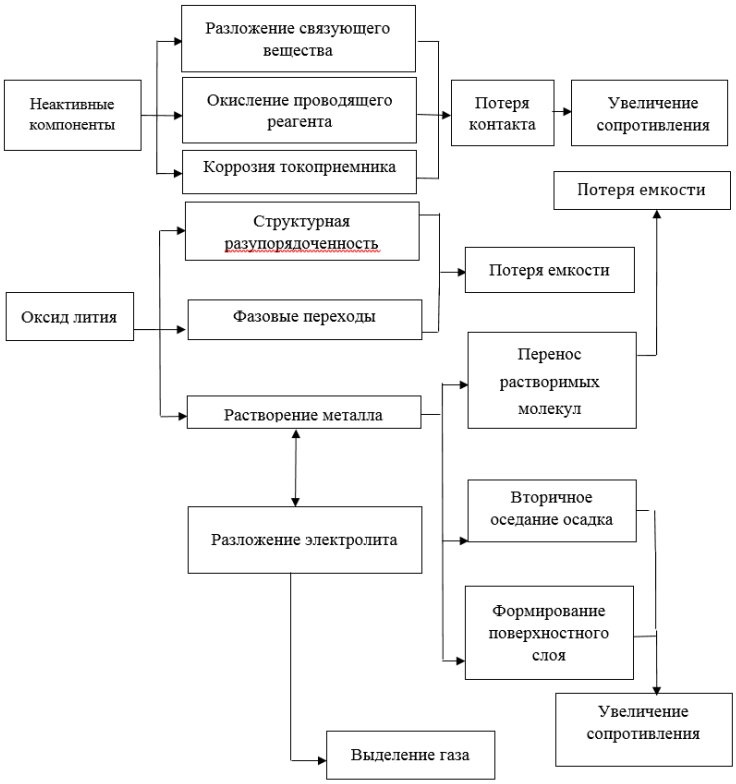


Рисунок ¶87 – Основные механизмы деградация катодных материалов



Рисунок¶88 – Причины и механизмы деградация катодных материалов

1.5.3 Методы оценки состояния заряда

Точная оценка *SOC* обеспечивает надежность ТАБ, способствует быстрому заряду, энергоэффективному использованию ТАБ и поддержанию баланса энергии в ЛИА во время заряда.

Основные методы оценки *SOC* приведены на рисунке 89.

Рисунок ¶89 – Методы оценки SOC

Самый распространённый метод расчета SOC:

$$SOC = \frac{\int i \cdot \eta \cdot dt}{C_n}, \tag{17}$$

где i –ток, А, C_n – номинальная емкость, А·ч, t –время, с, η – КПД в цикле.

1.6 Выводы по первой главе

1. Определена цель диссертационной работы – разработка принципов и алгоритма управления системой термостатирования накопителей электрической энергии, для обеспечение температурного режима работы тяговой аккумуляторной батареи в различных условиях эксплуатации, позволяющих повысить производительность электрифицированных автотранспортных средств (обладающего высокими экологическими характеристиками) с учетом ресурса тяговой аккумуляторной батареи на протяжении полного жизненного цикла;

2. Задачи, которые требуется решить для достижения цели: проведение анализа климатических особенностей РФ и определение граничных условий для расчета, анализ существующих систем термостатирования ТАБ, проведение анализа имеющихся видов ЛИА и определение наиболее подходящих для ЭАТС ТАБ из имеющихся на рынке предложений, определение эксплуатационных режимов ТАБ с использованием имитационного моделирования, разработка методики проведения комплексных исследований систем термостатирования ТАБ, анализ видов деградации ЛИА и методов оценки степени работоспособности ЛИА,

анализ режимов термостатирования в различных условиях эксплуатации с помощью имитационного моделирования, оценка SOH ТАБ с учетом эксплуатационных показателей ТАБ и прогнозирование его деградации, разработка предложений и рекомендаций по улучшению технического состояния в процессе эксплуатации;

3. ТАБ является компонентом, который в большой степени влияет на конечную стоимость ЭАТС;

4. Для ЭАТС наиболее подходящие ТАБ активными материалами на основе *NMC* и *LTO*;

5. Определены регионы РФ, где наиболее вероятна эксплуатация ЭАТС и определены исходные данные (график изменения температуры окружающей среды) для расчета верифицированной имитационной модели системы термостатирования с учетом изменений климата и срока службы ЭАТС;

6. Проведен комплексный анализ конструкций систем термостатирования (способ теплообмена теплоносителя с ЛИА), организация теплообмена в СТ, приведена сравнительная таблица;

7. Патентный анализ выявил, что существует часть вариантов исполнения систем термостатирования, не описанных в патентах. Поэтому возникает необходимость проведения исследований в этой области;

8. Анализ работ, посвящённых оценке степени работоспособности, выявил наиболее перспективные методы и методы, которые возможно использовать в данной работе;

9. Выявлены факторы, влияющие на деградацию ЛИА и достигнуто понимание степени влияния каждого из них.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВНУТРИ ТЯГОВОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ. ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ ОПИСАНИЮ СТЕПЕНИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

В настоящей работе созданы две имитационные модели (ИМ). Первая моделирует движение ЭАТС с потерями, алгоритмами работы и ограничениями в ТАБ, тяговом приводе, но без учета тепломассопереноса. Эта модель облегченная, она позволяет моделировать длительное время (например, для данной работы был произведен расчет средней температуры ТАБ в течение года), но позволяет определять лишь среднюю температуру ТАБ. Входными данными являются: цикл движения ЭАТС и температура окружающей среды, а выходными — расход энергии, средняя температура ТАБ. Вторая модель моделирует тепломассоперенос с учетом алгоритма работы СТ, переходных процессов, гидравлических потерь в системе, свойств теплоносителя, изменения коэффициента теплообмена и т.д. Эта модель способствует определению температуры каждого ЛИА внутри ТАБ, но позволяет моделировать процессы в течение непродолжительного времени (из-за настоящих ограничений вычислительной мощности персональных компьютеров), т.е. позволяет моделировать режимы выхода на рабочий режим эксплуатации ТАБ. Входными данными являются: токовые нагрузки ТАБ, температура окружающей среды и скорость воздуха, обдувающего ТАБ, выходными данными — средняя температура каждой ЛИА внутри ТАБ, расход энергии компонентов СТ, характеристики гидравлических компонентов. Эти две модели дают возможность в достаточной мере оценить потребные мощности и энергоэффективность СТ в длительных режимах эксплуатации, а также оценивать выполнение технических требований по времени выхода ТАБ в рабочий режим.

Для создания 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 $U = f(I, t)$:

$$E = E_s - k \cdot \frac{Q}{Q - I \cdot t} \cdot I - N \cdot I + A \cdot exp(\frac{I \cdot t}{B \cdot Q}) - C \cdot I \cdot t \qquad ¶(18)$$

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 ИМ для описания накопителя используются блок «*Battery*» из библиотеки *SimScape* в программе *Matlab*. На рисунке. 90 представлена эквивалентная схема ЕА. Данный блок применялся в ИМ модели изображенной на рисунке 98 для моделирования ТАБ.

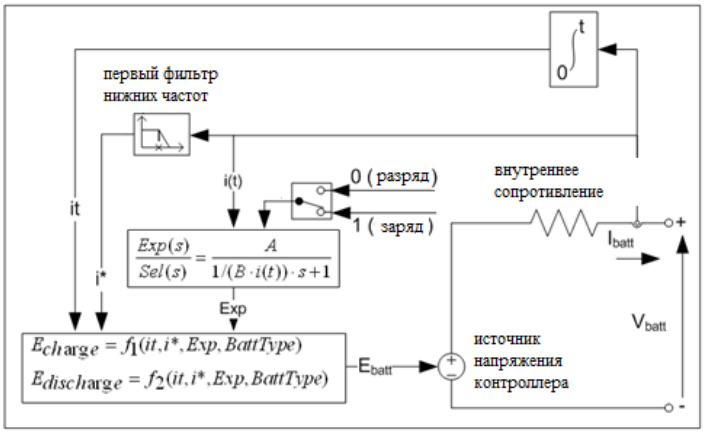


Рисунок ¶0 – Эквивалентная схема ЛИА

Для её работы используется следующие уравнения:

- Модель разрядки (i * > 0)

$$f2(it,i^*,i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K\frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot exp(-B \cdot it) \qquad ¶(19)$$

- Модель зарядки (i * <0)

$$f2(it,i^*,i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K\frac{Q}{Q - u} \cdot it + A \cdot exp(-B \cdot it) \qquad ¶(20)$$

где, E_{Batt} - нелинейное напряжение [В], E_0 - постоянное напряжение[В], Exp(s) - экспоненциальная зона [В], K - постоянная поляризации [А/ч], i^* - низкочастотная динамика тока [А], i - ток батареи[А], it – извлекаемая емкость [А·ч], Q - максимальная емкость аккумулятора [А·ч], A - экспоненциальное напряжение [В], B - экспоненциальная емкость [А/ч]; *Sel* (s) представляет режим батареи. *Sel* (s) = 0 во время разряда батареи, *Sel* (s) = 1 во время зарядки аккумулятора.

2.1 Математическое описание тепловых процессов литий-ионных аккумуляторов

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,

$$Q_s = \int - I \cdot T \frac{dV_{OCV}}{dT} \cdot dt \qquad ¶(21)$$

$$Q_p = \int I^2 \cdot R_{int} \cdot dt \qquad ¶(22)$$

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 *SOC* (степень заряженности) в процессе разряда, а также в зависимости от температуры.

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

$$m \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = - hA_{eff}(T - T_{amb}) + Q_s + Q_p \qquad ¶ (23)$$

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. Данная зависимость использована в ИМ изображенных на рисунке 98 и 124.

2.2 Основные виды теплопередачи в системе термостатирования

Теплообмен между ТАБ и системой термостатирования осуществляется несколькими способами, они изображены на рисунке 91. В основном теплопередача осуществляется теплопроводностью и конвекцией, но в определенных случаях передача тепла излучением может быть весомой, например, при исполнении ТАБ У1 по ГОСТ 15150.

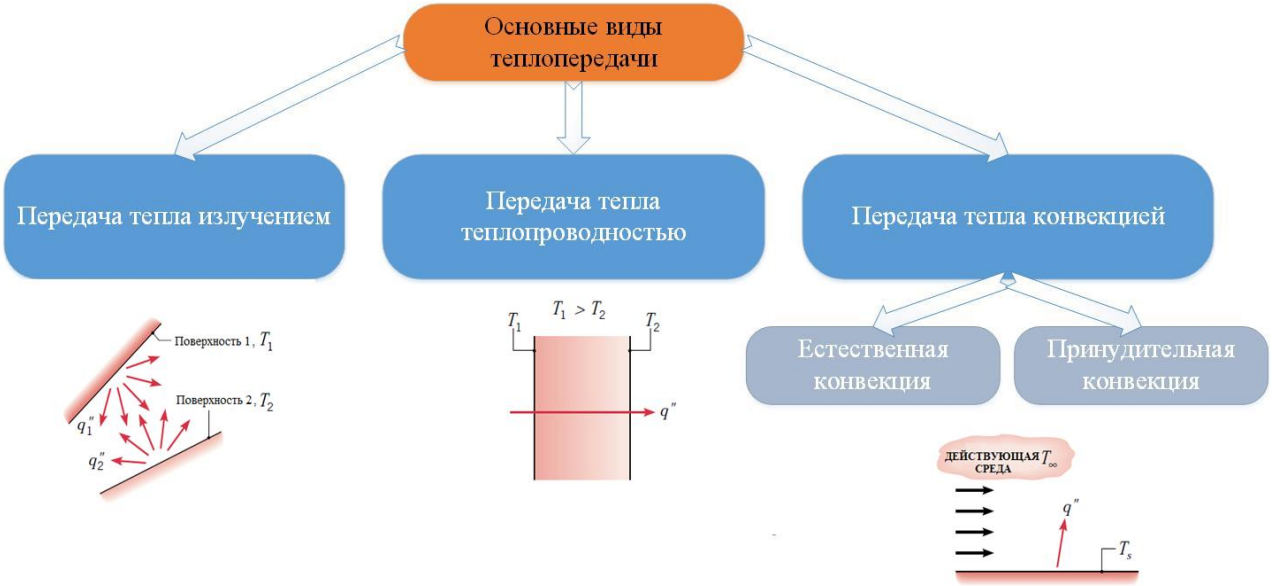


Рисунок 91 – Основные виды теплопередачи

2.2.1 Передача тепла теплопроводностью

Основным управлением, которое указывает на связь температурного поля в сплошной среде и интенсивность распространения теплоты, является закон Фурье [108]:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot gradT, \qquad (24)$$

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

Для трехмерного распространению тепла, для установившегося теплового режима $\frac{dT}{dt} = 0$ выражение [23]:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} = 0, \qquad (25)$$

Основным критерием выбора материалов при проектировании теплопередающих элементов является значение коэффициента теплопроводности λ. Одни из эффективным в этом отношении материалов является алюминий (λ = 205 Вт/(м·°С)), медь (λ = 394 Вт/(м·°С). Но использование таких материалов при передаче тепла на значительное расстояние приводит к увеличению массы теплопередающих элементов и большой разнице температур на этой длине [23].

2.2.2 Передача тепла излучением

Тепловое излучение – это энергия, излучаемая веществом, имеющим ненулевую температуру [109]. Это излучение, получаемое как от твердых поверхностей, так и от жидкостей и газов. Передача тепла теплопроводностью или конвекцией требует наличия материальной среды, через которую происходит теплообмен, в случае излучения этого не требуется, перенос тепла излучением наиболее эффективно происходит в вакууме [88].

Рассмотрим процессы переноса излучения для поверхности рисунка 92. Излучение, которое испускается поверхностью, происходит от тепловой энергии вещества, ограниченного поверхностью, а скорость, с которой энергия выделяется на единицу площади (Вт/м^2), называется интегральная плотность мощности q^*. Существует верхний предел мощность излучения, которая предписывается законом Стефана – Больцмана [88]:

$$q^* = \sigma \cdot T^4, \qquad (26)$$

где T - абсолютная температура (K) поверхности, σ - постоянная Стефана – Больцмана.

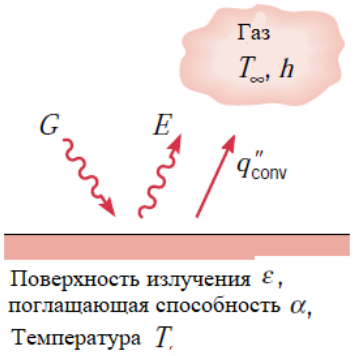


Рисунок ¶2 – Теплообмен излучением на поверхности

Закон Стефана-Больцмана устанавливает зависимость плотности потока излучения от температуры. При этом поверхность может не только излучать энергию, но и поглощать излученную другим телом энергию. Величина поглощенной энергии определяется величиной коэффициента поглощения [110].

Тепловой поток, излучаемый реальной поверхностью, меньше, чем у черного тела при той же температуре, и определяется как

$$q = \varepsilon \cdot \alpha \cdot T^4, \qquad ¶ \tag{27}$$

где, ε – степень черноты или коэффициент поглощения (излучения), зависящий от материала из которого состоит тело, состояния его поверхности и температуры [23].

Из уравнения (27), излучение становится существенным при температурах выше 125 °С. Поэтому в таких системах теплообмен излучением может рассматриваться лишь в качестве дополнения к основному способу теплоотвода [23].

2.2.3 Передача тепла конвекцией

Конвективный теплообмен – это процесс передачи тепла между поверхностью в основном твердого тела и обтекаемым подвижным теплоносителем (жидкостью или газом). Данный вид теплообмена характеризуется относительно высокой эффективностью теплоотдачи при умеренных температурах и является наиболее распространенным способом рассеяния тепловой энергии систем контроля температуры.

Конвективный теплообмен характеризуется дифференциальным уравнением Ньютона-Рихмана: [23]:

$$dQ = \alpha \cdot \Delta T \cdot dA, \tag{28}$$

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

В тонком пограничном слое формулу можно преобразовать [23]:

$$dQ = -\lambda \frac{dT}{dn} \cdot dA, \tag{29}$$

где λ — коэффициент теплопроводности теплоносителя; dT/dn – градиент температуры в пограничном слое.

Коэффициент теплопередачи зависит от градиента температуры в пограничном слое и его можно выразить:

$$\alpha = -\frac{\lambda}{\Delta T} \cdot \frac{dT}{dn}, \tag{30}$$

Поэтому для его расчета необходима информация о температурное поле, свойства которого в стационарном случае (dT/dt = 0) описываются уравнением энергии:

$$\vartheta_x \frac{\partial T}{\partial x} + \vartheta_y \frac{\partial T}{\partial y} + \vartheta_z \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \tag{31}$$

Уравнением движения Навье –Стокса

$$\begin{aligned}
\vartheta_x \frac{\partial \vartheta_x}{\partial x} + \vartheta_y \frac{\partial \vartheta_x}{\partial y} + \vartheta_z \frac{\partial \vartheta_x}{\partial z} &= g_x \cdot \beta \cdot \Delta T - \frac{1}{\partial \rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \vartheta_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_x}{\partial z^2} \right) \\
\vartheta_x \frac{\partial \vartheta_y}{\partial x} + \vartheta_y \frac{\partial \vartheta_y}{\partial y} + \vartheta_z \frac{\partial \vartheta_y}{\partial z} &= g_y \cdot \beta \cdot \Delta T - \frac{1}{\partial \rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \vartheta_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_y}{\partial z^2} \right) \\
\vartheta_x \frac{\partial \vartheta_z}{\partial x} + \vartheta_y \frac{\partial \vartheta_z}{\partial y} + \vartheta_z \frac{\partial \vartheta_z}{\partial z} &= g_z \cdot \beta \cdot \Delta T - \frac{1}{\partial \rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \vartheta_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_z}{\partial z^2} \right)
\end{aligned} \tag{32}$$

и уравнение непрерывности

$$\frac{\partial \vartheta_z}{\partial x} + \frac{\partial \vartheta_z}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta_z}{\partial z} = 0. \tag{33}$$

Здесь $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$ и g_x, g_y, g_z – составляющие векторов скорости элементарных объемов теплоносителя и ускорения свободного падения по координатам; $\alpha = \lambda/(c \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности; c и ρ - удельная

теплоемкость и плотность теплоносителя; β и μ— его коэффициент объемного расширения и динамическая вязкость; ΔT — разность между температурой в данной точке и средней температурой теплоносителя.

При использовании дифференциальных уравнений (32) – (33) для описания процесса теплоотдачи в конкретных системах необходимо учитывать краевые условия или условия однозначности. К ним относятся: граничные условия, определяющие особенности теплообмена на границе раздела сред; геометрические условия, связанные с размерами и формой системы; физические условия, характеризующие свойства взаимодействующих сред.

2.2.3.1 Естественная конвекция

Движение жидкости, полностью обусловленное силой земного притяжения, называется свободным движением, а конвекцию при таком движении называют естественной. Для естественной конвекции характерно, что движение жидкости происходит под воздействием подъемных сил, возникающих в результате изменения плотности вследствие разности температуры между жидкостью и находящейся с ней в контакте поверхностью. На теплообмен при естественной конвекции, особенно во вращающихся системах, оказывают влияние и другие силы.

Интенсивность теплообмена между твердой поверхностью и окружающей ее жидкостью помимо других факторов зависит и от того, является ли поток ламинарным или турбулентным, а тепловой поток может быть определен из уравнения. Коэффициент теплоотдачи α входит в критерий Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot X}{\lambda} \P \tag{34}$$

где X – это характерный размер системы, м. Критерий Нуссельта связан с критериями Грасгофа (Gr) и Прандтля (Pr) [111]:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \cdot K \P \tag{35}$$

В большинстве случаев константы C и n определяют обработкой эмпирических данных, полученных для геометрически подобных тел. K – это поправочный коэффициент, который дает более полное описание настоящей

физической проблемы. Данные коэффициенты можно определить по [111] страницы 55 – 60 и по [23] страница 33 – 39.

Различают ламинарный и турбулентный режимы движения теплоносителя, условия формирования которых определяются произведением критериев Грасгофа и Прандтля. Для ламинарной конвекции это произведение находится между $10^4 < Gr{\cdot}Pr < 10^9$. При $Gr{\cdot}Pr > 10^9$ конвекция турбулентная. Когда $Gr{\cdot}Pr < 10^3$, влияние конвекции на теплообмен незначительно [111].

2.2.3.2 Вынужденная конвекция

Вынужденный конвективный теплообмен происходит благодаря контакту движущегося теплоносителя и твердой поверхности, имеющих разную температуру. При вынужденной конвекции движение теплоносителя вызвано воздействием внешней силы. Энергия, поступающая извне, необходима для поддержания движения; при этом действуют две силы [111]:

а. Давление жидкости, зависящее от скорости потока ($1/2 \cdot \rho \cdot \vartheta^2$);

б. Сила трения, обусловленная вязкостью жидкости ($\mu \cdot (\partial\vartheta/\partial y)$).

Влияние этих сил на теплоотдачу жидкости характеризуется безразмерным критерием Рейнольдса. Этот критерий характеризует также режим течения в пограничном слое, который определяет теплоотдачу теплоносителя.

Теплоотдача при вынужденной конвекции жидкости в трубах, поперечном обтекании труб и вдоль плоских поверхностей достаточно полно исследована. Результаты этих экспериментальных исследований обычно интерполируются уравнением Нуссельта [111]:

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot K, \qquad (36)$$

где C, m и n — константы для данного типа потока и геометрии системы. Однако существуют н другие факторы. K – это коррекционная функция, ее вводят для получения более точного результата.

При большом значении числа Грасгофа влияние естественной конвекции на вынужденную конвекцию должно быть исследовано отдельно. Для большинства случаев этим влиянием можно пренебречь.

2.3 Математическое описание гидравлических процессов в системах термостатирования

Сопротивление жидкостей изменению своей формы характеризуется их динамической вязкостью (внутренним трением). Сила внутреннего трения в жидкости τ на единицу площади определяется по закону Ньютона [112]:

$$\tau = \pm\mu\frac{\partial u}{\partial y}, \qquad (37)$$

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

Отношение динамической вязкости жидкости к ее плотности называется относительной или кинематической вязкостью [112]:

$$\nu = \mu/\rho, \qquad (38)$$

где ρ – плотность жидкости.

Гидромеханический расчет индивидуальных систем термостатирования приборов основывается на уравнении Бернулли. Замкнутые жидкостные магистрали должны оснащаться резервуаром, компенсирующим тепловое расширение теплоносителя, его наличие позволяет определить абсолютное давление на входе нагнетателя [23]:

$$P_1 = P_0 + \rho \cdot g \cdot \Delta\lambda, \qquad (39)$$

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:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_л + \Delta p_м + \Delta p_с + \Delta p_н, \qquad (40)$$

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

Мощность двигателя нагнетателя (насоса или вентилятора), необходимая для перемещения теплоносителя определяется [23]:

$$N = \frac{G \cdot \Delta p_{\Sigma}}{\eta} = \frac{\dot{m} \cdot \Delta p_{\Sigma}}{\eta \cdot \rho}, \quad (41)$$

где G — объемный расход теплоносителя; η – КПД насоса или вентилятора. ρ – плотность жидкости, $\dot{m}$ – массовый расход теплоносителя.

2.3.1 Потери напора на трение по длине трубопровода

Равномерное движение жидкости наблюдается в тех случаях, когда живое сечение по длине потока постоянно (например, в напорных трубах постоянного диаметра). При равномерном движении в трубах потери напора на трение по длине $h_л$ как при турбулентном, так и при ламинарном движении определяют для круглых труб по формуле Дарси – Вейсбаха [112]:

$$h_л = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\vartheta^2}{2\,g}, \quad (42)$$

Потери давления на трение по длине определяются по формуле [112]

$$\Delta p_л = \lambda \cdot \frac{l}{d_э} \cdot \rho \cdot \frac{\vartheta^2}{2}, \quad (43)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения (безразмерный); l – соответственно длина участка трубы или канала, d- диаметр трубы, ϑ – средняя скорость течения, $d_э$ – эквивалентный диаметр, ρ – плотность жидкости, g –ускорение свободного падения.

2.3.2 Местные потери напора в трубопроводах

Местные потери напора обусловливаются преодолением местных сопротивлений, создаваемых фасонными частями, арматурой и прочим оборудованием трубопроводных сетей. Местные сопротивления вызывают изменение величины или направления скорости движения жидкости на отдельных участках трубопровода, что связано с появлением дополнительных потерь напора. Движение в трубопроводе при наличии местных сопротивлений является неравномерным. Потери напора в местных сопротивлениях $h_м$ (местные потери напора) вычисляют по формуле Вейсбаха [112]:

$$h_м = \zeta \cdot \frac{\vartheta^2}{2\,g}, \quad (44)$$

где ϑ — средняя скорость в сечении, как правило, расположенном ниже по течению за данным сопротивлением; ζ — безразмерный коэффициент местного сопротивления. g –ускорение свободного падения.

Для определения потерь давления $\Delta p_м$ формула преобразуется к виду [112]:

$$\Delta p_м = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{\vartheta^2}{2} \quad (45)$$

2.3.2.1 Потери напора при резком изменении сечения трубопровода

Внезапное расширение трубопровода. Потери напора при внезапном расширении трубопровода находят по формуле Борда [112]:

$$h_{вн.р} = \frac{(\vartheta_1 - \vartheta_2)^2}{2\,g} = \zeta_{вн.р.1} \frac{\vartheta_1{}^2}{2\,g} = \zeta_{вн.р.2} \frac{\vartheta_2{}^2}{2\,g}, \quad (46)$$

где ϑ_1 и ϑ_2- средние скорости течения соответственно до и после расширения.

Коэффициент местного сопротивления в формуле Вейсбаха определяется выражениями:

$$\zeta_{вн.р.1} = (1 - \omega_1/\omega_2)^2, \quad (47)$$

$$\zeta_{вн.р.2} = (\omega_1/\omega_2 - 1)^2, \quad (48)$$

где ω_1 и ω_2 - площади сечений трубопровода соответственно до и после расширения.

Внезапное сужение трубопровода. Коэффициент местного сопротивления при внезапном сужении:

$$\zeta_{вн.с} = (1/\varepsilon - 1)^2, \quad (49)$$

где ε — коэффициент сжатия струи, представляющий собой отношение площади сечения сжатой струи в узком трубопроводе $\omega_{сж}$ к площади сечения узкой трубы ω_2.

$$\varepsilon = \omega_{сж} / \omega_2 \quad (50)$$

2.3.2.2 Потери напора при повороте трубы

Резкий поворот трубы круглого поперечного сечения на угол α. Коэффициент сопротивления можно найти по формуле [113]:

$$\zeta_\alpha = \zeta_{90^\circ} (1 - \cos \alpha), \quad (51)$$

где $\zeta_{90°}$ — значение коэффициента сопротивления для угла 90^0 .

Плавный поворот трубы круглого поперечного сечения (закругленное колено, отвод). Коэффициент сопротивления определить по формуле:

$$\zeta_\alpha = \zeta_{90°} \cdot \alpha \qquad ¶(52)$$

Коэффициент $\xi_{90°}$ определяется по формуле Альтшуля [113]:

$$\zeta_{90°} = [0.2 + 0.001\,(100\,\lambda)^8]\sqrt{d/R}, \qquad ¶(53)$$

где d — диаметр трубопровода; R — радиус закругления.

2.3.3 Неизотермические потери

Если теплоноситель движется по каналу, расположенному под углом к горизонту, то в процессе его нагрева или охлаждения возникает явление самотяги, обусловленное появлением подъемных сил, связанных с изменением плотности жидкости или газа. Потери напора в этом случае определяются выражением [23]:

$$\Delta p_c = \pm(\rho_x - \rho_г)\, g \cdot \Delta\lambda\,, \qquad ¶(54)$$

где $\rho_х$ и $\rho_г$ средние плотности холодного и горячего теплоносителя; $\Delta\lambda$ – перепад высот на концах канала. В правой части уравнения (54) знак определяется исходя из направления движения. При направлении нагреваемого теплоносителя вниз, а охлаждаемого – вверх, ставится знак «+», в противоположных направлениях соответственно используется знак «-».

При неизотермическом течении, с изменением плотности теплоносителя изменяется скорость его движения. В канале постоянного сечения дополнительные потери давления на ускорение можно оценить по формуле [23]:

$$\Delta p_н = \frac{\dot{m}^2}{F^2}\left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1}\right), \qquad ¶(55)$$

где индексом 1 и 2 обозначены величины, отнесенные к температуре в начальном и конечном сечении канала соответственно.

Зависимости приведенные (24) - (36) использованы в ИМ изображенных на рисунке 98, а зависимости (37) – ((55) в ИМ изображенной на рисунке 124.

2.4 Математическое описание степени работоспособности литий-ионных аккумуляторов

Потерю *SOH* ЛИА можно разделить на циклическое и календарное. Обе из них могут привести к снижению производительности. Проведя обширный анализ работ, в которых описывается эмпирически *SOH* для ЛИА с активными материалами на основе литий-никель марганец-кобальт (*NMC*), были выбраны наиболее подходящие [103], [114], [115], [116], которые наиболее удовлетворяют требованиям по расчету *SOH.* Из выбранных работ были составлены имитационные модели. После экспертного анализа и проверки их «адекватности», было проведено априорное ранжирование этих имитационных моделей. Методика ранжирования приведена в разделе 3.1. Исходные данные по моделям находятся в таблице 8. В факторах (точность указания химии для *NMC*, учитывание календарного старения и напряжения) значение может быть равным либо 10, либо 1; значение 10 означает, что фактор учитывается, а 1 — фактор не учитывается.

Таблица¶8 – Исходные данные имитационных моделей по расчету *SOH*

Параметр	*Модель 1*	*Модель 2*	*Модель 3*	*Модель 4*
Охват диапазона *DOD* или *SOC*	95,0	80,0	70,0	75,0
Охват диапазона температуры	50,0	36,0	30,0	30,0
Охват диапазона *C-Rate*	3,0	6,0	1,0	4,7
Ёмкость описываемой ячейки	2,1	1,5	5,3	15,0
Точность указания химии для *NMC*	10,0	10,0	10,0	10,0
Учёт календарного старения	10,0	10,0	10,0	1,0
Учёт напряжения	10,0	1,0	1,0	1,0
Количество циклов испытания ячейки	4500,0	5000,0	1700,0	2200,0

Для ранговой оценки при подборе ТАБ были определены следующие факторы:

- Охват диапазона *DOD* или *SOC* (1);
- Охват диапазона температуры (2);
- Охват диапазона *C-Rate* (3);
- Ёмкость описываемой ячейки (4);
- Точность указания химии для *NMC* (5);
- Учёт календарного старения (6);
- Учёт напряжения (7);
- Количество циклов испытания ЛИА (8).

В качестве экспертов выступают руководители служб, ученые специалисты, инженеры: МАДИ (ГТУ), ООО «ИЦ «КАМАЗ» и ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». Экспертам предлагается ранжировать в соответствии со своими личными и профессиональными знаниями факторы, определяющие технологические и экономические характеристики ТАБ. Ранговая оценка факторов представлена в таблице 9.

Таблица 9 – Ранговая оценка факторов

Исследователи	Ранги по факторам								T_j
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	1	2	3	6	8	4	5	7	0
2	5	2	7	3	8	6	1	4	0
3	2	1	6	8	7	5	3	4	0
4	4	2	3	5	7	8	6	1	0
5	1	2	3,5	3,5	8	7	5	6	0,5
6	1	2,5	2,5	4	5	7	8	6	0,5

Продолжение таблицы 9

7	1,5	3,5	3,5	5	7	6	8	1,5	1
8	4,5	4,5	2	2	8	6,5	2	6,5	1,5
9	5	2,5	2,5	2,5	8	6	2,5	7	5
Сумма рангов Σ	25	22	33	39	66	55,5	40,5	43	
Отклонение суммы рангов от средней суммы рангов *Δ*	-15,5	-18,5	-7,5	-1,5	25,5	15	0	2,5	
Квадраты отклонений *Δ²*	240,25	342,25	56,25	2,25	650,25	225	0	6,25	
Место, занятое фактором *L*	2	1	3	4	8	7	5	6	
q_{li}	0,3	0,3	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1	

Выбор модели производится по максимальному значению критерия эффективности. Была выбрана наиболее подходящая модель под номером *2* , над которой работали группа авторов *John Wang, Justin Purewal, Ping Liu, Jocelyn Hicks-Garner и др* [103] в формуле (16) [117].

