

УДК 681.3

Комплексная тепловая модель программно-аппаратного комплекса связи

Гойденко В. К.

Постановка задачи: значительное количество отказов в современных средствах связи и автоматизации связано с изменением температурных режимов работы электронных модулей комплексов связи и автоматизации. Одним из эффективных методов контроля и диагностирования средств связи и автоматизации является тепловой контроль температурных значений элементов электронных модулей. Система контроля должна позволять: выявлять скрытые дефекты, возникающие в средствах связи и автоматизации, в реальном времени в процессе функционирования; покрывать значительный перечень скрытых дефектов, возникающих в программно-аппаратных комплексах связи; позволить заменить моделирование дефектов на макете на математическое моделирование с целью сокращения времени наполнения базы состояний. Для исследования тепловых режимов элементов электронных модулей необходима разработка комплексной тепловой модели. **Цель работы:** разработка комплексной тепловой модели комплексов связи и автоматизации, позволяющей получать температурные значения элементов электронных модулей средств связи и автоматизации в разных режимах функционирования. **Методы:** используется метод комплексного моделирования физических процессов с помощью параметризованных моделей. **Новизна.** В разработанной комплексной тепловой модели, в отличие от известных, учитывается влияние различных режимов функционирования комплексов связи и автоматизации на тепловые характеристики электронных модулей. **Результат:** разработанная модель позволяет определять температурные значения элементов в различных режимах работы с точностью до 3%, производить расчет допусковых интервалов температурных значений, моделировать постепенные и внезапные отказы комплекса и электронных модулей. **Практическая значимость:** на основе смоделированных данных эталонных состояний в номинальных режимах и при различных неисправностях формируется база состояний, которая позволит улучшить оперативность определения технического состояния и реализовать возможности предупреждения отказов.

Ключевые слова: тепловая модель, тепловой режим, контроль, диагностирование, температура, тепловой процесс, топологическая модель.

Введение

Современное состояние и перспективы развития программно-аппаратных комплексов связи (ПАКС), представляющих основную часть парка средств связи и автоматизации во всех родах войск, характеризуются постоянным повышением уровня производительности, улучшением эксплуатационных свойств, миниатюризацией конструкции и, как следствие, увеличением плотности компоновки отдельных электронных модулей (ЭМ).

Постоянная готовность ПАКС к использованию по назначению, эффективность его применения в процессе управления войсками, достигаются своевременным и полным выполнением мероприятий технического обслуживания и

Библиографическая ссылка на статью:

Гойденко В. К. Комплексная тепловая модель программно-аппаратного комплекса связи // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 1. С. 141-157. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10108

Reference for citation:

Goydenko V. K. Complex thermal model of communication hardware and software system. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 1, pp. 141-157. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10108 (in Russian).

ремонта. Часть мероприятий технического обслуживания и ремонта выполняется системой технической эксплуатации (СТЭ). СТЭ – это взаимоувязанная с автоматизированной системой управления связью по целям, задачам и уровням управления технологическая система, включающая совокупность объектов технической эксплуатации (ОТЭ), средств их эксплуатации, обслуживающего персонала и эксплуатационной документации, необходимая для поддержания и восстановления качества функционирования ОТЭ.

СТЭ должна обеспечивать следующий комплекс работ на ОТЭ:

- техническое обслуживание;
- восстановление работоспособности;
- создание условий хранения ОТЭ, обеспечивающих их сбережение и поддержание в готовности к использованию по назначению [1].

Указанные задачи решаются выполнением мероприятий на основной стадии жизненного цикла ПАКС – эксплуатации. В качестве основной подсистемы СТЭ выделяется система контроля технического состояния. Система контроля в общем случае должна обеспечивать реализацию следующих функций [2]:

- сбор, обработку и хранение информации о результатах контроля;
- отображение, регистрацию и документирование информации контроля;
- подготовку документов по результатам контроля;
- статистическую обработку и накопление информации контроля.

При контроле технического состояния элементов ОТЭ должен быть установлен вид их технического состояния (работоспособное, исправное, неработоспособное, неисправное) [3].

Эффективным и перспективным методом контроля ПАКС является бесконтактный метод, основанный на регистрации электромагнитного излучения в инфракрасной области спектра (далее по тексту теплового излучения), сформированного элементом или их совокупностью в составе функционального узла, блока или устройства [4]. Использование теплового излучения для диагностирования обусловлено следующими факторами:

- от 70 до 80 % энергии в электрорадиоизделиях (ЭРИ) преобразуется в тепловое излучение [5];
- ряд опытов показывает, что тепловой контроль является одним из наиболее информативных видов контроля [6];
- основными причинами развития дефектов является нарушение теплового и электрического режима работы элементов [7].

Таким образом, целью статьи является разработка модели, позволяющей рассчитывать тепловые характеристики элементов ПАКС для сбора данных о значениях температур элементов в разных режимах функционирования ПАКС.

Анализ существующего научно-методического аппарата

Существует ряд работ, рассматривающих возможности теплового диагностирования [7, 8]. Основной их направленностью является контроль печатных узлов при производстве на специальных стендах.

Однако, среди научной литературы пока еще недостаточно внимания уделяется вопросам описания тепловых моделей ПАКС, учитывающих такие его свойства, как многорежимность и многофункциональность.

