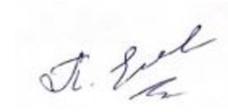


На правах рукописи



Пунт Елена Александровна

**МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРЕДАВАРИЙНОГО ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ВОЗДУШНОГО СУДНА НА ОСНОВЕ
ЦИФРОВОГО ПОРТРЕТА**

Специальность – 2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Московский государственный технический университет гражданской авиации"(МГТУ ГА) на кафедре "Электротехники и авиационного электрооборудования".

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Электротехники и авиационного электрооборудования"ФГБОУ ВО МГТУ ГА **Халютин Сергей Петрович**

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет"**Букреев Виктор Григорьевич**

Кандидат технических наук, доцент 91 кафедры Электрооборудования (и оптико-электронных систем) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина. **Дмитриев Владимир Михайлович.**

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации (ФГУП ГосНИИ ГА)

Защита состоится 29 января 2025 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 42.2.001.01 на базе ФГБОУ ВО МГТУ ГА по адресу: 125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский государственный технический университет гражданской авиации"(МГТУ ГА) и на сайте www.mstuca.ru.

Автореферат разослан " " 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 42.2.001.01
доктор технических наук, профессор



В.М. Самойленко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из актуальных проблем гражданской авиации является обеспечение безопасности полетов. Однако, авиационные происшествия продолжают происходить, о чем свидетельствуют отчеты о безопасности полетов ФАВТ и IATA. Согласно статистике, около 20–30 % авиационных происшествий происходят по причине отказа авиационной техники, в частности, электрооборудования.

Электрооборудование современного воздушного судна (ВС) представляет собой сложный электротехнический комплекс, состоящий из системы электроснабжения (СЭС) и множества потребителей электрической энергии. Функциональные системы ВС, устройства и системы бортового пилотажно-навигационного комплекса получают энергию от СЭС, поэтому надежность СЭС ВС в значительной степени определяет безопасность полетов.

На борту современного ВС СЭС является одной из основных энергосистем. Согласно ряду исследований электрическая энергия обладает преимуществами относительно других видов энергии:

- электрическая энергия может применяться для питания любого типа оборудования ВС;
- достаточно высокий уровень КПД при преобразовании и передаче электроэнергии;
- относительная простота реализации алгоритмов управления СЭС;
- низкая стоимость эксплуатации.

Все это приводит к тому, что количество потребителей электроэнергии на борту ВС возрастает, а следовательно увеличивается нагрузка на электротехнические устройства системы электроснабжения, что может приводить к ухудшению их функционирования или полного выхода из строя.

На данный момент как в России, так и за рубежом ведутся работы по созданию полностью электрического самолета (ПЭС). Согласно концепции ПЭС, питание всего оборудования ВС осуществляется от централизованной электрической системы. Это позволит оптимизировать работу газотурбинных двигателей, сократить суммарную массу оборудования и систем распределения энергии, уменьшить удельный расход топлива и снизить затраты на техническое обслуживание. Также такой самолет является более экологичным, по сравнению с ВС, на борту которых применяются газотурбинные и поршневые двигатели. На данный момент эта задача частично решена на таких ВС как Boeing 787 Dreamliner, Boeing 777, A 380, A400M и др. Бортовые системы таких самолетов используют для своей работы только электрическую энергию.

Таким образом, из вышесказанного можно сделать вывод, что в настоящее время нагрузка на электрооборудование современного ВС возрасла и будет возрастать в дальнейшем. Для современного уровня развития электроэнергетических комплексов характерно появление новых типов электротехнических устройств, а также усложнение условий функционирования существующих. Повышенный уровень энергетической нагрузки на эти устройства приводит к повышению вероятности выхода их из строя, снижению их ресурса. Одним из главных факторов, влияющих на ресурс оборудования, является высокая рабочая температура, которую сложно, а в некоторых случаях и невозможно отслеживать встроенными системами контроля. Исходя из этого, тема исследования, направленная на исследование тепловых режимов бортового электротехнического оборудования, мониторинг и диагностирование их теплового состояния, является весьма актуальной в процессе эксплуатации бортового оборудования.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам исследования авиационного электрооборудования, в том числе тепловых режимов, посвящены многочисленные работы В. А. Винокурова, А. Г. Гарганеева, С. А. Грузкова, А. О. Давидова, Б. В. Жмурова, Б. С. Зечихина, Ю. Г. Иванишина, В. В. Иванова, В. С. Кулебакина, В. А. Калия, Д. Л. Калужского, К. В. Капелько, К. В. Ковалёва, Л. К. Ковалёва, А. В. Лёвина, И. И. Лукина, И. А. Мараховского, С. И. Маслова, Н. З. Мастяева, С. М. Мусина, Г. С. Мыщыка, В. Т. Морозовского, С. А. Решетова, М. Ю. Румянцева, А. А. Савелова, И. М. Синдеева, С. П. Халютинина, С. А. Харитоновна и других.

Теоретическими вопросами эксплуатации, летной годности, в том числе диагностированием состояния воздушных судов и авиационного оборудования, занимались Ю. П. Артеменко, Б. И. Бачкало, В. Г. Воробьев, В. В. Глухов, Ю. В. Козлов, В. Д. Константинов, С. В. Кузнецов, С. Ф. Машошин, В. И. Павлова, Ю. В. Попов, И. М. Синдеев, Ю. М. Чинючин и другие.

Объект исследования – авиационные электротехнические устройства.

Предметом исследования является метод диагностирования предаварийного состояния электротехнических устройств на основе оценки их теплового состояния.

В соответствии с паспортом специальности 2.9.6 Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники предмет исследования соответствует требованиям к области исследований, указанным в пункте 4 перечня областей исследования (разработка и совершенствование методов контроля, проведения летных и наземных испытаний, диагностирования и прогнозирования технического состояния авиационной техники на всех этапах ее жизненного цикла).

Цель научного исследования заключается в повышении безопасности полетов воздушного судна за счет предотвращения аварийных режимов в электротехнических устройствах на основе оценки их теплового состояния.

Практическое противоречие между необходимостью постоянного контроля температуры ЭТУ в процессе эксплуатации и отсутствием средств контроля температуры самой нагретой части устройства, а также *противоречие в теории* между возможностями цифровых вычислительных систем, обладающих высокой точностью и быстродействием и отсутствием методов диагностирования ЭТУ с использованием цифровых вычислительных систем приводит к необходимости решения **научной задачи** разработки метода диагностирования предаварийного теплового состояния ЭТУ на основе использования цифрового (теплового) портрета.

Научная задача разбита на ряд подзадач:

- анализ причин тепловых потерь в ЭТУ ВС в нормальных и аварийных режимах работы;
- анализ существующих методов диагностики ЭТУ ВС;
- анализ методов моделирования тепловых режимов ЭТУ ВС;
- разработка математической модели тепловых режимов литийионного аккумулятора на основе метода математического прототипирования энергетических процессов;
- разработка модифицированного метода конечных объемов для получения цифровой динамической модели теплового поля;
- разработка математической компьютерной модели теплового поля температур литийионного аккумулятора на основе модифицированного метода конечных объемов;
- разработка метода диагностирования ЛИА по тепловым цифровым портретам;
- проведение экспериментальных исследований разработанной методики;
- формирование рекомендаций по применению методики диагностирования ЛИА на основе их тепловых цифровых портретов.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

- разработан модифицированный метод конечных объемов, отличающийся от известного применением метода математического прототипирования энергетических процессов, гарантированной точностью расчетов и сведением уравнений математической физики к уравнениям Коши;
- разработана математическая модель тепловых режимов работы литийионного аккумулятора, отличающаяся применением метода математического прототипирования энергетических процессов и использованием модифицированного метода конечных объемов, а также получением аналитического выражения для скалярного поля температур;
- разработан новый метод диагностирования предаварийного теплового состояния литийионного аккумулятора на основе цифрового портрета.

Практическая значимость полученных результатов определяется возможностью практического внедрения разработанной методики диагностирования в бортовом вычислителе ВС, что позволит спрогнозировать через какой промежуток времени произойдет отказ оборудования и своевременно отключить его от приемников электрической энергии. Внедрение полученных результатов позволит повысить уровень эксплуатационной надежности и безопасности полетов. Полу-

ченные результаты предназначены для использования инженерно-техническими службами аэропортов и авиакомпаний, разработчиками перспективных систем электрооборудования и электротехнических устройств ВС.

Положения, выносимые на защиту:

- модифицированный метод конечных объемов для численного расчета теплораспределения в литийионном аккумуляторе на основе метода математического прототипирования энергетических процессов;
- методика автоматического формирования уравнений метода математического прототипирования энергетических процессов по геометрии конечных объемов;
- метод диагностирования предаварийного теплового состояния литийионного аккумулятора на основе цифрового портрета, формируемого с применением модифицированного метода конечных объемов и метода математического прототипирования энергетических процессов;
- результаты экспериментальных исследований.