Общий вид имитационной модели *SOH* в среде *Simulink (Matlab)* изображён на рисунке 93.

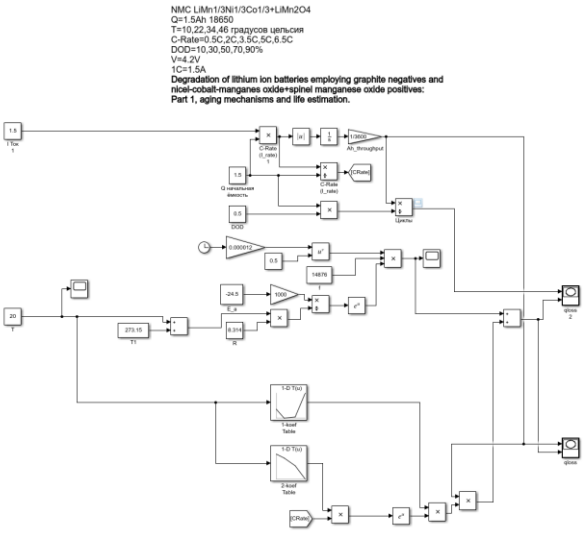


Рисунок 93 – Общий вид имитационной модели *SOH*

Для ЛИА с активными материалами на основе литий-титаната (*LTO*) была выбрана математическая модель оценки степени работоспособности следующих авторов: *Emil Namor, Dimitri Torregrossa, Fabrizio Sossan, Rachid Cherkaoui, Mario Paolone* [118] по формуле (56):

$$Q_{loss} = \left(\frac{C_{rate} \cdot E_0}{\mathrm{T}} \cdot 0{,}11 + 0{,}57\right) Ah_{thr}, \text{ ¶} \quad (56)$$

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).

2.5. Выводы по второй главе

1. Определены наиболее значимые виды теплопередачи для расчета СТ и приведены подходы к математическому моделированию;
2. Выявлены наиболее распространённые виды гидравлических потерь и приведены формулы для расчета потерь в гидравлическом тракте СТ;
3. Проанализированы работы, посвященные математическому моделированию степени работоспособности ЛИА, определены функции *SOH* для ЛИА с активными материалами *LTO* и *NMC*;
4. Определены зависимости для математического моделирования температуры ЛИА.

ГЛАВА 3 РАСЧЕТ И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ ТЯГОВОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

3.1 Выбор тяговой аккумуляторной батареи методом априорного ранжирования

В первой главе был сделан вывод о том, что ТАБ является одним из самых дорогостоящих компонентов ЭАТС. Выбор ТАБ является ключевым решением в концепции ЭАТС. Поэтому ниже приведен анализ различных продуктов, имеющихся на рынке по данным, находящимся в открытом доступе.

3.1.1 Исходные данные

Исходные данные получены из открытых источников компаний производителей ТАБ, которые собраны в сводную таблицу 10. Если какой-то параметр ТАБ не удалось получить, то в расчете используется наихудший параметр. Для удобства ТАБ с химией *LTO* и *NMC* разделены цветами, голубой и светло-розовый, соответственно.

Таблица¶10 – 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 даташите, циклов(DoD 80%)	40000	8000	3000	7 000	3 100	12 350	6 200	8 000	-	50000	12000	-	-
Стоимость на уровне ТАБ $/кВт·ч от 150 комплектов	1 391	712,2	777	1 611	-	1142	914	1280	721	1710	-	-	-
Срок гарантии	5		1	1	1	1	1	1	6	1	1	1	1

1.2.1 Выбор ТАБ методом априорного ранжирования.

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.

По условиям метода число экспертов определяется по формуле:

$$\boldsymbol{N}_{\text{эк}} = \frac{\ln(1-\gamma)}{\ln(1-q)}, \qquad (57)$$

где, γ – доверительная вероятность равная 0,8-0,85; q – ошибка.

Принимаем $\gamma = 0{,}8, q = 0{,}2$.

Число экспертов должно быть не менее семи, в нашем случае $N_{эк}$=8. В качестве экспертов выступают руководители, ученые, специалисты, инженеры МАДИ (ГТУ), ООО «ИЦ «КАМАЗ» и ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». Экспертам предлагается ранжировать в соответствии со своими личными и профессиональными знаниями факторы, определяющие технологические и экономические характеристики ТАБ. Ранговая оценка факторов представлена в таблице 11.

Таблица¶11 – Ранговая оценка факторов

Наименование факторов	Номера экспертов												
	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ	Δ	Δ²	L	qli
Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг	1	1	1	1	4	1	1	1,5	11,5	-24,5	600,25	1	0,22
Удельная энергоплотность, Вт·ч/л	5	4	8	6	7	5	5	4	44	8	64	5	0,11
Удельная длительная мощность , Вт/кг	2	5	3	2	6	3	3	5	29	-7	49	4	0,14
Удельная кратковременная мощность Вт/кг(время в сек.)	3	8	6	7	8	7	7	6	52	16	256	8	0,03
Удельная мощность, Вт/л	6	6	7	8	5	6	6	8	52	16	256	7	0,06
Ресурс , циклов	4	2	5	3	3	4	4	3	28	-8	64	2	0,19
Стоимость на уровне ТАБ $/кВт·ч	8	7	2	4	1	2	2	1,5	27,5	-8,5	72,25	3	0,17
Срок гарантии	7	3	4	5	2	8	8	7	44	8	64	6	0,08
									288	0	1425,5		

В данной таблице:

- Σ – сумма рангов, расставленных экспертами, по строке. По результатам этого столбца рассчитывается средняя сумма рангов (равная 32);
- Δ - разность между суммой рангов в данной строке и средним значением;
- Δ² - квадрат разности между суммой рангов в данной строке и средним значением. По результатам данного столбца рассчитывается итоговая сумма квадратов разностей;
- *L* - место, занятое данным фактором;
- q_{li} - удельный вес данного фактора.

По результатам данного расчета строится диаграмма значимости факторов по сумме рангов (рисунок 94).

Проверка согласованности мнений экспертов производится с помощью коэффициента конкордации, рассчитываемого по формуле:

$$W = \frac{12 \times \sum \Delta^2}{m^2 \times \left(k^3 - k\right)}, \qquad (58)$$

где m – количество экспертов, k – количество факторов.

$$W = 0{,}533$$

Мнения экспертов считаются согласованными при коэффициенте конкордации большем 0,5. Таким образом, для рассматриваемого случая мнения экспертов согласованы.

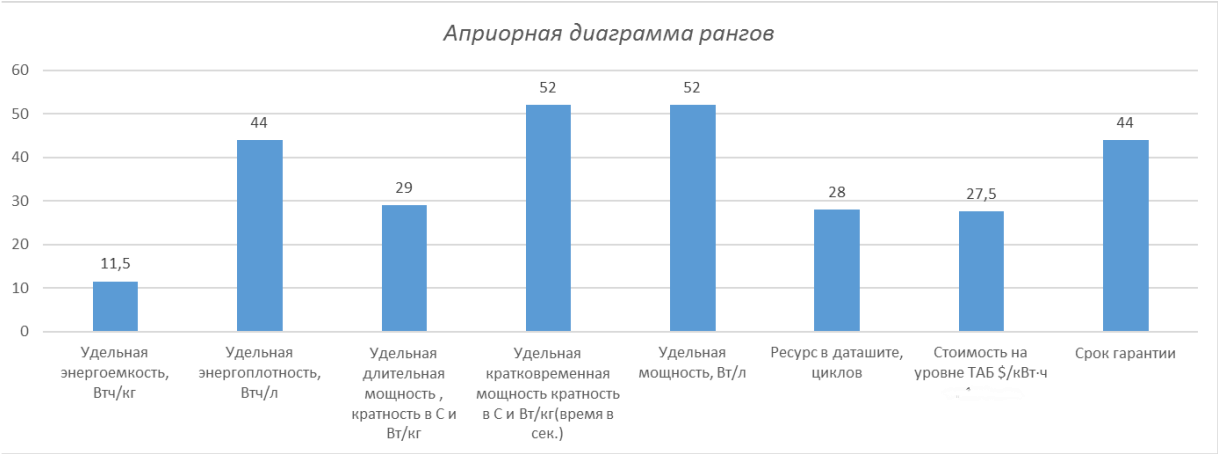


Рисунок 4 - Априорная диаграмма рангов

Проверка неслучайности мнений экспертов производится с помощью критерия Пирсона, вычисляемого по формуле:

$$\chi^2_{выб} = W \times m \times \left(k - 1\right), \qquad (59)$$

где W – коэффициент конкордации; m – число экспертов; k – число факторов.

$$\chi_{выб}^2 = 29{,}831.$$

Далее по таблицам находим по вероятности ошибки *(α=0,05)* и количество степеней свободы (число факторов минус один) $\chi^2_{таб}$ = *14,0495*. Совпадение мнений экспертов неслучайно, если расчетное значение больше табличного. Следовательно, в данном расчете, совпадение неслучайно.

Для окончательного выбора оборудования перейдем от ранговой к весовой оценке. Удельный вес фактора рассчитывается по формуле:

$$q_{li} = \frac{2 \times (k - L_i + 1)}{k \times (k + 1)}, \qquad ¶ \qquad (60)$$

где k – число факторов; L_i – место, занятое фактором в результате ранговой оценки.

Результаты данного расчета сведены в таблице 11 и показаны на рисунке 95.

Рисунок ¶5 – Удельные веса факторов

Далее переходим к безразмерным показателям, с тем, чтобы произвести оценку по различным факторам, имеющим различный физический смысл.

Окончательный выбор производится при помощи суммарного обобщенного критерия эффективности ($K_{фо}$):

$$K_{фо} = \sum_{i=1}^{k} q_i \bullet a_{фi}, \qquad ¶(61)$$

где $a_{фi}$ – безразмерная величина частного критерия; $ф$ – номер варианта оборудования; q_i – вес i-того фактора.

$$a_{фi} = \begin{cases} \dfrac{a_{i(пред)} - a_{фi(стат)}}{a_{i(пред)}} \\ \dfrac{a_{фi(стат)} - a_{i(пред)}}{a_{фi(стат)}} \end{cases}, \qquad ¶(62)$$

где $a_{i\ (пред)}$ – предельное (наихудшее) значение рассматриваемого показателя; $a_{фi\ (стат)}$ – значение частного критерия, полученное в результате статистических наблюдений (значение параметра оборудования).

Выбор используемой формулы производится по каждому фактору отдельно в соответствии с тем, минимальное или максимальное значение критерия является благоприятным.

Расчет критерия эффективности представлен в таблицы 12.

Таблица ¶12 – Выбор ТАБ с помощью метода ранговой оценки

	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	ai (пред)	ai (пред)	gli
	0,01	0,03	0,06	0,02	0,06	0,00	0,05	0,03	0,10	0,03	0,00	0,05	0,02	53	78	0,22
	0,02	0,04	0,05	0,04	0,05	0,00	0,02	0,03	0,05	0,00	0,06	0,02	0,03	43	64	0,08
	0,06	0,02	0,03	0,04	0,01	0,09	0,02	0,07	0,00	0,08	0,00	0,09	0,08	131	168	0,17
	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03	0,04	0,02	0,04	0,00	0,04	0,00	0,04	0,04	153	168	0,06
	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	60	160	0,03
	0,16	0,12	0,00	0,11	0,01	0,15	0,10	0,12	0,00	0,16	0,06	0,00	0,00	8000	3000	0,19
	0,03	0,08	0,07	0,00	0,00	0,04	0,06	0,01	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	1 710	1611	0,14
	0,09	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	1	1	0,11
Σ	0,39	0,41	0,24	0,26	0,16	0,33	0,27	0,31	0,30	0,33	0,15	0,23	0,19			

Выбор ТАБ производится по максимальному значению критерия эффективности. Сводная диаграмма данных критериев представлена на рисунок 96 и 97.

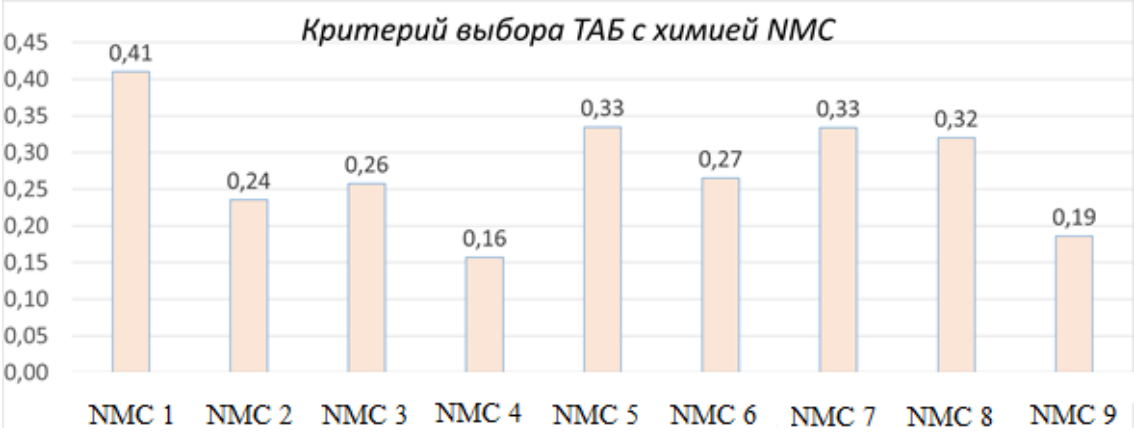


Рисунок ¶6 – Критерий выбора ТАБ с химией NMC

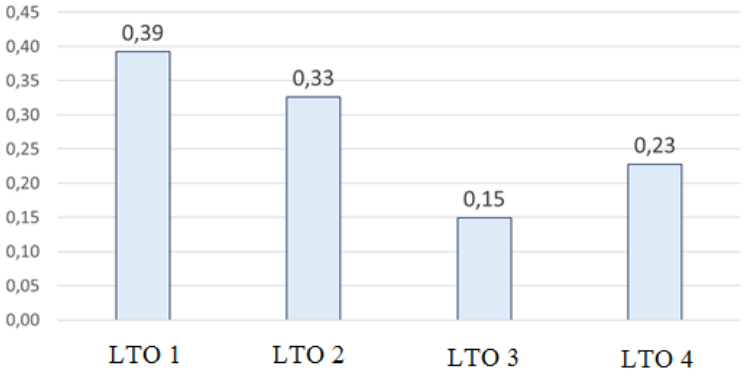


Рисунок ¶7 – Критерий выбора ТАБ с химией LTO

Данный критерий имеет максимальную величину для ТАБ NMC 1 с $K_{фо}$ = 0,41 и ТАБ LTO 1 с $K_{фо}$ = 0,39. Следовательно, он обладает лучшим набором параметров.

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.

3.2 Расчет тягово-динамических и энергетических характеристик электрических транспортных средств категории М3

Для определения зарядно-разрядных токов аккумуляторной батареи при движении, в рамках настоящей работы была использована имитационная модель ЭАТС в среде *Matlab/Simulink*. Она позволяет получить эксплуатационные характеристики аккумуляторной батареи при различных циклах движения.

Для оценки степени работоспособности ТАБ и влияния температуры окружающей среды на тяговую аккумуляторную батарею транспортного средства бала построена ИМ, прямолинейного движения ЭАТС (для анализа виртуальной эксплуатации ТАБ). Общий вид ИМ изображён на рисунке 98. ИМ состоит из пяти основных блоков. Первый, блок формирования скорости движения, включающий в себя несколько стратегий движения, такие как разгон, торможение, а также движение по различным циклам. Второй, блок тягового расчета, основан на уравнении прямолинейного движения транспортного средства [119]:

$$F_{aj} = F_{\text{к}} - F_{\text{в}} - F_{\psi}, \P \tag{63}$$

где, F_{aj} – сила сопротивления разгону поступательных и вращающихся масс автомобиля; $F_{\text{к}}$ – тяговое усилие в пятне контакта ведущих колес; $F_{\text{в}}$ – сила сопротивления воздуха; F_{ψ} – сила сопротивления движению.

Данный блок определяет требуемый момент и частоту вращения на валу электродвигателя. Третий, блок тягового электродвигателя. В данном блоке вводятся параметры электродвигателя такие, как зависимость пикового и длительного момента от частоты вращения ротора и КПД электрической машины в зависимости от момента частоты вращения и напряжения на входе в тяговый инвертор. Четвертый, блок расчета электрических характеристик, рассчитывает электрическую мощность, а также энергию, затрачиваемую на движение. Пятый, блок тяговой аккумуляторной батареи, учитывает ограничения токов заряда и разряда, падение напряжения с уменьшением уровня заряда аккумулятора, вырабатываемую тепловую мощность в результате разряда и заряда, а также

мощность необходимую для отвода тепла и нагрева. Ограничения двигателя по моменту и аккумуляторной батареи по току и напряжению учитываются в тяговой динамике транспортного средства [117], [120].

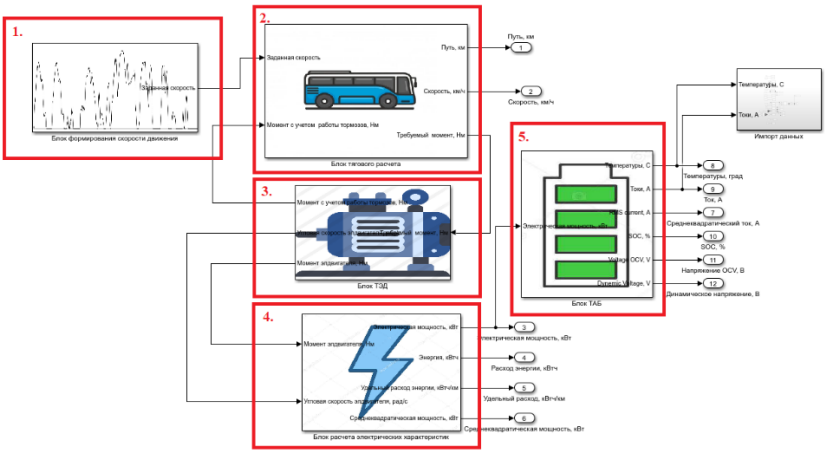


Рисунок ¶8 – Общий вид имитационной модели

3.2.1 Объект исследования

Объектом исследования является ЭАТС большого класса полной массой 18 000 кг, колесной формулой 4х2, с тяговым электрическим приводом задней оси, в составе двух тяговых электрических машин, каждая для привода колеса соответствующего борта, интегрированных в конструкцию портального моста, совокупности зубчатых передач. В качестве источника энергии используется тяговая аккумуляторная батарея. ЭАТС имеет электрический привод вспомогательных агрегатов: насоса ГУР, компрессора, климатического оборудования.

Блок-схема тягового электропривода представлена на рисунке 99.

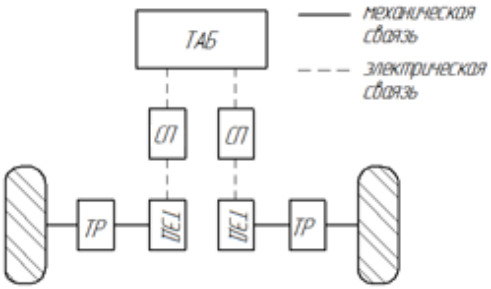


Рисунок ¶99 – Блок-схема тягового электропривода ЭАТС

СП – силовой преобразователь; ТР – трансмиссия привода ведущих колес; ТЭД – тяговый электродвигатель; ТАБ – тяговая аккумуляторная батарея;

3.2.2 Исходные данные

В таблице 13 приведены основные параметры ЭАТС

Таблица ¶13 – Параметры ЭАТС

Наименование параметра	Обознач.	Значение	Размерн.
Полная масса	$M_{полн}$	19 000	кг
Максимально возможная скорость движения	V_{max}	80	км/ч
Максимально скорость движения (ограничение)		70	км/ч
Коэффициент заполнения площади лобового сечения ЭАТС	A	0,95	
Ширина	B	2,55	м
Высота	H	3,5	м
Плотность воздуха	$\rho_{возд.}$	1,25	кг/м^3
Размерность шин		275/70 R22.5	
Количество двигателей	n	2	шт.

3.2.3 Характеристика тягового электродвигателя привода ведущих колес

Основные технические характеристики тяговых электрических двигателей привода представлены в таблице 14.

Таблица¶14 – Технические характеристики тягового электрического двигателя

Параметр	Обозн.	Значение	Размерн.
Максимальная кратковременная мощность	$N_{max\ кр.}$	125	кВт
Максимальный крутящий момент (кратковременный)	$M_{max\ кр.}$	485	Н·м
Максимальный крутящий момент (номинальный)	$M_{max\ длит.}$	165	Н·м
Максимальная частота вращения, кратковременная	$n_{max\ кр.}$	11000	об/мин
Максимальная частота вращения, длительная	$n_{max\ длит}$	10300	об/мин
Передаточное отношение бортового редуктора		22,66	
Номинальное напряжение звена постоянного тока	$U_{ном}$	650	В
Диапазон рабочего напряжения	U	580-750	В

Тяговый электрический привод имеет возможность работать в следующих режимах:

- Режим кратковременных перегрузок (пиковый режим), длительностью до 10-15 сек;
- Режим длительных перегрузок, длительностью до 5-10 мин;
- Часовой режим работы, длительностью не менее часа;
- Длительный режим работы, длительность без ограничений.

3.2.4 Расчет КПД привода

Трансмиссия привода ведущих колес имеет в своем составе совокупность зубчатых механических редукторов. Ввиду отсутствия данных по составу и характеристикам трансмиссии привода ведущих колес, принимаем КПД трансмиссии равный $\eta_{тр}$ = 0,92.

Общий КПД тягового электрического привода ведущих колес ЭАТС определяется по карте КПД предоставленной производителем.

3.2.5 Определение параметров шин

На ТС возможна установка шин *КАМА ALL STEEL NF201*

Согласно электронному каталогу *КАМА Catalog* технические характеристики шины:

– категория скорости – М,
– тип конструкции – радиальная,
– конструкция каркаса и брекера – цельнометаллокордная,
– тип рисунка протектора – дорожный,
– масса шины не более 50 кг,
– индекс несущей способности 148, максимальная нагрузка на шину 3150 кгс.
– свободный радиус шины определяется по формуле(64):

$$R_{св} = \frac{d_{об}}{2} + \frac{B \cdot H}{100}, \quad (64)$$

где, $d_{об}$ – посадочный диаметр обода диска, B – ширина шины, H – высота профиля шины.

$$R_{св} = \frac{571{,}5}{2} + \frac{245 * 70}{100} = 478{,}25 \text{ мм};$$

– Статический радиус шины, согласно, каталога равен 447 мм

– Кинематический радиус колеса в классической теории автомобиля определяется по формуле (65)

$$- \quad R_к = \frac{V_к}{\omega_к}, \qquad (65)$$

– Радиус качения колеса [121] определяется по формуле Зимелева (66)

$$R_к = \frac{3R_{св}}{1+\frac{R_{св}}{R_{ст}}}, \qquad (66)$$

$$R_к = \frac{3 \cdot 478{,}25}{1 + 2 \cdot \frac{478{,}25}{447}} = 458{,}39 \text{ мм}.$$

3.2.6 Расчет сил сопротивления качения, подъему и воздуха

Расчет сил сопротивления качения

Сила сопротивления качению определяется по формуле (67):

$$R_{кач} = f_i \cdot M \cdot g, \qquad (67)$$

где, M.- масса транспортного средства, g – Ускорение свободного падения, g = 9,81 м/с^2,f_i – коэффициент сопротивлению качению, определяется по формуле (68);

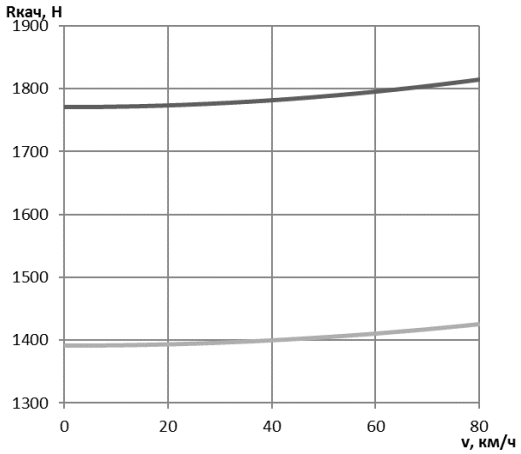
$$f_i = f_0(1 + 5 * 10^{-5} v^2), \qquad (68)$$

где,f_0 - коэффициент сопротивлению качению шин при V→0;$f_0 = 0{,}0095$ в соответствии с ГОСТ 5513 - 97 для радиальных цельнометаллокордных шин, v - скорость движения, км/ч;

Результаты расчетов силы сопротивления качению представлены в таблице 15. На рисунке 100 представлен график зависимости силы сопротивления качению от скорости движения ЭАТС.

Таблица ¶15 – Сила сопротивления качению

Парамет р	Значение								
V, км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70	80
f_i	0,0095	0,009504	0,009515	0,009533	0,009559	0,009592	0,009632	0,00968	0,009735
$R_{кач}$, Н (100% загрузка)	1770,7	1771,39	1773,437	1776,85	1781,635	1787,784	1795,298	1804,2	1814,4
$R_{кач\ 50\%}$, Н (50% загрузка)	1391,4	1391,94	1393,55	1396,073	1399,99	1404,82	1410,73	1417,7	1425,76



Рисунок¶100 – Сила сопротивления качению

Мощность сил сопротивления качению определяется по формуле (69)

$$N_{кач} = R_{кач} v_i; \qquad ¶ \qquad (69)$$

Результаты расчета мощности сил сопротивления качению шин представлены в таблице 16. На рисунке 101 представлен график зависимости мощности силы сопротивления качению от скорости движения ЭАТС.

Таблица ¶16 – Мощность сил сопротивления

Параметр	Значение								
V, км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$N_{кач}$, кВт (100% загрузка)	0	4,92	9,85	14,8	19,8	24,6	29,92	35,08	40,32
$N_{кач\ 50\%}$, Н (50% загрузка)	0	3,87	7,74	11,63	15,6	19,5	23,5	27,56	31,68

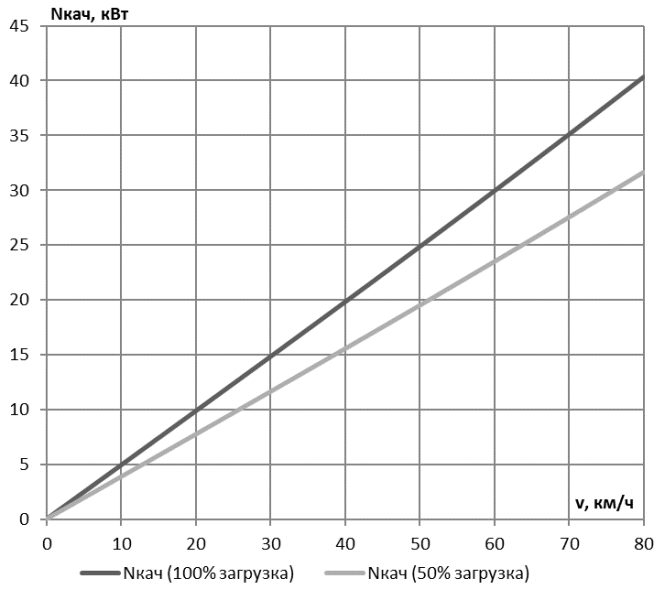


Рисунок ¶01 – Мощность силы сопротивления качения

3.2.7 Расчет сил сопротивления подъему

Сила сопротивления подъему определяется по формуле (70):

$$\mathrm{P}_{\text{под}} = \mathrm{M} \cdot g \cdot \psi, \qquad ¶ \qquad (70)$$

где, ψ – коэффициент сопротивлению движению, определяется по формуле (71);

$$\psi = f_0 \, sin\, \alpha + cos\, \alpha; \qquad ¶(71)$$

где, α - угол преодолеваемого подъема, град;

Результаты расчетов силы сопротивления подъему представлены в таблице 17. На рисунке 102 представлен график зависимости силы сопротивления подъему от угла преодолеваемого подъема.

Таблица ¶17 – Сила сопротивления подъему

α,%	0	5	10	15	20	25	30	35
α, °	0	2,86	5,7	8,54	11,32	14,04	16,7	19,3
ψ	0,0095	0,059	0,109	0,158	0,206	0,252	0,297	0,339
$P_{под}$, Н	1770,7	11081,1	20317,8	29414,2	38308,7	46946,5	55281,1	63275,3

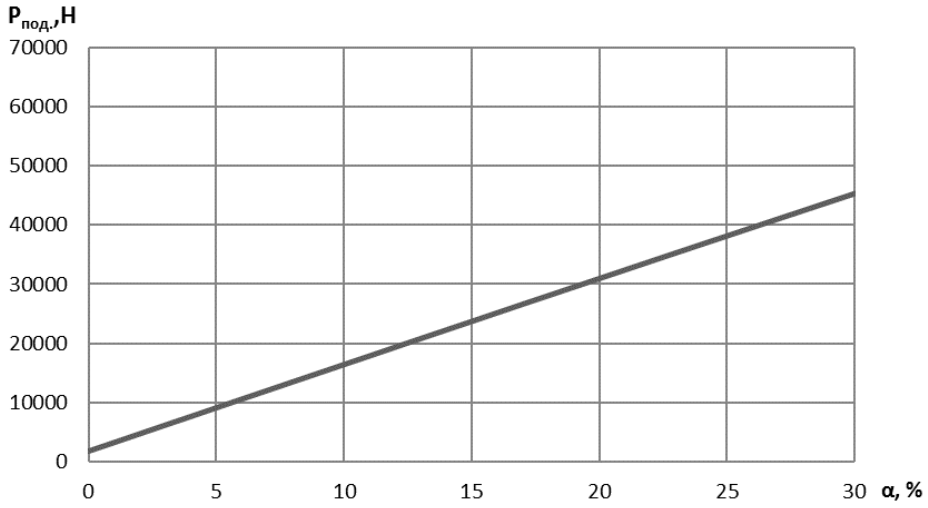


Рисунок ¶102 – Сила сопротивления подъему

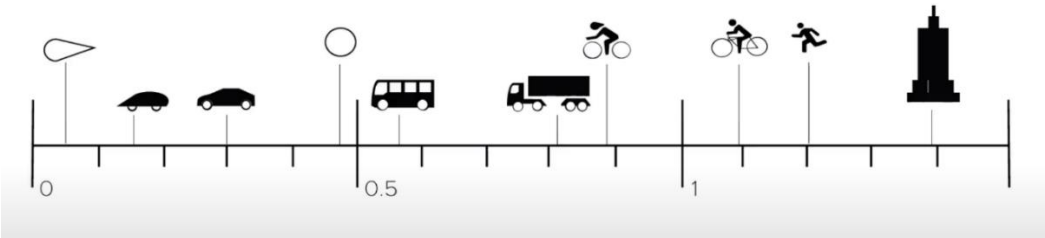
3.2.8 Расчет сил сопротивления воздуха

На рисунке 103 [122] изображены габариты ЭАТС. Площадь лобового сопротивления составляет 8,22 м^2.

