



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

ФАКУЛЬТЕТ Авиационных систем и комплексов

КАФЕДРА Электротехники и авиационного электрооборудования

Направление подготовки 25.06.01 Аэронавигация и эксплуатация
(код и наименование направления подготовки)
авиационной и ракетно-космической техники

Направленность Эксплуатация воздушного транспорта
(наименование направленности)

НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Тема Методика диагностирования электротехнических устройств
воздушного судна на основе оценки их температурных режимов

Обучающийся: Пунт Е.А.
(Ф.И.О.) 
(Подпись)

Научный руководитель: д.т.н., профессор Халютин С.П.
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.) 
(Подпись)

Рецензенты: д.т.н., профессор Старостин И.Е.
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.) 
(Подпись)

к.т.н., доцент Демченко А.Г.
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.) 
(Подпись)

Работа допущена к защите:

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор Халютин С.П.
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.) 
(Подпись)

МОСКВА 2023



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

ФАКУЛЬТЕТ Авиационных систем и комплексов

КАФЕДРА Электротехники и авиационного электрооборудования

Направление подготовки 25.06.01 Аэронавигация и эксплуатация
(код и наименование направления подготовки)
авиационной и ракетно-космической техники

Направленность 05.22.14 Эксплуатация воздушного транспорта
(наименование направленности)

**Доклад об основных результатах подготовленной научно-
квалификационной работы**

Тема Методика диагностирования электротехнических устройств
воздушного судна на основе оценки их температурных режимов

Обучающийся: Пунт Е.А.
(Ф.И.О.)

Научный руководитель: д.т.н., профессор Халютин С.П.
(уч.степень, уч.звание, Ф.И.О.)

МОСКВА 2023

Актуальность темы. Во все времена одной из актуальных проблем гражданской авиации является обеспечение безопасности полетов. По этой причине авиационный транспорт считается самым безопасным. 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;
- 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, 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 747 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, 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 и мониторинг их теплового состояния, является весьма актуальной в процессе эксплуатации бортового оборудования.

Объект исследования: авиационные электротехнические устройства.

Предмет исследования: методика диагностирования ЭТУ на основе оценки их температурных режимов.

Цель исследования: повышение безопасности полетов воздушного судна за счет предотвращения аварийных режимов в электротехнических устройствах на основе оценки их температурных режимов.

Задачи исследования:

- анализ причин тепловых потери 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 литий-ионного аккумулятора;
- разработка компьютерной модели тепловых режимов литий-ионного аккумулятора на основе модифицированного метода конечных объемов;
- разработка методики диагностирования ЛИА по тепловым цифровым портретам;
- проведение экспериментальных исследований разработанной методики;
- формирование рекомендаций по применению методики диагностирования ЛИА на основе их тепловых режимов.

Методология и методы исследования. Для получения основных результатов диссертационной работы использованы базовые методы математического анализа, аналитической геометрии, численные методы решения дифференциальных уравнений. Также, в работе использовалось компьютерное моделирование в пакете прикладных программ.

1. Анализ причин тепловыделения электротехнических устройств ВС и их методов диагностики

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 из строя.

Тепловой режим электротехнического устройства (ЭТУ) характеризуется совокупностью температур всех элементов, входящих в состав ЭТУ.

Тепловой режим каждого отдельного элемента ЭТУ устройства считается нормальным, если выполняются следующие критерии:

1. температура элемента устройства в условиях эксплуатации заключена в пределах, ограничивающих диапазон температур, допустимых для данного элемента;
2. температура элемента позволяет обеспечить его работу с заданной надежностью.

Анализ особенностей физико-химических процессов в ЭТУ в нормальных (регламентных) и аварийных режимах работы и причин тепловыделения позволяет определить необходимые параметры, позволяющие определить состояние ЭТУ и формировать критерии перехода к аварийным режимам (таблица 1)

Таблица 1– Причины тепловыделения в регламентном и аварийном режимах работы

Устройство	Регламентный режим	Аварийный режим	Контролируемые параметры
Генератор	Трение в подшипниках, вихревые токи, перемагничивание в стали статора и ротора, активные сопротивления обмоток статора и ротора.	Снижение (увеличение) питающего напряжения при номинальной нагрузке на валу; увеличение нагрузки выше номинальной; обрыв фазы; снижением сопротивления изоляции статорных обмоток; ухудшение	Питающее напряжение, ток нагрузки, температура и производная температуры

		вентиляции.	
Аккумуляторные батареи	Джоулево тепло; экзотермическая химическая реакция.	Тепловой разгон.	Ток нагрузки, температура, их производные
Силовые полупроводниковые преобразователи	Прохождение рабочего тока через полупроводниковый переход	Сверхдопустимые значения параметров электроэнергии питающей сети; аварийные режимы потребителей электроэнергии; перегрузки по току; короткие замыкания.	Входное и выходное напряжения, ток нагрузки, температура и производная температуры

Своевременное и точное диагностирование отказов и предотказных состояний ЭТУ является актуальной проблемой авиации, так как напрямую влияет на безопасность полетов.