Автором лично получены все основные результаты, выносимые на защиту:

- модифицированный метод конечных объемов для численного расчета теплораспределения в литийионном аккумуляторе на основе метода математического прототипирования энергетических процессов;
- методика автоматического формирования уравнений метода математического прототипирования энергетических процессов по геометрии конечных объемов;
- метод диагностирования предаварийного теплового состояния литийионного аккумулятора на основе цифрового портрета, формируемого с применением модифицированного метода конечных объемов и метода математического прототипирования энергетических процессов;
- результаты экспериментальных исследований разработанной методики.

Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается совпадением результатов эксперимента с расчетными данными, а также применением известных апробированных математических методов, в том числе метода математического прототипирования энергетических процессов, законов термодинамики и технической диагностики.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: Научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского», Москва, МГТУ ГА, 2020, 2022, 2023, 2024 гг.; Международной конференции «Проблемы информатики, электроники и радиотехники» (ПИЭР), Новосибирск, НГТУ, 2020 г.; Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки» (АВИАТОР), Воронеж, ВУНЦ ВВС, 2021 г.; Международной конференции молодых специалистов по микро/нано технологиям и электронным приборам (EDM), Алтай, Эрлагол, 2021, 2022, 2023 гг.; Гранте Ученого совета МГТУ ГА, Москва, МГТУ ГА, 2021 г.; Международной ежегодной конференции «Возобновляемая и малая энергетика – 2022. Энергосбережение. Автономные системы энергосбережения стационарных и подвижных объектов», Москва, МЭИ, 2022 г.

По материалам диссертации автором опубликованы научные работы, из них в изданиях ВАК – 1, SCOPUS – 3. Зарегистрированы 2 программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 166 страниц, в том числе 58 рисунков, 10 таблиц. Список литературы содержит 92 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, выявлены противоречия практического и научного характера в области диагностирования предаварийного теплового состояния электротехнических устройств, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ тепловых режимов существующих электротехнических устройств при нормальных и аварийных режимах работы, проведен обзор существующих мето-

дов диагностирования и прогнозирования состояния электротехнических устройств, выделены их достоинства и недостатки.

В электрооборудовании преобразование энергии неизбежно связано с нежелательными явлениями, такими как нагрев, магнитное рассеяние, механические деформации, вибрации и т.д. Наибольшее рассеяние энергии проявляется в виде тепла, нагревающего элементы устройства и устройство в целом. Как правило, нагрев заметно ухудшает характеристики оборудования, а в некоторых случаях может нарушать их работоспособность или выводить их из строя.

На борту воздушного судна (ВС) аккумуляторные батареи (АБ) используются в качестве аварийных источников электрической энергии. Во время полета АБ используются для запуска вспомогательной силовой установки (ВСУ), остановившегося двигателя, а также для питания приемников электроэнергии 1-й категории при отказе основных источников питания. АБ работают параллельно с основными источниками электроэнергии и выполняют роль вспомогательных источников, что обеспечивает требуемое качество электроэнергии.

В настоящее время перспективными являются литийионные аккумуляторные батареи (ЛИАБ), которые широко используются на новых гражданских ВС и беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). Преимуществами ЛИАБ является достаточно высокое напряжение на элементе по сравнению с никель-кадмиевыми аккумуляторами; малый саморазряд; отсутствие эффекта памяти; энергетическая плотность в 1,5-2 раза выше, чем в кислотных или щелочных батареях; высокие нагрузочные характеристики.

При эксплуатации ЛИАБ на борту ВС могут возникать аварийные режимы работы. Наиболее опасным является чрезмерный нагрев ЛИАБ вследствие теплового разгона, который в некоторых случаях может привести к взрыву, что существенно снижает безопасность полетов.

В настоящее время применяются различные методы технической диагностики, позволяющие с определенной точностью определять техническое состояние авиационного оборудования. Системы встроенного контроля позволяют проводить диагностику всех систем ВС, однако, они не позволяют контролировать критические температуры в недоступных для измерения точках. Широкое применение для диагностирования авиационной техники нашли методы неразрушающего контроля, такие как: метод термометра, метод заложенных термопреобразователей, метод термопар, метод инфракрасного излучения. Такие методы позволяют получать значение температуры устройства в режиме реального времени. Однако, подобные методы позволяют измерять температуру непосредственно в месте установки измерительного устройства (метод заложенных термопреобразователей), или на поверхности устройства (метод термометра), что является существенным недостатком методов, поскольку температура отличается в разных частях устройства.

Перспективным для диагностирования и прогнозирования состояния ЭТУ является использование «цифровых портретов». Параметры «цифровых портретов» идентифицируются в процессе эксплуатации ЭТУ средствами цифровых интеллектуальных систем распределения электроэнергии. Отклонения параметров диагностируемых устройств приводят к изменению «цифровых портретов», то есть характеризуют изменение свойств ЭТУ. В случае выхода этих параметров за допустимые пределы, диагностируется отказ устройства, а экстраполяция динамики изменения свойств позволяет прогнозировать отказы во время их функционирования.

В диссертационной работе предлагается метод диагностирования, основанный на применении цифровых тепловых портретов для мониторинга теплового состояния ЛИАБ, что позволит предсказать возможный отказ и предотвратить его.

Во второй главе получена математическая модель теплового поля литийионного аккумулятора, представлен модифицированный метод конечных объемов и описана методика расчета распределения тепла в литийионном аккумуляторе.

Важным этапом при разработке метода диагностирования предаварийного теплового состояния ЛИА, основанного на применении цифровых портретов, является разработка математической модели тепловых процессов. Такая модель получена с применением метода математического прототипирования энергетических процессов и использовалась при разработке нового численного метода моделирования – модифицированного метода конечных объемов.

Введем следующие ограничения и допущения для разрабатываемой математической модели:

1. Рассматриваемые области, в которых определяется распределение тепла, должны быть замкнуты (ограничены множеством поверхностей), при этом замыкание всего исследуемого пространства необходимо обеспечить замкнутой поверхностью (границей области), достаточно удаленной от заданного объекта, считая неизменной температуру на его поверхности (т.е. температуру окружающей среды); термин «достаточно удаленный» подразумевает некоторое допущение, которое можно количественно задать вариацией δT температуры на границе области и которая зависит от расстояния от объекта и от свойств теплопроводности окружающей среды.

2. Внутренние области, ограниченные заданными поверхностями, являются замкнутыми, и параметр, характеризующий свойство теплопроводности, считается постоянным.

3. Источники тепла задаются в виде замкнутых геометрических трехмерных объектов, для которых задано распределение температуры во времени и пространстве в виде гладкой дифференцируемой функции четырех аргументов (3-х координат и времени).

4. Имеется метод определения температуры каждой внутренней области на основе известного распределения температуры на граничной области и экспериментально полученных динамик изменения температуры в измеряемых точках исследуемого объекта.

5. В рассматриваемой системе вещества не изменяют своего положения в пространстве (не движутся).

Согласно предлагаемому методу, для нахождения распределения температуры исследуемого устройства (системы), его исходный объем требуется разбить на несколько объемов (конечные объемы). Для каждого объема будем находить значение температуры, решая уравнения, полученные с использованием метода математического прототипирования энергетических процессов.

Отличительными чертами предлагаемого подхода от известного метода конечных объемов являются:

– для моделирования теплопередачи используется метод математического прототипирования энергетических процессов, корректность которого подтверждена тем, что в его основе лежат законы сохранения и начала термодинамики,

– в уравнениях теплопроводности используются только производные по времени ввиду того, что принято допущение о том, что вещества в рассматриваемой системе не изменяют своего положения в пространстве;

– окончательная топология разбиения заданного пространства получится только в результате последовательного деления объемов с контролем точности после промежуточных расчетов, а не перед началом процедуры интегрирования.

Формирование уравнений динамики для конечных объемов

Запишем основное уравнение теплообмена, полученное методом математического прототипирования энергетических процессов, для выделенного i -го сегмента (объема) (рис.1).

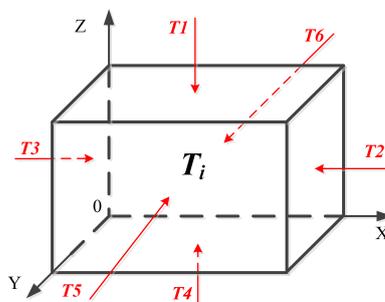


Рисунок 1 – i -й сегмент (объект) исследуемой системы

Как видно из (рис. 1) процесс теплопереноса в общем случае осуществляется по 6-ти граням i -го объема:

$$\begin{aligned}
 C_i m_i \frac{dT_i}{dt} = & \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_{x+\Delta x} - \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_x + \\
 & + \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_{y+\Delta y} - \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_y + \\
 & + \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_{z+\Delta z} - \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_z,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $\left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_{x+\Delta x} = \lambda S_x \Delta T_x$ – матрица-столбец переноса теплоты через грань с координатой $x + \Delta x$ по оси X ;

T_i – температура i -го объема.