Рисунок ¶103 – Общий вид ЭАТС

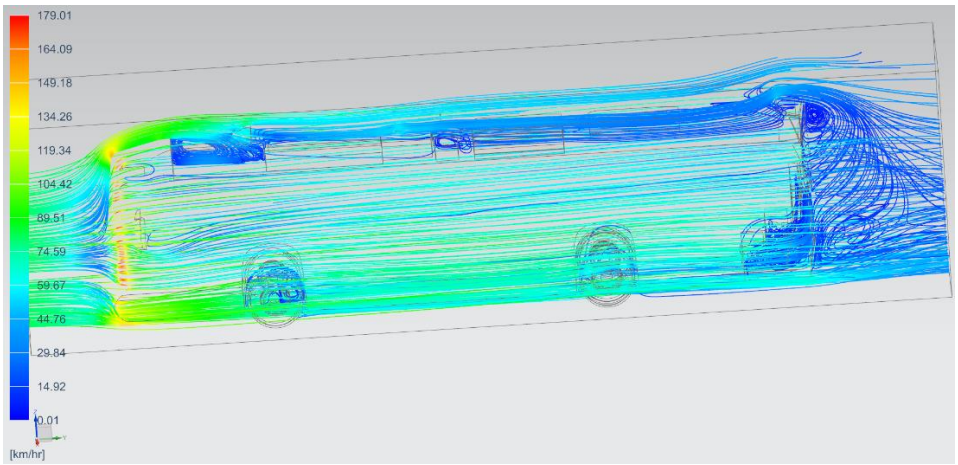
В имитационной модели скорость ветра не учитывается. Для определения коэффициента обтекаемости ЭАТС и коэффициентов теплообмена (с окружающим воздухом) высоковольтных компонентов была создана виртуальная модель ЭАТС в среде *NX* и проведен *CFD* анализ в среде *XFlow*. Коэффициент обтекаемости для различных объектов изображен на рисунке 104 [123], но существуют образцы

серийных транспортных средств у которых эти параметры улучшены благодаря оптимизации экстерьера, например, междугородний автобус MAN NEOPLAN Tourliner с коэффициентом обтекаемости 0,36 [124]. На рисунке 105 *а* изображена скорость частиц воздуха при движении ЭАТС на скорости 80 км/ч, а линии тока изображены на рисунке 105 *б*.



Рисунок¶104 – Коэффициент обтекаемости для различных объектов

а)



б)

Рисунок ¶105 – Линии тока и скорость частиц воздуха при движении ЭАТС

Для определения коэффициента обтекаемости в среде *XFlow* есть специальный инструмент определения данного коэффициента в каждый момент времени, график изменения показан на рисунке 106. Используя *XFlow 2020x VALIDATION GUIDE* [125] коэффициент c_x равен 0,6.

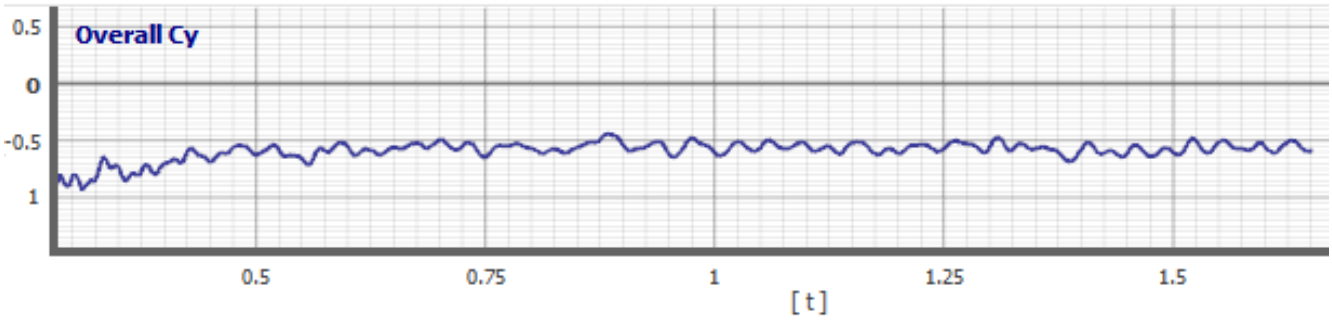


Рисунок ¶106 – График изменения коэффициент обтекаемости от времени

Сила сопротивления воздуха определятся по формуле (72)

$$R_{\text{в}} = \frac{c_x F_{\text{лоб}} v^2}{2}; \qquad ¶(72)$$

где, v - скорость движения ЭАТС, м/с; c_x - коэффициент обтекаемости;$F_{лоб.}$- площадь лобового сопротивления, м^2, определяется по формуле (73)

$$F_{\text{лоб}} = A \cdot B \cdot H, \qquad ¶(73)$$

где, B – ширина ЭАТС, м; H – высота ЭАТС, м; A – коэффициент заполнения площади лобового сечения ЭАТС.

$$F_{\text{лоб}} = 0{,}95 \cdot 2{,}55 \cdot 3{,}5 = 8{,}48 \ \text{м}^2$$

Мощность сил сопротивления воздуха рассчитывается по формуле (74)

$$N_{\text{в}} = R_{\text{в}} v; \qquad ¶(74)$$

Результаты расчетов силы сопротивления воздуха представлены в таблице 18.

Таблица ¶18 – Сила сопротивления воздуха и мощность силы воздуха

Параметр	Значение								
V, км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$R_в$, Н	0	28,6	114,5	257,6	457,96	715,6	1030,3	1402,5	1831,8
$N_в$, кВт	0	0,08	0,64	2,15	5,09	9,94	16,74	27,86	40,71

График зависимости силы сопротивления воздуха от скорости представлен на рисунке 107. На рисунке 108 представлен график зависимости мощности силы сопротивления воздуха от скорости движения.

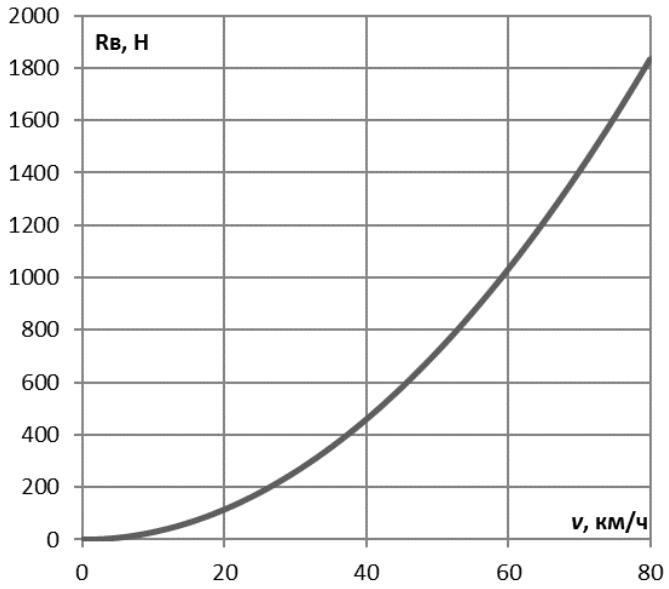


Рисунок ¶107 – Силы сопротивления воздуху

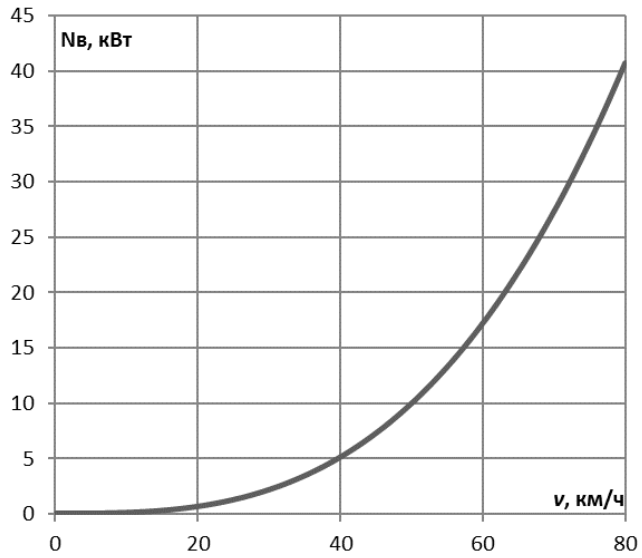


Рисунок ¶108 – Мощность сил сопротивления воздуха

3.2.9 Расчет скорости движения электрического транспортного средства

Скорость движения определяется по формуле (75)

$$v = 0{,}377\,\frac{n_{\text{ТЭД}} R_{\text{к}}}{U_{\text{тр}}}; \qquad ¶(75)$$

где, $n_{тэд}$ – частота вращения выходного вала тягового двигателя, об/мин; $U_{тр}$ – передаточное число трансмиссии;

Результаты расчетов представлены в таблице 19.

Таблица ¶19 – Скорость движения ЭАТС

nтэд, об/мин	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000
v, км/ч	0	7,6	15,2	22,8	30,4	38,0	45,6	53,2	60,8	68,4	76,0	83,6

Максимально-возможная кинематическая скорость 83,6 км/ч

Максимальная кинематическая длительная скорость составит

$$v_{max\,длит} = 0{,}377 \cdot \frac{10300 \cdot 0{,}45696}{22{,}66} = 78{,}3\,\frac{км}{ч}.$$

3.2.10 Определение потребной мощности двигателя

Минимальная потребная мощность двигателя определяется по формуле(76)

$$N_{треб} = \frac{(R_{кач\,max} + R_{в\,max})v_{max}}{\eta_{прив}}, \qquad ¶(76)$$

где, v_{max} – максимальная скорость движения, м/с; $R_{кач\,max}$ – сила сопротивления качению при максимальной скорости, Н;$R_{в\,max}$ – сила сопротивления воздуха при максимальной скорости движения, Н

$$N_{треб} = \frac{(1814{,}4 + 1831{,}8) \cdot 22{,}2}{0{,}9025} = 89{,}78\ кВт$$

Предполагаемый к установке на транспортное средство двигатель имеет длительную мощность 60 кВт. Устанавливается 2 таких двигателя. Суммарная мощность тяговых двигателей составит 120 кВт, что выше требуемого минимального значения.

3.2.11 Расчет силы тяги на колесе

Сила тяги на колесе в длительном (номинальном) режиме работы тягового электродвигателя определяется по формуле (77)

$$Р_{т\,длит} = \frac{2М_{кр\,ах.длит}U_{тр}\eta_{тр}}{R_к}, \qquad ¶(77)$$

где, $M_{кр\ max.\ длит.}$ – максимальный длительный крутящий момент на выходном валу двигателя, Н·м; $\eta_{тр.}$- КПД трансмиссии; $U_{тр}$ - передаточное число трансмиссии; $R_к$ - кинематический радиус колеса, м;

Сила тяги на колесе в режиме работы с перегрузкой до 5-10 минут определяется по формуле (78)

$$P_{т\ мин} = \frac{2M_{кр\ max.мин} U_{тр} \eta_{тр}}{R_к}, \quad (78)$$

где, $M_{кр\ max.\ мин.}$ – максимальный крутящий момент, имеющий возможность длиться 5-10 минут, на выходном валу двигателя, Н·м;

Сила тяги на колесе в режиме работы с перегрузкой до 1 часа определяется по формуле (79)

$$P_{т\ час} = \frac{2M_{кр\ max.час} U_{тр} \eta_{тр}}{R_к}, \quad (79)$$

где, $M_{кр\ max.\ час.}$ – максимальный крутящий момент, имеющий возможность длиться до 1 часа, на выходном валу двигателя, Н·м;

Сила тяги на колесе в режиме работы с перегрузкой до 5-10 минут определяется по формуле (80)

$$P_{т\ кр} = \frac{2M_{кр\ max.пик} U_{тр} \eta_{тр}}{R_к}, \quad (80)$$

$M_{max.\ пик.}$ – максимальный кратковременный крутящий момент на выходном валу двигателя, Н·м;

Результаты расчетов приведены в таблице 20.

Таблица 20 – Сила тяги на колесе

Парам	Значение								
v, км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$P_{т\ час}$, Н	20574,3	20574,3	20574,3	18808,5	14106,4	11285,1	9707,2	8060,7	7053,2
$P_{т\ мин}$, Н	30175,6	30175,6	30175,6	27659,5	20744,6	16595,7	13829,8	11854,1	10372,3
$P_{т\ кр}$, Н	44348,9	44348,9	44348,9	27659,5	20744,6	16595,7	13829,8	11854,1	10372,3
$P_{т\ длит}$, Н	15087,8	15087,8	15087,8	13276,6	9957,4	7965,9	6638,3	5689,9	4978,7

3.2.12 Расчет динамического фактора

Динамический фактор в часовом режиме определяется по формуле (81)

$$D_{\text{час}} = \frac{(P_{\text{т час}} - R_{\text{в}})}{G}, \quad (81)$$

где, G – вес транспортного средства, Н, определяется по формуле (82)

$$G = g \cdot \text{М}_{\text{полн}} \quad (82)$$

$$G = 9{,}81 * 19000 = 186390 \text{ Н}.$$

Динамический фактор в минутном режиме определяется по формуле (83)

$$D_{\text{мин}} = \frac{(P_{\text{т мин}} - R_{\text{в}})}{G}, \quad (83)$$

Динамический фактор в кратковременном режиме определяется по формуле (84)

$$D_{\text{кр}} = \frac{(P_{\text{т кр}} - R_{\text{в}})}{G}, \quad (84)$$

Динамический фактор в часовом режиме определяется по формуле (85)

$$D_{\text{длит}} = \frac{(P_{\text{т длит}} - R_{\text{в}})}{G}, \quad (85)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 21.

Таблица 21 – Динамический фактор

Парам.	Значение								
v, км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$D_{\text{час}}$	0,1102	0,1102	0,109	0,0995	0,0732	00567	00449	0,0357	0,028
$D_{\text{мин}}$	0,1617	0,1617	0,1612	0,147	0,1088	0,0852	0,0687	0,0561	0,0458
$D_{\text{кр}}$	0,238	0,238	0,222	0,147	0,1088	0,0852	0,0687	0,0561	0,0458
$D_{\text{длит}}$	0,0807	0,0807	0,0803	0,0698	0,0509	0,0389	0,03	0,023	0,0169

На рисунке 109 представлен график изменения динамического фактора от скорости движения транспортного средства.

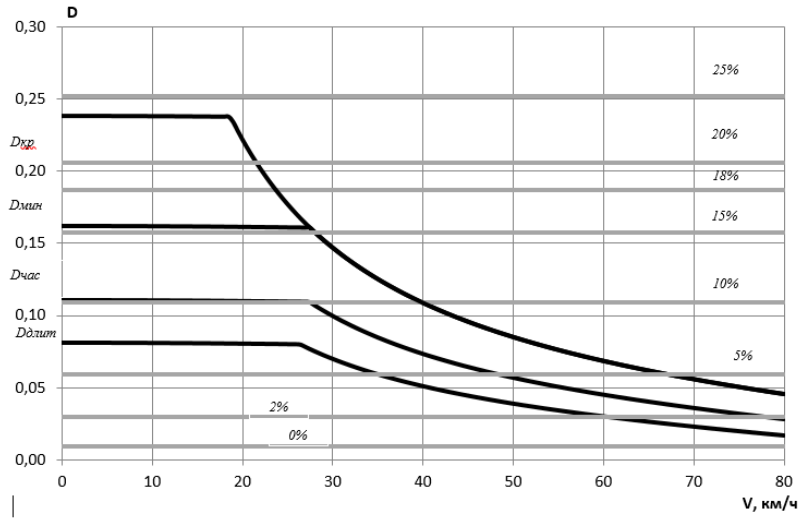


Рисунок ¶109 – Динамический фактор

Максимальный угол преодолеваемого подъема в длительном режиме 7 % возможная скорость движения до 34,5 км/ч, в часовом режиме 10% со скоростью до 27,8 км/ч, в минутном режиме (длительность режима 5-10 мин) 15% со скоростью до 27,8 км/ч, в кратковременном режиме 23 % со скоростью до 23,5 км/ч. Требуемые скорости движения, а также максимальные кинематически возможные, достижимы на ровной (без уклона) дороге с асфальтобетонным покрытием. Динамические кривые лежат выше кривой сопротивления качению.

При уклоне дороги 2% (естественный эквивалентный уклон) максимально достижимая скорость 62 км/ч в длительном режиме и 76 км/ч в часовом режиме. В остальных режимах скорость достижима.

Максимальная сила тяги по сцеплению определяется по формуле (86):

$$P_{\varphi} = \varphi_{max} \cdot G_{\text{сц}}, \qquad ¶(86)$$

где, φ_{max} – максимальный коэффициент сцепления ведущих колес с дорогой принимаем $\varphi_{max} = 0{,}6$ согласно [126], $G_{сц}$ – сцепной вес приходящийся на ведущую ось транспортного средства, Н, определяется по формуле (87):

$$G_{\text{сц}} = g \cdot \text{М}_{\text{сц}}, \qquad ¶(87)$$

При движении без буксования необходимо выполнение следующего условия $P_{\varphi} \geq P_{\text{тяг}}$,где $P_{тяг} = P_{т\ кр}$.

3.2.13 Расчет характеристики разгона

Разгонную характеристику определяем в двух режимах работы тягового электрического привода, в часовом и в минутном режиме (длительность 5-10 минут), как наиболее продолжительных. В данных режимах имеется возможность пренебречь температурным состоянием компонентов привода.

Пиковый режим работы привода рассматривать нецелесообразно, так как он имеет малую продолжительность и будет влиять на разгонные характеристики лишь на начальных этапах разгона. Основным режимом работы тягового электрического привода при разгоне будет режим длительных перегрузок (с возможностью длительности 5-10 мин). Разгоны по времени не будут превышать данной длительности. Определение разгонных характеристик в режиме часовой мощности ведется для оценки изменения динамики разгона при перегреве привода.

Процесс разгона представляем состоящим из элементарных участков, на протяжении которых движение транспортного средства считаем равноускоренным.

Ускорение на элементарном рассматриваемом участке определяется по формуле (88):

$$a = \frac{g}{\delta}(D - f), \qquad (88)$$

где, δ – коэффициент вращающихся масс транспортного средства приведенных к оси колеса, D – динамический фактор транспортного средства на рассматриваемом элементарном участке, f – коэффициент сопротивления качению, принимаем $\delta = 1{,}2$ согласно [127].

Время разгона на элементарном участке разгона определяется по формуле (89):

$$\Delta t_{\text{разг } i} = \frac{\Delta v}{a_{\text{ср}}}, \qquad (89)$$

где, Δv – приращение скорости на элементарном участке разгона, м/с, $a_{ср}$ – среднее значение ускорения на элементарном участке разгона, м/с^2

Время разгона определяется по формуле (90):

$$t_{\text{разг}} = \sum_0^i \Delta t_{\text{разг } i}, \qquad (90)$$

где, $t_{разг}$ – время разгона в конце предыдущего элементарного участка, с; $\Delta t_{разг\ i}$ - длительность элементарного рассматриваемого участка, с;

Приращение пути на элементарном рассматриваемом участке разгона определяется по формуле (91):

$$\Delta S_{\text{разг}\ i} = \Delta t_{\text{разг}\ i} v_{\text{ср}}, \qquad (91)$$

где, $v_{ср}$ – средняя скорость на элементарном рассматриваемом участке разгона, м/с

Путь разгона определяется по формуле (92):

$$S_{\text{разг}} = \sum_0^i \Delta S_{\text{разг}\ i}, \qquad (92)$$

где, $S_{разг}$ – путь разгона, м; $\Delta S_{разг\ i}$ – путь, пройденный на элементарном рассматриваемом участке, м;

Результаты расчетов представлены в таблицах 22 и 23.

Таблица 22 – Разгонная характеристика ТС в часовом режиме

Парам.	Значение								
v, км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70	80
a, м/с^2	0,825	0,823	0,82	0,736	0,52	0,385	0,288	0,212	0,149
t, с	0	3,37	6,75	10,2	14,73	20,98	29,34	40,556	56,12
S, м	0	4,68	18,77	42,77	82,24	165,69	293,98	497,4	822,83

Таблица 23 – Разгонная характеристика транспортного средства в режиме длительностью 5-10 мин (минутный)

Парам.	Значение								
v, км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70	80
a, м/с^2	1,25	1,244	1,241	1,123	0,811	0,62	0,483	0,379	0,295
t, с	0	2,23	4,47	6,74	9,68	13,62	18,73	25,2	33,55
S, м	0	3,1	12,4	28,22	57,02	106,6	184,88	302,73	476,4

На рисунках 110 и 111 представлены графики времени и пути разгона.

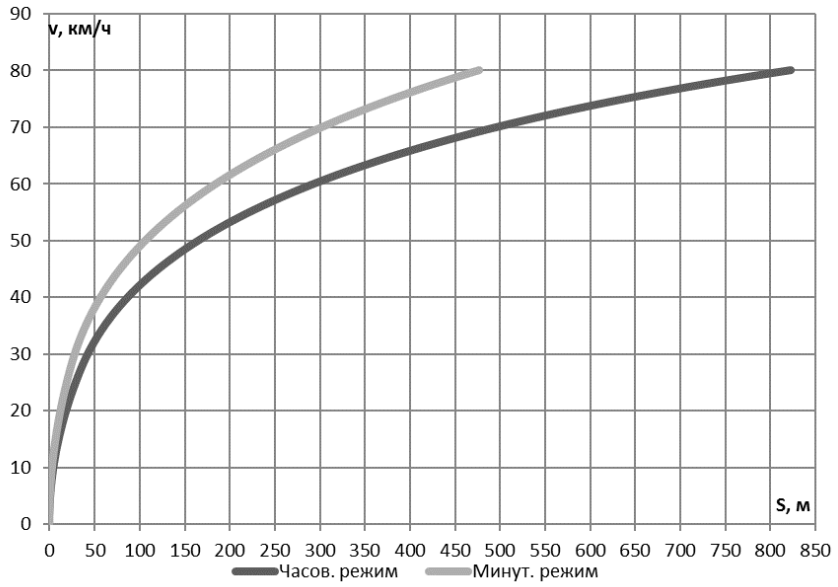


Рисунок ¶110 – Путь разгона

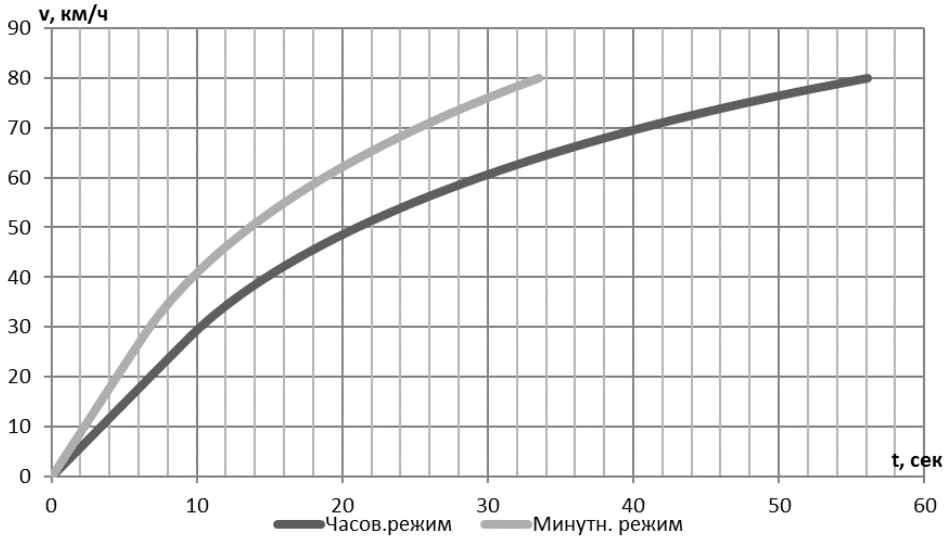


Рисунок ¶111 – Время разгона

3.2.14 Расчет тормозной характеристики

Расчет тормозной характеристики ведем из условия, что транспортное средство осуществляет торможение с помощью электродинамического тормоза, путем перевода ТЭД в генераторный режим. В данном случае электромашина работает в режиме кратковременной перегрузки. Можно выделить 2 режима электродинамического торможения:

- в режиме продолжительностью 5-10 мин;

- длительный режим торможения;
- кратковременный (пиковый), до полной остановки.

Замедляющая сила на колесе определяется по формуле (93):

$$\text{Р}_{\text{торм}} = \frac{2\text{М}_{\text{торм}}\eta_{\text{тр}}U_{\text{тр}}}{R_{\text{к}}}, \quad (93)$$

где, $M_{тром}$ – тормозной момент на выходном валу двигателя, Н·м; а $M_{торм} = M_{кр}$, где, $M_{кр}$ – крутящий момент на оси ведущих колес, Н·м.

Динамический фактор при торможении определяем по формуле (94):

$$D_{\text{торм}} = \frac{(\text{Р}_{\text{том}} + R_{\text{в}})}{G}, \quad (94)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 24.

Таблица 24 – Тормозная характеристика

Парам.	Значение								
v, км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$P_{торм\ крат}$, Н	44348,97	44348,97	41489,28	27659,52	20744,64	16595,71	13829,76	11854,08	10372,32
$P_{торм\ длит}$, Н	30175,58	30175,58	30175,58	27659,52	20744,64	16595,71	13829,76	11854,08	10372,32
$D_{торм\ крат}$	0,303	0,303	0,284	0,191	0,145	0,118	0,101	0,091	0,0833
$D_{торм\ длит}$	0,206	0,206	0,206	0,191	0,145	0,118	0,101	0,091	0,0833

где $P_{торм.крат}$ – тормозная сила на ведущих колесах в кратковременном режиме торможения; $P_{торм.длит}$ – тормозная сила на ведущих колесах в длительном режиме торможения; $D_{торм.крат}$ – динамический фактор при кратковременном торможении; $D_{торм.длит}$ – динамический фактор при длительном режиме торможения.

Замедление определяется по формуле (95):

$$a_{\text{торм}} = \frac{g}{\delta}\left(D_{\text{торм}} + f\right). \quad (95)$$

Время замедления на элементарном участке торможения определяется по формуле (96):

$$\Delta t_{\text{торм } i} = \frac{\Delta v}{a_{\text{торм.ср}}}. \quad (96)$$

где, Δv – уменьшение скорости на элементарном участке разгона, м/с; $a_{ср}$ – среднее значение замедления на элементарном участке торможения, м/с^2.

Время торможения определяется по формуле (97):

$$t_{\text{торм}} = \sum_0^i \Delta t_{\text{ торм } i}, \quad (97)$$

где, $\Delta t_{торм\ i}$ - длительность элементарного рассматриваемого участка, с;

Приращение пути на элементарном рассматриваемом участке торможения определяется по формуле (98):

$$\Delta S_{\text{торм } i} = \Delta t_{\text{торм } i} v_{\text{ср}}, \quad (98)$$

где, $v_{ср}$ – средняя скорость на элементарном рассматриваемом участке торможения, м/с.

Путь торможения определяется по формуле (99):

$$S_{\text{торм}} = \sum_0^i \Delta S_{\text{торм } i}, \quad (99)$$

где, ΔS_i – путь, пройденный на элементарном рассматриваемом участке, м;

Результаты расчетов представлены в таблицах 25 и 26.

Таблица 25 – Характеристика торможения в кратковременном (пиковом) режиме

Парам.	Значение								
v, км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$a_{торм}$, м/с^2	-2,022	-2,024	-1,9	-1,302	-1,01	-0,838	-0,73	-0,661	-0,615
$t_{торм}$, с	0	1,373	2,75	4,55	6,99	10,05	13,61	17,62	21,98
$S_{торм}$, м	0	1,91	7,65	20,31	44,26	82,41	136,99	209,52	300,6

Таблица 26 – Характеристика торможения в длительном режиме

Парам.	Значение								
v, км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$a_{торм}$, м/с^2	-1,401	-1,402	-1,401	-1,302	-1,0	-0,838	-0,73	-0,661	-0,615
$t_{торм}$, с	0	1,982	3,96	5,95	8,4	11,44	15,01	19,02	23,39
$S_{торм}$, м	0	2,75	10,99	24,85	48,8	86,95	141,54	214,06	305,15

Из результатов расчетов видно, что система электродинамического торможения не имеет возможности обеспечить режим экстренного торможения, так как не оказывает требуемых значений замедления. В данном случае требует включение рабочей пневматической тормозной системы в работу.

Система электродинамического торможения будет обеспечивать служебные торможения с замедлением до 2,024 м/с^2 при кратковременных, длительностью до 10 сек подтормаживаниях и замедление до 1,402 м/с^2 при торможении длительностью до 5-10 мин (движение накатом).

Процессы торможения при кратковременном режиме и длительном режиме отличаются лишь в начальный момент времени и на малых скоростях движения. В этом случае двигатель имеет возможность принять кратковременную перегрузку. В дальнейшем нагрузка на двигатель снижается из-за температурного состояния агрегата. На скоростях выше 30 км/ч процесс торможения идентичен.

На рисунках 112, 113 представлены графики времени и пути торможения в кратковременном режиме.

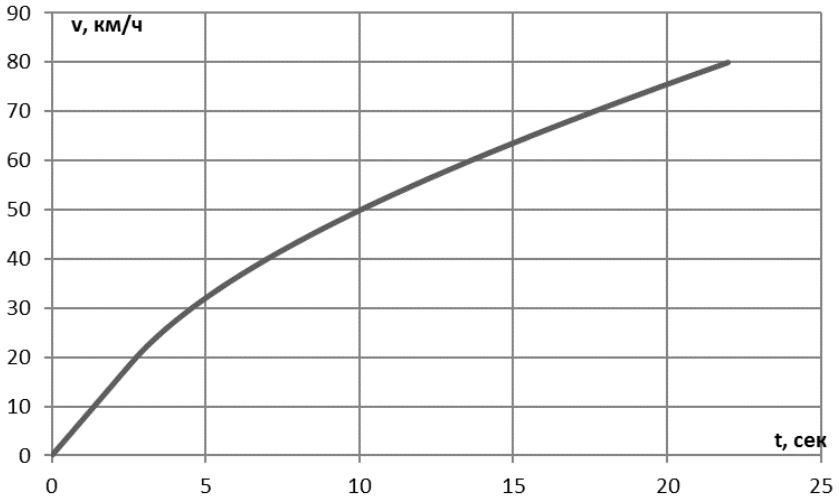


Рисунок ¶112 – Время торможения в кратковременном режиме

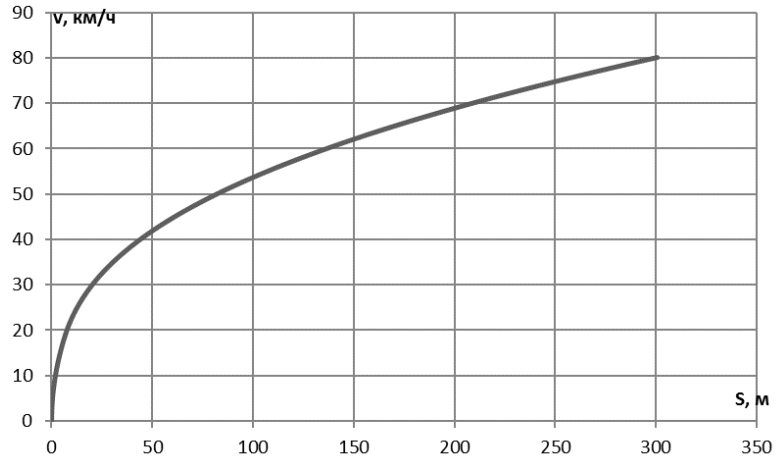


Рисунок ¶113 – Путь торможения в кратковременном режиме

3.2.15 Расчет энергетического баланса и предварительные расчеты СТ

Расчет расхода энергии при движении транспортного средства проводится при загрузке 50 %. При движении на маршруте ЭАТС двигается от начала маршрута пустой, постепенно загружаясь, предположительно до 100 %, и в конце маршрута также становится пустым. Таким образом, в среднем справедливо допущение до 50% постоянной загрузки. Влияние встречного ветра не учитываем, исходя из допущения, что часть маршрута ветра является дополнительным сопротивлением, а часть маршрута будет являться дополнительной движущей силой.