Под многофункциональностью понимается свойство объекта, заключающееся в способности удовлетворить различные потребности пользователя. Многорежимность – свойство объекта, заключающееся в способности выполнения возложенных на него функций посредством использования различных совокупностей функциональных элементов либо изменения их свойств [9]. С изменением режима функционирования ПАКС будут меняться допусковые интервалы эксплуатационных параметров и характеристик элементов, из которых формируется библиотека состояний, а также определяются пороговые значения параметров для каждого режима функционирования отдельно, на основе компьютерного моделирования ПАКС.

В общем виде модель ПАКС приведена на рис. 1. Входные воздействия $X(t)$ с учетом влияния внешних факторов $Z(t)$ преобразуются в выходные параметры $Y(t)$. Преобразование осуществляется с помощью функции преобразования, где q_i – параметр устройства со своим верхним $q_i^в$ и нижним $q_i^н$ допусками из множества $Q_{норм}$ – электрических, теплофизических, физических и др. параметров. В качестве выходных параметров рассматриваются значения температуры элементов.

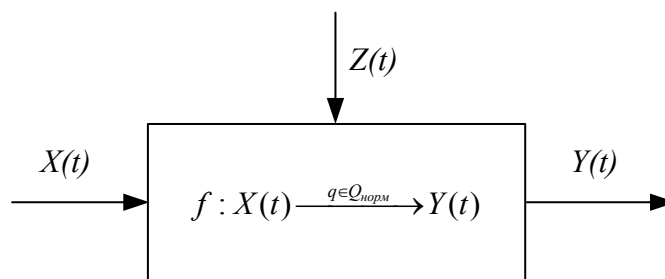


Рис. 1. Модель ПАКС

С учетом особенностей современных ПАКС для расчета теплового режима можно выделить следующие виды тепловых моделей ЭМ (рис. 2).

Все тепловые модели (ТМ) делятся на динамические и статические. По способу моделирования различают математические (символьные) и физические (объектные) модели.

Физические модели разделяются на модели замещения, в которых реальный объект заменяется другим объектом и процесс теплопереноса заменяется другим процессом, описываемым уравнением, аналогичным уравнению теплопереноса, и модели подобия, в которых реальный объект заменяется его копией увеличенного или уменьшенного размера.

Эффективным методом теплового моделирования, соединяющим физический и математические способы представления объекта, является метод, основанный на принципе теплоэлектрической аналогии [10, 11], согласно которому тепловые процессы в твердотельных элементах аналогичны электрическим

процессам в электрических цепях. Поэтому выделен отдельный класс электро-тепловых или теплоэлектрических моделей.

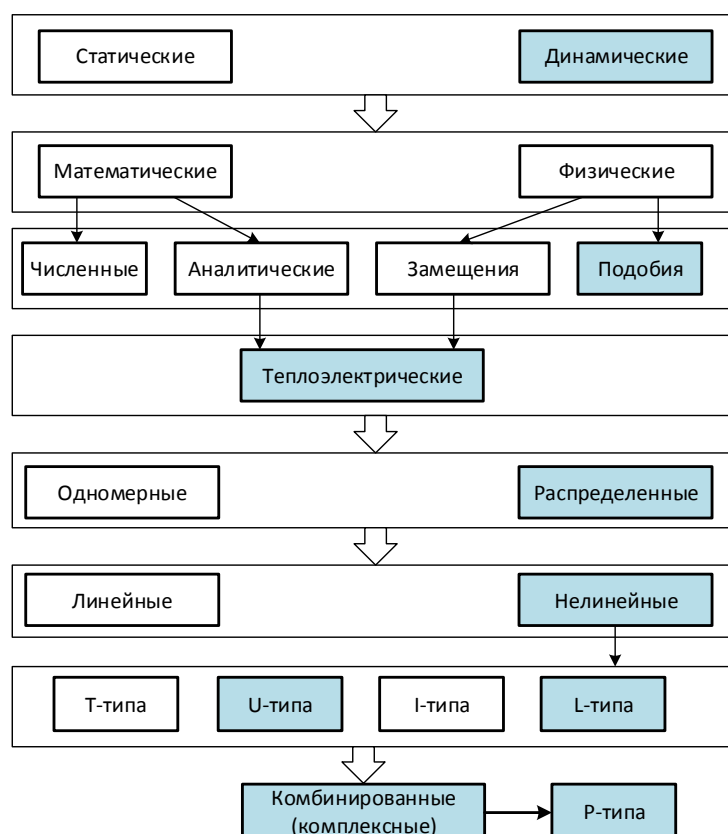


Рис. 2. Классификация и иерархия тепловых моделей ЭМ

Моделирование тепловых режимов ПАКС

Исходными данными для модели являются:

- электронный макет схемы ($\Gamma_{\text{пар}}$ – геометрические параметры, $\mathcal{E}_{\text{пар}}$ – электрические параметры, $T_{\text{пар}}$ – тепловые параметры, $A_{\text{пар}}$ – аэродинамические параметры);
- входные воздействия X ($U(t)$ – изменение напряжений, P – вектор перепадов давлений воздуха);
- начальные условия (S_n – режим функционирования, U_0 – начальные значения напряжений, T_0 – начальные значения температур);
- внешние воздействующие факторы ($T_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды, $P_{\text{ср}}$ – давление).