В матричном виде уравнения для всех объемов запишутся в виде

$$\mathbf{K} \frac{d\mathbf{T}}{dt} = \Lambda \mathbf{T} + \mathbf{T}_{01} + \mathbf{Q}, \tag{2}$$

где $\mathbf{K} = Cm$ – диагональная матрица коэффициентов, количественно учитывающих инерционные свойства объектов системы (постоянные времени);

$\mathbf{T} = (T_1, T_2, \dots, T_n)^T$ – вектор координат состояния (температур) всех объемов;

\mathbf{T}_{01} – матрица, учитывающая влияние температуры окружающей среды на приток (отток) тепла к каждому объёму (не равна нулю только для тех объемов, которые находятся на границе системы),

$$\mathbf{T}_{01} = \begin{pmatrix} \lambda_{0(1)} S_{0(1)} T_0 \\ \dots \\ \lambda_{0(i)} S_{0(i)} T_0 \\ \dots \\ \lambda_{0(n)} S_{0(n)} T_0 \end{pmatrix}; \tag{3}$$

T_0 – температура окружающей среды;

n – количество объёмов, на которое разбита система;

$S_{0(i)}$ – суммарная площадь соприкосновения i -го объёма с границей системы;

\mathbf{Q} – внешний источник теплоты, обусловленный протеканием тока, например для n объёмов, в каждом из которых имеется составляющая тока, например вдоль оси Y , матрица \mathbf{Q} запишется так:

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} (j_{y1} S_{xz1})^2 \rho_{y1} \frac{y_1}{S_{xz1}} \\ \dots \\ (j_{yi} S_{xzi})^2 \rho_{yi} \frac{y_i}{S_{xzi}} \\ \dots \\ (j_{yn} S_{xzn})^2 \rho_{yn} \frac{y_n}{S_{xzn}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 (j_{y1})^2 \rho_{y1} \\ \dots \\ V_i (j_{yi})^2 \rho_{yi} \\ \dots \\ V_n (j_{yn})^2 \rho_{yn} \end{pmatrix}, \tag{4}$$

В уравнении (4):

j_{yi} – плотность тока вдоль оси Y для i -го объекта,

ρ_{yi} – удельное электрическое сопротивление вдоль оси Y для i -го объекта,

S_{xzi} – площадь поперечного сечения i -го объекта, перпендикулярно оси Y ,

y_i – длина i -го объекта по оси Y ,

$V_i = y_i S_{xzi} = x_i S_{yzi} = z_i S_{xyi}$ – объём i -го объекта.

В общем случае, если есть составляющие токов по всем осям, тогда

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} V_1 [(j_{x1})^2 \rho_{x1} + (j_{y1})^2 \rho_{y1} + (j_{z1})^2 \rho_{z1}] \\ \dots \\ V_i [(j_{xi})^2 \rho_{xi} + (j_{yi})^2 \rho_{yi} + (j_{zi})^2 \rho_{zi}] \\ \dots \\ V_n [(j_{xn})^2 \rho_{xn} + (j_{yn})^2 \rho_{yn} + (j_{zn})^2 \rho_{zn}] \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Матрица Λ характеризует диссипативные свойства системы и состоит из коэффициентов, зависящих от теплопроводности объемов, коэффициентов теплоотдачи и геометрических параметров объемов в соответствии с уравнениями метода математического прототипирования энергетических процессов.

Методика расчета распределения тепла в исследуемом объекте

Исходя из рассмотренных гипотез предлагается итерационная методика, в которой для заданной погрешности определения температуры получается аналитическая функция зависимости температуры от четырех параметров (три пространственные координаты и время).

Методика состоит из следующей последовательности действий:

1. Задание исходных данных:
 - геометрии объекта и окружающей среды для первичного разбиения на условно однородные среды (параметр теплопроводности постоянный);
 - погрешности определения температуры во внутренних областях;
 - погрешности задания граничной области;
 - геометрии источников тепловыделения и распределения температуры внутри них в виде аналитической функции.
2. Проверка замкнутости внутренних объемов и соответствия граничной области заданным погрешностям.
3. Определение метода деления внутренних объемов (необходимо для формализации процедуры достижения заданной точности расчета).
4. Запуск таймера (задаем начальное значение времени).
5. Выполнение следующей последовательности действий:
 - применение методики расчета для исходной геометрии объектов (получение значения температуры для каждой внутренней области);
 - каждый внутренний объем делим (например, пополам) заданным выше методом деления;
 - применение методики расчета для новой геометрии объектов (получаем значения температур для каждого объема, т.е. для частей исходных объемов);
 - проверка условия остановки деления (сравнение значений температур для текущей итерации со значениями температур, полученных на предыдущей итерации с учетом заданной погрешности);
 - для объемов, в которых условие остановки деления выполнено, деление прекращаем, фиксируем значения температур;
 - для объемов, в которых условие остановки деления не выполнено, производим очередное деление;
 - применяем методику расчета к текущей конфигурации объемов;
 - повторяем предыдущие действия в цикле до тех пор, пока не выполнится условие остановки деления.
6. Если итерационный процесс закончился, то делаем приращение по координате времени и возвращаемся к п.5.

7. Если итерационный процесс не заканчивается по условию остановки деления, тогда вводим дополнительные ограничения в соответствии с критерием Кнутсена.

8. Процесс во времени останавливаем либо при достижении установившегося режима (проверка осуществляется по заданному допуску изменения температур на соседних итерациях по времени), либо при заданном времени окончания расчетов; следует отметить, что первый вариант остановки возможен только при постоянных источниках тепловыделения.

9. Проводим аппроксимацию полученных значений температур гладкой аналитической функцией.

Описанная методика может быть представлена в виде блок-схемы (рис. 2)

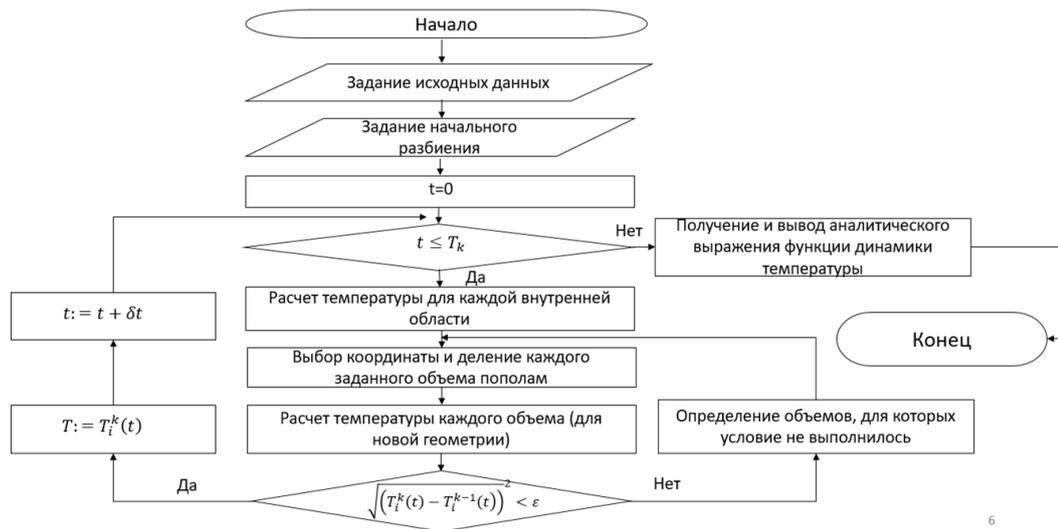


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма расчета теплораспределения

Для компьютерной реализации модифицированного метода конечных объемов используются принципы объектно-ориентированного программирования. Исходя из введенных ограничений для разрабатываемой математической модели, каждая из областей, для которой рассчитывается распределение температуры, будет представлена в виде класса.

В рамках создания первичного разбиения задаются процедуры расчета координат средней точки объекта, массы, объема объекта, которые вычисляются по формулам:

$$N_{\text{cp}} = \begin{cases} x_{\text{cp}} = \frac{x_{\text{max}} + x_{\text{min}}}{2}, \\ y_{\text{cp}} = \frac{y_{\text{max}} + y_{\text{min}}}{2}, \\ z_{\text{cp}} = \frac{z_{\text{max}} + z_{\text{min}}}{2}. \end{cases}$$

$$V = (x_{\text{max}} - x_{\text{min}})(y_{\text{max}} - y_{\text{min}})(z_{\text{max}} - z_{\text{min}}),$$

$$m = \rho V.$$

Процесс распределения тепла в исследуемом объекте заключается в передаче тепла между объемами веществ и объемами воздуха. Причем, на сам процесс теплопередачи существенно влияет площадь соприкосновения между соответствующими объемами. После реализации процедуры деления в новой геометрии могут возникать различные сочетания соприкосновения объемов. На рис. 3 приведены примеры основных случаев.