Мощность двигателя, затрачиваемая на преодоление сил сопротивления движению, при равномерном движении определяется по формуле (100):

$$N_{\text{сопр}} = \frac{(R_{\text{кач}} + R_{\text{в}})v_{\text{ср}}}{\eta_{\text{тр}}}, \qquad ¶100)$$

где, $R_{\text{кач}}$ – сила сопротивления качению, ($R_{\text{кач } 50\%}$ - при загрузке 50%), Н; $R_{\text{в}}$ – сила сопротивления воздуха, Н; $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения на элементарном рассматриваемом участке, м/с; $\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии.

Динамический фактор при разгоне с 50% загрузкой определяется по формуле (101)

$$D_{50\%} = \frac{(P_{\text{т мин}} - R_{\text{в}})}{G_{50\%}}, \qquad ¶101)$$

где, $G_{50\%}$ - вес транспортного средства с учетом 50% загрузки, Н, определяется по формуле (102)

$$G_{50\%} = g\mathrm{M}_{50\%}, \qquad (102)$$

где, $\mathrm{M}_{50\%}$ - масса транспортного средства с учетом 50% загрузки, кг, определяется по формуле . (103)

$$\mathrm{M}_{50\%} = \mathrm{M}_{\text{снар}} + 0{,}5(\mathrm{M}_{\text{полн}} - \mathrm{M}_{\text{снар}}). \qquad (103)$$

Параметры процесса разгона транспортного средства определяются аналогично параметрам, приведенным выше по формулам (95) – (99).

Потребная сила тяги, развиваемая двигателем для осуществления разгона определяется по формуле (104):

$$P_{\text{т разг}} = a\delta M_{50\%} + R_{\text{в}} + R_{\text{кач } 50\%}. \qquad (104)$$

Мощность потребной силы тяги для разгона (силы сопротивления разгону), приведенной к валу электродвигателей, определяется по формуле (105):

$$N_{\text{т разг}} = \frac{\mathrm{P}_{\text{т разг}} v}{\eta_{\text{тр}}}. \qquad (105)$$

Приращение энергии, затрачиваемой на разгон на рассматриваемом элементарном участке, определяется по формуле (106):

$$\mathrm{E}_{\text{разг } i} = \frac{N_{\text{т разг}} \Delta t_i}{\eta_{\text{ТЭД}} \eta_{\text{СП}}}. \qquad (106)$$

Расход энергии на разгон определяется по формуле (107):

$$E_{\text{разг}} = \sum_0^i \mathrm{E}_{\text{разг } i}. \qquad (107)$$

На рисунке 114 показан график зависимости расхода энергии от скорости, до которой осуществляется разгон

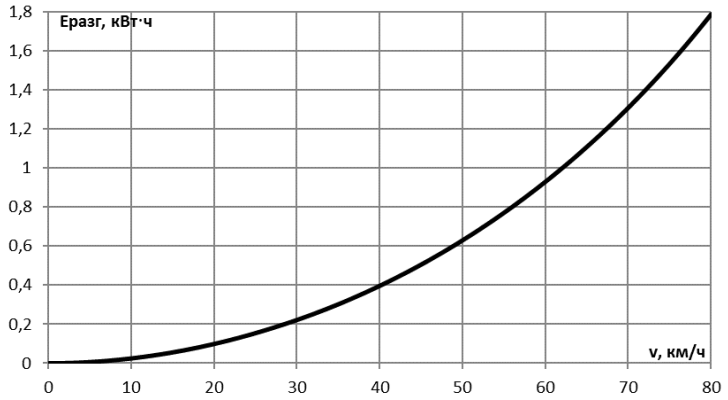


Рисунок ¶114 – График зависимости расхода энергии от скорости при разгоне

Параметры процесса замедления или торможения транспортного средства определяются аналогично параметрам, приведенным выше по формулам (93) –(99).

При движении транспортного средства по расчетному циклу движения рассматриваем режимы кратковременного торможения, имеющие возможность длиться до 5-10 мин. Пиковый режим торможения для исключения влияния температурного состояния двигателя не учитываем, так как не представляется возможным точно спрогнозировать возможность такой перегрузи двигателя из-за температурного состояния двигателя. Принимается допущение, что вся мощность рекуперации принимается тяговой аккумуляторной батареей.

Мощность рекуперации при торможении (замедлении) определяется по формуле (108):

$$N_{\text{торм}} = \text{P}_{\text{торм.крат}}\eta_{\text{тр}}v, \qquad ¶108)$$

Приращение энергии, возвращаемой в тяговую аккумуляторную батарею в процессе торможения, вычисляется по формуле (109):

$$\text{E}_{\text{торм } i} = N_{\text{торм}}t_i\eta_{\text{тэд}}\eta_{\text{сп}}, \qquad ¶109)$$

Энергия, возвращаемая в тяговую аккумуляторную батарею, определяется по формуле (110):

$$\text{E}_{\text{торм}} = \sum_0^i E_{\text{торм } i}, \qquad ¶110)$$

На рисунке 115 показан график зависимости энергии, возвращаемой при торможении от скорости, с которой происходит торможение.

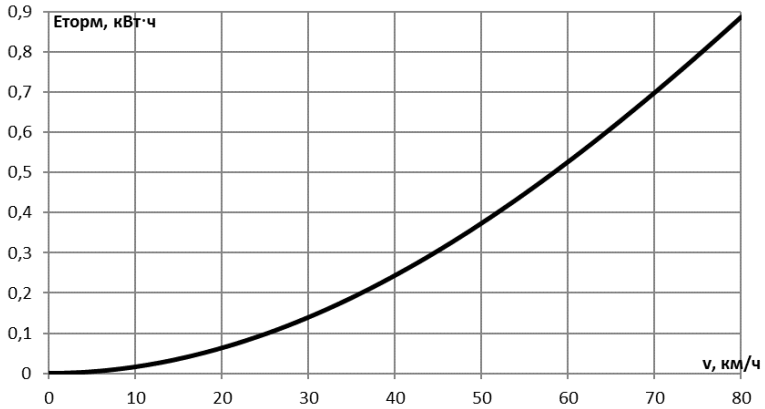


Рисунок ¶115 – График зависимости энергии, возвращаемой при торможении от скорости, с которой происходит торможение

Удельный расход энергии на движение определяется по формуле (111):

$$E_{уд.движ} = \frac{E_ц}{S_ц}; \qquad ¶(111)$$

где, $E_ц$ – расход энергии при движении согласно расчетного цикла, кВт·ч, $S_ц$ – путь, пройденный за расчетный цикл движения, км.

При движении транспортного средства имеет место расход энергии на привод вспомогательных агрегатов. К таковым можно отнести:

Электродвигатель насоса гидравлического усилителя руля, электродвигатель компрессора пневматической системы, электродвигатели вентиляторов систем термостатирования, питание климатической установки, освещение, насосы.

Принимаем номинальное значение разрядного напряжения звена постоянного тока 650 В, что укладывается в допустимый диапазон, согласно спецификации на тяговый привод.

Сила тока на рассматриваемом участке движения определяется по формуле (112):

$$I_{тягаi} = \frac{N_{движi}}{U_{ном}}, \qquad ¶(112)$$

где, $N_{движ}$ – значение мощности, требуемой на конкретном этапе движения по циклу на тягу, кВт; $U_{ном}$ – номинальное напряжение звена постоянного тока, В

$$I_{действi} = I_{тягаi} + I_{соб.нужд}, \qquad ¶(113)$$

где, $I_{соб.нужды}$ – ток тяговой батареи, затрачиваемый на привод вспомогательных агрегатов собственных нужд:

$$I_{\text{соб.нужд}} = \frac{N_{\text{соб.нужд}}}{U_{\text{ном}}}. \quad ¶(114)$$

Эквивалентное значение силы тока (среднеквадратичный ток) тягового электродвигателя определяется по формуле (115):

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{I_1^2 \Delta t_1 + \cdots + I_i^2 \Delta t_i}{\Delta t_1 + \cdots + \Delta t_i + t_c}}, \quad ¶(115)$$

где, I_1, I_i – значение силы тока на рассматриваемом участке цикла, А,

Δt_1, Δt_i – продолжительность рассматриваемого участка, с,

t_c – время стоянки, с.

Средний ток определяется по формуле (116):

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_1\ \Delta t_1 + \cdots + I_i\ \Delta t_i}{\Delta t_1 + \cdots + \Delta t_i}. \quad ¶(116)$$

Ток тяговой аккумуляторной батареи, затрачиваемый на привод вспомогательных агрегатов:

Теплота, выделяемая при движении в тяговой аккумуляторной батареи определяется по формуле (117):

$$Q_{\text{сум}} \sum_1^i Q_i, \quad ¶(117)$$

где $Q_{сум}$ – теплота, выделившаяся на батарее при движении, кДж; Q_i – теплота, выделившаяся при движении на рассматриваемом участке цикла, кДж, определяется по формуле [128]:

$$Q_i = I_{\text{действ}\ i}^2 R \Delta t_i, \quad ¶(118)$$

где R_i – внутренне сопротивление батареи, Ом

$$R = r_0 \frac{s}{p}, \quad ¶(119)$$

где r_0 – внутреннее сопротивление аккумулятора, Ом, s – количество аккумуляторов в контейнере, шт.

$$s = \frac{U_{\text{ном}}}{u_{\text{ном}}}, \quad ¶(120)$$

где $u_{ном}$ – среднее разрядное напряжение ЛИА, В

принимаем, $u_{ном}$ = 3,2 В, тогда

$$s = \frac{650}{3{,}2} = 203{,}13 \text{ шт}$$

Принимаем s = 204 аккумулятора.

Уточненное значение номинального напряжения тяговой аккумуляторной батареи равно $U_{ном}$ = 204·3,2 = 652.8 В.

p – количество параллельных ветвей (контейнеров) в тяговой аккумуляторной батарее, шт.

Сопротивление ЛИА принимается как функция, зависимая от степени заряженности и температуры ЛИА. Предоставлена данная функция производителем ТАБ.

Тепловая мощность, нагревающая батарею, равна

$$N_{\text{т}} = I_{\text{экв}\,i}^2 R. \qquad (121)$$

При расчетах аналитическим методом [129] использовалось уравнение баланса энергии:

$$q_c = h_c \cdot A \cdot \Delta T_2 = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T_1, \qquad (122)$$

где, q_c – тепловой поток, поступающий в канал т.е. поступающий от ЛИА; h_c – коэффициент теплопередачи; A = 2b ·L – общая площадь поверхности контакта воздуха с теплопередающей поверхностью; ΔT_2 – разность температуры между поверхностью ТАБ(T_s) и средней температурой потока; $\dot{m}$ – массовый расход воздуха; C_p – удельная теплоемкость; ΔT_1 – изменение температуры потока между входом в канал и выходом из него.

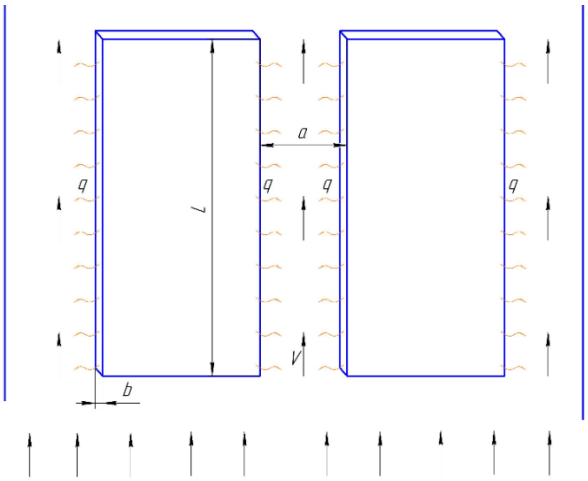


Рисунок 116 –Теплообмен ТАБ с окружающей средой

Массовый расход воздуха через канал равен:

$$\dot{m} = \rho \cdot B \cdot V\ , \qquad (123)$$

где, ρ – плотность воздуха; B = a · b – площадь канала; V – средняя скорость движения воздуха.

График изменения средней скорости потока воздуха (который обдувает ТАБ) в зависимости от скорости движения ЭАТС изображен на рисунке 117, данные взяты из исследования в п. 3.2.8 [130].

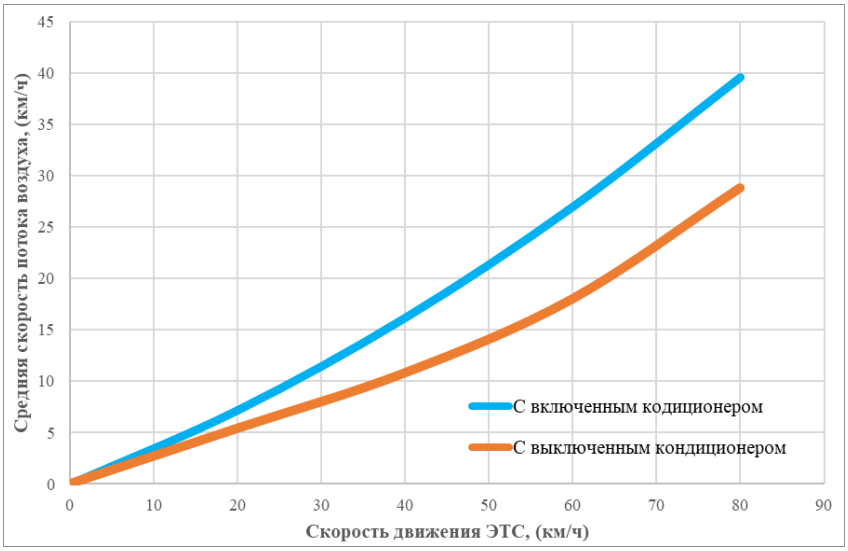


Рисунок 117 – График изменения скорости воздушных потоков в зависимости от скорости движения ЭАТС

Коэффициент теплопередачи рассчитывается по формуле(124) [129]:

$$h_c = \frac{k \cdot Nu}{D_h}, \qquad (124)$$

где, k – коэффициент теплопроводности воздуха; Nu– число Нуссельта; D_h – гидравлический диаметр.

Число Нуссельта для ламинарного движения вычисляется по формуле [131]:

$$Nu_{\text{лам}} = 1{,}86(Re \cdot Pr)^{0.33} \left(\frac{D_h}{L}\right)^{0.33} \left(\frac{\mu_b}{\mu_s}\right)^{0.33}, \qquad (125)$$

а для турбулентного движения – по формуле:

$$Nu_{\text{турб}} = 0{,}023 Re^{0.8} Pr^{0.3}, \qquad (126)$$

где Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля; D_h –гидравлический диаметр; L – длина канала; μ_b, μ_s –коэффициенты динамической вязкости воздуха при разных температурах (+20 °C и +50 °C) соответственно.

Число Рейнольдса вычисляется по формуле:

$$Re = \frac{V \cdot D_h}{\nu}, \quad (127)$$

где V – средняя скорость движения воздуха; ν –коэффициент кинетической вязкости воздуха. Критическим числом Рейнольдса является значение $Re_{кр}$≈2300 т.е. Re>2300 турбулентный поток, а Re<2300 ламинарный поток [111].

Гидравлический диаметр вычисляется по формуле [132]:

$$D_h = 2\left(\frac{a \cdot b}{a+b}\right), \quad (128)$$

ИМ описывает теплоперенос от ЛИА к конструктивным элементам ТАБ, а далее к окружающую среду.

$$\Delta T_2 = T_s - \frac{T_{b1} - T_{b2}}{2} = \frac{q_c}{h_c \cdot A}, \quad (129)$$

$$\Delta T_1 = T_{b2} - T_{b1} = \frac{q_c}{\dot{m} \cdot C_p}, \quad (130)$$

где, T_s – средняя температура стенки ЛИА; T_{b1} – температура потока на входе канала; T_{b2} – температура потока на выходе из него.

$$T_s = \frac{q_c}{h_c \cdot A} + \frac{T_{b1} - T_{b2}}{2}, \quad (131)$$

3.3 Расчет системы термостатирования

3.3.1 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. Температура теплоносителя в режиме нагрева должна быть не менее 25 °C, а в режиме охлаждения не более 19 °C. Мощность охлаждения должна быть не менее 7 и 14 кВт тепловой мощности охлаждения и нагрева соответственно. На рисунке 118 изображена общая гидравлическая схема

подключения, а на рисунке 119 приведена гидравлическая схема подключения ТАБ — они соединяются по схеме петли Тихельмана. Основные технические характеристики приведены в таблице 27.

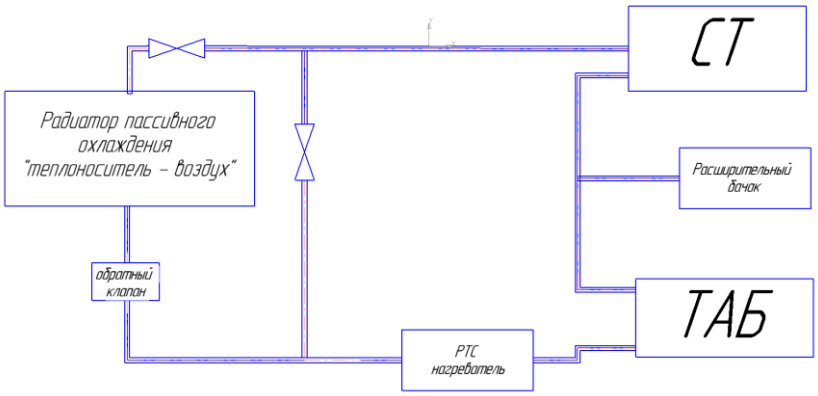
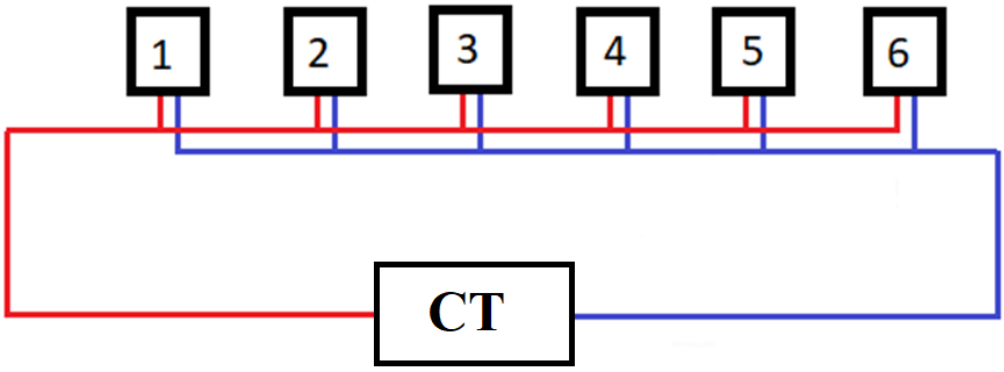


Рисунок ¶18 – Общая гидравлическая схема СТ ТАБ



Рисунок¶119 – Гидравлическая схема подключения ТАБ

Таблица¶27 – Технические характеристики СТ ТАБ

№ п/п	Параметр	Ед. изм	Значение	Примечание
Мощностные параметры				
1	Максимальная мощность охлаждения	кВт	7/3,8	Тепловая/ электрическая
2	Максимальная мощность нагрева	кВт	14/14	
Входные параметры HV				
3	Диапазон входного напряжения	В	520 - 750	

Продолжение таблицы 27

Входные параметры LV				
4	Номинальное напряжение питания	В	24	
5	Диапазон напряжения	В	От 16 до 32	
Температуры при эксплуатации				
6	Рабочая температура воздуха при эксплуатации	°С	От –40 до +55	
7	Предельная рабочая температура воздуха при эксплуатации	°С	От –50 до +60	
Прочие				
8	Цвет корпуса	-	белый или серебристо-белый цвет	-
9	Степень защиты	IP	65DH	по ГОСТ 14254-2015 (IEC 60529:2013)
10	Масса СТ	кг	50	
Требования к гидравлической части системы				
11	Номинальная производительность насоса, не менее	л/мин	45	

СТ устанавливает температуру теплоносителя в зависимости от температуры ЛИА. Система термостатирования имеет два уровня функционирования:

Первый уровень:

Если максимальная температура ЛИА превышает 25 ° С, то система термостатирования должна обеспечивать выходную температуру теплоносителя 21 ° С, пока максимальная температура ЛИА не опустится ниже 21 ° С.

Если минимальная температура ЛИА ниже 19 ° С, то система термостатирования должна обеспечивать выходную температуру теплоносителя 23 ° С, пока минимальная температура ЛИА не поднимется выше 23 ° С.

Второй уровень:

Если максимальная температура ЛИА превышает 30 °С, то система термостатирования должна обеспечивать выходную температуру теплоносителя 19 ° С, пока максимальная температура ЛИА не опустится ниже 24 ° С.

Если минимальная температура ЛИА ниже 14 °С, то система термостатирования должна обеспечивать выходную температуру теплоносителя 25 ° С, пока минимальная температура ЛИА не поднимется выше 20 ° С.

Блок схема работы СТ ТАБ изображена на рисунке 120. Учитывая шкалу приведенную на рисунке 1, выбраны температуры в блок схеме с учетом погрешности датчиков ±2^0 С и инертностью тяговой батареи, для того чтобы избежать преждевременной деградации ТАБ. Переходные температуры зафиксированы и изменение их в процессе эксплуатации, требует создания системы, которая будет анализировать разные факторы эксплуатации (погоду, SoC и т.д.)

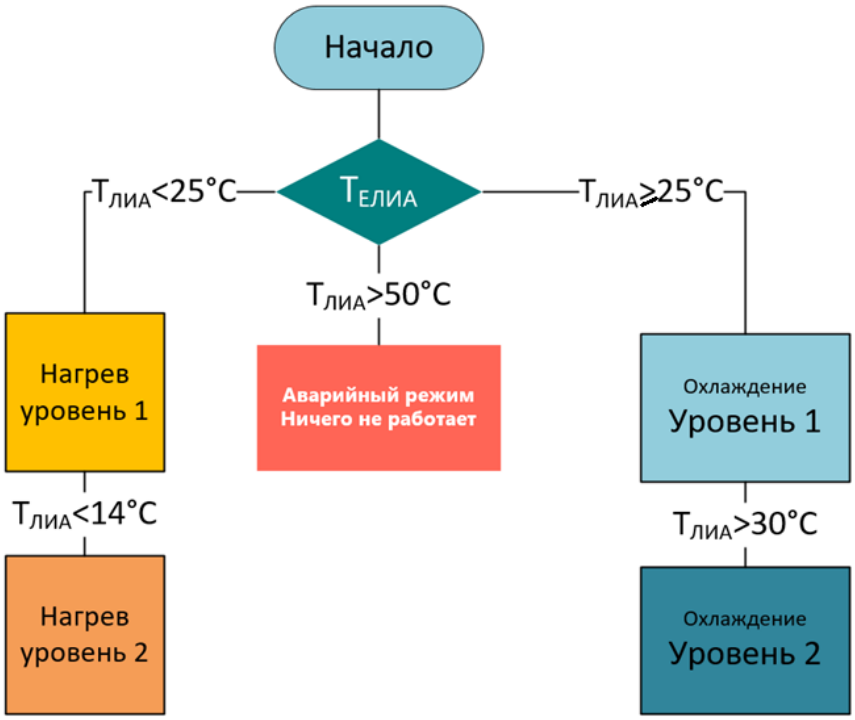


Рисунок ¶20 – Блок схема работы СТ ТАБ

Режимы работы:

1) Циркуляция теплоносителя (работает только насос и радиатор пассивного охлаждения);

2) Охлаждение (работает насос и чиллер);

3) Подогрев (работает насос и подогреватель).

3.3.2 Определение общих гидравлических потерь (в трубопроводах + ТАБ)

СТ поддерживает температуру 6 батарейных модулей аккумуляторных ячеек. *3D*-модель общего вида объекта исследования в составе установки системы термостатирования ТАБ представлена на рисунке 121.

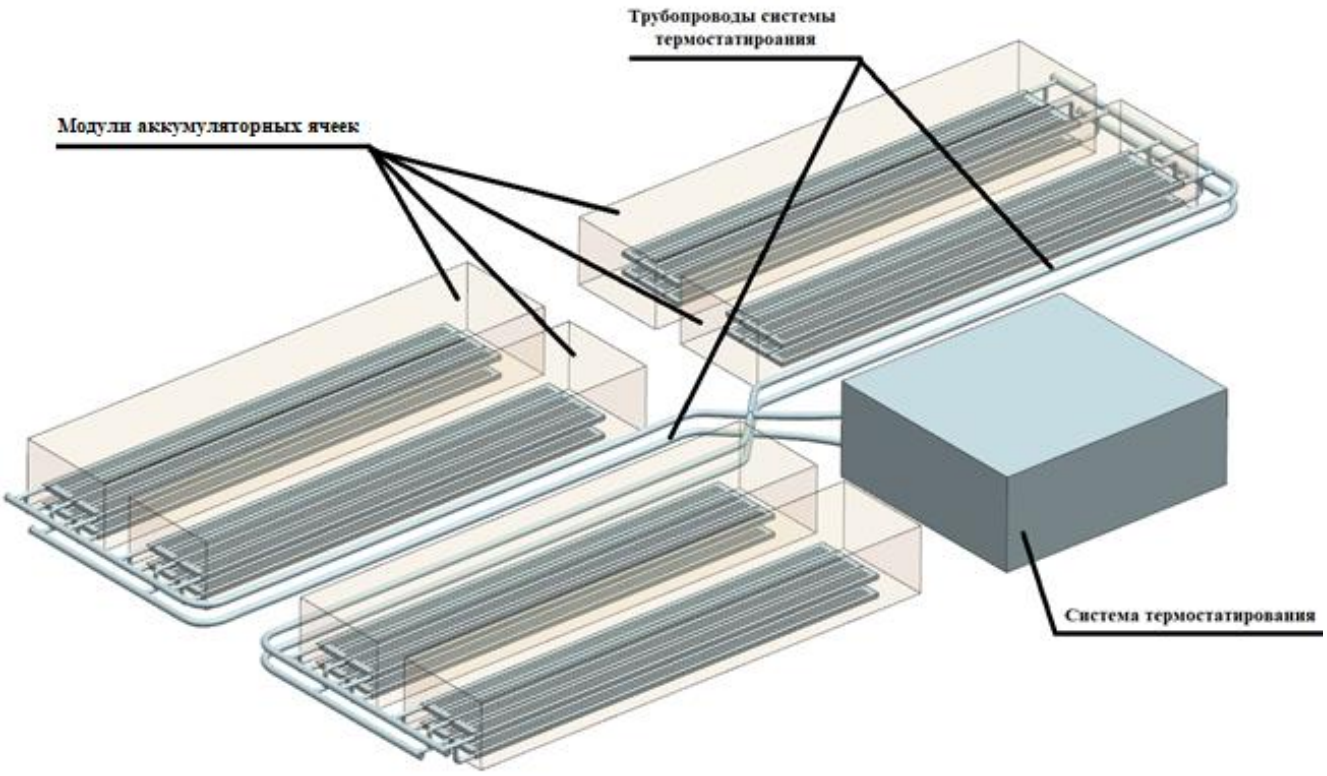


Рисунок ¶21 – *3D*-модель установки системы термостатирования батарей ЭАТС

Для моделирования потоков теплоносителя, проходящих через трубопроводы и теплообменники в компьютерной модели, на основе внутренней поверхности трубопроводов, созданы расчетные области теплоносителя изображенного на рисунке 122.

В местах соединения трубопроводов с системой термостатирования созданы входные границы расчетных областей теплоносителя на которых заданы массовый расход теплоносителя (Q_m) и его температура (T_1).

Гидравлическое сопротивление самой системы термостатированния не учитывалось и не рассчитывалось.

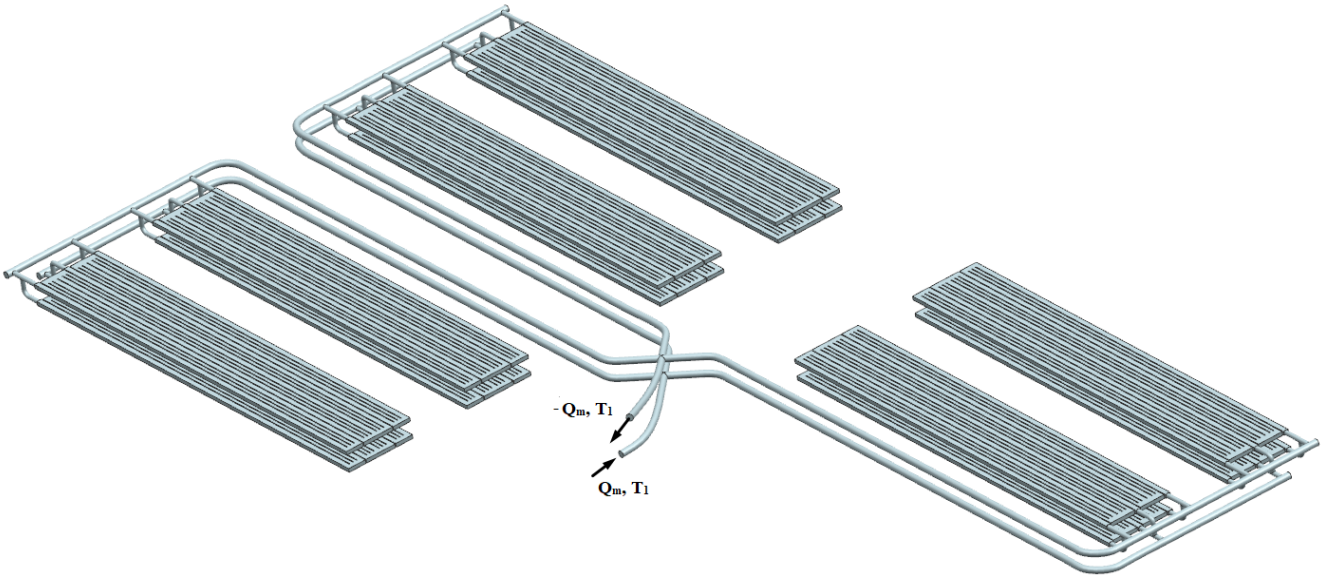


Рисунок ¶122 – Компьютерная модель трубопроводов подключённых к СТ

При проведении расчетов для вычисления гидродинамического сопротивления трубопроводов системы термостатирования, рассчитываются величины давлений на входных и выходных границах трубопровода. По разности давлений на входах и выходах определяется величина сопротивления исследуемого трубопровода [133]:

$$\Delta p = p_m - p_0, \qquad (132)$$

где Δp – сопротивления исследуемого трубопровода; p_m –давление на входной границе трубопровода, место соединения с агрегатом термостатирования; p_0 – давление на выходной границе трубопровода.

Подготовка расчётной модели осуществляется в *NX*, а расчет проводился в среде *xFlow*. В качестве охлаждающей жидкости применяется *SINTEC* Антифриз-40 ТУ 2422-047-51140047-2007, параметры, используемые при проведении расчета, представлены в таблице 28 [134]. В качестве исходных данных потока задается массовый расход, который равен 0,75 кг/с из таблицы 27.

Таблица¶28 – Параметры применяемой охлаждающей жидкости

Параметр	Значение	
	при 20°С	при 60°С
Плотность, кг/м^3	1082	1057
Динамическая вязкость, Па·с	0,00487	0,00159

Теплопроводность, Вт/м·К	0,402	0,394

На рисунке 123 представлено изменение давления на внутренней поверхности и в продольном сечении трубопровода при работе системы термостатирования.