Найти: температуры элементов для разных состояний ($T(S_n, t)$ – температуры в режиме S_n).

Ограничения: поверхность каждого печатного узла ПАКС изотермична; поверхность конструктива ПАКС изотермична; тепловой поток от печатных узлов через разъемы и монтажные провода незначительный.

Для принятой идеализации в блоке существуют следующие виды теплообмена:

- тепловое взаимодействие посредством теплопроводности между каждым печатным узлом и корпусом блока;
- тепловое взаимодействие посредством теплопроводности между стенками корпуса блока;
- излучение с поверхности корпуса блока в окружающую среду;
- конвективная теплоотдача с поверхности печатных узлов в проходящие между ними воздушные потоки;
- конвективная теплоотдача с поверхности корпуса блока в окружающую среду;
- тепломассоперенос воздухом в воздушных каналах между печатными узлами.

Допущения: влияние теплового режима на электрические характеристики ПАКС не учитывается.

Решение.

Для получения искомых значений температур в приведенной модели электрические характеристики ПАКС рассчитываются в программе схемотехнического моделирования, позволяющей сохранять результаты в одном из стандартизированных форматов. Затем полученные данные вводятся в системы моделирования температурных значений элементов [12]. При этом моделируются различные режимы функционирования, в результате чего создается библиотека технических состояний ПАКС.

Для расчета параметров модели будем использовать способ комплексного моделирования с учетом электрических, тепловых и аэродинамических факторов (рис. 3).



Рис. 3. Схема метода теплового комплексного моделирования ПАКС с учетом, электрических, тепловых и аэродинамических факторов

На рис. 3 использованы следующие обозначения:

- электрическая модель схемы: U_0 – вектор напряжений, \bar{I} – вектор токов, S_n – режим функционирования ПАКС, U_0 – начальные значения напряжений, $U(t)$ – изменения напряжений;
- тепловая модель ПАКС: T^k – вектор элементов температур конструктива, Q^T – тепловые потоки, T_{cp} – температура окружающей среды, P_{cp} – атмосферное давление, P – вектор давлений воздуха, ΔP – вектор изменений давлений воздуха;
- тепловая модель ЭМ ПАКС: $T^э$ – вектор температур элементов, Q^T – тепловые потоки, $q^{TЭ}$ – тепловые параметры элементов.

При моделировании сначала задаются геометрические ($\Gamma_{пар}$), электрические ($\Theta_{пар}$), тепловые ($T_{пар}$) и аэродинамические ($A_{пар}$) параметры исследуемого ПАКС. На их основе формируются электрическая тепловые модели ПАКС в системах автоматизированного проектирования. В результате работы электрической модели схемы получают значения токов и напряжений на элементах ЭМ. Данные полученные в электрической модели схемы вводятся в тепловую модель ЭМ. На основе расчета значений электрических режимов элементов в тепловой модели ЭМ ПАКС проводится расчет значений температур элементов. После чего, изменяя входные воздействия и внешние возмущающие факторы, моделируются различные режимы и неисправности ПАКС.

Расчет электрических характеристик ЭМ ПАКС

Высокой точностью и достоверностью обладают классические программы схемотехнического моделирования (SPICE-подобные программы [11]), которые основаны на машинном составлении системы обыкновенных дифференциальных уравнений электрической цепи и их решении без применения упрощающих предположений. В них используются численные методы Рунге – Кутты или метод Гира для интегрирования системы дифференциальных уравнений, метод Ньютона-Рафсона [13] для линеаризации системы нелинейных алгебраических уравнений и метод Гаусса или LU-разложение для решения системы линейных алгебраических уравнений.

Расчет электрических допусков осуществляется на основе следующих исходных данных:

- конструкция и принципиальная схема ПАКС, режим функционирования и номинальные значения параметров элементов, входящих в него;
- условия эксплуатации, основные технические характеристики (выходные параметры) радиоаппарата и требуемая точность этих характеристик.

Расчет теплового режима ПАКС

Моделирование теплового режима проводится поэтапно с постепенным переходом от верхнего уровня иерархии, включающего группу блоков и конструкций ПАКС, к нижнему, имеющему в своем составе простейшие подсисте-

мы – отдельные элементы, которые невозможно разделить, не нарушив их целостности [14, 15, 16].

Сначала создаются модели тепловых процессов или макромоделли исследуемой конструкции рис. 4.

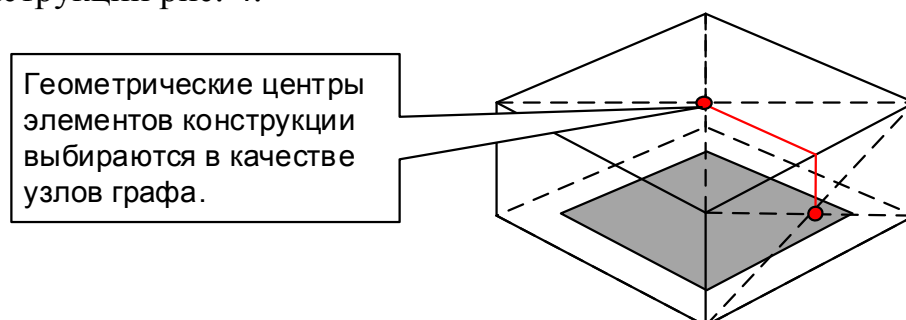


Рис. 4. Определение длины теплового потока между стенками конструктива

Построение модели начинается с определения узлов топологического графа. Далее узлы соединяются ветвями для определения тепловых связей между элементами конструкции (рис. 5).