Используемые в настоящее время методы диагностики не обладают достаточной точностью, а строенные системы контроля не позволяют контролировать высокую температуру устройств.

Перспективным для диагностирования и прогнозирования состояния ЭТУ является использование «цифровых портретов», которые в общем случае состоят из «электрического» и «теплого» портретов устройства. Параметры «цифровых портретов» как математических моделей идентифицируются в процессе эксплуатации ЭТУ средствами цифровых интеллектуальных систем

распределения электроэнергии. Отклонения параметров характеризуют изменение «цифровых портретов», то есть 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.

2. Метод математического прототипирования энергетических процессов для электротехнических устройств

В настоящее время для контроля технического состояния различных систем перспективным является применение цифровых двойников.

Цифровой двойник представляет собой совокупность математической модели объекта (системы) и ее программного кода, имеющего возможность обмениваться информацией о состоянии с самим исследуемым объектом (системой). При создании цифрового двойника большое значение имеет точность построенной математической модели. Математическая модель исследуемого объекта (системы) должна обладать высокой точностью, адекватностью и максимально точно описывать процессы, происходящие в объекте или системе. Для создания таких моделей предлагается использовать метод математического прототипирования энергетических процессов (ММПЭП).

Метод математического прототипирования энергетических процессов вытекает из основных законов сохранения энергии и известных начал термодинамики. Данный метод позволяет учитывать как внутренние, так и внешние силы, обусловленные потоками энергии между системой и средой.

Основное уравнение обобщенного метода математического прототипирования:

$$\frac{dX}{dt} = BAB^T (-\nabla_x F) + \left(\frac{dX}{dt} \right)_{ext}, \quad (1)$$

Где $X = X(t)$ - матрица-столбец параметров, определяющих состояние системы;

$B = B(x, U)$ - матрица инцидентности;

$A = A(x, U)$ - положительно определенная матрица свойств, характеризующая восприимчивость процессов к возмущениям;

$F = F(x, U)$ - функция запасенной энергии внутри системы;

$\left(\frac{dX}{dt}\right)_{ext}$ - матрица-столбец внешних воздействий на систему.

Основное уравнение ММПЭП для физико-химической системы примет вид:

$$\begin{pmatrix} \frac{dU}{dt} \\ \frac{dz}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{transf} & U \\ 0 & B \end{pmatrix} A \begin{pmatrix} Q_{transf} & U \\ 0 & B \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \nabla_U S \\ \nabla_z S \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{dU}{dt} \\ \frac{dz}{dt} \end{pmatrix}_{ext}, \quad (2)$$

Где

$U = U(t)$ - матрица-столбец внутренних энергий энергетических степеней свободы;

$z = z(t)$ - матрица-столбец прочих координат состояний;

Q_{transf} - матрица инцидентности по перенесенным теплотам;

$U = U(U, z)$ - матрица, характеризующая изменения внутренней энергии за счет некомпенсированных теплот и совершения работы внутри системы;

$B = B(U, z)$ - матрица баланса;

$A = A(U, z)$ - положительно определенная кинетическая матрица;

$S = S(U, z)$ - энтропия системы.

Для разработки метода диагностирования, основанного на применении цифровых тепловых портретов для мониторинга теплового состояния ЛИАБ необходимо разработать математическую модель тепловых режимов.



Рисунок 2 - Sony US18650VTC6

В качестве объекта моделирования будет использована аккумуляторная батарея Sony US18650VTC6 (рис. 2). Конструктивно в ЛИАБ входят: анод, выполненный из графита на фольге из меди; катод, выполненный из оксида лития на фольге из алюминия; пористый сепаратор, обильно пропитанный электролитом, выполняющим функции проводника.

Введем следующие ограничения для разрабатываемой математической модели:

1. геометрия заданной области пространства задается уравнениями пересекающихся поверхностей в трехмерном евклидовом пространстве;
2. 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 удалённый» 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;
3. внутренние области, ограниченные заданными поверхностями, являются замкнутыми, и параметр, характеризующий свойство теплопроводности, считается постоянным;

4. 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);

5. 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.

Для задания геометрии и свойств цилиндрического аккумулятора воспользуемся формулами аналитической геометрии для цилиндрической системы координат.

Для определения граничных поверхностей будем использовать уравнения цилиндров и плоскостей

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = r^2 \\ ax + by = 0 \\ z = h \\ \lambda \end{cases}$$

$$\begin{cases} r_{\min} \leq r \leq r_{\max} \\ h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \\ \varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max} \end{cases}$$

Где $a = \cos \varphi$; $b = \sin \varphi$; r - радиус устройства; φ - угол; h - высота устройства; λ - теплопроводность.