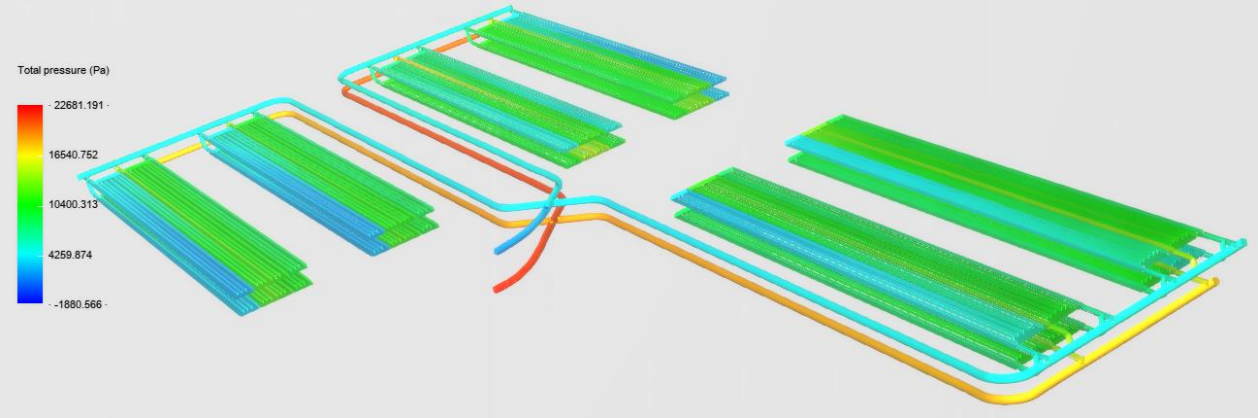


Рисунок ¶23 – Изменение давлений на внутренней поверхности трубопроводов подключённых к СТ

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 °С) составляет 24,6 кПа.

3.3.3 Описание имитационной модели системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи

На основе работ [1], [135] и [136] была сформирована имитационная математическая модель системы термостатирования. Общий вид данной модели изображен на рисунке 124. Модель можно разделить на восемь основных блоков:

1. Блок глобальных исходных данных
2. Блок системы управления и расчетов параметров системы
3. Блок ТАБ (использованы формулы (21)–(23))
4. Блок моделирования режимов работы СТ;
5. Блок моделирования набегающего потока воздуха;
6. Блок моделирования расширительного бачка

7. Блок моделирования помпы;
8. Блок вывода результатов.

Гидравлические элементы соединены собой блоками, имитирующими трубопроводы. В которых учитываются гидравлические потри приведенные в разделе 2.3 и в формулами (37)–(55).

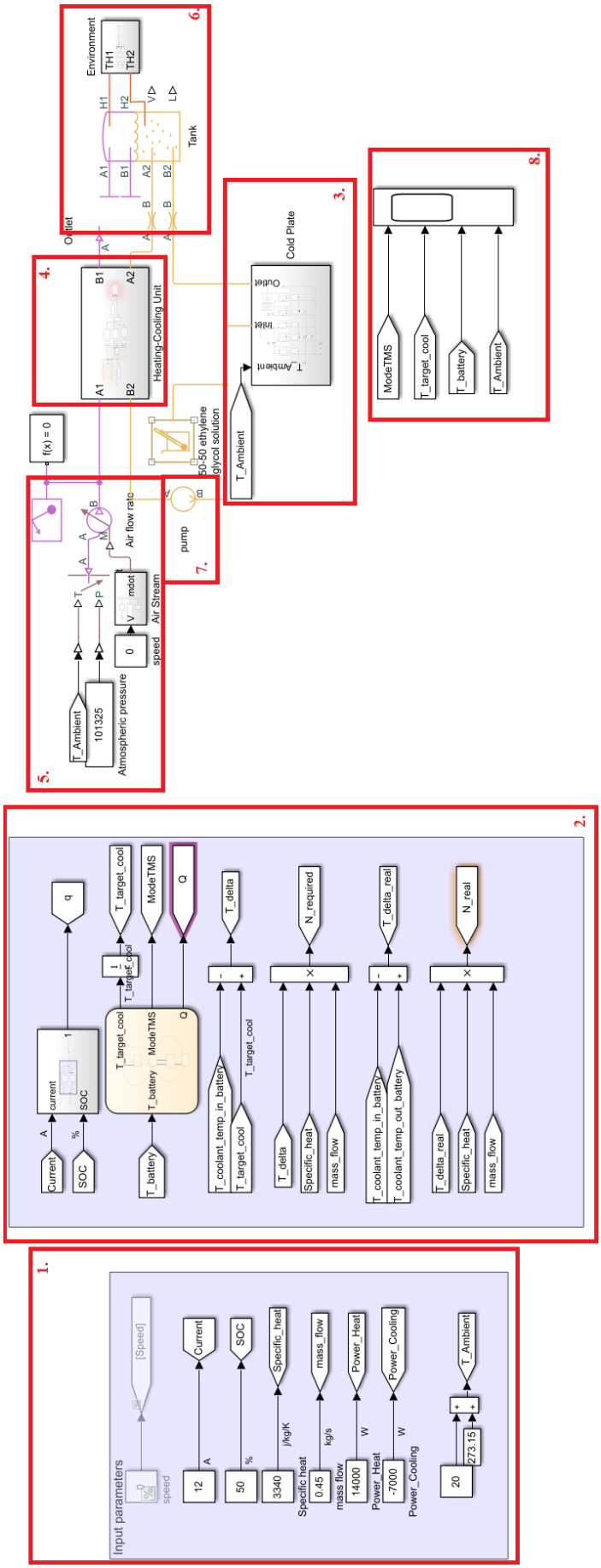


Рисунок ¶124 – Общий вид имитационной модели СТ

В блок глобальных исходных данных вводятся основные параметры СТ, а также параметры окружающей среды. Помимо глобальных исходных данных на рисунке 124 под №1, данные задаются в *Workspase* (Рабочая область) в *Matlab* представленного на рисунке 125.

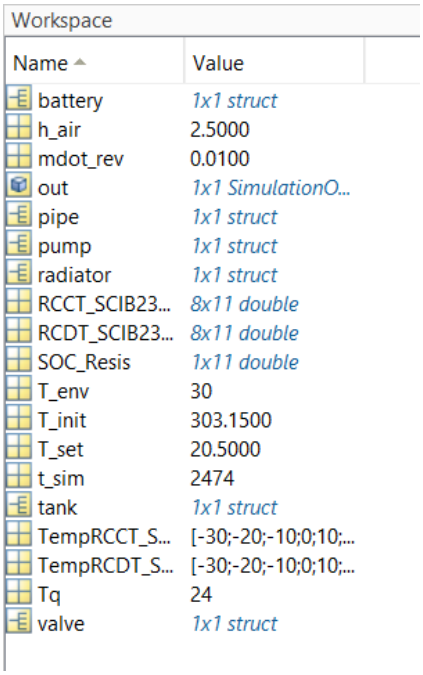


Рисунок ¶125 – Рабочая область, на которой введены дополнительные исходные данные

Все основные исходные данные компонентов СТ и окружающей среды заданы в таблице 29.

Таблица ¶29 – Основные исходные данные имитационной модели СТ

№	Параметр	Значения
1	Рабочий диапазон температур теплоносителя, °С	Не менее -40 Не более 50
2	Рабочий диапазон давления теплоносителя, атм	Не менее 0,1 Не более 5
3	Удельная теплоемкость ЛИА, Дж/(кг·°С)	1025
4	Теплопроводность ТАБ, Вт/(м·°С)	0,16
5	Тепловая мощность нагревателя, кВт	14
6	Тепловая мощность охладителя, кВт	8
Параметры насоса		
7	Номинальная производительность, л/мин	45

Продолжение таблицы 29

Параметры радиатора		
8	Общая поверхность охлаждения, м^2	6,77
9	Объём радиатора, л.	2,07
10	Лобовая поверхность остова, м^2	0,11
11	Потери давления потока теплоносителя, кПа	4,72
12	Аэродинамическое сопротивление, кПа	44,63
Параметры рубашек охлаждения внутри ТАБ		
13	Средняя площадь поперечного сечения потока, мм^2	230
14	Входной и выходной внутренний диаметр, мм	23
15	Гидравлический диаметр	15
16	Потери давления на длине, м	0,36
17	Эмпирический коэффициент потери давления	2,5

Блок под №2 на рисунке 124 отвечает за выбор режима охлаждения в соответствии с рисунком 120. Управление происходит с помощью событийно-управляемой (реактивной) системы (конечного автомата) *chart* в библиотеке *StateFlow* в *Matlab*, управление представлено на рисунке 126. Входными данными является температура ЛИА в ТАБ, а выходными значениями — целевая температура теплоносителя, актуальный режим СТ и значение управляющего сигнала(Q), который необходим для управления запорной арматурой в блоке №4.

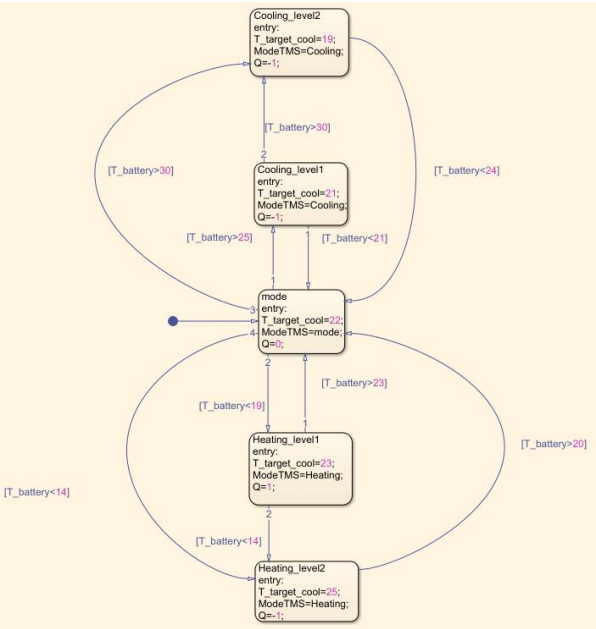


Рисунок ¶26 – Конечный автомат выбора режима СТ

В блоке №2 проводятся вычисления мощности тепловыделения ЛИА, тепловой потребной мощности СТ и актуальной мощности СТ.

Блок №3 моделирует тепловую модель ТАБ. В нем смоделированы:

- пластины охлаждения (рубашки охлаждения, рисунок 121);
- ЛИА внутри ТАБ;
- теплопроводящие пластины между ЛИА;
- датчики температуры.

На рисунке 127 представлен один из модулей аккумуляторных ячеек ТАБ. Модуль ЛИА состоит:

- пластин охлаждения (теплообменник: теплоноситель ↔ ЛИА);
- теплопроводящих пластин (которые находятся между ЛИА);
- внутреннего воздуха;
- силового каркаса;
- крышки.

Теплообмен внутри модуля осуществляется:

- кондуктивно (ЛИА → теплопроводная подложка → теплообменная пластина);
- конвективно (теплообменная пластина→ теплоноситель; корпус ЛИА и теплообменной пластины → воздух внутри модуля→ крышка модуля → внешняя среда).

Каждая тепловая модель модуля ЛИА входит в общую тепловую модель ТАБ которая изображена на рисунке 128.

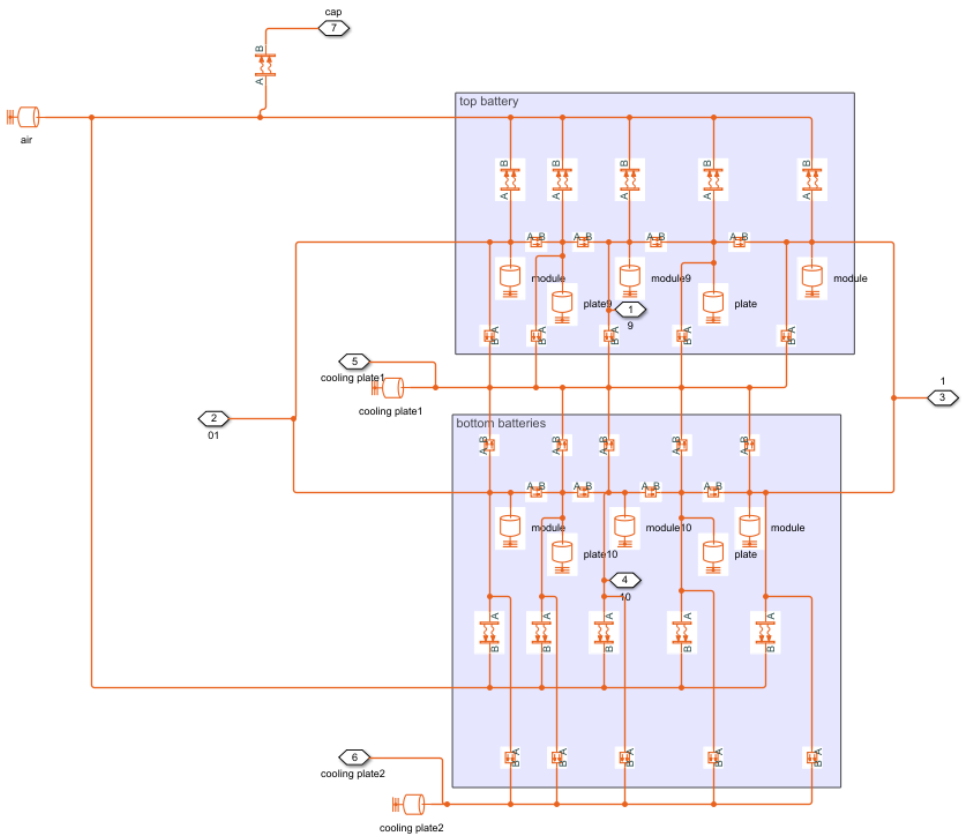


Рисунок ¶27 – Тепловая модель модуля аккумуляторных ячеек

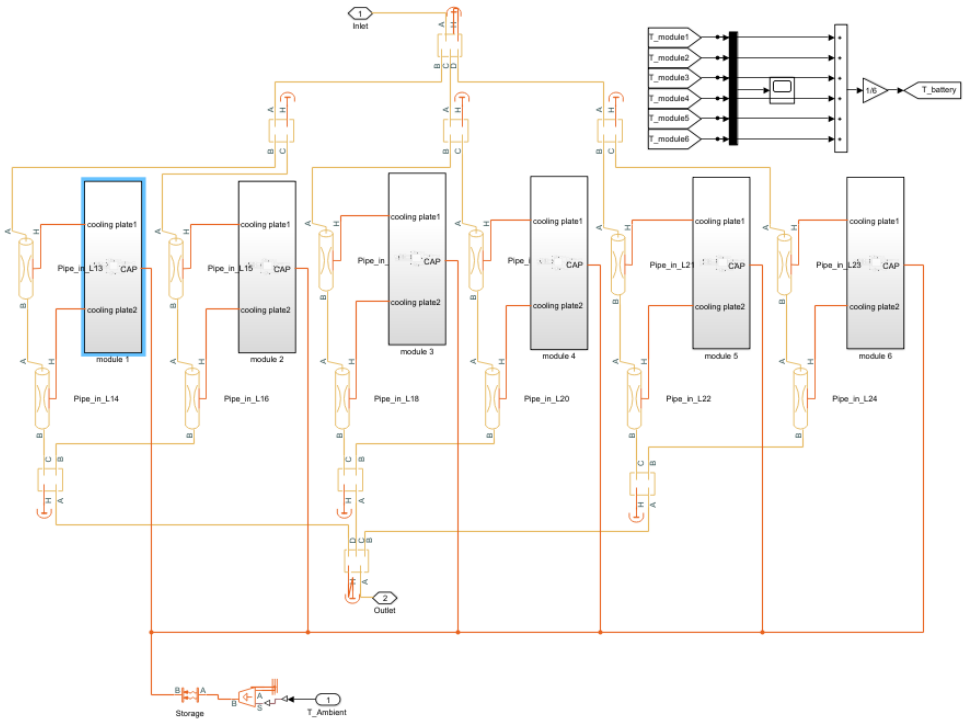


Рисунок ¶28 – Общий вид тепловой модели ТАБ

Блок №4 предназначен для моделирования режимов системы термостатирования, общий вид данного вида изображен на рисунке 129. Данная СТ, как и большинство таких систем, работает в 3 режимах: режим подогрева, режим пассивного охлаждения, режим активного охлаждения; и каждый из них изображен на рисунках 130, 132, 133, соответственно.

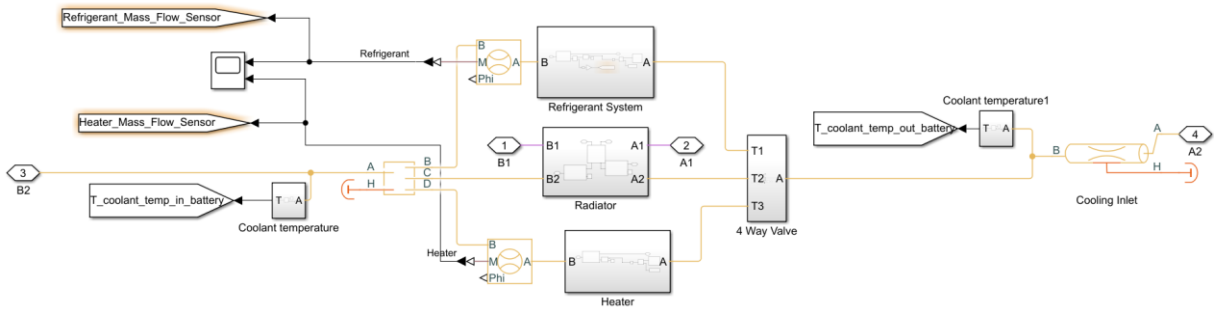
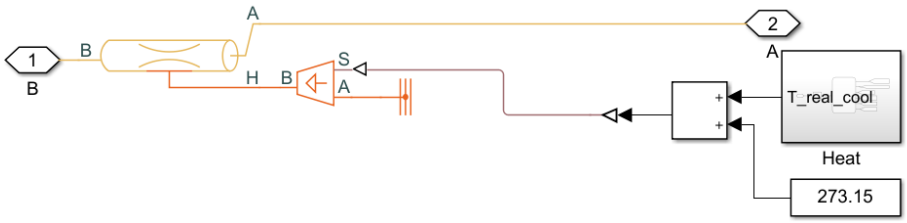


Рисунок ¶29 – Блок моделирования режимов СТ

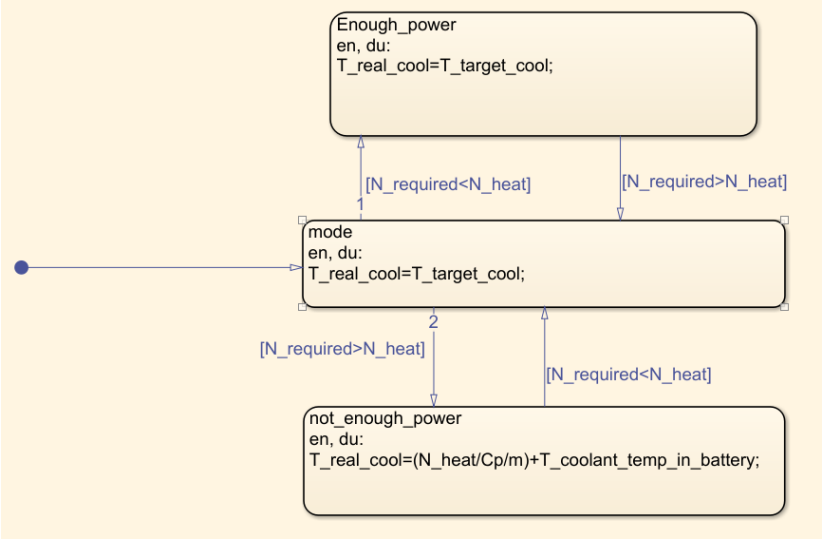


Рисунок¶30 – Подогреватель

На рисунках 131 и 134 изображены конечные автоматы режимов подогрева и активного охлаждения. Для пассивного охлаждения конечный автомат не требуется, т.к. температура теплоносителя рассчитывается исходя из принудительной конвекции, которая происходит в радиаторе. Если тепловой мощности недостаточно для обеспечения заданной температуры, то температура теплоносителя на выходе из СТ вычисляется следующим образом:

$$T_{реал.} = \frac{N_{тепл.}}{C_p \cdot \dot{m}} + T_{вх.в_СТ} \qquad ¶(133)$$

где $T_{реал.}$– температура на выходе из СТ(на входе в ТАБ), $N_{тепл.}$– максимальная тепловая мощность, C_p – удельная теплоемкость теплоносителя, $\dot{m}$ – массовый расход теплоносителя, $T_{вх.в_СТ}$ – температура теплоносителя на входе в СТ(на выходе из ТАБ).



Рисунок¶31 – Конечный автомат подогревателя

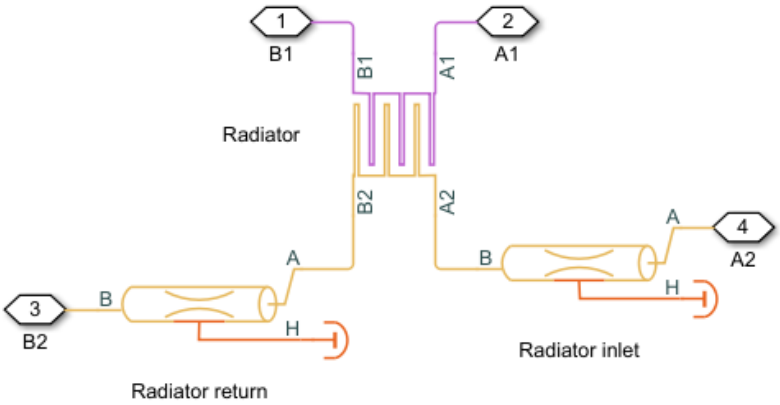


Рисунок ¶32 – Пассивное охлаждение

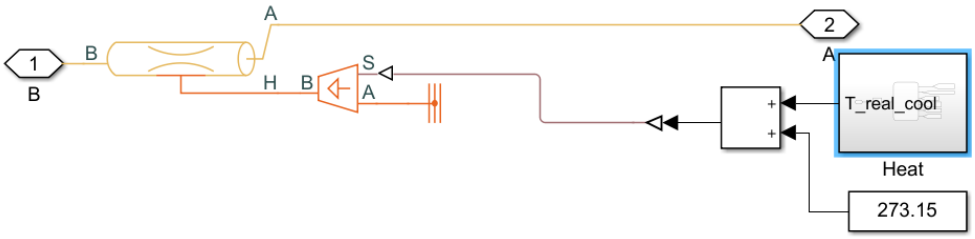


Рисунок ¶33 – Активное охлаждение

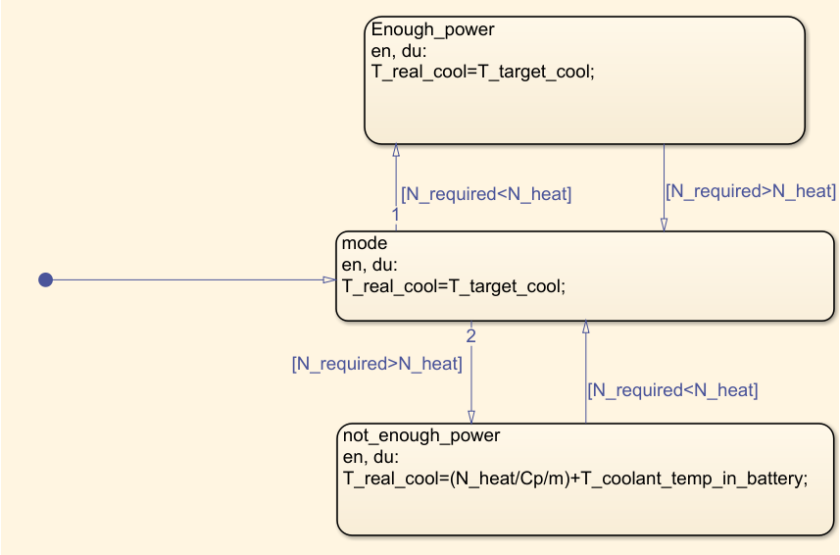
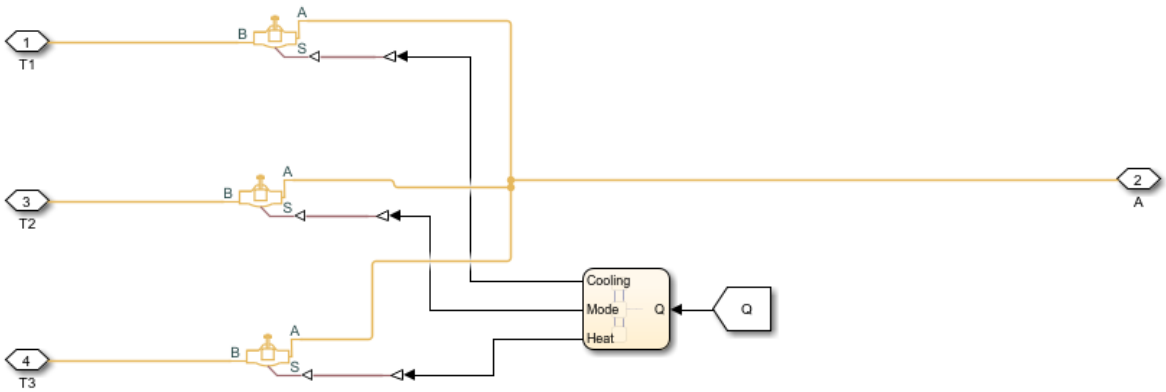


Рисунок ¶34 – Конечный автомат активного охлаждения

На рисунке 135 и 136 смоделирован 4-х ходовой клапан и его конечный автомат, который переключает клапан в нужное положение в соответствии с требуемым режимом. Сигнал *Q* передается из конечного автомата выбора режима СТ на рисунке 126.



Рисунок¶35 – Четырех ходовой клапан

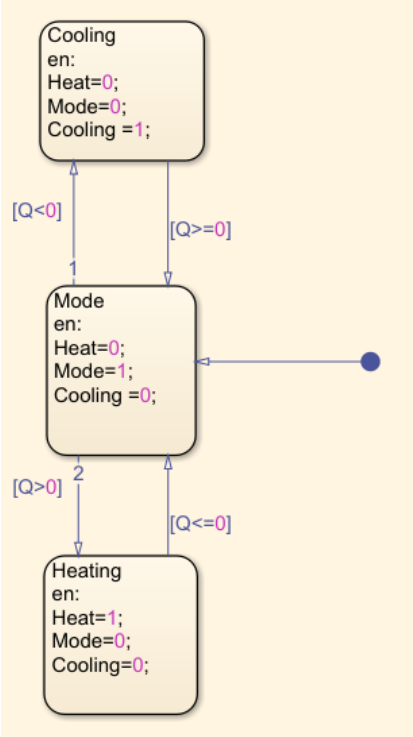


Рисунок ¶36 – Конечный автомат четырех ходового клапана

В блоке №5 моделируется поток воздуха, который обдувает радиатор пассивного охлаждения. Скорость воздуха, создаваемая вентиляторами, суммируется со скоростью движения ЭАТС при движении.

В блоке №6 моделируется расширительный бачок, чтобы компенсировать расширение теплоносителя и поддерживать рабочее давление в контуре. В блоке №7 моделируется помпа, которая поддерживает постоянный расход в контуре 45 л/мин.

Блок №8 предназначен для отображения результатов.

3.4 Определение времени прогрева и охлаждения тяговой аккумуляторной батареи в климатической камере

Для рационального выбора конструкции СТ для ЭАТС необходимо проанализировать и учитывать специфические особенности условий эксплуатации. Это возможно осуществить путем анализа исследовательских испытаний.

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;

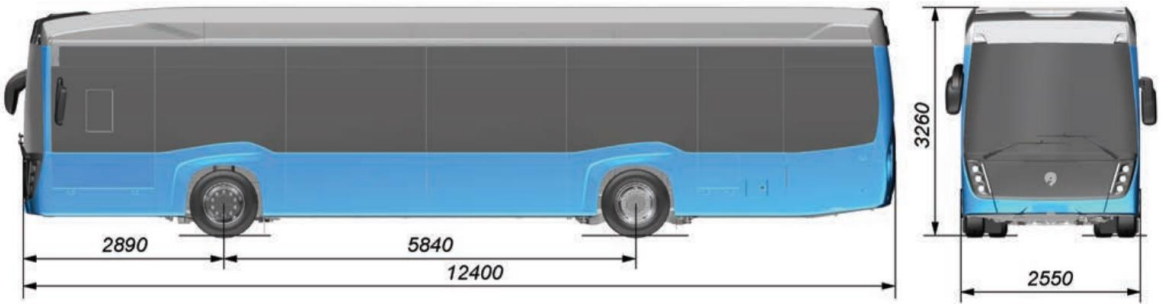
– Получить массив регистрируемых данных температур (ТАБ, теплоносителя, воздуха в салоне) и потребляемого тока компонентов;

– Осуществить статистическую обработку массива данных.

3.4.1 Объект исследования

Объектами исследования в ходе исследовательских испытаний являлась система термостатирования и тяговая аккумуляторная батарея, установленные на крыше ЭАТС. Исследовательские испытания проводились на ЭАТС КАМАЗ категории М3, имеющего задние ведущие колеса, а также внешний вид и габаритные размеры которого представлены на рисунке 137. Основные технические характеристики представлены в таблице 30.

Предметом исследования являются температура тяговой аккумуляторной батареи и потребление энергии системой термостатирования, установленные на ЭАТС в различных условиях окружающей среды, а также распределение данных величин по времени исследовательских испытаний.



Рисунок¶137 – Внешний вид и габаритные размеры ЭАТС КАМАЗ категории М3 полной массой 18000 кг

Таблица¶30 – Технические характеристики ЭАТС КАМАЗ категории М3

Параметр	Значение (размерность)
Полная масса ТС	18000 (кг)
Категория ТС	М3
Количество пассажирских мест	85
Сидячих мест	35
Максимальная скорость	80 (км/ч)
Двигатель	
Тип	асинхронный
Мощность	2 х 125 (кВт)
Крутящий момент	2 х485 (Н·м)
Система охлаждения	жидкостная (этиленгликоль)
ТАБ	
Тип	литий-титанатные
Емкость	149 (кВт·ч)
Масса	1700 (кг)
Максимальный запас хода	100 (км)
Время восстановления заряда	10-20 (мин)
Подвеска	
передняя задняя	независимая, пневматическая зависимая, пневматическая
Тормоза	дисковые
Размер шин	275/70 R22,5

3.4.2 Измерительная и регистрирующая аппаратура

В ходе исследований регистрировались следующие данные:

– температура ТАБ и теплоносителя;

– электрический ток, потребляемый системой термостатирования и напряжение ТАБ;

В блок измерительной системы стенда входили следующие измерительные устройства и датчики:

- датчики тока LF 510-S, 6 штук;

- датчик напряжения CV3-2000, 2 штуки;

- датчик температуры MF55;

- прибор контроля параметров воздушной среды МЭС-200А;

В таблице 31. показаны характеристики средств измерения.

Таблица ¶В1 – Характеристики средств измерения

Наименование	Тип	Характеристика
Датчик тока	LF 510-S	Напряжение питания ± 25 В, диапазон преобразования ± 0…500 А, номинальный выходной ток 100 мА, точность преобразования 0,5 %
Датчик напряжения	CV3-2000	Напряжение питания ± 15 В, диапазон преобразования 0 ... ±32 мА, диапазон измерения 0 …2000 В, точность преобразования ± 0,2 %
Прибор контроля параметров воздушной среды	МЭС-200А	Температура минус 40...+ 85 °С, абсолютная погрешность - ± 0,5 °С, относительная влажность 10...98 %, абсолютная погрешность ± 3 %, давление 80...110 кПа (600...825 мм. рт. ст.), абсолютная погрешность - ± 1 кПа
Датчик температуры	MF55	Температура измерения от –40...+ 120°С, абсолютная погрешность - ± 0,5 °С, Изоляционное сопротивление 100 МОм, Тепловая постоянная времени 5 с

3.4.3 Порядок и методы проведения исследовательских испытаний

В ходе исследований регистрировались следующие данные:

– средняя температура ТАБ ЭАТС;

– температура теплоносителя;

– потребление энергии системой термостатирования.