Особенностью этой процедуры является то, что необходимо рассмотреть все пары из множества объемов системы, при этом для каждой пары объемов для каждой из координат (X, Y, Z) существует 6 вариантов взаимодействия в случае, если грани объектов находятся в одной плоскости:

- 1 и 2 варианты – площадь границы второго объекта находится внутри площади первого объекта (см. рис.3 А, Б) или площадь границы первого объекта находится внутри площади второго объекта;
- 3 и 4 варианты – площади не пересекаются (см. рис.3 В, Г);
- 5 и 6 варианты – пересечение площадей, при котором для каждого объекта из пары пересекается только часть площади (см. рис.3 Д, Е).

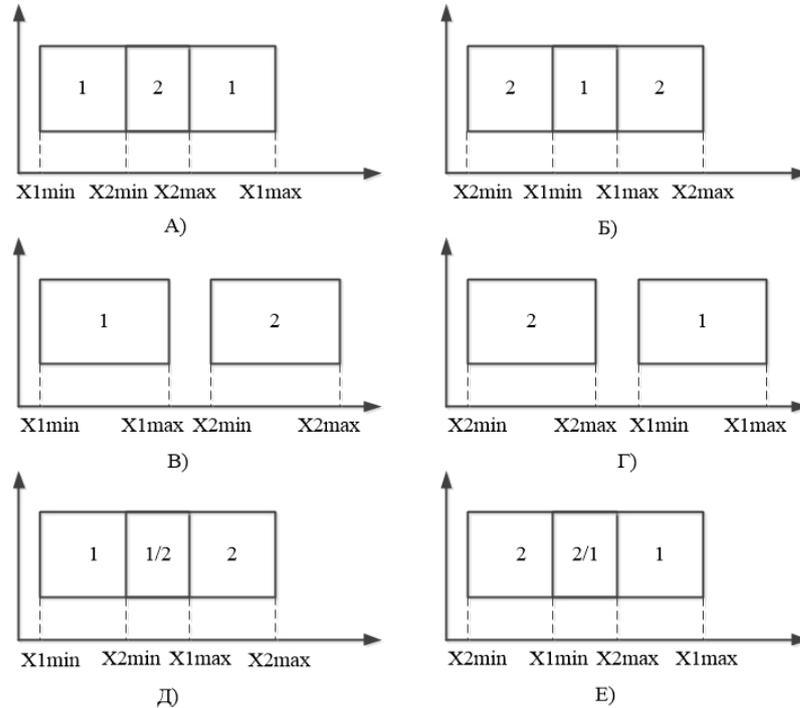


Рисунок 3 – Возможные комбинации пересечения граней двух объемов по оси X , находящихся в одной плоскости

Таким образом, исходя из взаимного расположения двух объемов, зная соответствующие координаты, рассчитывается площадь соприкосновения, которая является важным параметром в расчете матрицы теплопроводности (Λ) и матрицы площадей соприкосновения элемента с объемом воздуха (T_{01}).

На основе этого формируется матрица площадей соприкосновения между парами объемов по каждой из плоскостей (XY , XZ , ZY).

Первоначальным этапом для формирования матрицы площадей соприкосновения двух объемов является проверка условия нахождения этих объемов в одной плоскости и имеющих соприкосновение друг с другом. Для проверки этого условия необходимо сравнить максимальные и минимальные координаты объемов по оси X .

$$\begin{aligned} x1_{min} &= x2_{max}, \\ x1_{max} &= x2_{min}. \end{aligned} \quad (6)$$

При выполнении условия (6) можно сделать вывод, что поступившие на вход процедуры объемы находятся в одной плоскости и соприкасаются друг с другом.

Для расчета площади соприкосновения объемов необходимо определить координаты площади соприкосновения, исходя из взаимного расположения объемов 3 и рассчитать площадь по формуле:

$$S_{ZY} = (zz_{max} - zz_{min})(yy_{max} - yy_{min}),$$

где $yy_{min}, yy_{max}, zz_{min}, zz_{max}$ – координаты площади соприкосновения объемов в плоскости ZY .

Формирование матрицы теплопроводности

Процедура формирования матрицы теплопроводности может быть представлена следующим алгоритмом:

- задается матрица с количеством строк и столбцов равным количеству объемов, составляющих геометрию исследуемого объекта;
- производится последовательная проверка всех объемов геометрии между собой на наличие соприкосновения по каждой плоскости (XY, ZY, YZ), используя заранее сформированные матрицы площадей;
- если для проверяемых объемов имеется соприкосновение, то значение площади, взятое из матрицы площадей, умножается на соответствующее значение матрицы теплоотдачи-теплопроводности;
- полученное значение со знаком минус вносится в матрицу;
- если соприкосновения объектов нет, то в формируемую матрицу заносится значение нуль.

Формирование матрицы взаимодействия объемов с воздушной средой

Формирование матрицы взаимодействия объемов с воздушной средой представляет собой произведение суммарной площади соприкосновения каждого объема с окружающей средой (с границей исследуемой области), умноженной на коэффициент теплопередачи. Для реализации этой процедуры подготовительным этапом является определение максимальных и минимальных координат по каждой оси границ исследуемого объема. Далее, путем перебора всех объемов, составляющих геометрию после деления, проводится проверка: граничит ли проверяемый объем с внешней средой.

Формирование матрицы теплоты

При формировании класса, необходимого для задания исходной геометрии исследуемого объекта одним из параметров является плотность тока по каждой из трех координат – j_{ix}, j_{iy}, j_{iz} . Исходя из заданных параметров и координат объемов, формирующих геометрию, формируются матрицы токов по трем осям – X, Y, Z с использованием формул (7), (8):

$$R_x = \rho_R \frac{l_x}{S_{ZY}}, \quad (7)$$

$$I_x = j_{ix}^2 S_{ZY} \rho_R l_x \quad (8)$$

Для каждого объема геометрии по представленным формулам формируются три матрицы токов – $matrix_{I_x}, matrix_{I_y}, matrix_{I_z}$. Таким образом, формируемая матрица теплоты получается путем сложения трех матриц токов.

Формирование матрицы К

К представляет собой матрицу, каждый элемент которой является произведением объема сегмента на плотность материала данного сегмента. Алгоритм формирования уравнения (2) и пересчета матриц представлен на рис. 4. При этом уравнение (2) представляется в виде разностных уравнений численного интегрирования методом Эйлера:

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{T}_{i-1} + \mathbf{K}^{-1} [\Delta \mathbf{T}_{i-1} + \mathbf{T}_{01} \mathbf{T}_0 + \mathbf{Q}] \Delta t, \quad (9)$$

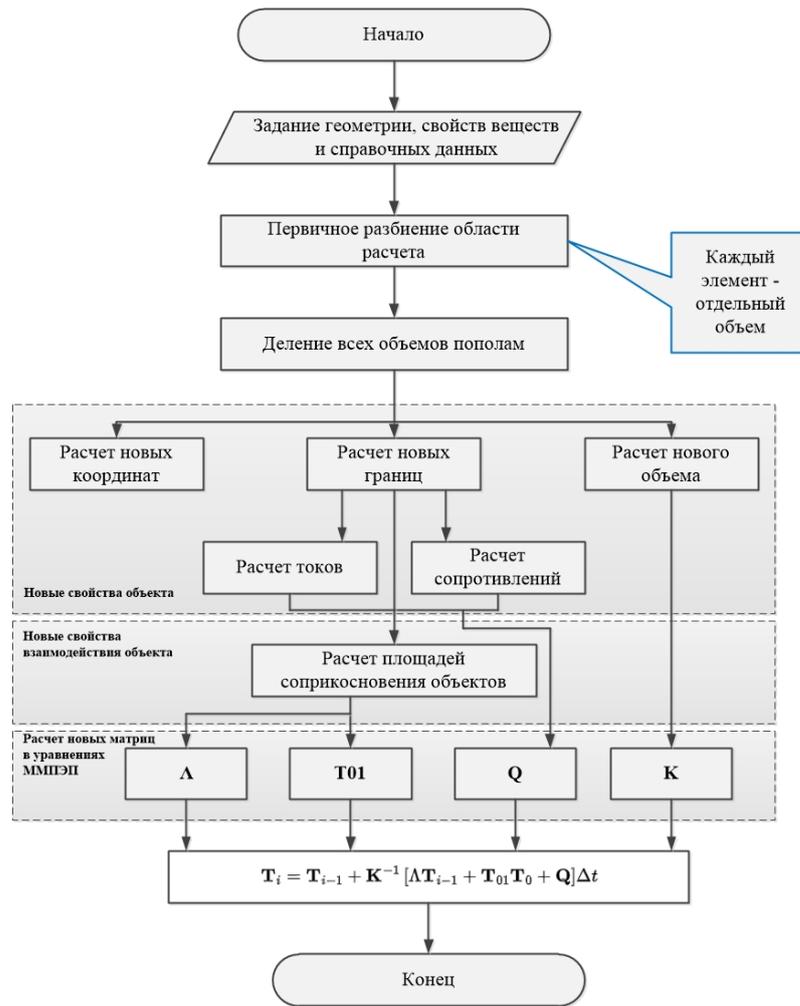


Рисунок 4 – Алгоритм автоматического формирования уравнений теплопроводности в модифицированном методе конечных объемов

На рисунках представлены результаты моделирования с применением разработанной методики. Расчет производился для различных значений тока и температуры окружающей среды.