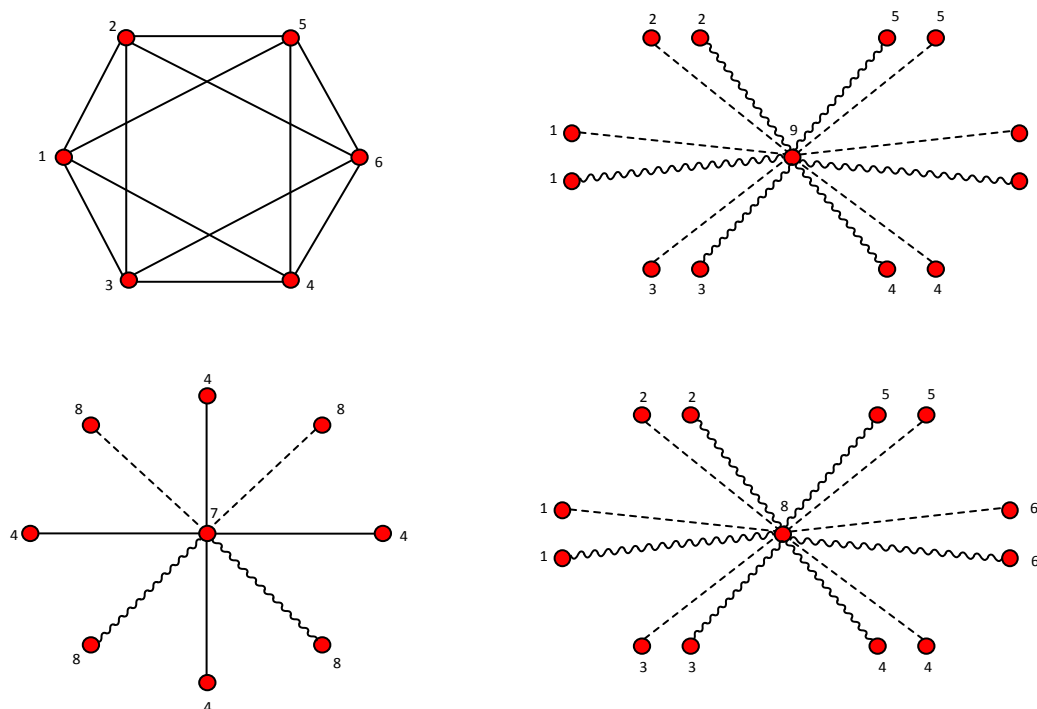


Рис. 5. Топологическая модель модуля «Монокуб» в корпусе

Таблица 1 – Характеристики модуля «Монокуб» в корпусе

Размеры корпуса	96×281×315 мм
Материал корпуса	Сталь
Толщина стенок корпуса	0,5 мм
Общая мощность, выделяемая ЭМ	30 Вт

На рис. 5 цифрами обозначены: 1 – левая стенка корпуса, 2 – верхняя стенка корпуса, 3 – передняя стенка корпуса, 4 – нижняя стенка корпуса, 5 – задняя часть корпуса, 6 – правая стенка корпуса, 7 – электронный модуль, 8 – воздух внутри, 9 – воздух снаружи.

Между стенками задаются условия кондуктивного теплообмена, такие как, $x \times y \times z$ – размер, определяющий площадь сечения теплового потока, l^q – длина пути теплового потока, σ – теплопроводность материала.

Теплообмен с окружающей средой описан естественной конвекцией с плоской поверхности в окружающую среду и излучением с неразвитой поверхности. Задаются следующие параметры: длина поверхности, ширина (высота) поверхности, ориентация поверхности, давление окружающей среды.

Теплообмен платы с воздухом внутри корпуса задан условиями излучения и конвекции с плоской неразвитой поверхности. Так как ЭМ размещается на нижней стенке корпуса, задан кондуктивный теплообмен ЭМ с нижней стенкой корпуса.

На основе топологической модели (рис. 5) формируется и рассчитывается система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T_1 - T_2}{R_{12}} + \frac{T_1 - T_3}{R_{13}} + \frac{T_1 - T_5}{R_{15}} + \frac{T_1 - T_4}{R_{14}} = P_1(T_1); \\ \frac{T_2 - T_1}{R_{21}} + \frac{T_2 - T_5}{R_{25}} + \frac{T_2 - T_3}{R_{23}} + \frac{T_2 - T_6}{R_{26}} = P_2(T_2); \\ \frac{T_3 - T_1}{R_{T_{31}}} + \frac{T_3 - T_4}{R_{34}} + \frac{T_3 - T_2}{R_{32}} + \frac{T_3 - T_6}{R_{36}} = P_3(T_3); \\ \frac{T_4 - T_3}{R_{43}} + \frac{T_4 - T_6}{R_{46}} + \frac{T_4 - T_1}{R_{41}} + \frac{T_4 - T_5}{R_{45}} = P_4(T_4); \\ \frac{T_5 - T_2}{R_{52}} + \frac{T_5 - T_6}{R_{56}} + \frac{T_5 - T_1}{R_{51}} + \frac{T_5 - T_4}{R_{54}} = P_5(T_5); \\ \frac{T_6 - T_5}{R_{65}} + \frac{T_6 - T_4}{R_{64}} + \frac{T_6 - T_2}{R_{62}} + \frac{T_6 - T_3}{R_{63}} = P_6(T_6); \\ 4 \frac{T_7 - T_4}{R_{74}} + 2 \frac{T_7 - T_8}{R_{78}} + 2 \frac{T_7 - T_8}{R_{78}^{rad}} = P_7(T_7); \\ \sum_{i=1}^7 \frac{T_8 - T_i}{R_{8i}^{rad}} + \sum_{i=1}^7 \frac{T_8 - T_i}{R_{8i}^{conv}} = P_8(T_8); \\ \sum_{i=1}^7 \frac{T_9 - T_i}{R_{9i}^{rad}} + \sum_{i=1}^7 \frac{T_9 - T_i}{R_{9i}^{conv}} = P_9(T_9). \end{array} \right.$$