Исследовательские испытания проводились на базе АО «НПО «КВАНТ». В ходе исследовательских испытаний для определения времени прогрева и охлаждения ТАБ было проведено 7 исследовательских испытаний при температурах окружающей среды +40, +30, +10, -10, -20, – 30 и – 40 °С. Исследовательские испытания проводились с целью определения времени выхода на линию ЭАТС категории М3. Перед испытанием определенной температурой окружающей среды ЭАТС выдерживался при этой температуре не менее 12 часов с открытыми дверьми. После чего производился запуск систем ЭАТС посредством поворота ключа зажигания с положения «*LOCK»* в положение *«ON»*.

На рисунке 138 изображен ЭАТС внутри климатической камеры. По результатам исследовательских испытаний был сформирован протокол № 17-2/3-17528-2020 (Приложение Б). Исследовательские испытания подтвердили соответствие СТ ТАБ требованиям ТЗ ГУП «Мосгортранс» предъявляемые к ЭАТС категории М3 [133].

Рисунок ¶138 – ЭАТС внутри климатической камеры

Каждое испытание предполагало измерение температуры ТАБ, измерение температуры теплоносителя СТ ТАБ, температуры внутри салона по схеме на рисунке 139, а также проверку работоспособности высоковольтных компонентов. Каждое испытание начиналось после выдержки в течении не менее 12 часов с открытыми дверьми ЭАТС.

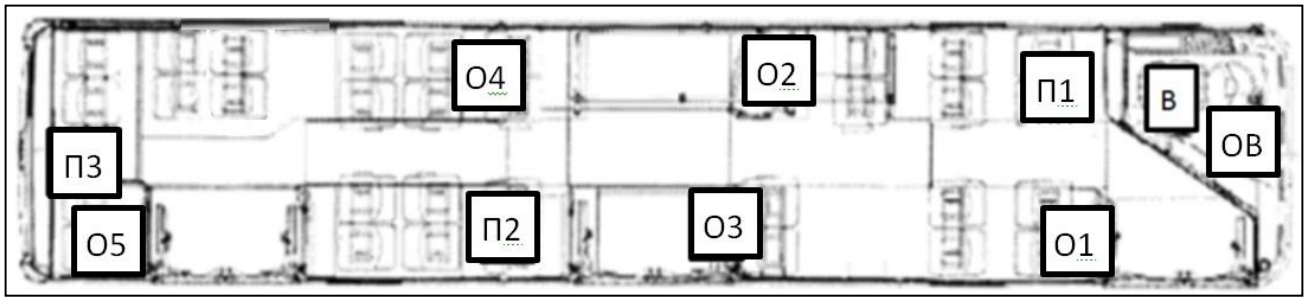


Рисунок ¶39 – Схема расположения датчиков внутри ЭАТС

В – зоны водителя; ОВ – зона отопителя в кабине водителя;П1, 2, 3 – зоны пассажира 1, 2, 3; О1, 2, 3, 4, 5 – зоны отопителей 1, 2, 3, 4, 5 в салоне

На рисунке 140 изображено расположение датчиков внутри (по схеме на рисунке 139) и жгутов (рисунок 141), которые подключены к CAN-шинам ЭАТС. Необходимые параметры записывались с CAN-шины ЭАТС с помощью адаптера *Vector VN1630* сер. № 007151-003155; устройство записи (Ноутбук *Panasonic Toughbook CF-54 процессор: Intel Core i5 ОЗУ 4 Гб*), которое находится вне климатической камеры, т. е. к рабочему месту инженера-испытателя рисунок 142.

Рисунок ¶40 – Внутреннее расположение датчиков внутри и жгутов

Рисунок ¶41 – Жгуты из салона ЭАТС к рабочему месту инженера-испытателя

Рисунок ¶42 – Рабочее место инженера-испытателя

3.4.4 Описание климатической камеры

Климатическая камера, в которой проходили данные исследовательские испытания, расположена в исследовательском центре электрооборудования АО «НПО «Квант» и данный центр соответствует требованиям ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009, что подтверждается аттестатом аккредитации, который изображен на рисунке 143.

РОСАККРЕДИТАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО АККРЕДИТАЦИИ № 0004038

АТТЕСТАТ АККРЕДИТАЦИИ

№ RA.RU.21КВ01 выдан 26 ноября 2015 г.

Настоящий аттестат выдан Акционерному обществу "Научно-производственное объединение "Квант"; ИНН 5321151441

173001, РОССИЯ, Новгородская область, Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 73

и удостоверяет, что Испытательный центр электрооборудования Акционерного общества "Научно - производственного объединения "Квант"

173001, РОССИЯ, Новгородская область, Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 73

соответствует требованиям ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009

аккредитован(а) в качестве Испытательной лаборатории (центра)

в соответствии с областью аккредитации, область аккредитации определена в приложении к настоящему аттестату и является неотъемлемой частью аттестата.

Дата внесения сведений в реестр аккредитованных лиц 02 ноября 2015 г.

М.П.

Руководитель (заместитель Руководителя) Федеральной службы по аккредитации М.А. Якутова

Рисунок ¶43 – Аттестат аккредитации

Климатическая камера изображена на рисунке 144 [137], а на рисунке 145 изображена схема подобной климатической аэродинамической трубы (*small CWT*), расположенной в Австрии [138].

Рисунок ¶44 – Климатическая камера

Рисунок ¶45 – Пример схемы климатической аэродинамической камеры

На рисунке 146 изображено ТС в климатической камере [139].

Рисунок ¶46 – ТС при исследовательских испытаниях в климатической камере

3.4.5 Обработка результатов исследовательских испытаний и верификация имитационной модели

Данные с шин *CAN* были записаны при помощи программного обеспечения *CANoe*. Для данного исследования требуются данные со следующих сигналов:

- средняя температура модуля аккумуляторных ячеек для всех модулей ТАБ;
- ток потребления с ТАБ;
- степень разрежённости (*SOC*) ТАБ;
- температура охлаждающей жидкости входе и выходе из СТ;

- температура окружающего воздуха, который расположен на блоке кондиционера;
- электрическая мощность потребления СТ;

Верификация проводилась для двух расчетных случаев при температуре окружающего воздуха –20 °С, +10 °С и +30 °С и +40 °С. Исследовательские испытания проводились в режиме выдерживания ЭАТС в климатической камере при определенной температуре не менее 12 часов, для крайних случаев не менее 24 часов. Далее производился запуск ЭАТС и выход его на рабочий режим эксплуатации (соответствие времени разогрева воздуха в салоне и температуры ТАБ техническим требованиям). Соответственно расчет полностью моделировал время простоя, включение и режимы работы СТ при разных температурах ТАБ. Верификация режима подогрева проводилась при –20 и +10°С, а режим охлаждения при +30°С и +40°С. На рисунках 147, 148 и 149, 150 и представлены данные исследовательских испытаний и моделирования, а на рисунке 151, 152 и 153, 154 изображён график ошибки, которая высчитывалась следующим образом:

$$R = \frac{\mathrm{T_{мод}} - \mathrm{T_{исп}}}{\mathrm{T_{исп}}} \cdot 100\ \%, \qquad (134)$$

где $T_{исп}$ –температура ТАБ при исследовательских испытаниях, где $T_{мод}$ – температура ТАБ при моделировании.

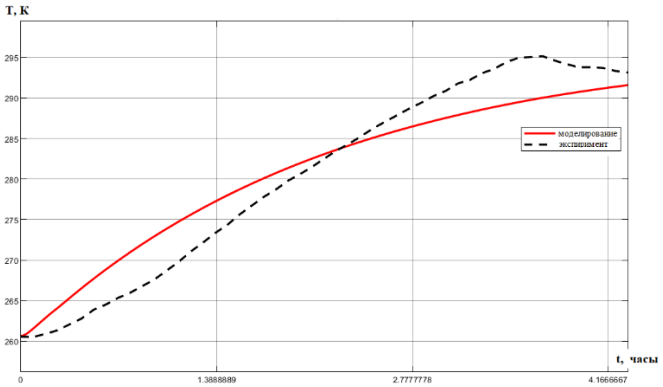


Рисунок 147 – Температура ТАБ при исследовательских испытаниях и при моделировании режима нагрева при температуре окружающей среды –20 °С

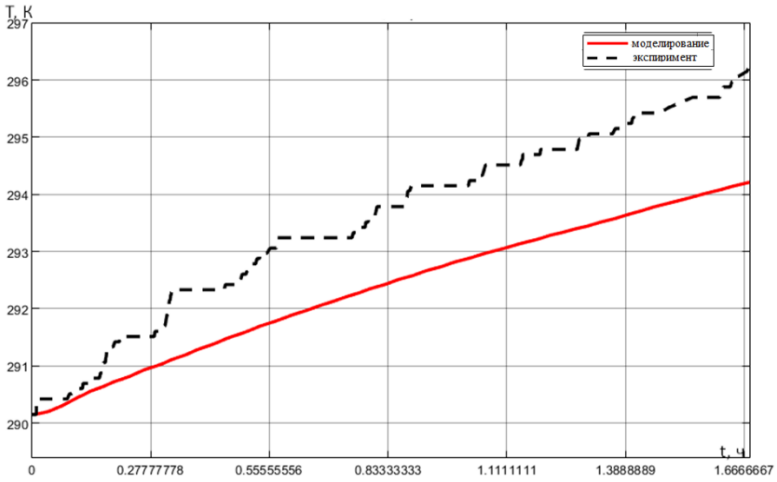
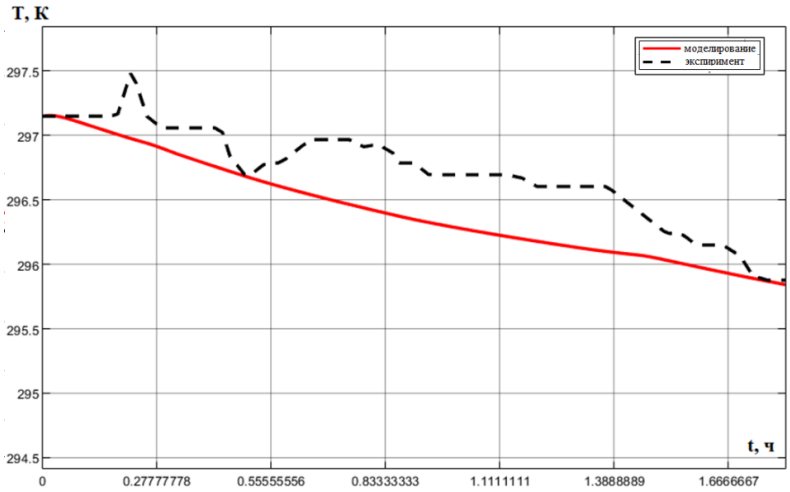
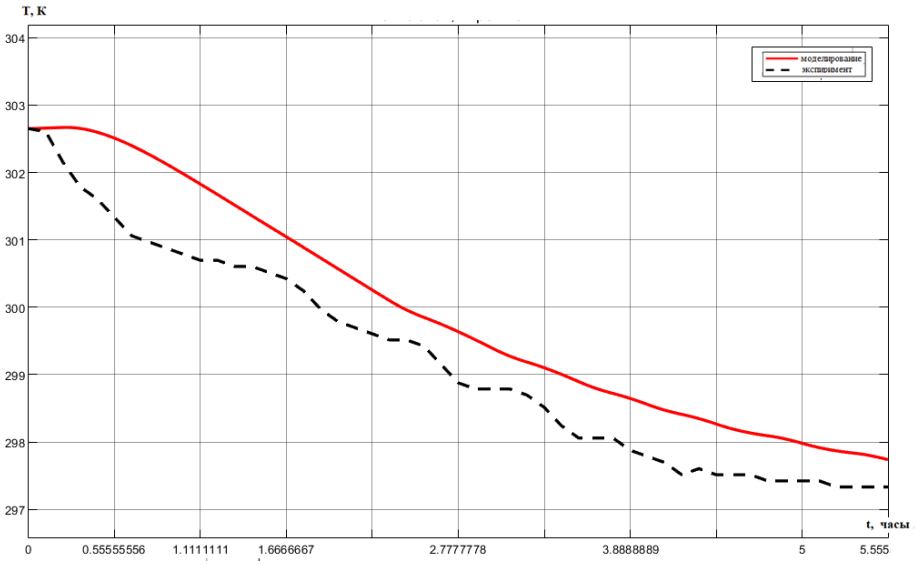


Рисунок ¶48 – Температура ТАБ при исследовательских испытаниях и при моделировании режима нагрева при температуре окружающей среды +10 °С



Рисунок¶49 – Температура ТАБ при исследовательских испытаниях и при моделировании режима охлаждения при температуре окружающей среды +30 °С



Рисунок¶150 – Температура ТАБ при исследовательских испытаниях и при моделировании режима охлаждения при температуре окружающей среды +40 °С

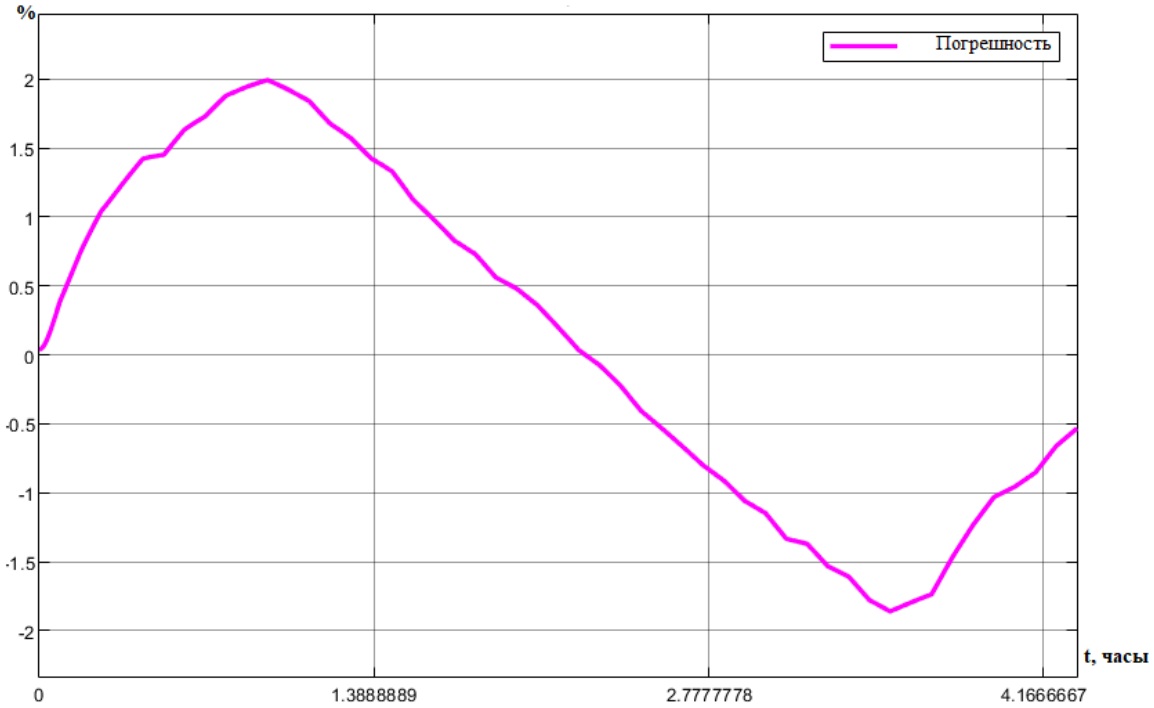


Рисунок ¶151 – Погрешность моделирования при температуре -20°С (см. рис. 147)

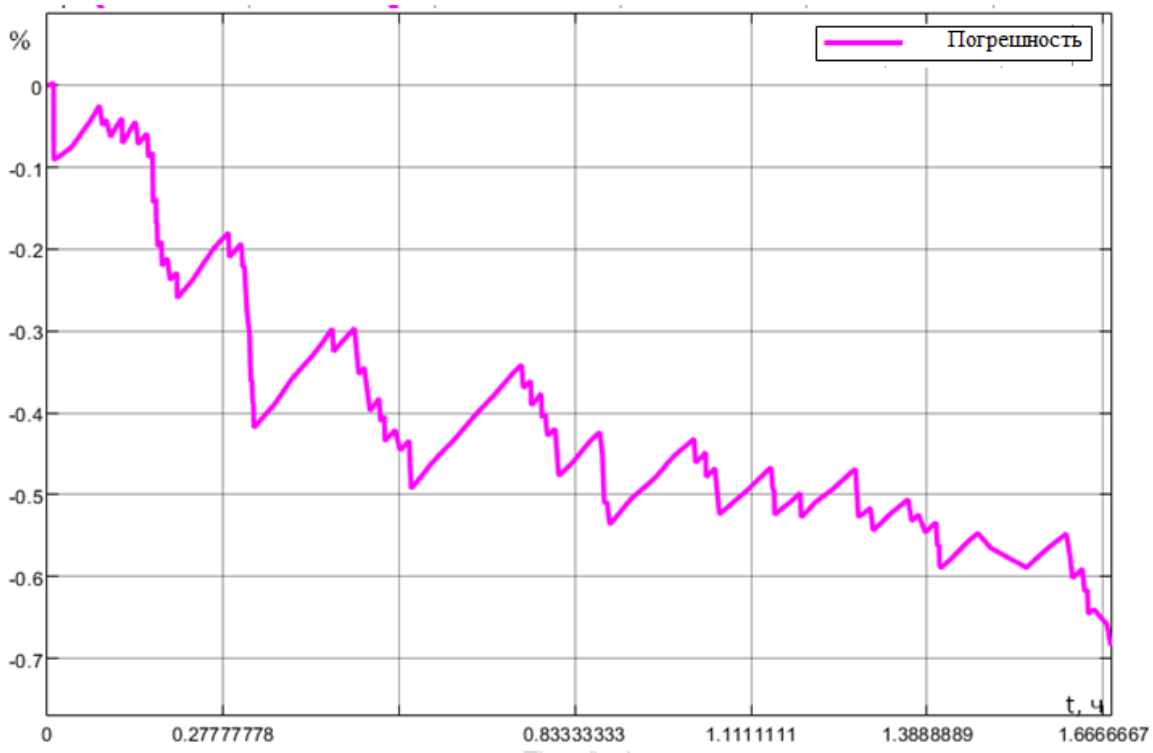


Рисунок ¶152 – Погрешность моделирования при температуре +10°С (см. рис. 148)

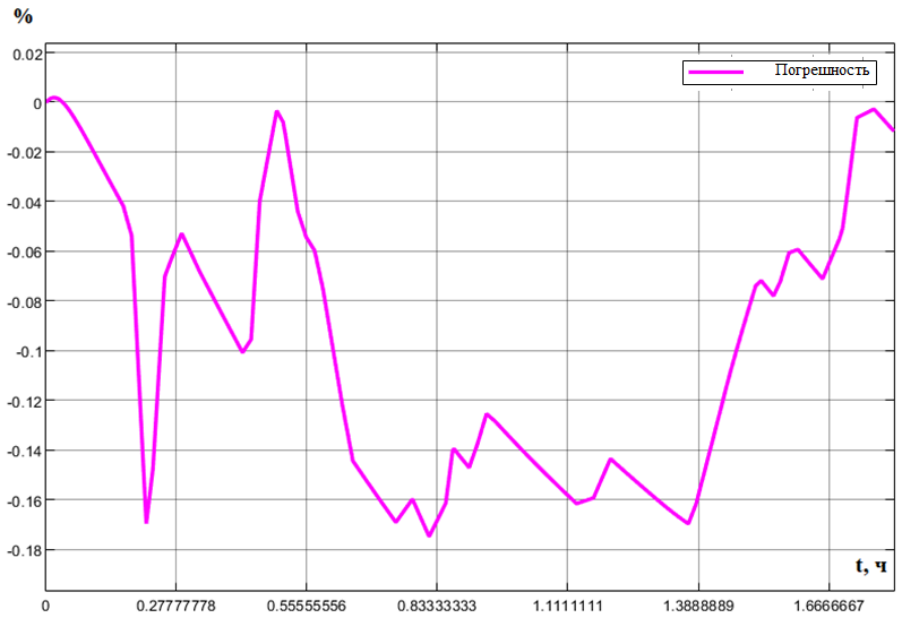


Рисунок ¶153 – Погрешность моделирования при температуре +30°С (см. рис. 149)

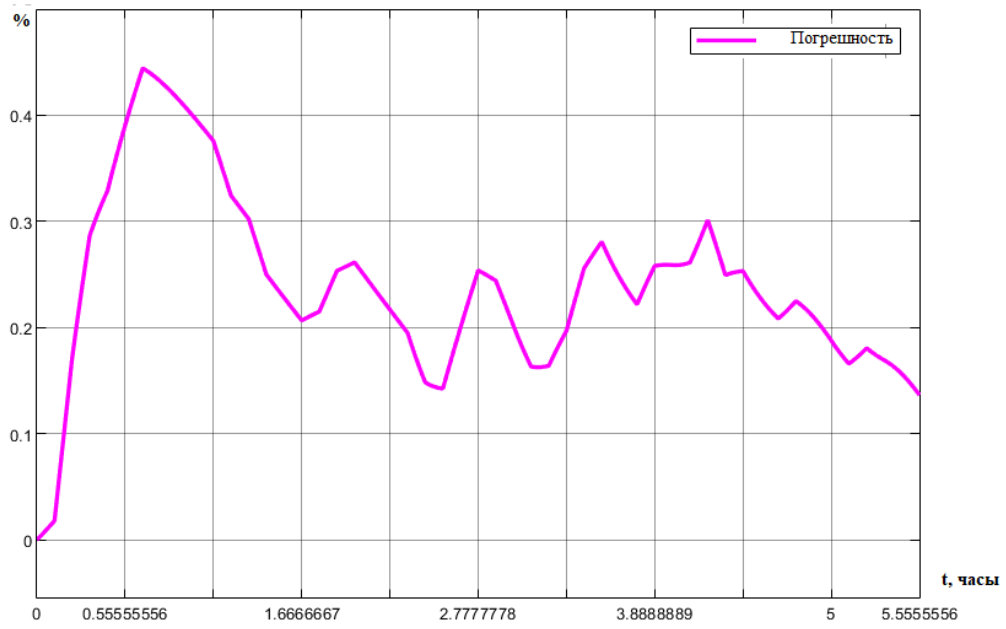


Рисунок ¶154 – Погрешность моделирования при температуре +40°С (см. рис. 150)

Максимальная погрешность составляет 2%, эта погрешность возникает из-за следующих причин:

- внутренние настройки ст (например, время включения компрессора при поступлении сигнала о режиме охлаждения или «мягкий» пуск нагревателей при сильно отрицательных температурах окружающей среды);

- неравномерность потока теплоносителя между модулями таб; в имитационной модели поток равномерно распределятся между модулями таб;
- дискретизация сигнала температуры таб в 1°C;
- допущения, принятые в тепловой модели таб (например, неизменность плотности, объема, теплопроводности, теплоёмкости некоторых элементов за исключением теплоносителя);
- расположение датчика температуры окружающей среды (расположен рядом с таб на расстоянии не более 1,5 метров, но таб не оснащена таким датчиком);
- расположение датчика температуры внутри ТАБ (при исследовательских испытаниях измеряется температура в определенном месте, а в 1D моделировании температура получается средняя по массе).

3.5 Выводы по третьей главе

1. Проведен анализ имеющихся ТАБ и с помощью метода априорного ранжирования определены наиболее подходящая ТАБ для применения на пассажирском ЭАТС;
2. Алгоритм работы системы управления СТ ТАБ должен исключать выход ЛИА из рабочего температурного диапазона (рис. 1) эксплуатации и стремиться поддерживать температуру ЛИА ТАБ в оптимальном температурном диапазоне (рис. 1). Базовые принципы управления СТ должны быть основаны на:
   - Контроле и минимизации разницы температур ЛИА внутри модуля и ТАБ;
   - Контроле за температурой ЛИА и обеспечении эксплуатации в безопасном температурном диапазоне;
   - Поддержании теплового «запаса» ТАБ для обеспечения работы ТАБ в пиковом режиме в течение требуемого времени;

- Определении энергетического баланса между сокращением времени термостатирования ТАБ (до оптимального диапазона рис. 1) и затрачиваемой мощностью СТ на это (учет как затрачиваемой энергии, так и возможных потерь энергии в ЛИА - рис. 21);

3. Сформирована математическая модель для определения расчетных значений ТАБ;

4. Определен коэффициент обтекаемости ЭАТС и среднеэксплуатационный коэффициент теплоотдачи ТАБ в окружающую среду;

5. Получены эксплуатационные характеристики ТАБ при исследовательских испытаниях в условиях экстремальных температур ЭАТС. Измерения осуществлялись с помощью CAN технологии. В результате определено время выхода на рабочий режим ЭАТС в экстремальных условиях;

6. Разработана комплексная имитационная модель СТ ЭАТС, включающая модель ТАБ, СТ, расширительного бака и помпы, 4-х ходового клапана, системы управления СТ. Показано, что с помощью разработанной имитационной модели можно провести расчет температур ТАБ в различных условиях эксплуатации;

7. Разработанная ИМ при верификации с результатами исследовательских испытаний в составе ТС показала адекватность получаемых результатов. Погрешность расхождения расчетных и получаемых параметров не превысила 2%.

ГЛАВА 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

3.1 Анализ исследовательских испытаний условий работы системы термостатирования и моделирование степени работоспособности тяговой аккумуляторной батареи

Требования к ресурсу ТАБ на протяжении срока службы ЭАТС, как упоминалось ранее в разделе 1.2, сводятся к выполнению требований по поддержанию оптимальной температуры при эксплуатации (при выполнении условий в кратностях тока, глубины разрежённости и т.д.). Начальная температура определяется по результатам моделирования стоянки ЭАТС в течение 8 часов при тех же экстремальных изменениях температуры (начальная температура ЛИА 24 °С); результаты исследования следующие: 10.8 °С — при хранении в один из самых холодных дней в Красноярске и 25 °С – в один из самых жарких дней в Астрахани (графики изменений температуры изображены на рисунках 155 и 156 соответственно). По результатам исследования (рисунки 19 и 25) рассчитаны графики изменения температуры ТАБ при движении ЭАТС в течение суток, которые изображены на рисунках 157 и 158. Окончательные температуры 19,6 °С и 22,6 °С.

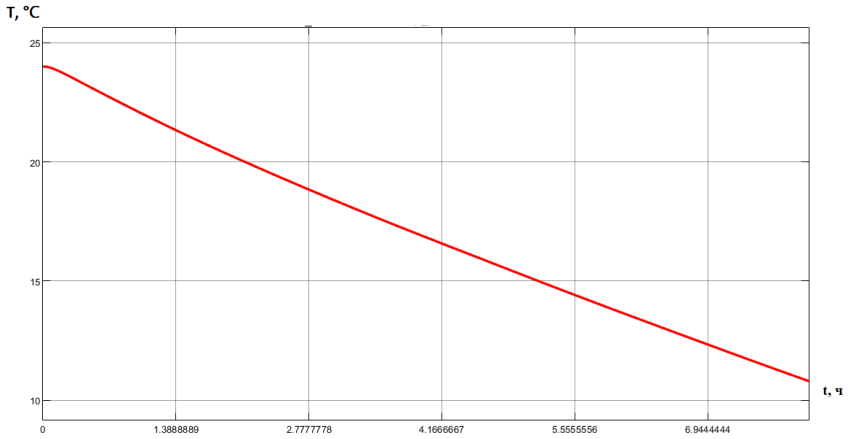


Рисунок ¶55 – График изменения температуры ТАБ при стоянке ЭАТС в условиях экстремально низкой температуры воздуха

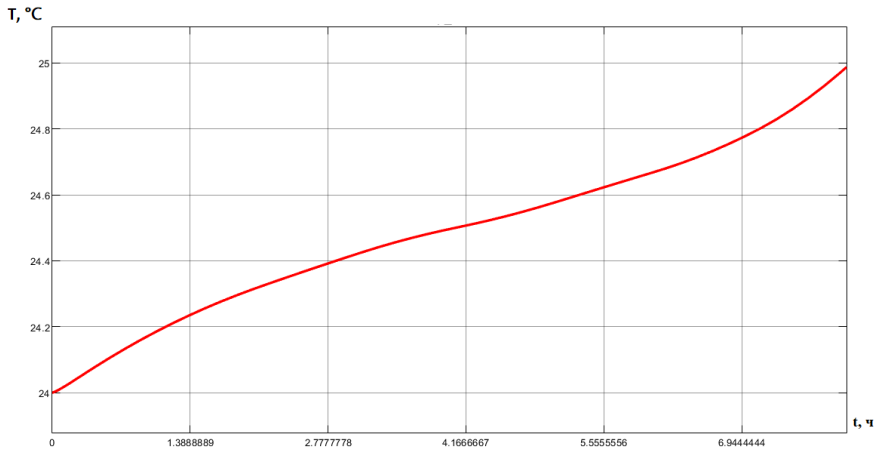


Рисунок ¶56 – График изменения температуры ТАБ при стоянке ЭАТС в условиях экстремальной температуры воздуха

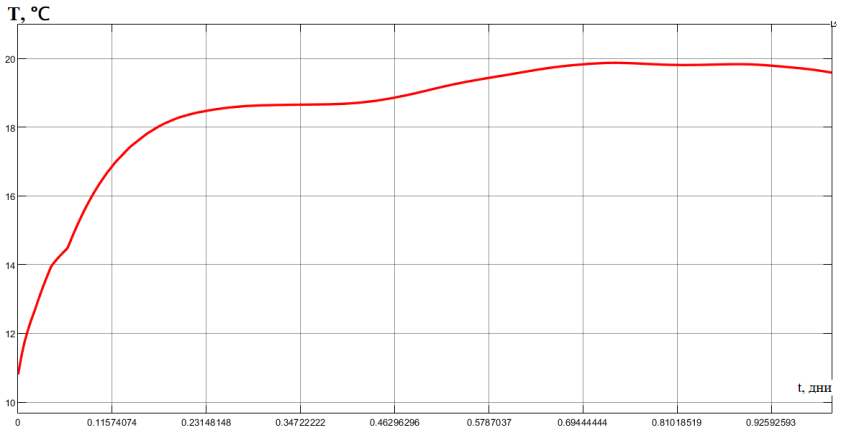


Рисунок ¶57 – График изменения температуры ТАБ при движении ЭАТС в условиях экстремально низкой температуры воздуха

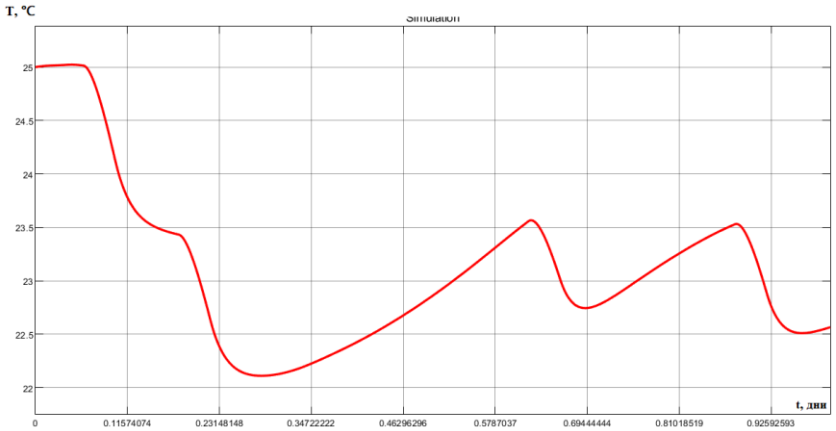


Рисунок ¶58 – График изменения температуры ТАБ при движении в условиях экстремальной температуры воздуха

По результатам исследования можно сделать следующий вывод: при экстремально высоких температурах и экстремально низких температурах окружающей среды температура ТАБ остается в оптимальном температурном диапазоне согласно рисунку 1.

Согласно техническим требования ГУП «МОСГОРТРАНС» для системы термостатирования время прогрева ТАБ после выстуживания (ночной отстой продолжительностью 12 часов при температуре – 40°С) до рабочей температуры не должен превышать 30 мин [140]. При стоянке при температуре – 40°С (в сухую безветренную погоду) в течение 12 часов ТАБ остывает до 9,2°С (Рисунок 159). Время нагрева до рабочей температуры (до +10°С) составляет 8,3 мин (Рисунок 160). Таким образом требование ГУП «МОСГОРТРАНС» выполняется.