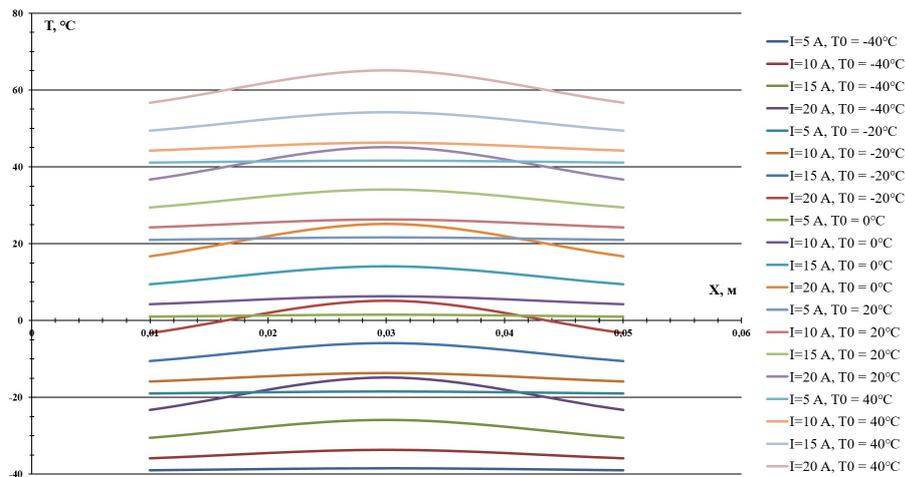


Рисунок 5 – Семейство кривых распределения температуры для исходной геометрии аккумулятора

Семейство кривых распределения температуры для левого (на рис.6 выделено красным) объема воздуха с координатами $X = (-0,06; 0)$, $Y = (0; 0,02)$, $Z = (0; 0,02)$ после ряда процедур его

деления по оси X для различных значений окружающих условий (начальной температуры от -40 до $+40$ °C) и режимов работы (токов разряда/заряда от 5 до 20 А) представлено на рис.7.

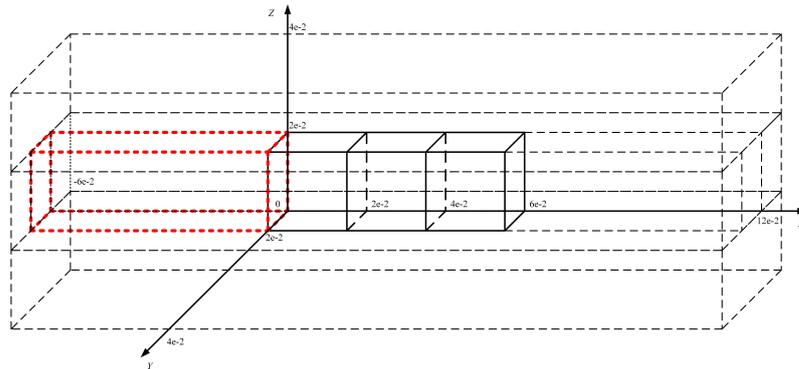


Рисунок 6 – Схема объекта моделирования

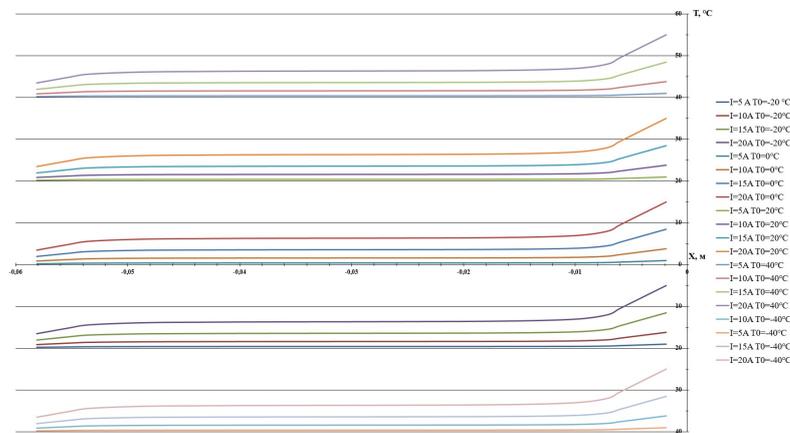


Рисунок 7 – Семейство кривых распределения температуры для левого объема воздуха после его деления по оси X

Семейство кривых распределения температуры для верхнего (на рис.8 выделено красным) объема воздуха с координатами $X = (-0,06; 0,12)$, $Y = (0; 0,02)$, $Z = (0,02; 0,04)$ после ряда процедур его деления по оси X для различных значений окружающих условий (начальной температуры от -40 до $+40$ °C) и режимов работы (токов разряда/заряда от 5 до 20 А) представлено на рис.9.

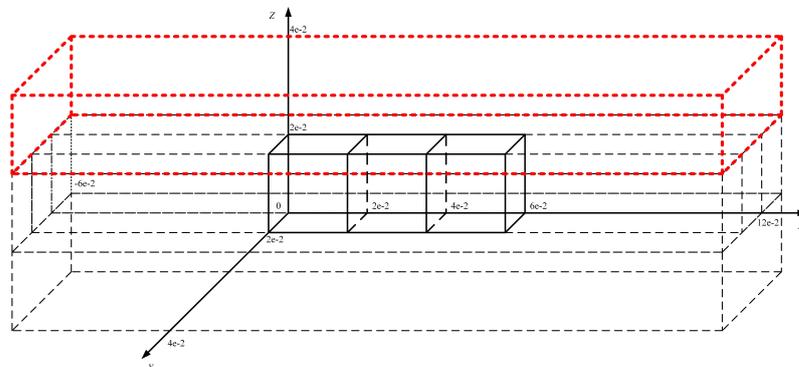


Рисунок 8 – Схема объекта моделирования

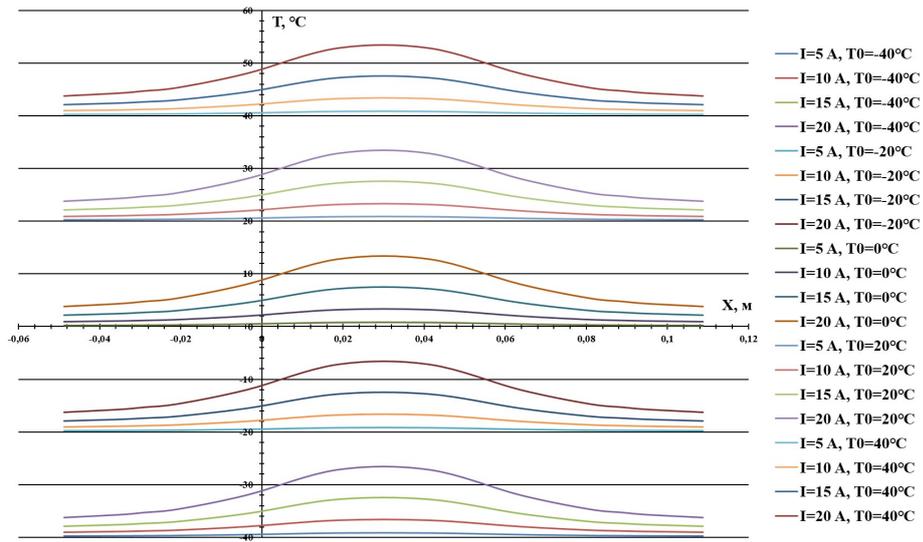


Рисунок 9 – Семейство кривых распределения температуры для верхнего объема воздуха после его деления по оси X

Семейство кривых распределения температуры для переднего (на рис. 10 выделено красным) объема воздуха с координатами $X = (-0,06; 0,12)$, $Y = (0,02; 0,04)$, $Z = (0; 0,02)$ после ряда процедур его деления по оси X для различных значений окружающих условий (начальной температуры от -40 до $+40$ °C) и режимов работы (токов разряда/заряда от 5 до 20 A) представлено на рис.11.