где $P_i(T_i)$ – тепловая мощность i -го элемента, T_i – температура i -го элемента, R_{ij} – тепловое сопротивление между i -м и j -м элементами.

Для решения указанной задачи используются критериальные уравнения теории подобия и уравнения теплообмена, метод узловых потенциалов для формирования математической модели тепловых процессов в виде системы

обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ) или системы нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ) [17].

Для решения СОДУ используется метод формул дифференцировании назад (ФДН), для решения СНАУ используется метод простых итераций, а для решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), к которым сводятся СОДУ и СНАУ (на каждом шаге по времени и/или на каждой итерации по нелинейностям), – метод LU-разложения с символьной факторизацией и учетом разреженности матрицы тепловых проводимостей [10].

В отличие от других видов моделей топологические модели тепловых процессов позволяют в простой форме задавать граничные условия различных родов [18] и их комбинаций по объемам и поверхностям конструкции ПАКС при помощи соответствующих компонентов графа (ветвей, источников заданной температуры и (или) источников с заданной тепловой мощностью).

Тепловой расчет конструкции ПАКС позволил получить окончательные значения температур, показанные в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета значений температур во всех узлах модели

№ узла	Имя узла	Температура, °С
1	Левая стенка	46
2	Верхняя стенка	45,6
3	Передняя стенка	46
4	Нижняя стенка	47,4
5	Задняя стенка	46,4
6	Правая стенка	46
7	Плата	80,1
8	Воздух внутри	58,7
9	Воздух снаружи	30

После разработки модели проводится контроль точности и подстройка параметров, далее производится расчет и оптимизация целевой функции (1), которая зависит от измеренных и рассчитанных температур, путем изменения геометрических и теплофизических параметров (ГТФП) модели в пределах их допусков.

$$\delta = \sum_{n=1}^N \left(1 - \frac{T_n^H}{T_n^M} \right)^2 \Rightarrow \min_{q \in Q_{зад}}, \quad (1)$$

где $T_n^H = f(q^H)$ – вектор измеренных (И) значений температур; $T^M = f(q^M)$ – вектор расчетных (модельных – М) значений температур; q^H – вектор фактических ГТФП конструкции ЭМ; q^M – вектор идентифицируемых ГТФП конструкции ЭМ; N – число элементов. Значения параметров q рассчитываются методом Давидона-Флетчера-Пауэлла (ДФП), который основан на формуле:

$$q_{i+1} = q_i - \lambda_i \cdot P(q_i) \cdot g(q_i), \quad (2)$$

где i – номер итерации процесса оптимизации; λ – параметр шага оптимизации; $P(q_i)$ – матрица, рекуррентно пересчитываемая по значениям градиента в текущих точках; $g(q_i)$ – градиент целевой функции.

При этом задача идентификации параметров является оптимизационной задачей (рис. 6). Значения параметров оптимизируются таким образом, чтобы максимально приблизить смоделированные значения температур к измеренным.

Реализация способа оценки точности и подстройки параметров модели [19] приведена на рис. 6.