3. Модифицированный метод конечных объемов

Для определения температуры каждой внутренней области исследуемого устройства будем использовать модифицированный метод конечных объемов, основанный на применении метода математического прототипирования энергетических процессов. Согласно методу конечных объемов, для нахождения распределения температуры исследуемого устройства, его исходный объем требуется разбить на несколько конечных объемов. Для каждого объема будем находить распределение температуры, используя метод математического прототипирования энергетических процессов. Для реализации метода расчета

распределения тепла внутри ЛИА будет использоваться упрощенная структура ЛИА, представляющая собой три последовательно соединенных сегмента.

Запишем основное уравнение метода (1) для одного сегмента, так как полученное уравнение будет актуально для всех объемов. Как видно из рисунка 3 процесс теплопереноса осуществляется по 6-ти граням объема.

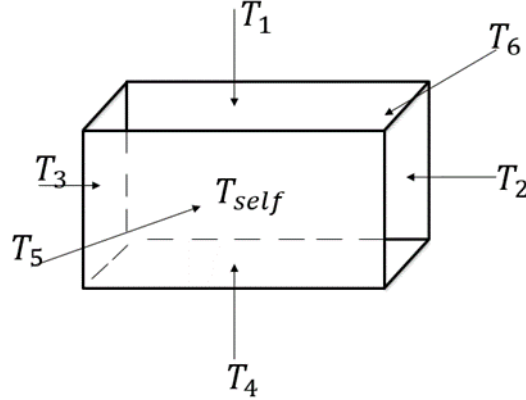


Рисунок 3 - Один сегмент ЛИА

$$\frac{\delta \Delta Z}{dt} = \left(\left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_{r+\Delta r} \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_r \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_{h+\Delta h} \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_h \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_{\varphi+\Delta \varphi} \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_\varphi \right)^T \quad (3)$$

$\vec{Z} = \vec{U}$ - внутренняя энергия;

$$dU = C m dT$$

C - теплоемкость; m - масса; $m = \rho V$

$$\left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_{r+\Delta r} = \lambda S_r \Delta T_r \quad (4)$$

λ - теплопроводность (либо α - коэффициент теплопередачи, в случае стыка двух материалов);

S_r - площадь грани, через которую проходит теплота;

$$\mathbf{B} = (1; -1; 1; -1; 1; -1) \quad (5)$$

Используя (3) и (25) основное уравнение ММПЭП для одного сегмента примет вид:

$$\frac{C m dT}{dt} = \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_{r+\Delta r} - \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_r + \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_{h+\Delta h} - \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_h + \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_{\varphi+\Delta \varphi} - \left(\frac{\delta Q_{transf}}{dt} \right)_\varphi + \left(\frac{\delta Q}{dt} \right)_{source} \quad (6)$$

$$\left(\frac{\delta Q}{dt} \right)_{source} = \left(I \frac{\Delta S_r}{S_m} \right)^2 R$$

Приведенное уравнение (2.45) может быть записано в матричном виде:

$$K \frac{dT_i}{dt} = \Lambda T + T_0 + Q \quad (7)$$

$$K = Cm$$

$T = (T_1, T_2, \dots, T_m)^T$ - начальная температура объемов;

T_0 - температура окружающей среды в начальный момент времени.

Q - температура внешних источников теплоты.

$$Q = \begin{pmatrix} \left(I_1 \frac{S_1^*}{S_\Sigma} \right)^2 \rho_R \frac{h_1}{S_1^*} \\ 0 \\ \left(I_3 \frac{S_3^*}{S_\Sigma} \right)^2 \rho_R \frac{h_3}{S_3^*} \end{pmatrix}$$

Матрица Λ состоит из коэффициентов, находящихся из основного уравнения математического прототипирования. Основное уравнение ММПЭП (2.45) для одной координаты:

$$C_i \rho_i V_i \frac{dT_i}{dt} = \alpha_{i(i-1)} S_{i(i-1)} T_{(i-1)} - \alpha_{i(i-1)} S_{i(i-1)} T_{(i)} - \alpha_{i(i+1)} S_{i(i+1)} T_{(i)} + \\ + \alpha_{i(i+1)} S_{i(i+1)} T_{(i+1)} + \left(I \frac{S_i^*}{S_\Sigma} \right)^2 \rho_R \frac{h}{\rho^*}, \quad (8)$$

Где $T_{(i)}$ - температура текущего объема;

$T_{(i-1)}$ - температура предыдущего объема;

$T_{(i+1)}$ - температура объема, следующего за текущим;

$\alpha_{i(i-1)}$ - теплопроводность текущего и предыдущего объемов;

$\alpha_{i(i+1)}$ - теплопроводность текущего и последующего объемов;

$S_{i(i-1)}$ - площадь текущего и предыдущего объемов;

$S_{i(i+1)}$ - площадь текущего и последующего объемов.