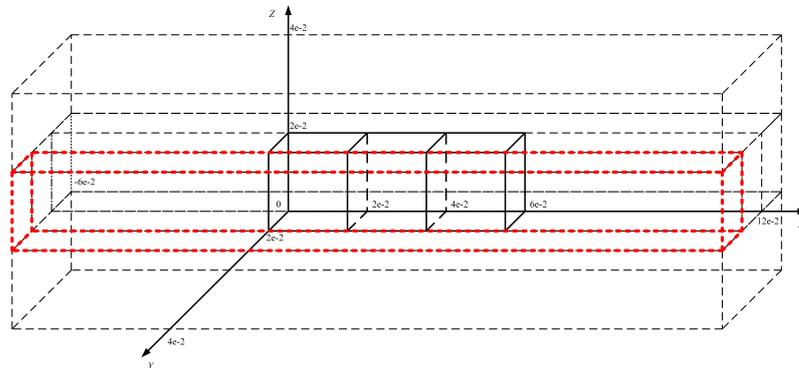


Рисунок 10 – Схема объекта моделирования

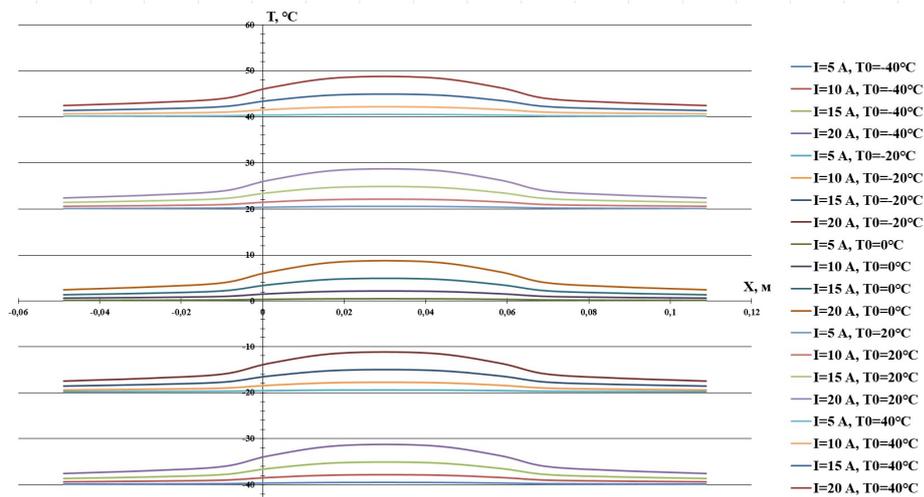


Рисунок 11 – Семейство кривых распределения температуры для переднего объема воздуха после его деления по оси X

В третьей главе обосновывается критерий диагностирования ЛИА, описывается метод диагностирования ЛИА по тепловым цифровым портретам.

При разработке метода диагностирования состояния ЛИА по тепловым портретам в качестве критерия диагностирования предложено выбрать **интервал времени Δt , за который внутренняя температура электролита $T_{\text{контр}}$ аккумулятора (самый нагретый участок) достигнет критического значения.** Определяя значение этого критерия в режиме реального времени можно выявить критическое состояние аккумулятора (ситуация когда температура гарантированно станет больше критической), либо выявить предаварийное состояние (приближение температуры к критическому значению).

Для каждого типа аккумуляторных батарей, используемых на борту ВС, известно критическое значение температуры, при достижении которой возникает аварийный режим работы устройства. Однако, средства измерения температуры аккумуляторов и аккумуляторных батарей не могут быть расположены внутри аккумуляторов, где температура максимальна. Исходя из этого важным является получение зависимости температуры в контролируемой точке (внутренняя температура) от измеряемой (на корпусе аккумулятора). Такие аналитические зависимости можно получить, используя в качестве эталона математическую модель на основе решения уравнений теплопроводности с использованием модифицированного метода конечных объемов.

В предлагаемой методике диагностирования состояния аккумуляторных батарей будет производиться измерение температуры на поверхности устройства ($T_{\text{изм}}$) с помощью точечных датчиков температуры. Установка температурных датчиков должна осуществляться в конкретных местах, где температура на поверхности наибольшая. Наиболее нагретые области можно определить на основании математической модели, а также экспериментальным путем – с помощью тепловизора. Значение температур в местах установки датчиков будет определяться в каждый момент времени.

Зная аналитическую функцию распределения скалярного поля температур внутри аккумулятора, которая получена с использованием модифицированного метода конечных объемов, можно используя измеренную температуру в определенный момент времени t_i , пересчитать температуру внутри аккумулятора в этот же момент времени t_i (рис.12). Таким образом, зная аналитическую функцию распределения температуры можно рассчитать температуру в любой момент времени. Исходя из того, что критическое значение температуры известно, при котором возникает аварийный режим работы аккумулятора, можно по аналитической функции рассчитать через какой промежуток времени внутренняя температура устройства достигнет критического значения $\Delta t_{\text{кр}}$, то есть получить значение критерия.

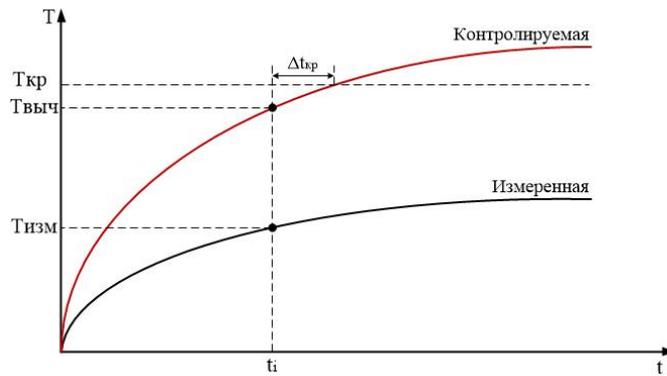


Рисунок 12 – Диагностика и прогноз теплового состояния аккумулятора

$\Delta t_{кр}$ – это время, за которое необходимо принять управленческое решение об отключении аккумулятора, и включает в себя непосредственно время расчета, время на передачу информации по цифровому каналу связи, а также время срабатывания коммутационного устройства. Следует отметить, что Δt зависит от нескольких параметров – момента времени измерения, измеренной температуры, тока разряда, температуры окружающей среды и непосредственно критического значения самого нагретого элемента. Аналитическая функция скалярного поля температур, параметрами которой и являются указанные величины, позволяет рассчитать выбранный критерий. В общем случае метод диагностирования ЛИА может быть представлен в виде следующей последовательности действий (рис. 14).

Упрощенная аналитическая тепловая модель ЛИА формируется путем аппроксимации данных, полученных в результате расчета распределения температуры внутри и вокруг аккумулятора. В качестве функционального базиса предложено использовать сигмоидные функции.

Для проведения аппроксимации графика распределения температуры с использованием сигмоидных функций, необходимо исходный график температуры разбить на несколько областей. Далее для каждой области необходимо подобрать сигмоидную функцию, варьируя соответствующие коэффициенты.

Подбирая таким образом сигмоидные функции для каждой выделенной области графика распределения температуры будет получена искомая функция аппроксимации.

Таким образом, график аппроксимации распределения температур для различных значениях токов примет вид:

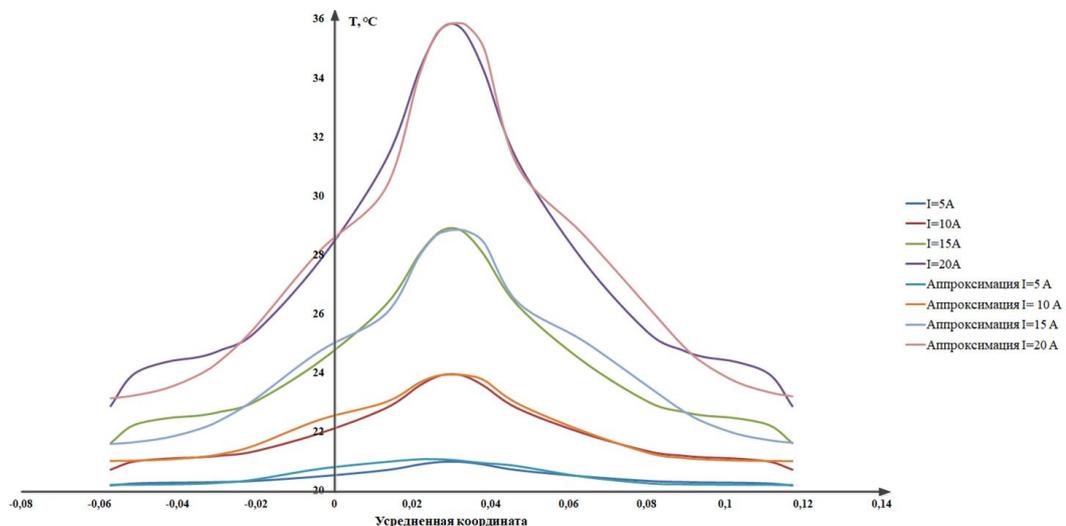


Рисунок 13 – Аппроксимация графиков температуры сигмоидными функциями при $I = 5A, I = 10A, I = 15A, I = 20A$

Полученные функции позволяют найти распределение температуры при конкретных значениях токов, однако для дальнейшего использования функции для реализации диагностики, необходимо иметь возможность рассчитать функцию для любого значения тока. С этой целью была проведена замена коэффициентов, которые выражены константами в виде функциональной зависимости.

$$T(x) = \frac{A_1}{1 + \exp(-B_1x - 1,2)} + \frac{A_2}{1 + \exp(-B_2x + 6,8)} - \frac{A_3}{1 + \exp(-B_3x + 7)} - \frac{A_4}{1 + \exp(-B_4x + 15)} + C.$$

где A_1, A_2, A_3, A_4 – коэффициенты числителя каждого из слагаемых;
 B_1, B_2, B_3, B_4 – коэффициенты перед координатой x ;
 C – постоянный коэффициент.