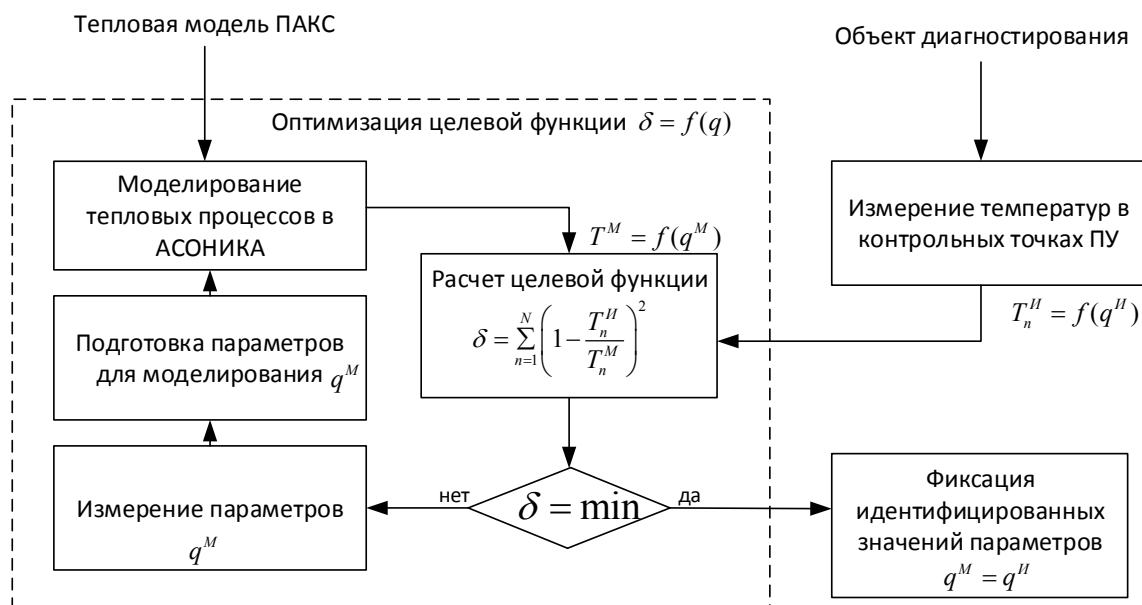


Рис. 6. Оценка точности и подстройка параметров модели

Для первого этапа теплового моделирования были подготовлены следующие исходные данные: теплофизические параметры материалов несущих конструкций из баз данных и справочников; заданы теплофизические параметры материалов и мощности тепловыделений всех ЭМ, а также указаны пути кондуктивной, конвективной и лучистой передач тепла.

Расчет тепловых режимов элементов ЭМ ПАКС

Для первого этапа моделирования была построена тепловая модель блока (рис. 5). После чего осуществляется переход ко второму этапу моделирования – уточнению температур ЭРИ, расположенных в каждом ЭМ.

Для расчета тепловых режимов ЭРИ ЭМ в соответствии с конечным этапом моделирования были подготовлены следующие исходные данные на основе конструкции системной (материнской) платы выполненной в форм-факторе mini-ITX (рис. 7):

- теплофизические параметры материалов и геометрические параметры печатных плат и всех ЭРИ;
- мощности тепловыделений в каждом ЭРИ;
- поверхности кондуктивной и лучистой передач тепла;
- средние температуры ЭМ и стенок блока, а также воздушных объемов вокруг ЭМ, полученные на первом этапе моделирования.

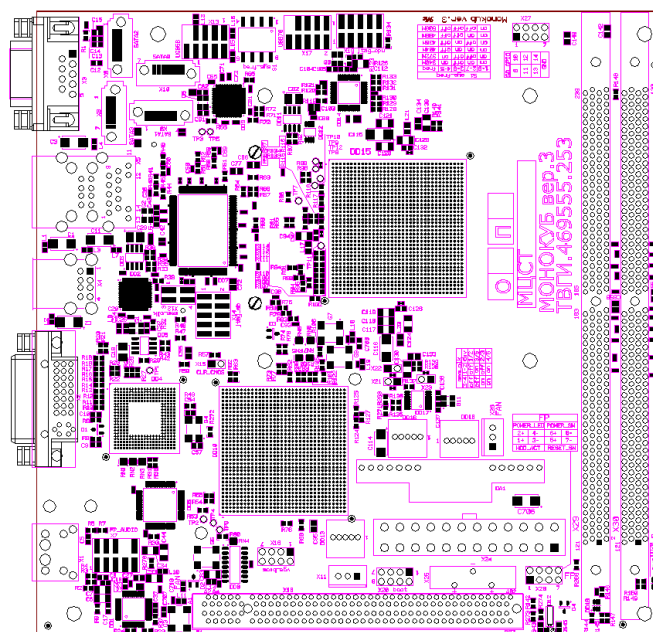
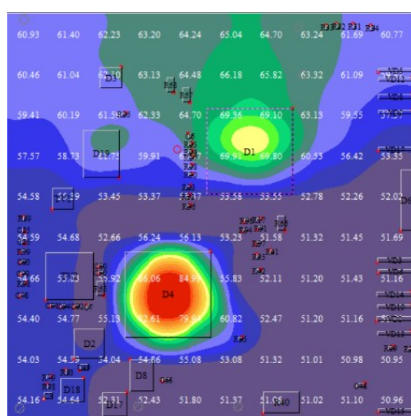


Рис. 7. Системная (материнская) плата выполненная в форм-факторе mini-ITX

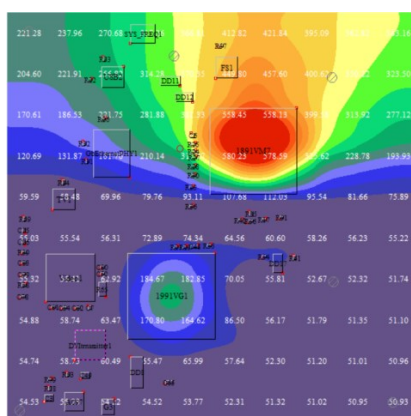
В результате проведенного моделирования были получены термограммы ЭМ, а также температуры и запасы по температурам на каждом отдельном ЭРИ. На рис. 8 и в таблице 3 представлены результаты моделирования ЭМ.