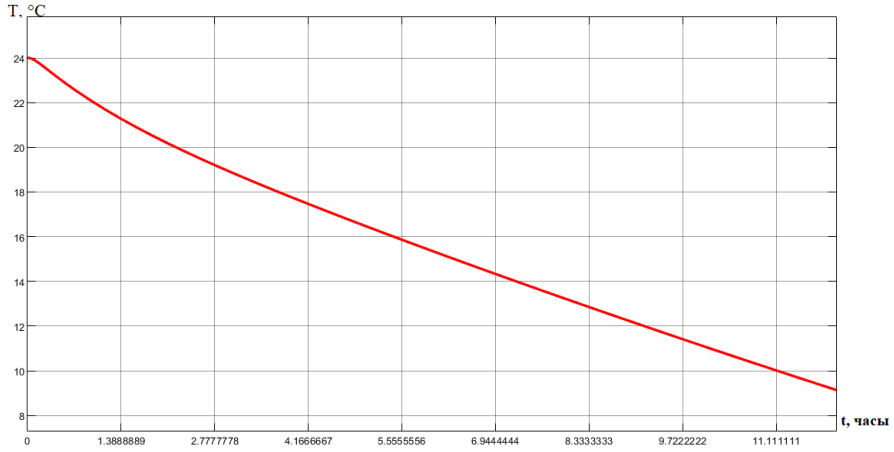


Рисунок ¶59 – График изменения температуры ТАБ во время стоянки ЭАТС при температуре окружающей среды –40°С

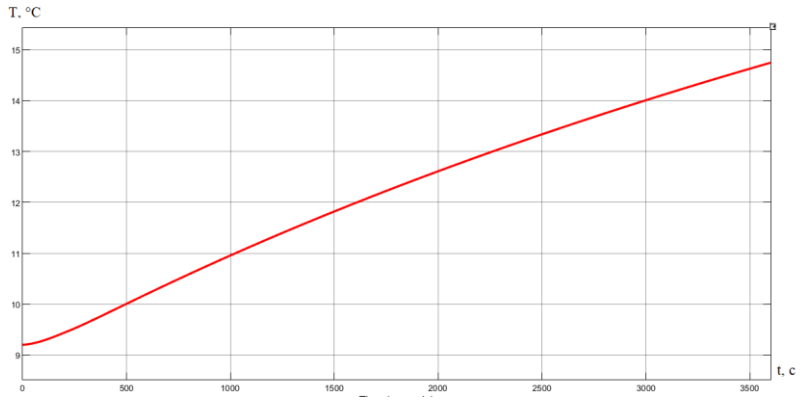


Рисунок ¶60 – График изменения температуры ТАБ во время функционирования–СТ при температуре окружающей среды –40°С

На рисунке 161 изображено изменение температуры на высоте 2 метра над поверхностью земли для городов: Москва, Астрахань и Красноярск [141]. Средняя температура ТАБ в результате непрерывного имитационного моделирования для условий 2018 года следующая: для города Москва температура +19 °С, для города Астрахань 21,6 °С, для города Красноярск +15 °С [117].

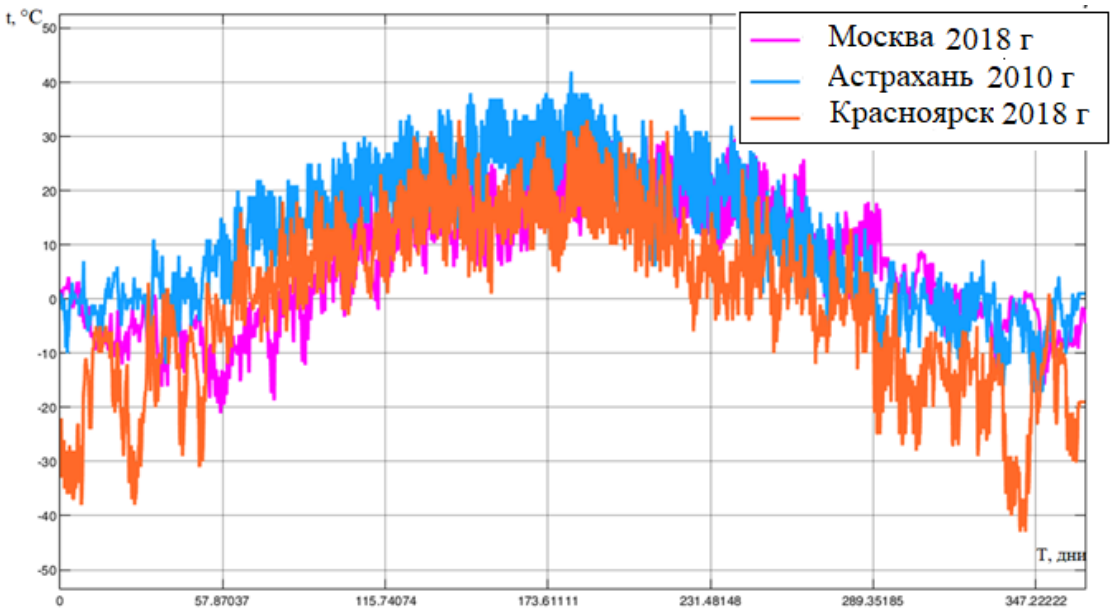


Рисунок ¶61 – Изменение температуры воздуха в течении года в городах РФ

Совет производителей по автомобильным исследованиям Соединенных Штатов Америки (*USCAR*) в стандартах указывает, что ТАБ целесообразно и безопасно эксплуатировать, пока ёмкость не уменьшится на 20 % от первоначальной значения [142], а внутреннее сопротивление не увеличится в два раза [92].

Для расчета степени работоспособности (*SOH*) были использованы 3 эксплуатационных параметра:

1. Среднеэксплуатационный ток ТАБ, путем анализа текущих маршрутов — он равен 1С;
2. Среднеэксплуатационная температура ТАБ, которая была вычислена при эксплуатации и стоянке ТАБ в 3 городах РФ (результаты описаны выше);
3. Минимальная степень разрежённости (*SOC*) ТАБ при эксплуатации.

Оценка *SOH* ТАБ проводится с помощью математических моделей, выбранных в разделе 2.4. На рисунке 162 и 163 изображены графики потерь ёмкости с разными активными материалами на основе литий-никель марганец-кобольт (*NMC*) и литий-титаната (*LTO*) соответственно. Расчет производился в разных условиях эксплуатации в разных городах. При использовании системы термостатирования и такой конструкции ТАБ уменьшение ёмкости до 80% произойдёт после 5954 циклов при эксплуатации в городе Астрахань, в Красноярске после 5265 циклов, а в Москве после 6097 циклов для ТАБ с катодным материалом *NMC*. Уменьшение ёмкости до 80% произойдёт после 17320 циклов при эксплуатации в городе Астрахань, в Красноярске после 13140 циклов, а в Москве после 15760 циклов для ТАБ с анодным материалом *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.

При эксплуатации в г. Москве ЭАТС категории М3 в течение 365 дней в году с коэффициентом выпуска 0,9, с среднесуточным пробегом 220 км, ТАБ с активными материалами на основе литий-никель марганец-кобальт (*NMC*) необходимо заменить после 5250 полных циклов заряда разряда, а ТАБ на основе литий-титаната (*LTO*) — после 16700 циклов заряда разряда.

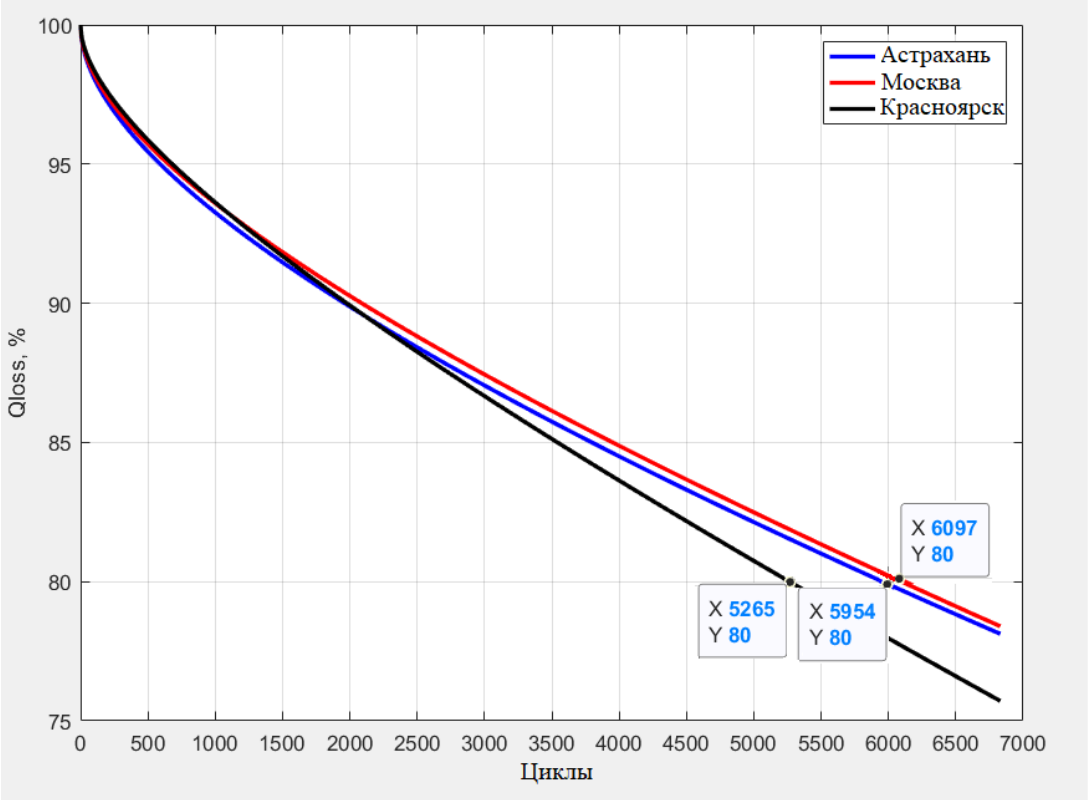


Рисунок ¶62 – Потеря емкости при эксплуатации в разных городах РФ для ТАБ с *NMC*

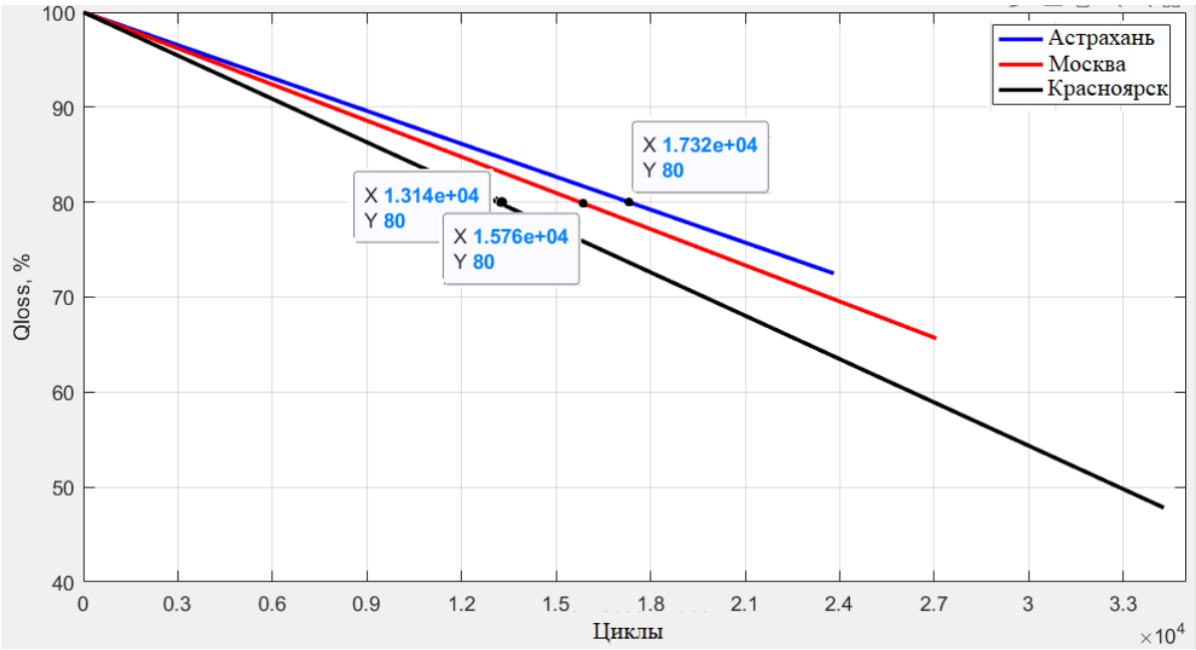


Рисунок ¶63 – Потеря емкости при эксплуатации в разных городах РФ для ТАБ с *LTO*

3.2 Ранжирование факторов имитационной модели системы термостатирования

Для определения функции регрессии, которая определяет температуру модулей ТАБ, используется «полный факторный эксперимент». Изучаемые факторы:

- температура окружающей среды (z_1);
- использование теплоизоляционного материала (*3M™ Battery Enhancement Material 1807S*) [143] (z_2);
- использование нагревателя или использование активного охлаждения(z_3);
- режим движения (стоянка или движение) (z_4).

Матрица планирования для обработки результатов показана в таблице 32. В таблице 32 величина означает, что +1 фактор действует, а -1 означает, что фактор не действует. Например, расчетный случай для имитационной модели (эксперимент) №1: температура окружающей среды (z_1) (1) график изменения температуры на рисунке 26, использование теплоизоляции (z_2) (1) – используется теплоизоляция. Результатом моделирования является конечная температура модулей ТАБ $T_{мод}$.

Таблица¶32 – Матрица планирования

№	z1	z2	z3	z4	$T_{мод.}$, ^0C
1	1	1	1	1	32,8
2	1	1	1	-1	25,4
3	1	1	-1	1	39,5
4	1	-1	1	1	33,5
5	-1	1	1	1	18
6	-1	-1	1	1	15,7
7	-1	1	-1	1	-18,8
8	-1	1	1	-1	21
9	1	-1	-1	1	34,3
10	1	-1	1	-1	28,5
11	1	1	-1	-1	28
12	-1	-1	-1	1	-21
13	1	-1	-1	-1	28,5
14	-1	1	-1	-1	0,9
15	-1	-1	1	-1	20,9
16	-1	-1	-1	-1	-0,3

Вычисленные коэффициенты регрессии приведены в таблице 33.

Таблица ¶3 – Коэффициенты регрессии

b0	*b1*	*b2*	*b3*	*b4*	*b1b2*	*b1b3*	*b1b4*	*b2b3*	*b2b4*	*b3b4*	*b1b2b3*	*b1b2b4*	*b1b3b4*	*b2b3b4*	*b1b2b3b4*
286,9	183,35	-24,05	73,95	-49,65	-35,65	-155,65	47,55	-40,25	-19,45	-3,45	-38,25	-25,85	-67,85	-32,85	-35,25

Полученная функция регрессии в кодированных значениях переменных:

$$y = 286 + 183{,}35 \cdot x_1 - 24.05 \cdot x_2 + 73{,}95 \cdot x_3 - 49{,}65 \cdot x_4 + 35{,}65 \cdot x_1 \cdot x_2 - 155{,}65 \cdot x_1 \cdot x_3 + 47{,}55 \cdot x_1 \cdot x_4 - 40{,}25 \cdot x_2 \cdot x_3 - 19{,}45 \cdot x_2 \cdot x_4 - 3{,}45 \cdot x_3 \cdot x_4 - 38{,}25 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - 25{,}85 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 - 67{,}85 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 - 32{,}85 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 - 35{,}25 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \quad (135)$$

По уравнению видно, что наиболее сильное влияние оказывает фактор z_1 – температура окружающей среды и совокупность факторов z_1 и z_3 (температура окружающей среды и использование активной СТ).

Функция регрессии в натуральных переменных:

$$y = 306{,}06 + 2{,}1 \cdot z_1 - 668.1 \cdot z_2 + 37 \cdot \frac{z_3}{2} - 9.993 \cdot z_4 + 35{,}65 \cdot 0.4\, z_1 - 11.11 \cdot z_2 - 0{,}89 \cdot (z_1 - 1) \cdot z_3 + 0{,}11 \cdot (z_1 - 1) \cdot (z_4 - 3.5) - 20{,}125 \cdot (27{,}78 z_2 - 0.5) \cdot z_3 - 3.89 \cdot (27{,}78 z_2 - 0.5) \cdot (z_4 - 3.5) - 0{,}345 \cdot z_3 \cdot (z_4 - 3.5) - 0{,}22 \cdot (z_1 - 1) \cdot (27{,}78 z_2 - 0.5) \cdot z_3 - 0{,}6 \cdot (z_1 - 1) \cdot (27{,}78 z_2 - 0.5) \cdot (z_4 - 3.5) - 0{,}08 \cdot (z_1 - 1) \cdot z_3 \cdot (z_4 - 3.5) - 3{,}29 \cdot (27{,}78 z_2 - 0.5) z_3 \cdot (z_4 - 3.5) - 0{,}04 \cdot (z_1 - 1) \cdot (27{,}78 z_2 - 0.5) \cdot z_3 \cdot (z_4 - 3.5) \quad (136)$$

Температура окружающей среды оказывает наибольшее влияние на температуру ТАБ по следующим причинам:

- узкий диапазон регулирования температуры теплоносителя;
- фиксированный расход жидкости;
- коэффициент теплообмена между корпусом ТАБ и окружающим воздухом оказывает сильное влияние на температуру ТАБ.

Полученная функция регрессии относится к классу линейных и требует проверки на адекватность по результатам исследовательских испытаний. Более того, при её адекватности она будет справедлива только к данному компоненту. Результатом этого расчета являются только ранжирование факторов, поскольку модель достаточно «грубая».

3.3 Рекомендации по результатам текущих исследований системы термостатирования ЭАТС категории М3

Анализ использования СТ показал её эффективность для функционирования и сохранения ресурса ТАБ. Анализ показывает эффективность использования СТ данной мощности по сравнению с системами с пассивным термостатированием (таблица 32).

Наряду с этим остаются неисследованные области:

- влияния тепловой мощности СТ на длительность пиковых токов ТАБ;
- применимости теплоизоляции ТАБ, который влияет помимо теплообмена с окружающей средой и на массогабаритные характеристики ТАБ;
- выбора тепловой мощности, т.к. при выборе слишком мощной системы последняя будет переразмерена, а также частота включений будет больше по сравнению с менее мощной системой (что отрицательно скажется на ресурсе СТ).

Все вышеперечисленные области в будущем должны быть изучены и связаны между собой в систему.

Дополнительные исследования необходимы в области оценки ресурса ТАБ и влияния на нее параметров СТ.

Требуются дополнительные исследования в области изменения климата нашей планеты и вероятности появления рекордных температур.

Исследования работы СТ в режиме «опережения» тепловых потерь или внешних температурных воздействий. Например, при зарядке ЭАТС система термостатирования должна активироваться заранее, прежде чем температура ТАБ достигнет штатного включения СТ или, учитывая прогноз погоды, смещать

температуры активации СТ. Безусловно, для этого необходимо проводить работы по внедрению машинного обучения.

Также требуются исследования возможности объединения климатической системы ЭАТС и СТ в целях энергоэффективнсти, уменьшения массы ЭАТС и увеличения ресурса этой системы (система будем работать дольше, но с меньшей частотой включения), а также частичного объединения (либо обеспечение теплового контакта через теплообменник) контуров охлаждения двигателя и инвертора с контуром системы термостатирования ТАБ для энергоэффективной работы ЭАТС.

Исследования о целесообразности функционирования СТ при выключенном ЭАТС.

3.4 Выводы по четвертой главе

1. Имитационное моделирование СТ ТАБ при рекордных температурах показало эффективность работы СТ. Требования, предъявляемые к СТ ТАБ по выходу на рабочий режим, выполняются с 70 % запасом;
2. Проведена оценка степени работоспособности (*SOH*, в процентах в зависимости от циклов) двух видов ТАБ. Уменьшение емкости ТАБ до 80% произойдёт через 7,5 лет эксплуатации в г. Москве для ТАБ с *NMC,* а для ТАБ с *LTO* — через 15 лет. Исходя из сроков контракта жизненного цикла (15 лет) [144] замена ТАБ с *NMC* потребуется 1 раз, а для ТАБ с *LTO* замена не потребуется;
3. В результате исследования установлено, что наибольшее влияние на температуру ТАБ оказывает температура окружающей среды;
4. Определены области, в которых необходимы дополнительные исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 среднеэксплуатационным показателям. ТАБ с активными материалами на основе литий-никель марганец-кобольт(*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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] К. Е. Карпухин, Р. Ш. Биксалеев, А. В. Климов , «Об аспектах перспективных решений по формированию энергоэффективной системы термостатирования тяговых аккумуляторных батарей электрифицированных транспортных средств» в *Безопасность колесных транспортных средств в условиях экплуатации*, Иркутск, 2017.

[2] D. J. Edmondson, «China to Enforce Electric Vehicle Safety by 2021» 19 May 2020. [В Интернете]. Available: https://www.idtechex.com/en/research-article/china-to-enforce-electric-vehicle-safety-by-2021/20707. [Дата обращения: 03 август 2020].

[3] J. Warner, The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design, Amsterdam • Boston • Heidelberg • London • New York • Oxford Paris • San Diego • San Francisco • Singapore • Sydney • Tokyo: Elsevier, 2015.

[4] S. V. Bakhmutov, V. G. Ivanov, K. E. Karpukhin, A. A. Umnitsyn, «IOP Conference Series: Materials Science And Engineering» в *Creation Of Operation Algorithms For Combined Operation Of Anti-Lock Braking System (ABS) And Electric Machine Included In The Combined Power Plant*, Moscow, 2018.

[5] S. Bakhmutov, Y. Sizov, M. Kim, «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Automobile Scientific Forum» в *Development, Modeling And Research Of The System Of Automatic Control And Equalization Of The Charge State Of A Battery Pack Of A Hybrid Engine Of A Vehicle*, Moscow, 2018.

[6] K. E. Karpukhin, A. S. Terenchenko, S. V. Bakhmutov , «3rd International Electric Vehicles Tachnology & Automotive Power Electronics Japan Conference» в *Energy Efficiency Electric Vehicles Through The Use Of The Range Extender System In The Climatic Conditions Of The Russian Federation*, 2016, Yokohama.

[7] G. O. Kotiev , B. B. Kositsyn , A. A. Stadukhin, I. F. Gumerov, «IASF 2019» в *Selection Of The Capacity Of The Onboard Energy Storage Device For A High-Mobility Wheeled Vehicle Wear-Resistant Brake System With An Electric Machine*, 2019, Moscow,.

[8] Б. В. Падалкин , Г. О. Котиев, А. А. Стадухин, Б. Б. Косицын, «Сравнительный Анализ Схем Электромеханических Трансмиссий Гусеничных Машин С Двумя Тяговыми Электродвигателями» *Труды НАМИ,* № 128, с. 14-23, 2020.

[9] G. O. Kotiev, D. O. Butarovich, B. B. Kositsyn, «IASF 2017 "Intelligent Transport Systems"» в *Energy Efficient Motion Control Of The Electric Bus On Route*, Moscow, 2018.

[10] Н. М. Филькин, Оптимизация параметров конструкции энергосиловой установки транспортной машины : дис. док. техн. наук: спец 05.05.03, Н. М. Филькин ФГБОУ ВО ИжГТУ им. М.Т. Калашникова – Ижевск, 2001 – 430 с.

[11] Н. М. Филькин, В. А. Умняшкин, Р. С. Музафаров , Гибридный автомобиль: основы проектирования, конструирования и расчета: Учебное пособие, Форум, 2020.

[12] Б. И. Петленко, Ю. М. Иньков, А. В. Крашенинников, Электротехника и электроника, Академия, 2014.

[13] А. А. Эйдинов и М. В. Нагайцев, Электромобили: учебное пособие, НАМИ, 2014.

[14] А. В. Козлов, Теоретические основы оценки показателей силовых установок автомобилей в полном жизненном цикле: дисю док. тех. наук 05.04.02, А. В. Козлов МАДИ – Москва, 2004 –427 с.

[15] В. В. Селифонов и М. М. Бирюков, Устройство и техническое обслуживание автобусов, Академия, 2005.

[16] В. В. Селифонов, К. Е. Карпухин, А. И. Филонов , . Е. Е. Баулина и Е. В. Авруцкий, «Гибридные Автомобили - Решение Экологической Проблемы Автомобильного Транспорта» *Известия МГТУ МАМИ.,* № 4, с. 30-44, 2007.

[17] В. В. Селифонов, К. Е. Карпухин, А. И. Филонов и Е. В. Авруцкий, «Гибридные автомобили – решение экологической проблемы автомобильного транспорта» *Известия МГТУ «МАМИ»,* № 2 (4) , с. 30-44, 2007.

[18] К. Е. Карпухин и Р. Х. Курмаев , *Современные транспортные средства на электрической тяге,* Москва: ГНЦ РФ ФГУП "НАМИ", 2019.

[19] К. Е. Карпухин, А. С. Теренченко и А. А. Шорин, «Обоснование параметров балансировки аккумуляторных батарей» *Вестник машиностроения ,* № 11, с. 25-27, 2015.

[20] С. В. Бахмутов, С. В. Гайсин, К. Е. Карпухин, Р. Х. Курмаев, Е. В. Зиновьев, «Способ повышения энергоэффективности электромобильного транспорта» *Журнал Автомобильных инженеров ,* № 4 (93), с. 4-10, 2015.

[21] M. Yazdan Pour, «Electro-thermal Modeling of Lithium-ion Batteries» pp. 133, 2015.

[22] L. Morini, «Thermal management model for a Plug-In Hybrid Electric Vehicle» Alma Mater Studiorum - Università Di Bologna, Bologna, 2016.

[23] А. И. Улитенко, Принципы построения высокоэффективных систем охлаждения электронных приборов: дис. док. техн. наук: спец 05.27.02, А. И. Улитенко РГРТУ – Рязань, 2009 – 419 с.

[24] M. Kanog˘lu, Y. A. C¸ engel, I. Dinc¸er, Efficiency Evaluation, Reno: Springer, 2012.

[25] К. Е. Карпухин, А. А. Шорин, . А. С. Теренченко, А. А. Умницын и В. Н. Кондрашов, «Исследование эффективности аккумуляторных систем гибридных автомобилей и электромобилей в условиях отрицательных температур» *Вестник машиностроителя,* № 8, с. 26-29, 2016.

[26] I. Baghdadia, O. Briata, P. Gyanb, J. M. Vinassa, «State of health assessment for lithium batteries based on voltage–time relaxation measure» *The official journal of the International Society of Electrochemistry (ISE).,* 2016.

[27] Б. К. Оспанбеков, Повышение энергетической эффективности и эксплуатационных показателей электромобилей : дис. канд. техн. наук: спец 05.09.03, Б. К. Оспанбеков, МАДИ – Москва, 2017 – 157 с.

[28] С. А. Иванов, Повышение эффективности тягово-транспортных средств при использовании накопителей энергии: дис. док. техн. наук: спец 05.20.01, С. А. Иванов ФГБОУ ВПО МГАУ – Москва, 2013 – 310 с.

[29] А. В. Климов , «Повышение энергоэффективности транспортных средств сельскохозяйственного назначения путём применения амортизаторов с рекуперативным эффектом: дис. канд. техн. наук: спец 05.20.01, А. В. Климов, МАДИ – Москва, 2019 – 206 с.

[30] В. И. Строганов, Повышение эксплуатационных характеристик электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой: : дис. док. техн. наук: спец 05.09.03, В. И. Строганов МАДИ – Москва, 2014 – 356 с

[31] М. М. Хандорин, Метод, алгоритмы и микропроцессорное устройство оценивания параметров литий-ионной аккумуляторной батареи космического аппарата: дис. канд. техн. наук: спец 05.13.05, М. М. Хандорин, ФГАОУ ВО НИ ТПУ, АО «НПЦ«Полюс» Томск, 2018 – 147 с.

[32] Д. П. Чупин, Параметрический метод контроля эксплуатационных характеристик аккумуляторных батарей: дис. канд. техн. наук: спец 05.11.13, Д. П. Чупин, ОмГТУ Омск, 2018 – 203 с, 2014.

[33] A. Cordoba-Arenas, «Aging Propagation Modeling and State-of-Health Assessment in Advanced Battery Systems» The Ohio State University, Ohio , 2013.

[34] J. Liu, «Linear Convergent Stochastic Algorithms for Optimization and Linear» University of Wisconsin-Madison, Wisconsin, 2014.

[35] R. Xiong, W. Shen, Advanced Battery Management Technologies for Electric Vehicles, Wiley, 2019.

[36] A. Matasso, «Identification of the interdependance of aging and internal pressure evolution of commercial li-ion cells» The University Of Texas At Arlington, ARLINGTON, 2014.

[37] А. С. Теренченко и К. Е. Карпухин, «Энергоэффективность, как способ улучшения экологической безопасности транспортных средств» *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева,* № 14(106), с. 299-305, 2014.

[38] Правительство Российской Федерации, «Об утверждении Стратегии развития автомобильной промышленности до 2025 года» 4 май 2018. [В Интернете].Available:http://static.government.ru/media/files/EVXNIplqvhAfF2Ik5t6l6kWrEIH8fc9v.pdf. [Дата обращения: 2020 сентябрь 2020].

[39] А. Н. Ременцов, Ю. В. Панов, Л. Л. Зиманов, А. А. Хазиев, А. В. Лаушкин, Е. Б. Горина и С. А. Холондач, *Автомобильный бензин, основные показатели, причины низкого качества автомобильного бензина в г.Москве,* Москва: МАДИ, 2012.

[40] И. Осипьянц, «Смерть дизеля: к чему еще приведет введение экологического стандарта Евро-6» «За рулем» , 11 декабрь 2015. [В Интернете]. Available: https://www.zr.ru/content/articles/808680-smert-dizelya-k-chemu-eshhe-privedet-vvedenie-ekologicheskogo-standarta-evro-6/. [Дата обращения: 04 августа 2020].

[41] А. Тимерханов, «ООО «АВТОСТАТ» © Автостат., 7 февраля 2021. [В Интернете]. Available: https://www.autostat.ru/news/47243/. [Дата обращения: 19 февраля 2020].

[42] Z. Shabalala, P. Desai, M. Potter, «Booming electric vehicle sales drive surge in cobalt prices» © Reuters, 12 март 2021. [В Интернете]. Available:

https://www.reuters.com/article/us-cobalt-prices-graphic-idUSKBN2B41YB. [Дата обращения: 22 марта 2021].

[43] А. Тимерханов, «В России насчитывается около 53 млн транспортных средств» [В Интернете]. Available: https://www.autostat.ru/news/42973/. [Дата обращения: 24 июля 2020].

[44] С. Собянин, «Москва продолжает инвестировать в обновление подвижного состава (2010-2023 гг)» Портал мэра Москвы, [В Интернете]. Available: https://twitter.com/MosSobyanin/status/1283708286727069696. [Дата обращения: 27 июль 2020].

[45] Портал мэра Москвы, «С 2021 года Москва откажется от закупок дизельных автобусов» Портал мэра Москвы, 08 август 2017. [В Интернете]. Available: https://www.mos.ru/mayor/themes/2299/4191050/. [Дата обращения: 06 август 2020].

[46] Ведомости, «https://www.vedomosti.ru/society/news/2020/08/25/837660-moskva-otkazhetsya-ot-trolleibusov» Ведомости, 27 август 2020. [В Интернете]. Available: https://www.vedomosti.ru/society/news/2020/08/25/837660-moskva-otkazhetsya-ot-trolleibusov. [Дата обращения: 06 сентябрь 2020].