С целью нахождения искомых функциональных зависимостей для каждого коэффициента построим график в зависимости от тока, с помощью автоматической функции подбора функции аппроксимации MS Excel, будет подобрана необходимая функция тренда и выведено ее уравнение. Таким образом, аналитическая функция аппроксимации примет вид:

$$T(x) = 0,178I + 19,2 + \frac{0,0145I^2 + 0,0785I - 0,0125}{1 + \exp(-176,58I^{-0,23}x - 1,2)} + \frac{0,021I^2 - 0,131I + 0,225}{1 + \exp(-580,26I^{-0,184}x + 6,8)} - \frac{0,0145I^2 + 0,0785I - 0,0125}{1 + \exp(-176,58I^{-0,23}x + 7)} - \frac{0,021I^2 - 0,131I + 0,225}{1 + \exp(-580,26I^{-0,184}x + 15)}, \quad (10)$$

где x – координата рассматриваемой точки по оси X , I – значение тока, для которого ищется температура.

Значение контролируемой температуры в точке x_2 вычисляется из (10) по значению измеряемой в точке x_1 и значению тока.

$$T_{\text{контр}}(x_2) = T_{\text{изм}}(x_1) + \frac{0,0145I^2 + 0,0785I - 0,0125}{1 + \exp(-176,58I^{-0,23}x_2 - 1,2)} + \frac{0,021I^2 - 0,131I + 0,225}{1 + \exp(-580,26I^{-0,184}x_2 + 6,8)} - \frac{0,0145I^2 + 0,0785I - 0,0125}{1 + \exp(-176,58I^{-0,23}x_2 + 7)} - \frac{0,021I^2 - 0,131I + 0,225}{1 + \exp(-580,26I^{-0,184}x_2 + 15)} - \frac{0,0145I^2 + 0,0785I - 0,0125}{1 + \exp(-176,58I^{-0,23}x_1 - 1,2)} - \frac{0,021I^2 - 0,131I + 0,225}{1 + \exp(-580,26I^{-0,184}x_1 + 6,8)} + \frac{0,0145I^2 + 0,0785I - 0,0125}{1 + \exp(-176,58I^{-0,23}x_1 + 7)} + \frac{0,021I^2 - 0,131I + 0,225}{1 + \exp(-580,26I^{-0,184}x_1 + 15)}. \quad (11)$$

Далее искомое значение критерия Δt получается из аналитического решения дифференциального уравнения Коши по начальному значению температуры контролируемого сегмента и значению температуры $T_{\text{контр}}$.

Первоначальным этапом является получение аналитической модели ЛИА, которое подробно описано во второй главе диссертации. После получения аналитической функции динамики распределения температуры, полученной с использованием модифицированного метода конечных объемов, уже можно говорить о цифровой модели исследуемого ЛИА (рис.15).

Второй этап – идентификация параметров математической модели. Цифровой портрет, который будет использоваться в процессе диагностирования ЛИА, представляет собой компьютерную модель исследуемого объекта, которая уточняется по экспериментальным данным (процедура валидации), получаемым от объекта, тогда модель цифрового портрета будет обладать адекватностью и наиболее точно отражать свойства и процессы, протекающие в литийионном аккумуляторе.



Рисунок 14 – Метод диагностирования ЛИА



Рисунок 15 – Цифровой тепловой портрет ЛИА

Экспериментальные данные должны обновляться либо в режиме реального времени, либо с определенной периодичностью, которая зависит от динамики изменения собственных свойств объекта.

Созданная на основе математической модели компьютерная модель также должна быть уточнена для того, чтобы она соответствовала математической модели, этот процесс называется верификацией компьютерной модели.

Третьим этапом является определение контролируемых параметров по измеряемым. Температура в ЛИА внутри устройства, как правило, выше чем на его поверхности. Контролировать температуры внутри ЛИА точечными температурными датчиками не представляется возможным. Следовательно, зная функцию распределения температуры внутри устройства можно пересчитать температуру с точечных датчиков, установленных на внешней части ЛИА, что является четвертым этапом методики.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие работоспособность предложенного в диссертации метода диагностирования предаварийного теплового состояния электротехнических устройств. Для исследования тепловых режимов литийионных аккумуляторных батарей был выбран аккумулятор Sony US18650VTC6 и два термистора, которые устанавливались на корпусе аккумулятора. Значения температуры снима-

лись при разных значениях тока. На рисунках 16-21 представлены полученные результаты (температуры с каждого датчика температуры).

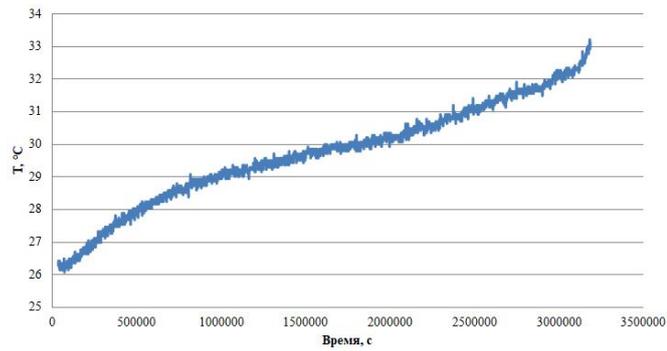


Рисунок 16 – Зависимость температуры от времени с датчика 1 при разряде аккумулятора $I=3,3$ А

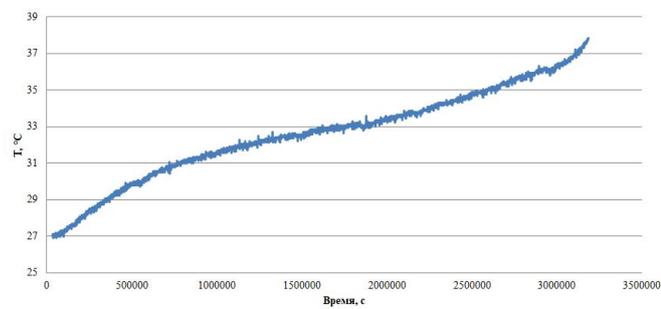


Рисунок 17 – Зависимость температуры от времени с датчика 2 при разряде аккумулятора $I=3,3$ А

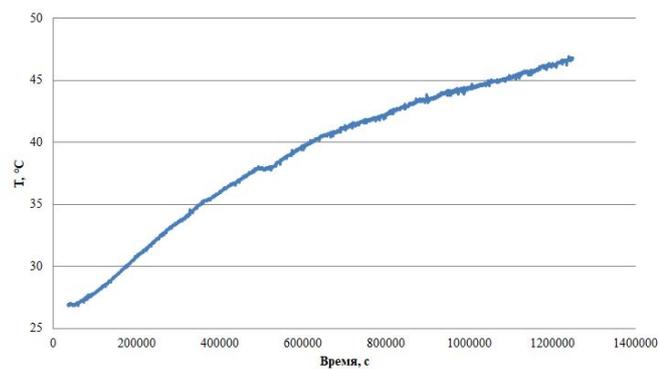


Рисунок 18 – Зависимость температуры от времени с датчика 1 при разряде аккумулятора $I=5$ А

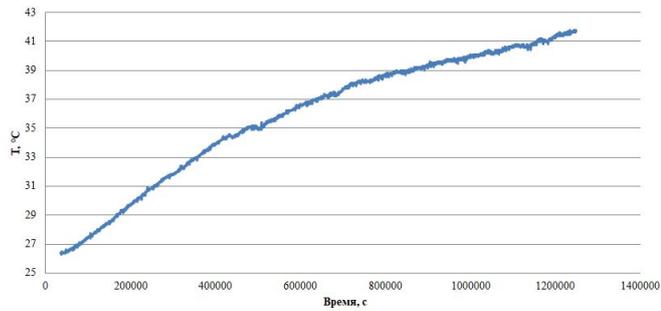


Рисунок 19 – Зависимость температуры от времени с датчика 2 при разряде аккумулятора $I=5$ А

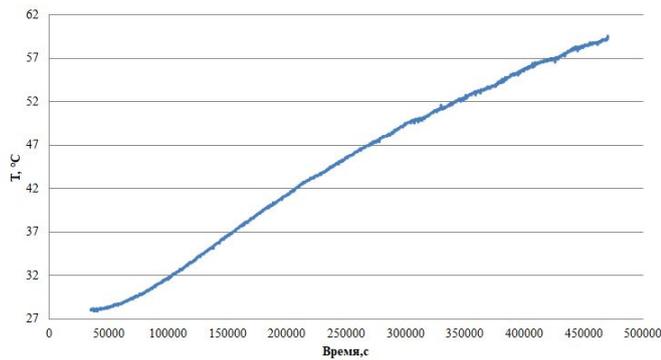


Рисунок 20 – Зависимость температуры от времени с датчика 1 при разряде аккумулятора $I=9$ А