Таблица 3 – Тепловые режимы ЭМ

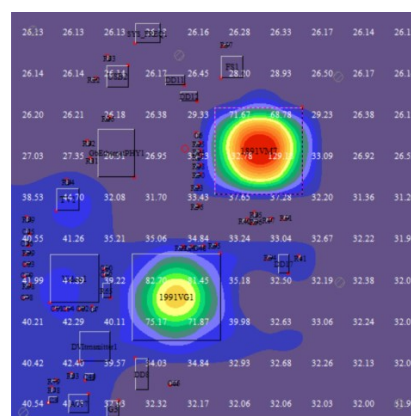
Обозначение ЭРИ	Время, с	Температура ЭРИ		Коэффициент тепловой нагрузки	Запас по температуре, %
		Максимальная расчетная, °С	Максимальная по ТУ, °С		
DA2	200,00	56,91	85,00	0,67	33
DA9	200,00	59,74	85,00	0,7	30
DA8	200,00	55,69	85,00	0,66	34
DA3	200,00	54,52	85,00	0,64	36
DD1	200,00	53,08	85,00	0,62	38
DD3	200,00	60,58	125,00	0,48	52
...



а)



б)



в)

Рис. 8. Термограммы поверхностей ЭМ в различных режимах:
а) нормальный режим функционирования, б) перегрев 1891 VM7,
в) отсутствие воздушного охлаждения

Проверка модели на адекватность

Полученные результаты необходимо оценить на чувствительность и адекватность к изменению входных воздействий и внешних возмущающих факторов. На рис. 9 приведены результаты натурального и имитационного моделирования, выполненного с использованием разработанной модели.

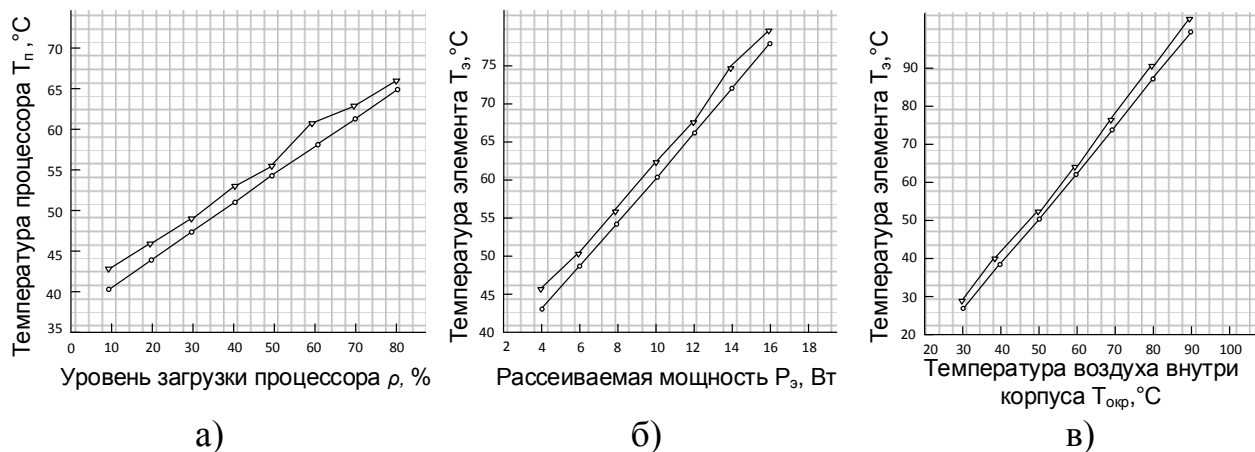


Рис. 9. Результаты компьютерного и натурального моделирования:

- а) зависимость температуры процессора от режима загрузки,
- б) изменение температуры элемента в зависимости от мощности рассеивания,
- в) изменение температуры элемента в зависимости от изменения температуры окружающей среды

Проведенное компьютерное моделирование показало, что разработанная модель адекватна, информативна и чувствительна к изменению входных воздействий и внешних возмущающих факторов и как следствие изменению технического состояния ПАКС, погрешность разработанной модели составляет 3...5 %, и не превышает статистическую погрешность и существующие требования к достоверности контроля [20]. Результаты компьютерного моделирования подтверждают выводы, сделанные в процессе математического моделирования, о целесообразности применения модели ПАКС при формировании библиотеки неисправностей [21].

Заключение

Разработанная тепловая диагностическая модель ПАКС представляет собой комплексную модель, в которой на основе иерархического подхода последовательно моделируются: электрические процессы, тепловой режим конструкции ПАКС и тепловые режимы ЭРИ ЭМ ПАКС.

При моделировании получены математические и имитационные модели с использованием средств компьютерного моделирования АСОНИКА и Proteus 8.0, которые подтверждаются результатами натурального эксперимента.

Была разработана комплексная модель тепловых процессов в ПАКС, которая позволяет рассчитать температуры элементов ПАКС в различных режимах функционирования ПАКС.

Полученная модель отличается от известных моделей тем, что в ней учитываются различные режимы функционирования ПАКС. Модель позволяет рассчитать температурные значения элементов с точностью до 3%, что на сегодня недостижимо имеющимися средствами моделирования.

Предлагаемая модель позволяет моделировать температурные значения элементов в таких технических состояниях, как запуск, ненагруженный режим, нагруженный режим, предотказное состояние, энергосбережение, отключение, неработоспособное состояние.

На основе полученной модели разработана методика теплового контроля, которая позволяет определять техническое состояние ПАКС в рабочем состоянии в реальном времени [4].