[47] Н. Гусаченко, «К 2023 году количество электробусов в Петербурге может увеличиться в 5 раз» ООО «Редакция журнала «РЖД-Партнер», 17 января 2020. [В Интернете]. Available: https://www.rzd-partner.ru/auto/news/k-2023-godu-kolichestvo-elektrobusov-v-peterburge-mozhet-uvelichitsya-v-5-raz/. [Дата обращения: 19 февраль 2020].

[48] Официальный портал Мэра, «От самоката до электробуса: в Москве создается сеть станций зарядки для электротранспорта» [В Интернете]. Available: https://www.mos.ru/mayor/themes/2299/5759050/. [Дата обращения: 21 07 2020].

[49] Г. «Мосгортранс», «Схема маршрутов электробуса» ГУП «Мосгортранс», февраль 2020. [В Интернете]. Available: http://www.mosgortrans.ru/electrobus/map/. [Дата обращения: 19 февраль 2020].

[50] С. В. Бахмутов, К. Е. Карпухин и А. С. Теренченко, «Особенности конструкции и эксплуатации гибридных и электрических транспортных средств в сложных климатических условиях РФ» в *Материалы 99-й международной научно-технической конференции "Безопасность колёсных транспортных средств в условиях эксплуатации"*, Иркутск, 2017.

[51] Bloomberg New Energy Finance, «Electric Vehicles to Accelerate to 54% of New Car Sales by 2040» 9 июль 2017. [В Интернете]. Available: https://about.bnef.com/blog/electric-vehicles-accelerate-54-new-car-sales-2040/. [Дата обращения: 24 сентябрь 2020].

[52] IEA Publications, «Global EV Outlook 2020 Entering the decade of electric drive?» International Energy Agency , 2020.

[53] www.enerdata.net, «Мировая энергетическая статистика ежегодник 2018» Enerdata, 2020. [В Интернете]. Available: https://yearbook.enerdata.ru/CO2-emissions-data-from-fuel-combustion.html. [Дата обращения: 05 февраль 2020].

[54] IEA Publications, «Global Energy Review 2020» IEA Publications, 2020.

[55] РОСГИДРОМЕТ, «Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год» Москва, 2021.

[56] J. Workman, Z. King, F. Munoz, «Выбросы CO2 от новых автомобилей достигли самого высокого среднего показателя в Европе с 2014 года» [В Интернете]. Available: https://www.jato.com/new-car-co2-emissions-hit-the-highest-average-in-europe-since-2014/. [Дата обращения: 24 июля 2020].

[57] © NGVA Europe, «Well-to-Wheel – How to better understand it» [В Интернете]. Available: https://gmobility.eu/what-is-well-to-wheel/. [Дата обращения: 17 март 2021].

[58] B. S. Maharaj, G. King, «IConETech-2020» в *A real-world energy and cost comparison between an electric vehicle and a petrol vehicle in the trinidad and tobago context*, St. Augustine, 2020.

[59] Министерство энергетики Российской Федерации, «основные характеристики российской электроэнергетики» министерство энергетики Российской Федерации, [В Интернете]. Available: https://minenergo.gov.ru/node/532. [Дата обращения: 22 февраль 2020].

[60] И. Р. Мингулова, «Методическое обоснование оценки количества загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду мегаполиса при истирании протекторов шин и колесных тормозных механизмов» *Известия Петербургского университета путей сообщения,* с. 197-202, март 2011.

[61] U. E. I. Administration, «What drives crude oil prices?» U.S. Department of Energy, 12 май 2020. [В Интернете]. Available:

https://www.eia.gov/finance/markets/crudeoil/spot_prices.php. [Дата обращения: 25 май 2020].

[62] Передовые платежные решения, «Розничные цены на топливо рассчитаны по методологии РЭШ. www.petrolplus.ru» Передовые Платежные Решения, [В Интернете]. Available: https://yandex.ru/news/quotes/11095/20003.html. [Дата обращения: 25 май 2020].

[63] K. Gallagher, S. Trask, C. Bauer, W. Thomas, S. Lux, M. Tschech, P. Lamp, B. Polzin, S. Ha, B. Long, Q. Wu, W. Lu, D. Dees, A. Jansen, «Optimizing Areal Capacities through Understanding the Limitations of Lithium-Ion Electrodes» *Journal of The Electrochemical Society,* № 163(2) , pp. A138-A149, 2016.

[64] T. Sylvia, « pv magazine group GmbH & Co. KG» PV Magazine, 19 отктябрь 2019. [В Интернете]. Available: https://pv-magazine-usa.com/2019/10/29/back-to-the-battery-future/. [Дата обращения: 18 февраль 2020].

[65] Sciences, School of Geographical, «World Meteorological Organization» WebCite Consortium, [В Интернете]. Available: https://www.webcitation.org/68DS7KaCA?url=http://wmo.asu.edu/. [Дата обращения: 20 февраль 2020].

[66] Департамент по экономическим и социальным вопросам ООН: Отдел народонаселения, «Население России» Countrymeters, [В Интернете]. Available: https://countrymeters.info/ru/Russian_Federation. [Дата обращения: 20 февраля 2020].

[67] Wikipedia®, «Климат России» Wikimedia Foundation, Inc., [В Интернете]. Available: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BB%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D1%82_%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8#%D0%A2%D0%B0%D0%B1%D0%BB%D0%B8%D1%86%D0%B0_%E2%84%96_1. [Дата обращения: 20 февраля 2020].

[68] T. Yuksel, J. J. Michalek, «Effects of Regional Temperature on Electric Vehicle Efficiency, Range, and Emissions in the United States» *Environmental Science & Technology,* № 49(6), p. 3974–3980, 2015.

[69] C. Fiori, K. Ahn, H. A. Rakha, «Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation» *Applied Energy,* № 168, pp. 257-268, 2016.

[70] А. Ф. Колбасов, К. Е. Карпухин и В. В. Дебелов «Исследование инфраструктуры для личного электротранспорта: актуальные проблемы,

варианты решений» *Журнал автомобильных инженеров,* № 2(103), с. 36-45, 2017.

[71] И. В. Карнацевич и Е. Б. Березин, «Новые расчетные характеристики температурны воздуха и их статистические прогнозы» *Омский научный вестник,* № 84, с. 79-82, 2009.

[72] Р. Х. Курмаев, А. С. Теренченко и К. Е. Карпухин, «Способы поддержания требуемой температуры аккумуляторных высоковольтных батарей электромобилей и автомобилей с комбинированными энергоустановками» *Технический журнал «Вестник машиностроения»,* № 6, с. 52-55, 2015.

[73] J. Wang, Y. Chen, S. F. Tett, Z. Yan, P. Zhai, J. Feng, J. Xia, «Anthropogenically-driven increases in the risks of summertime compound hot extremes» *Nature Communications объем 11,* № 528, pp. 1-11, 2020.

[74] Шмунк Р.Б., «GISS Surface Temperature Analysis (v4)» NASA Official: Gavin A. Schmidt, 13 февраль 2020. [В Интернете]. Available: https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/#. [Дата обращения: 20 февраля 2020].

[75] Г. В. Груза и Э. Я. Ранькова Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха, Москва: ФГБУ "ВНИИГМИ–МЦД", 2012.

[76] Официальный сайт Мэра Москвы, «Москва продолжает переход на экологичный транспорт» Официальный сайт Мэра Москвы, 25 январь 2019. [В Интернете]. Available: https://www.mos.ru/news/item/50409073/. [Дата обращения: 09 сентябрь 2020].

[77] X. M. Inc., «XING Mobility _ EV Powertrain Solutions» 2020. [В Интернете]. Available: https://www.xingmobility.com/products/EV-battery-solutions. [Дата обращения: 05 февраль 2020].

[78] 3M, « Novec™ 7500 Engineered Fluid» 2020. [В Интернете]. Available: http://multimedia.3m.com/mws/media/771209O/3mtm-novectm-7500-engineered-fluid.pdf. [Дата обращения: 05 февраль 2020].

[79] S. Pety, P. Chia, W. Stephen, S. Carrington, Active cooling of microvascular composites for battery packaging, Smart Materials and Structures, 2017.

[80] J. Chin, D. Sherman Fernandez, «BMW iX3 EV Launched To Challenge Tesla X» 16 июль 2020. [В Интернете]. Available: https://www.dsf.my/2020/07/bmw-ix3-ev-launched-to-challenge-tesla-x/. [Дата обращения: 28 сентября 2020].

[81] Climetal S.L., «Our technology» [В Интернете]. Available: http://climetal.com/our-technology. [Дата обращения: 25 сентября 2020].

[82] H. Knol ten Bensel, «Focus on the high-voltage battery system of the Audi e-tron: 95 kWh of energy» 1 апреля 2019. [В Интернете]. Available: https://autoprova.be/2019/04/01/focus-on-the-high-voltage-battery-system-of-the-audi-e-tron-95-kwh-of-energy/. [Дата обращения: 24 сентября 2020].

[83] R. Zhao, J. Gu, J. Liu, «An experimental study of heat pipe thermal management system with wet cooling method for lithium ion batteries» *Elsevier Journal of Power Sources* , № 273, pp. 1089-1097, 2015.

[84] M. Mochizuki, «Latest Development and Application of Heat Pipes» *IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)*, pp. 87-90, 2017.

[85] Q. Wang, B. Jiang, Q. Xue, H. Sun, B. Li, H. Zou, Y. Y. Yan, «Experimental investigation on EV battery cooling and heating by heat pipes» *Elsevier Journal of Applied Thermal Engineering*, pp. 1-7, 2014.

[86] В. Ю. Кравец , Е. С. Алексеик и А. Ю. Аполлонин , «Влияние количества витков на термическое сопротивление пульсационных тепловых труб» *Восточно-Европейский журнал передовых технологий,* № 2/8 (56), с. 54-57, 2012.

[87] S. M. Sohel Murshed , Electronics Cooling, Published by ExLi4EvA, 2016.

[88] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

[89] R. Zhao, S. Zhang, J. Liu, «A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: Electrode modification and thermal management system» *J. Power Sources*, № 188, pp. 557-577, 2015.

[90] Mersen, «Electrical Power Segment Solutions For Power Management Bu EV/HEV – e-MOBILITY» Mersen, 2017.

[91] А. В. Климов , Р. Ш. Биксалеев и Б. К. Оспанбеков , «Модульная система терморегулирования состояния тяговых аккумуляторных батарей». Россия Патент RU174819U1, 11 март 2017.

[92] К. Е. Карпухин, Р. Ш. Биксалеев, А. В. Климов и Б. К. Оспанбеков, «Об аспектах безопасности тяговых аккумуляторных батарей электрофицированных транспортных средств. Аналих факторов, влияющих

на их ресурс и некоторые методы его оценки» *Журнал Автомобильных Инженеров,* № 6(107), с. 26-29, 2017.

[93] M. G. Richard, «Elon Musk letter explains why that Tesla Model S caught fire» Narrative Content Group, 04 март 2013. [В Интернете]. Available: https://www.treehugger.com/cars/elon-musk-letter-explains-why-tesla-model-s-caught-fire.html. [Дата обращения: 05 февраль 2020].

[94] М. Агаджанов, «Аккумулятор Galaxy Note 7 взрывается из-за агрессивного дизайна» 5 декабрь 2016. [В Интернете]. Available: https://habr.com/ru/post/399841/. [Дата обращения: 2020 август 20].

[95] R. Xiong, J. Tian, H. Mu, C. Wang, «A systematic model-based degradation behavior recognition and health monitoring method for lithium-ion batteries» *Applied Energy,* № 207, pp. 372-383, 2017.

[96] С. И. Нифталиев, О. А. Козадерова и К. Б. Ким, «Электропроводящие свойства мембран МК-40 и МА-41, исследованные методом высокочастотной спектроскопии импеданса» *Вестник ВГУИТ,* № 1, с. 167-172, 2016.

[97] A. Farmann, W. Waag, D. U. Sauer, «Application-specific electrical characterization of high power batteries with lithium titanate anodes for electric vehicles» *Energy Elsevier,* № 112, pp. 294-306, 2016.

[98] B. Shrestha, P. M. Novak, D. A. Wetz, A. F. Matasso, «Evaluation of High C Rate Cycle Induced Aging on Low Impedance Lithium-Ion Batteries using In-Situ Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Analysis» *ECS Transactions,* № 58(48), pp. 207-222, 2014.

[99] D.-I. Stroe, E. Schaltz, «Lithium-Ion Battery State-of-Health Estimation Using the Incremental Capacity Analysis Technique» *EEE Transactions on Industry Applications,* т. l, № 56, pp. 678-685, 2020.

[100] В. Штиллер, Уравнение аррениуса и неравновесная кинетика, Москва: Мир, 2000.

[101] Y. Yang, X. Hu, D. Qing, F. Chen, «Arrhenius equation- based cellhealth assessment: application to thermal energy management design of a HEV NiMH battery pack» *Energies,* № 6(5), pp. 2709-2725, 2013.

[102] J. Wanga, P. Liu, J. Hicks-Garner, E. Sherman, S. Soukiazian, M. Verbrugge, H. Tataria, J. Musser, P. Finamore, « Cycle-life model for graphite-$LiFePO_4$ cells» *Journal of Power Sources* , № 196, p. 3942–3948, 2011.

[103] J. Wang, J. Purewal, P. Liu, J. Hicks-Garner, S. Soukazian, E. Sherman, A. Sorenson, L. Vu, M. W. Harshad Tataria, «Verbrugge Degradation of lithium ion batteries employing graphite negatives and nickelecobaltemanganese oxide þ spinel manganese oxide positives: Part 1, aging mechanisms and life estimation» *Journal of Power Sources* , № 269, pp. 937-948, 2014.

[104] Z. Xiaoqing , Z. Wang, W. Yituo , W. Hsin , C. Wang, L. Tong, M. Yi, «Overcharge investigation of large format lithium-ion pouch cells with Li(Ni0.6Co0.2Mn0.2)O2 cathode for electric vehicles: Thermal runaway features and safety management method» *Energy,* pp. 1-50, 2018.

[105] X. Wanli, «Silicon nanowire anode for lithium-ion batteries: fabrication, characterization and solid electrolyte interphase» Dalian University of Technology, Далянь, 2020.

[106] J. Vetter, P. Novak, M. Wagner, C. Veit, K. C. Möller, J. Besenhar, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler, A. Hammouched, «Ageing mechanisms in lithium-ion batteries» *Journal of Power Sources,* № 147 , p. 269 – 281., 2005.

[107] Т. Г. Дмитриева, П. Р. Казанский и М. В. Захаркин , «Исследование границы раздела кремниевый электрод-электролит в литий-ионных аккумуляторах» 30 май 2016. [В Интернете]. Available: https://www.microscop.ru/stati/item /issledovanie-granici-razdela/. [Дата обращения: 2020 август 12].

[108] М. А. Михеев и И. М. Михеева, Основы теплопередачи, Москва: Энергия, 1977.

[109] Р. Р. Маликов, Р. Ш. Биксалеев, К. Е. Карпухин и А. В. Климов, «Влияние солнечной радиации на накопители энергии электрифицированного ТС» *Автомобильная промышленость,* № 8, с. 19-24, 2021 .

[110] Г. Б. Цветков Ф.Ф., Тепломассообмен, Москва: Издательство МЭИ, 2011.

[111] Х. Уонг, Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров, Москва: Атомиздат, 1979.

[112] А. Д. Альтшуля, Примеры Расчетов По Гидравлике, Москва: Стройиздат, 1977.

[113] А. Д. Альтшуль, Гидравлические сопротивления., Москва: Недра, 1970.

[114] J. Schmalstieg, S. Käbitz, M. Ecker, D. U. Sauer, «A holistic aging model for Li(NiMnCo)O_2 based 18650 lithium-ion» *Journal of Power Sources,* № 257, pp. 325-334, 2014.

[115] I. Baghdadi, O. Briat, J.Y. Deletage, P. Gyan, J.M. Vinassa, «Lithium battery aging model based on Dakin's degradation approach» *Journal of Power Sources*, № 325, pp. 273-285, 2016.

[116] A. Cordoba-Arenas, S. Onori, Y. Guezennec, G. Rizzoni, «Capacity and power fade cycle-life model for plug-in hybrid electric vehicle lithium-ion battery cells containing blended spinel and layered-oxide positive electrodes» *Journal of Power Sources*, № 278, pp. 473-483, 2015.

[117] Р. Ш. Биксалеев, Р. Р. Маликов, К. Е. Карпухин и А. В. Климов *Особенности эксплуатации аккумуляторных электрических транспортных средств в России и методы оценки технического состояния тяговых аккумуляторных батарей*, Москва, «МАНФ-2020» 2020.

[118] E. Namor, D. Torregrossa, S. Fabrizio , R. Cherkaoui, M. Paolone, «Assessment of Battery Ageing and Implementation of an Ageing Aware Control Strategy for a Load Leveling Application of a Lithium Titanate Battery Energy Storage System» в *2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Тронхейм, 2016.

[119] А. И. Гришкевич, Автомобили: Теория: Учебник для вузов., Минск: Высшая школа, 1986.

[120] R. S. Biksaleev, A. V. Rlimov, R. R. Malikov, K. E. Karpuhin, «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.

[121] А. А. Полунгян, Проектирование полноприводных колесных машин. Том 1., Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана., 1999.

[122] К. Климов, «На маршруте электробус КАМАЗ-6282, II генерации» Грузовик Пресс, 21 август 2017. [В Интернете]. Available: http://www.gruzovikpress.ru/article/13638-na-marshrute-elektrobus-kamaz-6282-ii-generatsii/. [Дата обращения: 23 ноябрь 2020].

[123] AirShaper, «What is a Drag Coefficient?» AirShaper, 9 август 2018. [В Интернете]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=bEgoZ_dAg7o&list=PLGalmM09othb5jDw5x23acNMwYzkK7ZMQ&index=1. [Дата обращения: 1 октябрь 2020].

[124] M. Hellmold, K. Stephan, A. Liebing, Progress in Vehicle Aerodynamics and Thermal Management,, Cham: Springer International Publishing AG, 2018.

[125] 3DEXPERIENCE®, XFlow 2020x Validation Guide, Marcel: 3DEXPERIENCE Company, 2019.

[126] А. С. Литвинов и Я. Е. Фаробин, Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств: Учебник для ВУЗов, Москва: Машиностроение, 1989.

[127] Г. И. Гладов и В. В. Павлов, Тягово-динамический расчет транспортных средств, Москва: МАДИ, 1984.

[128] V. A. Gorelov, D. O. Butarovich, A. A. Staduhin, G. I. Skotnikov, «Simulation-based identification of the parameters of a minibus hybrid powertrain» *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering,* № 534, pp. 1-11, 2019.

[129] Р. П. Слабоспицкий , М. А. Хажмурадов и В. П. Лукьянова , «Анализ перспективных систем охлаждения аккумуляторных батарей» *Радиоэлектроника и информатика,* № 2(61), с. 8-12, 2013.

[130] Р. Ш. Биксалеев, Р. М. Бурганов, А. В. Климов и Р. Р. Макликов, «Исследование потоков воздуха при движении электробуса с целью определения его коэффициента обтекаемости и коэффициентов теплопередачи высоковольтных компонентов» *Автомобильная промышленность ,* № 6, 2021.

[131] Р. Слабоспицкий, М. Хажмурадов и В. Лукьянова, «Анализ перспективных систем охлаждения аккумуляторных батарей» *Радиоэлетроника и информатика,* № 3, с. 3-8, 2011.

[132] Ф. Крейт и У. Блэк, Основы теплопередачи, Москва: М.: Мир, 1983.

[133] А. И. Кувичка и Д. О. Бутарович, «Расчетное определение гидравлической характеристики системы охлаждения тяговых батарей электробуса» *Машиностроение и компьютерные технологии,* № 11, с. 17-28, 2017.

[134] TehTab.ru, «АНТИФРИЗЫ на основе этилена и пропиленгликолей и вода. Температуры замерзания. Вязкости. Плотности. Теплоемкости» [В Интернете]. Available: https://tehtab.ru/Guide/GuideMedias/Antifreeze/GuideEPAntifreesesAndWater/. [Дата обращения: 07 декабрь 2020].

[135] Р. Ш. Биксалеев, К. Е. Карпухин и А. В. Климов, «Имитационная модель системы охлаждения в среде Matlab, позволяющая анализировать тепловое состояние аккумуляторного модуля» *Труды НАМИ,* № 279, p. 61–69., 2019.

[136] The MathWorks, Inc., «EV Battery Cooling System» [В Интернете]. Available: https://www.mathworks.com/help/physmod/hydro/ug/sscfluids_ev_battery_cooling.html?container=jshelpbrowser. [Дата обращения: 2020 декабря 20].

[137] Rostec © , «Научно-Производственное объединение «Квант» 5 июнь 2013. [В Интернете]. Available: https://rostec.ru/media/photogallery/4515622/. [Дата обращения: 1 октябрь 2020].

[138] © 2020 rta.eu, «Technical Data Small Climatic Wind Tunnel (small CWT)» [В Интернете]. Available: https://www.rta.eu/images/stories/pdf/MK08-01-AU-03%20Technical%20Data.pdf. [Дата обращения: 1 октябрь 2020].

[139] F. Blum, «Wenn zwischen Naturgewalt und Mensch nur ein PSS 4000 steht» 1 октябрь 2015. [В Интернете]. Available: https://www.ke-next.de/automation/steuerung-industrie-pc/wenn-zwischen-naturgewalt-und-redakteur-nur-ein-pss-4000-steht-368.html. [Дата обращения: 1 октябрь 2020].

[140] ГУП «Мосгортранс», «Техническое задание на городской электробус большой вместимости с низким уровнем пола» 1 Сентябрь 2017. [В Интернете].Available:https://www.mos.ru/upload/documents/oiv/electrobus_project_01092017.pdf. [Дата обращения: 21 Январь 2021].

[141] ООО «Расписание Погоды», «Архив погоды» ООО «Расписание Погоды»,, [В Интернете]. Available: https://rp5.ru/. [Дата обращения: 10 сентябрь 2020].

[142] A. S. Jacob, R. Banerjee, P. C. Ghosh, «Trade-off between end of life of battery and reliability in a photovoltaic system» *Journal of Energy Storage*, № 30, pp. 1-14, 2020.

[143] 3M™, «3M™ Battery Enhancement Material 1807S» 3M™ , [В Интернете]. Available: https://www.3m.com/3M/en_US/company-us/all-3m-products/~/3M-Battery-Enhancement-Material-1807S/?N=5002385+3289468698&rt=rud. [Дата обращения: 16 январь 2021].

[144] © 2020 МИА «Россия сегодня», «Долгая гарантия: Москва развивает контракты жизненного цикла» РИА новости, 10 ноября 2020. [В Интернете]. Available: https://ria.ru/20201110/kontrakty-1583916606.html. [Дата обращения: 9 июнь 2021].

ПРИЛОЖЕНИЕ А Сведения о патентах на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **174 819** (13) **U1**

(51) МПК
B60L 11/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2017116587, 11.05.2017**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
11.05.2017

Дата регистрации:
03.11.2017

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **11.05.2017**

(45) Опубликовано: **03.11.2017** Бюл. № **31**

Адрес для переписки:
423827, РТ, г. Набережные Челны, пр-т Автозаводский, 2, ПАО "КАМАЗ", НТЦ, БПЛиИР, И.Я. Бурганову

(72) Автор(ы):
Климов Александр Владимирович (RU),
Биксалеев Ринат Шакирович (RU),
Оспанбеков Бауржан Кенесович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Публичное акционерное общество "КАМАЗ" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **DE 4408960 C1, 27.04.1995. RU 168447 U1, 02.02.2017. RU 2394307 C1, 10.07.2010. US 8494699 B2, 23.07.2013.**

(54) МОДУЛЬНАЯ СИСТЕМА ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ТЯГОВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

(57) Реферат:

Модульная система терморегулирования состояния тяговых аккумуляторных батарей содержит теплообменники (1), установленные внутри контейнеров аккумуляторной батареи, охлаждающе-подогревающий теплообменник (2), теплообменник (3) ускоренного подогрева, радиатор (4), обдуваемый с помощью электровентилятора (5). Циркуляцию охлаждающей жидкости в системе осуществляет циркуляционный насос (6) переменной производительности с электроприводом, который соединен с напорным трубопроводом (7). Изменение направления потока охлаждающей жидкости осуществляет распределитель (8) с электроуправлением. Теплообменник (2) конструктивно расположен внутри воздуховода (9) климатической системы (10) поддержания микроклимата внутри салона.

Была решена задача повышения эффективности работы системы охлаждения тяговых батарей.

RU 174819 U1

RU 174819 U1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **191 010**(13) **U1**

(51) МПК
B60K 1/04 (2006.01)
B60R 16/04 (2006.01)
B60L 50/60 (2019.01)
B62D 21/02 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B60K 2001/0405 (2019.05); B60K 2001/0455 (2019.05); B60R 16/04 (2019.05); B60L 50/60 (2019.05); B62D 21/02 (2019.05); B60L 2200/36 (2019.05)

(21)(22) Заявка: **2019103737, 11.02.2019**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
11.02.2019

Дата регистрации:
18.07.2019

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **11.02.2019**

(45) Опубликовано: **18.07.2019** Бюл. № **20**

Адрес для переписки:
423827, РТ, г. Набережные Челны, пр. Автозаводский, 2, ПАО "КАМАЗ", НТЦ, БПЛиИР, И.Я. Бурганову

(72) Автор(ы):
Климов Александр Владимирович (RU),
Скутар Роман Дмитриевич (RU),
Биксалеев Ринат Шакирович (RU),
Седенков Сергей Дмитриевич (RU),
Максименко Эдуард Валерьевич (RU),
Масленников Иван Константинович (RU),
Куковинец Олег Васильевич (RU),
Долгий Илья Олегович (RU),
Маликов Рамиль Раильевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Публичное акционерное общество "КАМАЗ" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 125935 U1, 20.03.2013. RU 173152 U1, 14.08.2017. RU 97090 U1, 27.08.2010. CN 203854419 U, 01.10.2014. WO 2017207970 A1, 07.12.2017.**

(54) **Электрическое колесное транспортное средство**

(57) Реферат:

Электрическое колесное транспортное средство содержит тяговый силовой преобразователь, тяговый электрический двигатель (2), соединенный с помощью карданной передачи с ведущим мостом (3), накопители электрической энергии, представляющие собой набор аккумуляторных батарей (6), оснащенных блоками контроля, датчиками состояния, зарядным устройством и преобразователями напряжения, установленны на едином подрамнике, прикрепленном к лонжеронам рамы (4) между передним и задним мостами, при этом аккумуляторные батареи установлены на быстросъемной платформе, выполненной с возможностью быстрого демонтажа.

Предлагаемой полезной моделью решаются задачи повышения технологичности сборки и ремонта электрического оборудования, а также повышения энергетической эффективности электрического колесного транспортного средства, за счет снижения потерь тягового электрического оборудования. 3 ил.

RU 191010 U1

RU 191010 U1

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Протокол исследовательских испытаний

НТЦ
ПАО «КАМАЗ»

"УТВЕРЖДАЮ"
Главный конструктор
по испытаниям
_____ Р.Н. Гиниятуллин
"27" июля 2020 г.

ПРОТОКОЛ № 17-2/3- 17528-2020 от 27 июля 2020 г.
испытаний по результатам исследовательских испытаний климатической системы аккумуляторного колесного транспортного средства (АКТС) и системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) в климатической камере

1 Основание: служебная записка №17700-123 от 29.06.2020.

2 Объект испытаний

2.1 Фабричная или торговая марка	КАМАЗ
2.2 Тип транспортного средства	Автобус городской электрический КАМАЗ-6282
2.3 Категория	M_3
2.4 Код VIN	XTC628200LN000229
2.5 Адрес завода-изготовителя	423827, РФ, РТ, г. Набережные Челны, пр. Автозаводский, 2 ПАО «КАМАЗ»
2.6 Колесная формула	4x2
2.7 Тяговый мотор:	Электродвигатели в количестве 2 шт.
- тип	Электропортальный мост
- модель	ZF AVE 130
- максимальная часовая мощность, кВт	2x60 (ном), 2x120 (пиковая)
2.9 Передаточное число главной передачи	4,78

3 Цель испытаний

3.1 Установление соответствия электробуса городского низкопольного КАМАЗ-6282-0000021К перечню обязательных требований технического регламента ТР ТС 0188/2011 и ТУ 37.104.410-2015, а также оценка его эксплуатационных свойств.

4 Условия проведения испытаний

4.1 Испытания проводились на территории АО «НПО «КВАНТ» г. Великий Новгород, в климатической камере. В ходе исследований для определения времени прогрева и охлаждения салона АКТС и ТАБ было проведено 7 испытаний при температурах окружающей среды +40, +30, +10, -10, -20, -30 и -40 °С.

5 Результаты испытаний

5.1 Испытания при разных температурах окружающей среды показали, что система термостатирования ТАБ и климатическая система АКТС функциональность систем сохраняется на 100 %. Время остывания и прогрева после выдержки ТАБ и салона АКТС соответствуют требованиям ТУ 37.104.410-2015 и перечню обязательных требований технического регламента ТР ТС 0188/2011.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»

Россия, 125319, Москва, Ленинградский просп., 64.
Тел. (499) 346-01-68 доб. 12-00, факс (499) 151-89-65. Интернет: http://www.madi.ru. E-mail: info@madi.ru

Утверждаю

Проректор по учебной работе

_____/В.В.Татаринов/

«__1__» августа 2021 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс результатов работы аспиранта Биксалеева Рината Шакировича

Результаты работы аспиранта ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» Биксалеева Р.Ш. на тему «Принципы и алгоритм управления системой термостатирования накопителей электрической энергии для электрифицированных автотранспортных средств» внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Московский автомобильный-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Результаты исследований Биксалеева Р.Ш. используются при обучении студентов на следующих направлениях подготовки бакалавриата, магистратуры, специалитета и программах подготовки кадров высшей квалификации: 13.03.03 «Электрооборудование автомобилей и электромобили», 13.03.02 «Электрооборудование автомобилей и электромобили», 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы».

Разработанные методики и результаты проведения экспериментальных исследований системы термостатирования тяговых аккумуляторных батарей, имитационные модели оценки времени выхода на рабочие режимы эксплуатации и оценки степени работоспособности (SOH) аккумуляторов использовались при чтении лекций и проведении семинаров.

Результаты научно-квалификационной работы аспиранта Биксалеева Р.Ш. рекомендованы к внедрению в учебный процесс решением кафедры «Электротехника и Электрооборудование» (протокол №11 от «2» июля 2021г.)

Заведующий кафедрой

«Электротехника и электрооборудование» _____/В.И.Строганов/

ООО «ИННОВАЦИОННЫЙ ЦЕНТР « К А М А З »

АКТ

опытно-промышленного внедрения результатов диссертационной работы Биксалеева Рината Шакировича на соискание ученой степени кандидата технических наук

Результаты диссертационной работы «Принципы и алгоритм управления системой термостатирования накопителей электрической энергии для электрифицированных автотранспортных средств», представленной на соискание ученной степени кандидата технических наук, использованы в опытно-конструкторской работе «Установка системы термостатирования для электробуса КАМАЗ 6282» при разработке систем термостатирования тяговых аккумуляторных батарей автотранспортного средства категории М3:

1. Разработка имитационной модели в среде Matlab/Simulink системы термостатирования тяговых аккумуляторных батарей;
2. Разработка технических требований на разработку системы термостатирования электрифицированного автотранспортного средства КАМАЗ категории М3.

Использование указанных результатов позволило определить время выхода на рабочий режим эксплуатации, температуру тяговой аккумуляторной батареи в зависимости от температуры окружающей среды, оценить ресурс тяговой аккумуляторной батареи в зависимости от условий эксплуатации.

Руководитель группы автомобильной электроники — Б.К. Оспанбеков

Руководитель группы автомобильной электрики, и.о. руководителя службы электрифицированных автомобилей — И. О. Долгий

Исполнительный директор ООО «Инновационный центр «КАМАЗ» — А.В. Горбатовский