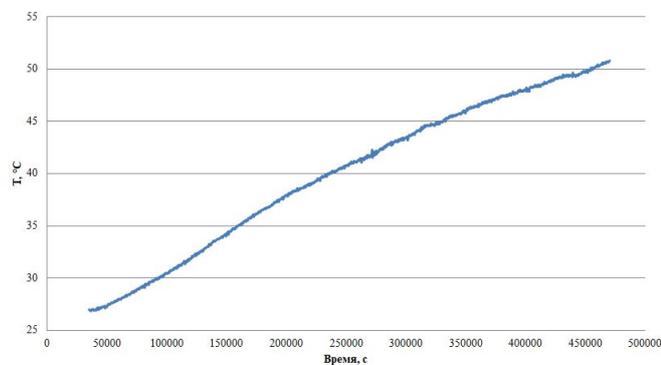


Рисунок 21 – Зависимость температуры от времени с датчика 2 при разряде аккумулятора $I=9$ А

Для сравнительной оценки расчетных данных с экспериментальными и корректировке параметров разработанной модели проведена аппроксимация экспериментальных данных для временного отрезка от 0 до 300 с полиномом второй степени (рис. 22).

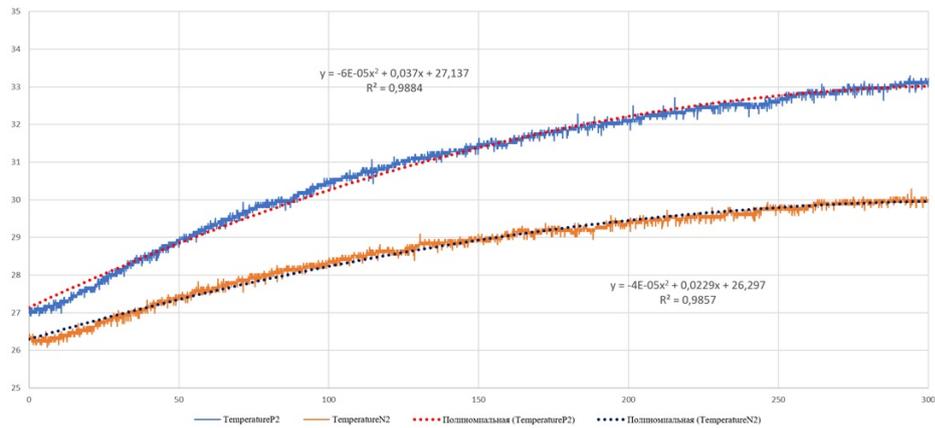


Рисунок 22 – Аппроксимация экспериментальных данных полиномами второй степени

Используя полученные функции аппроксимации, проведена корректировка параметров математической модели аккумулятора (валидация), которая показала, что погрешность полученной модели не превышает 3% от максимального значения температуры (рис. 23).

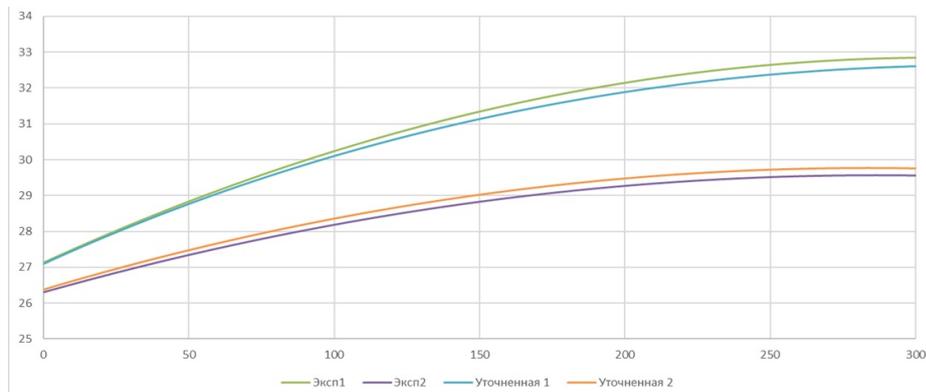


Рисунок 23 – Коррекция параметров математической модели по экспериментальным данным (валидация)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основными результатами, полученными в ходе выполнения диссертации являются:

1. Проведен анализ основных причин тепловыделения электротехнических устройств ВС при регламентных и аварийных режимах работы. Рассмотрены основные последствия, возникающие при чрезмерной нагреве устройств.
2. Проведен анализ основных методов диагностики, используемых на современных ВС. Выявлены их основные достоинства и недостатки. Приведены основные авиационные инциденты, причинами которых послужили аварийные режимы работы ЭТУ ВС.
3. Проведен анализ численных методов, используемых при решении уравнения теплопроводности. Проведен их сравнительный анализ. Выявлены достоинства и недостатки приведенных методов.
4. **Разработан новый модифицированный метод конечных объемов (ММКО), который отличается возможностью получения гарантированной точности моделирования поля температур.**
5. **Разработана методика автоматического формирования дифференциальных уравнений метода математического прототипирования энергетических процессов, который является одним из необходимых этапов ММКО**

6. Разработана компьютерная модель исследуемого объекта с использованием языка программирования Python. Получена динамика распределения температуры при разряде аккумулятора постоянными токами.

7. На основе экспериментальных исследований показана возможность проведения валидации моделей с погрешностью, **не превышающей 3%**, что позволяет достаточно точно определять диагностируемые критерии.

8. **Разработан метод диагностирования ЛИА на основе их тепловых портретов.** Сформулированы рекомендации по установке точечных температурных датчиков.

9. Проведены исследования влияния коэффициента теплоотдачи на максимальную установившуюся температуру аккумулятора, которые показали, что

– при загрязнении в процессе эксплуатации стенок аккумуляторов, ухудшающих коэффициент теплоотдачи, критическая температура, характеризующая предаварийное состояние может быть достигнуто быстрее и при меньших значениях токов;

– при использовании специальных систем охлаждения (продув, жидкостное или испарительное) имеется возможность использовать аккумуляторы при больших токовых нагрузках при сохранении заданного температурного режима;

– при применении мер, направленных на увеличение теплоотдачи, имеется возможность **снизить рабочую температуру до 2,5 раз**, что улучшает условия предотвращения теплового режима.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАННЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ

1. **Пунт Е.А.** Алгоритм синтеза уравнений теплопроводности литийионного аккумулятора для конечных объемов при делении. Научный вестник МГТУ ГА. 2024;27(4):50-62.

<https://doi.org/10.26467/2079-0619-2024-27-4-50-62>

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662400 Российская Федерация. Программа расчета динамики распределения температур литийионного аккумулятора с учетом заданной точности для модифицированного метода конечных объемов : № 2024661329 : заявл. 16.05.2024 : опубл. 28.05.2024 / **Е. А. Пунт.** – EDN SSVZXO.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660805 Российская Федерация. Программа формирования системы дифференциальных уравнений в процессе деления объемов в модифицированном методе конечных объемов : № 2024619534 : заявл. 27.04.2024 : опубл. 13.05.2024 / **Е. А. Пунт.** – EDN LADAWG.

Публикации в других изданиях

1. **Е. А. Пунт**, S. P. Khalyutin and A. O. Davidov, "Analysis of Tasks of Forming Thermal Imaging of Electrical Devices," 2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, Russia, 2020, pp. 104-107, doi: 10.1109/PIERE51041.2020.9314647.

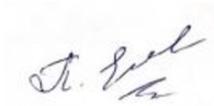
2. **Е. А. Пунт** and S. P. Khalyutin, "Formation of Thermal Portraits of Electrical Devices Based on the Finite Element Method," 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Souzga, the Altai Republic, Russia, 2021, pp. 310-314, doi: 10.1109/EDM52169.2021.9507697

3. Starostin I.E., Khalyutin S.P., Davidov A.O., **Пунт Е.А.**, Pavlova V.I. "Obtaining a model for the voltage and temperature of the us18650vtc6 series lithium-ion battery in constant current discharge mode from the analysis of physical and chemical processes in the accumulator". 2021 18th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky, TSCZh 2021. 18. 2021. С. 109-117.

4. **E. A. Punt**, S. P. Khalyutin and I. E. Starostin, "Formation of Digital Thermal Portraits of Lithium-Ion Accumulator Based on Modified Method of Final Volumes," 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russian Federation, 2022, pp. 421-424, doi: 10.1109/EDM55285.2022.9855141

5. **E. A. Punt**, S. P. Khalyutin, M. O. Troshin and I. E. Starostin, "Modified Finite Volume Method Study for Numerical Calculation of Lithium Battery Temperature," 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Novosibirsk, Russian Federation, 2023, pp. 1230-1234, doi: 10.1109/EDM58354.2023.10225111.

Соискатель



Пунт Е.А.