Произведя простейшие преобразования уравнение (2.47) примет вид:

$$C_i \rho_i V_i \frac{dT_i}{dt} = \alpha_{i(i-1)} S_{i(i-1)} T_{(i-1)} - T_{(i)} (\alpha_{i(i-1)} S_{i(i-1)} + \alpha_{i(i+1)} S_{i(i+1)}) + \\ + \alpha_{i(i+1)} S_{i(i+1)} T_{(i+1)} + \left(I \frac{S_*}{S_\Sigma} \right)^2 \rho_R \frac{h}{\rho^*} \quad (9)$$

Аналогично для трех координат:

$$C_{ijk} \rho_{ijk} V_{ijk} \frac{dT_{ijk}}{dt} = \alpha_{i(i-1)jk} S_{i(i-1)jk} (T_{(i-1)jk} - T_{ijk}) - \alpha_{i(i+1)jk} S_{i(i+1)jk} (T_{ijk} - T_{(i+1)jk}) + \\ + \alpha_{ij(j-1)k} S_{ij(j-1)k} (T_{j(j-1)k} - T_{ijk}) - \alpha_{ij(j+1)k} S_{ij(j+1)k} (T_{ijk} - T_{i(j+1)k}) + \\ + \alpha_{ijk(k-1)} S_{ijk(k-1)} (T_{ij(k-1)} - T_{ijk}) - \alpha_{ijk(k+1)} S_{ijk(k+1)} (T_{ijk} - T_{ijk(k+1)})$$

При $i=1, j=1, k=1$

$$C_{111} \rho_{111} V_{111} \frac{dT_{111}}{dt} = \alpha_{1(0)11} S_{1(0)11} (T_{(0)11} - T_{111}) - \alpha_{1(1)11} S_{1(2)11} (T_{111} - T_{(2)11}) + \\ + \alpha_{11(0)1} S_{11(0)1} (T_{1(0)1} - T_{111}) - \alpha_{11(0)1} S_{11(0)1} (T_{111} - T_{1(0)1}) + \\ + \alpha_{111(0)} S_{111(0)} (T_{11(0)} - T_{111}) - \alpha_{111(0)} S_{111(0)} (T_{111} - T_{111(0)})$$

Проведя простейшие преобразования уравнение примет вид:

$$C_{111} \rho_{111} V_{111} \frac{dT_{111}}{dt} = (-\alpha_{1011} S_{1011} - \alpha_{1211} S_{1211} - \alpha_{1101} S_{1101} - \alpha_{1101} S_{1101} - \alpha_{1110} S_{1110}) T_{111} + (\alpha_{1211} S_{1211}) T_{2111}$$

Согласно классическому методу конечных объемов необходимо разбить все исследуемое пространство на выпуклые объемы (сегменты) таким образом, чтобы в исходном состоянии каждый объем включал только одно вещество, для которого можно задать его физические свойства – плотность, теплоемкость, теплопроводность, геометрию, а также коэффициент теплоотдачи при его контакте с другим веществом.

Исходное разбиение моделируемой системы на объемы соответствует максимальным объемам веществ, состоящим из одного вещества. Упрощенное разбиение аккумулятора можно представить в виде трех элементов – двух электродов и электролита.

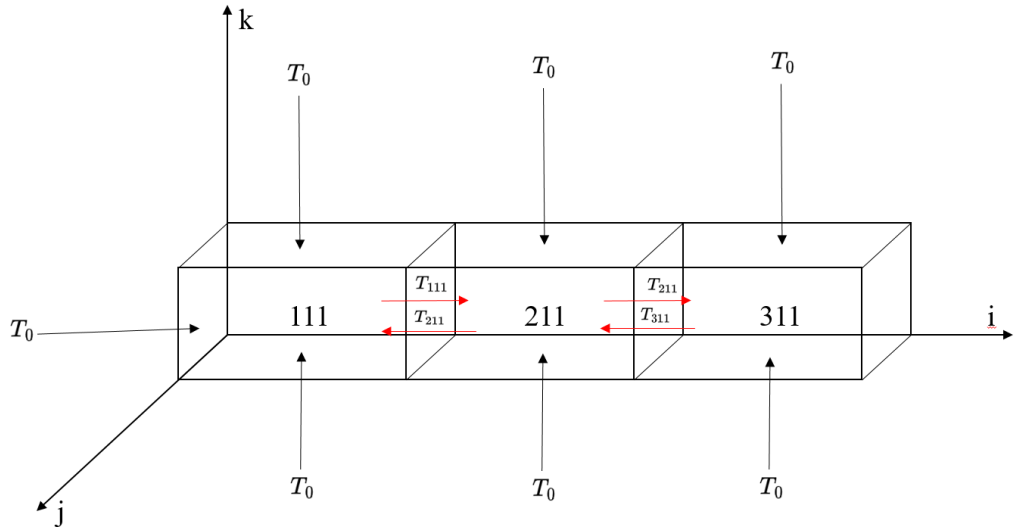


Рисунок 4 - Общий вид первого приближения пространственной модели
ЛИА

По аналогии с приведенными выше уравнениями, уравнения для оставшихся сегментов примут вид:

При $i=2, j=1, k=1$

$$C_{211}\rho_{211}V_{211}\frac{dT_{211}}{dt} = \alpha_{2(1)11}S_{2(1)11}(T_{(1)11} - T_{211}) - \alpha_{2(3)11}S_{2(3)11}(T_{(2)11} - T_{311}) + \\ + \alpha_{2(0)1}S_{2(0)1}(T_{2(0)1} - T_{211}) - \alpha_{2(2)1}S_{2(2)1}(T_{211} - T_{2(0)1}) + \\ + \alpha_{211(0)}S_{211(0)}(T_{21(0)} - T_{211}) - \alpha_{211(2)}S_{211(2)}(T_{211} - T_{21(0)})$$

$$C_{211}\rho_{211}V_{211}\frac{dT_{211}}{dt} = (\alpha_{2111}S_{2111})T_{111} - (\alpha_{2111}S_{2111} + \alpha_{2311}S_{2311} + \alpha_{2101}S_{2101} + \alpha_{2121}S_{2121} + \alpha_{2112}S_{2112})T_{211} + \\ + (\alpha_{2311}S_{2311})T_{311}$$

При $i=3, j=1, k=1$

$$C_{311}\rho_{311}V_{311}\frac{dT_{311}}{dt} = \alpha_{3(2)11}S_{3(2)11}(T_{(2)11} - T_{311}) - \alpha_{3(0)11}S_{3(0)11}(T_{311} - T_{(0)11}) + \\ + \alpha_{3(0)1}S_{3(0)1}(T_{3(0)1} - T_{311}) - \alpha_{3(0)1}S_{3(0)1}(T_{311} - T_{3(0)1}) + \alpha_{311(0)}S_{311(0)}(T_{31(0)} - T_{311}) - \\ - \alpha_{311(0)}S_{311(0)}(T_{311} - T_{31(0)})$$

$$C_{311}\rho_{311}V_{311}\frac{dT_{311}}{dt} = (\alpha_{3211}S_{3211})T_{211} - (\alpha_{3211}S_{3211} + \alpha_{3011}S_{3011} + \alpha_{3101}S_{3101} + \alpha_{3101}S_{3101} + \\ + \alpha_{3110}S_{3110} + \alpha_{3110}S_{3110})T_{311}$$

Таким образом, для исходного разбиения имеем математическую модель в

виде системы из трех дифференциальных уравнений.

$$K_{ijk} \frac{dT_{ijk}}{dt} = \begin{pmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} & 0 \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} & \alpha_{2,3} \\ 0 & \alpha_{3,2} & \alpha_{3,3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{111} \\ T_{211} \\ T_{311} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_{0,1} \\ T_{0,2} \\ T_{0,3} \end{pmatrix} T_0 + Q$$

$$\alpha_{1,1} = -(\alpha_{1(0)11}S_{1(0)11} + \alpha_{1(2)11}S_{1(2)11} + \alpha_{1(1)01}S_{1(1)01} + \alpha_{1(1)10}S_{1(1)10})$$

$$\alpha_{1,2} = \alpha_{1(2)11}S_{1(2)11}$$

$$\alpha_{2,1} = \alpha_{2(1)11}S_{2(1)11}$$

$$\alpha_{2,2} = -(\alpha_{2(1)11}S_{2(1)11} + \alpha_{2(3)11}S_{2(3)11} + \alpha_{2(1)01}S_{2(1)01} + \alpha_{2(1)21}S_{2(1)21} + \alpha_{2(1)10}S_{2(1)10} + \alpha_{2(1)12}S_{2(1)12})$$

$$\alpha_{2,3} = \alpha_{2(3)11}S_{2(3)11}$$

$$\alpha_{3,2} = \alpha_{3(2)11}S_{3(2)11}$$

$$\alpha_{3,3} = -(\alpha_{3(2)11}S_{3(2)11} + \alpha_{3(0)11}S_{3(0)11} + \alpha_{3(1)01}S_{3(1)01} + \alpha_{3(1)01}S_{3(1)01} + \alpha_{3(1)10}S_{3(1)10} + \alpha_{3(1)10}S_{3(1)10})$$

$$T_{0,1} = \alpha_{1(0)11}S_{1(0)11} + \alpha_{1(1)01}S_{1(1)01} + \alpha_{1(1)01}S_{1(1)01} + \alpha_{1(1)10}S_{1(1)10} + \alpha_{1(1)10}S_{1(1)10}$$

$$T_{0,2} = \alpha_{2(1)01}S_{2(1)01} + \alpha_{2(1)21}S_{2(1)21} + \alpha_{2(1)10}S_{2(1)10} + \alpha_{2(1)12}S_{2(1)12}$$

$$T_{0,3} = \alpha_{3(0)11}S_{3(0)11} + \alpha_{3(1)01}S_{3(1)01} + \alpha_{3(1)01}S_{3(1)01} + \alpha_{3(1)10}S_{3(1)10} + \alpha_{3(1)10}S_{3(1)10}$$

4. Разработка компьютерной модели тепловых режимов ЛИА на основе модифицированного метода конечных объемов и ее верификация

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:

- а. геометрии объекта и окружающей среды для первичного разбиения на условно однородные среды (параметр теплопроводности постоянный);
- б. погрешности определения температуры во внутренних областях;

- c. погрешности задания граничной области;
 - d. 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:
 - a. применение методики расчета для исходной геометрии объектов (получение значения температуры для каждой внутренней области);
 - b. каждый внутренний объем делим (например, пополам) заданным выше методом деления;
 - c. применение методики расчета для новой геометрии объектов (получаем значения температур для каждого объема, т.е. для частей исходных объемов);
 - d. проверка условия остановки деления (сравнение значений температур для текущей итерации со значениями температур, полученных на предыдущей итерации с учетом заданной погрешности);
 - e. для объемов, в которых условие остановки деления выполнено, деление прекращаем, фиксируем значения температур;
 - f. для объемов, в которых условие остановки деления не выполнено, производим очередное деление;
 - g. применяем методику расчета к текущей конфигурации объемов;
 - h. повторяем d-g 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.

Полученные уравнения были реализованы в виде компьютерного кода с использованием языка программирования Python. В компьютерной реализации находилось распределение температуры при различных значениях тока.

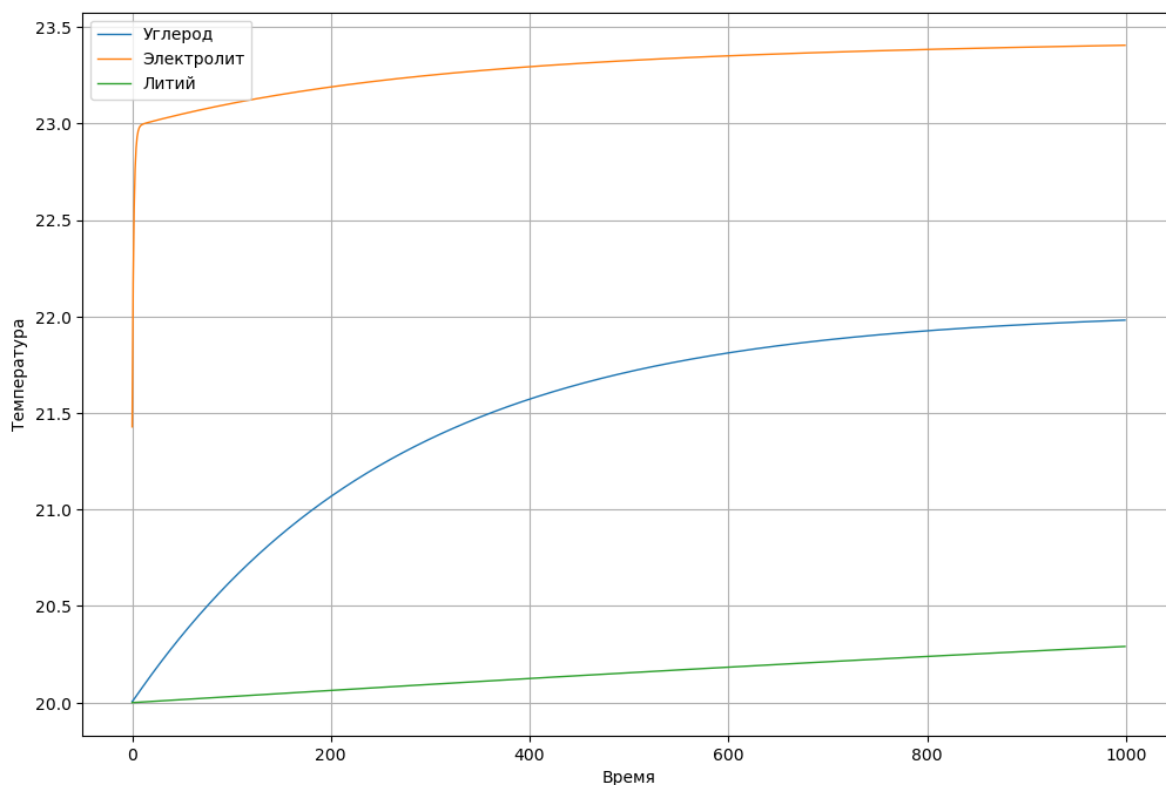


Рисунок 6 - Распределение температуры при значении тока $I=3$ А

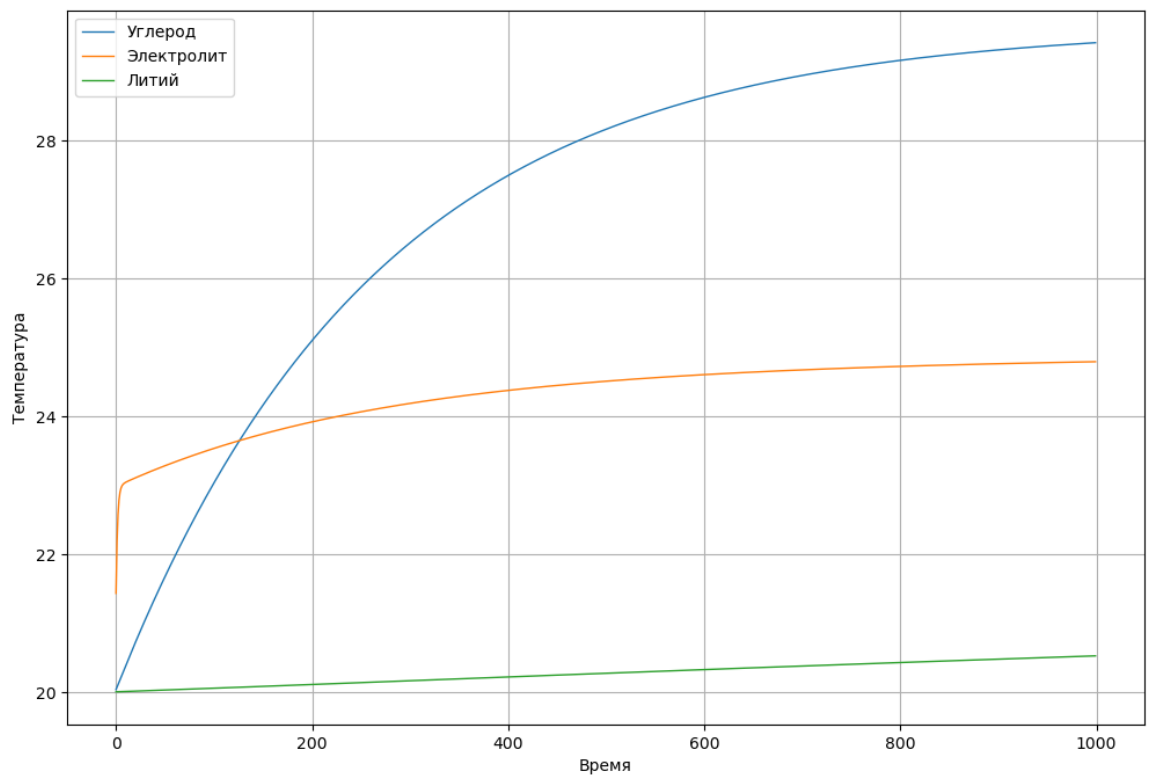


Рисунок 7 - Распределение температуры при значении тока $I=10$ А

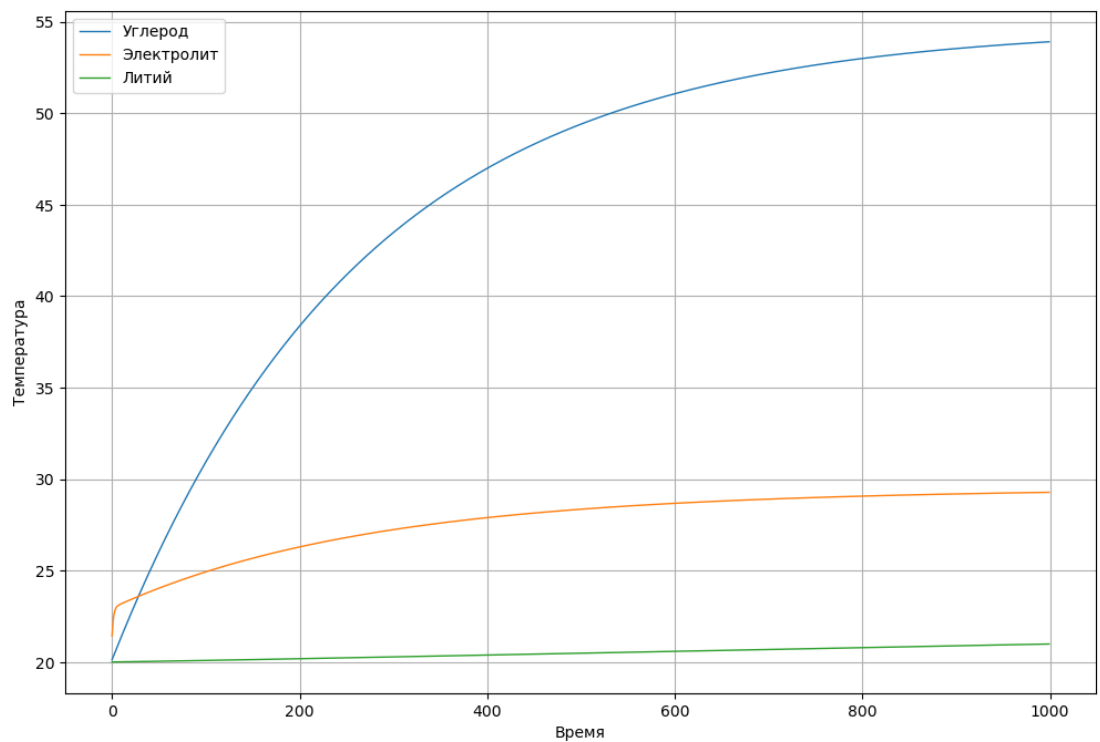


Рисунок 8 - Распределение температуры при значении тока $I=20$ А

5.Обобщенная методика диагностирования ЛИА по тепловым портретам

В общем случае методика диагностирования ЛИА может быть представлена в виде следующей последовательности действий рис.9.



Рисунок 9 Методика диагностирования ЛИА

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

Для исследуемого литий-ионного аккумулятора была разработана компьютерная математическая модель на основе уравнений математической физики, в результате решения которой получены картины распределения

теплового поля, позволяющие определять значения температур в контролируемых местах для целей диагностирования.

Общий вид рабочего «теплового портрета» для ЛИА принимает вид аналитической функции:

$$T = f(I, T_0, t), \quad (10)$$

Где I - ток разряда ЛИА;

T_0 - температура окружающей среды;

t - момент времени, для которого рассчитывается распределение тепла внутри ЛИА.

Второй этап – идентификация параметров математической модели. Цифровой портрет, который будет использоваться в процессе диагностирования ЛИА, представляет собой математическую модель исследуемого объекта и компьютерную модель. Математическая модель, используемая при создании ЦП должна обладать адекватность и наиболее точно отражать свойства и процессы, протекающие в объекте исследования. Следовательно, для обеспечения адекватности математической модели необходимо обеспечить постоянное получение данных цифровым портретом от объекта исследования. При этом данные должны обновляться либо в режиме реального времени, либо с определенной периодичностью. Данная процедура называется валидацией математической модели.

Созданная на основе математической модели компьютерная модель также должна постоянно уточняться, этот процесс называется верификацией компьютерной модели.

Третьим этапом является определение контролируемых параметров и измеряемых. Температура в ЛИА внутри устройства, как правило, выше чем на его поверхности. Контролировать температуры внутри ЛИА точечными температурными датчика не представляется возможным. Следовательно, зная функцию распределения температуры внутри устройства можно пересчитать температуру с точечных датчиков, установленных на поверхности ЛИА, что

является четвертым этапом методики. Таким образом, математическая модель для внутренних частей устройства примет вид:

$$\begin{aligned} T_{эл}^{+} &= F(T_1, \frac{dT_1}{dt}, \dots, T_k, \frac{dT_k}{dt}, \dots, T_K, \frac{dT_K}{dt}) \\ T_{эл}^{-} &= G(T_1, \frac{dT_1}{dt}, \dots, T_k, \frac{dT_k}{dt}, \dots, T_K, \frac{dT_K}{dt}) \\ T_{электролит} &= Q(T_1, \frac{dT_1}{dt}, \dots, T_k, \frac{dT_k}{dt}, \dots, T_K, \frac{dT_K}{dt}) \end{aligned} \quad (11)$$

Где T_1, T_k, T_K - значения температур, полученных с точечных датчиков, расположенных на поверхности устройства;

$\overline{1, K}$ - количество точечных датчик;

$T_{эл}^{+}, T_{эл}^{-}, T_{электролит}$ - внутренняя температура.

Важно отметить, что средства измерения температуры аккумуляторов и аккумуляторных батарей не может быть расположено в месте, где необходимо контролировать температуру, поэтому важно иметь зависимость контролируемой температуры от измеряемой, что можно сделать, применяя математическое моделирование.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в ходе выполнения научно-квалификационной работы:

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, использующихся на современных ВС. Выявлены их основные достоинства и недостатки. Приведены основные авиационные инциденты, причинами которых послужили аварийные режимы работы ЭТУ ВС.
3. Проведен анализ основных численных методов, использующихся при решении уравнения теплопроводности. Проведен их сравнительный анализ. Выявлены достоинства и недостатки приведенных методов.

4. Разработана методика распределения тепла внутри ЛИА на основе модифицированного метода конечного объема с использованием метода математического прототипирования энергетических процессов.
5. Разработана компьютерная модель исследуемого объекта с использованием языка программирования Python. Получена динамика распределения температуры при разряде аккумулятора различными токами.
6. Разработана методика диагностирования ЛИА на основе их тепловых портретов. Сформулированы рекомендации по установке точечных температурных датчиков.