Литература

1. Буравлев А. И., Пьянков А. А. Управление техническим обеспечением жизненного цикла вооружения и военной техники. – М.: Издательство «Граница», 2015. – 301 с.
2. Евланов Л. Г. Контроль динамических систем. – М.: Наука, 1979. – 432 с.
3. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. М.: Стандартиформ, 2007. 22 с.
4. Будко П. А., Винограденко А. М., Гойденко В. К. Методика теплового диагностирования и контроля технического состояния радиоэлектронного оборудования // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 1. С. 12-20.
5. Давыдов П. С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.
6. Чернышев А. А. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники. – М.: Энергия, 1980. – 216 с.
7. Долматов А. В., Сулейманов С. П., Увайсов С. У., Алкадарский А. М. Программно-методический инструментальный мониторинг производственных дефектов радиотехнических устройств // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2005. Т. 1. С. 335-336.
8. Долматов А. В., Увайсов С. У., Увайсов Р. И., Алкадарский А. М., Синтез температурных допусков на комплектующие элементы электронных приборов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2005. Т. 1. С. 334-335.
9. Ксенз С. П., Теоретические и прикладные задачи диагностирования средств связи и автоматизации. – Л.: ВАС, 1990. – 336 с.
10. Шалумов А. С. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 368 с.
11. Шелепин Н. А. Основные принципы создания SPICE-моделей микроэлектромеханических систем // Микросистемная техника. 2004. № 9. С. 30-35.

12. Сабоннадьер Ж. К., Метод конечных элементов и САПР. – М.: Мир, 1989. – 192 с.
13. Васильев Н. П., Егоров А. А. Опыт расчета параметров логистической регрессии методом Ньютона-Рафсона для оценки зимостойкости растений // Математическая биология и биоинформатика. 2011. Т. 6. №. 2. С. 190-199.
14. Суходольский В. Ю. Altium Designer: проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 224 с.
15. Разевиг В. Д. Система проектирования OrCAD 9.2. – М.: Солон-Р, 2001. – 250 с.
16. Петросянц К. О. Реализация процесса электротеплового моделирования в САПР БИС Mentor Graphics // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2008. № 1. С. 243-246.
17. Дульнев Г. Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1971. – 248 с.
18. Дульнев Г. Н., Теория тепло- и массообмена. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 195 с.
19. Увайсов С. У., Юрков Н. К., Методика обеспечения тепловой контролепригодности радиотехнических устройств на этапе проектирования // Вестник Самарского государственного университета. 2012. № 7. С. 16-21.
20. Аврунин О. Г., Щапов П. Ф. Повышение достоверности контроля и диагностики объектов в условиях неопределенности. – Харьков: ХНАДУ, 2011. – 192 с.
21. Будко П. А., Винограденко А. М., Кузнецов С. В., Гойденко В. К. Реализация метода многоуровневого комплексного контроля технического состояния морского робототехнического комплекса // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 4. С. 71-101.

References

1. Buravlev A. I., P'iankov A. A. *Upravlenie tekhnicheskim obespecheniem zhiznennogo tsikla vooruzheniia i voennoi tekhniki* [Managing the technical support of the life cycle of weapons and military equipment]. Moscow, Granitsa Publ., 2015. 301 p.
2. Evlanov L. G. *Kontrol' dinamicheskikh sistem* [Control of dynamic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 432 p.
3. State Standard 27.002-2015. Dependability in technics. Terms and definitions. Moscow, Standartinform, 2016. 22 p. (in Russian).
4. Budko P. A., Vinogradenko A. M., Goidenko V. K. Metodika teplovogo diagnostirovaniia i kontroliia tekhnicheskogo sostoianiia radioelektronnogo oborudovaniia [The method of thermal diagnostics and control of technical condition of radioelectronic equipment]. *H&ES Research*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 12-20 (in Russian).

5. Davydov P. S. *Tekhnicheskaiia diagnostika radioelektronnykh ustroistv i sistem* [Technical diagnostics of electronic devices and systems]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1988. 256 p. (in Russian).

6. Chernyshev A. A., *Obespechenie teplovykh rezhimov izdelii elektronnoi tekhniki* [Provision of thermal conditions for electronic products]. Moscow, Energiia Publ., 1980. 216 p. (in Russian).

7. Dolmatov A. V., Suleimanov S. P., Uvaisov S. U., Alkadarskii A. M. Programmno-metodicheskii instrumentarii monitoringa proizvodstvennykh defektov radiotekhnicheskikh ustroistv [Programming Methodological Tools for Monitoring Defects in Radio Engineering Devices]. *Annual International Symposium "Reliability and Quality"*, 2005, vol. 1, pp. 335-336 (in Russian).

8. Dolmatov A. V., Uvaisov S. U., Uvaisov R. I., Alkadarskii A. M., Sintez temperaturnykh dopuskov na komplektuiushchie elementy elektronnykh priborov [Synthesis of temperature tolerances for components of electronic devices]. *Annual International Symposium "Reliability and Quality"*, 2005, vol. 1, pp. 334-335 (in Russian).

9. Ksenz S. P., *Teoreticheskie i prikladnye zadachi diagnostirovaniia sredstv svyazi i avtomatizatsii* [Theoretical and applied problems of diagnosing communications and automation]. Sankt-Petersburg, Military Telecommunication Academy Publ., 1990. 336 p (in Russian).

10. Shalumov A. S. *Avtomatizirovannaia sictema ASONIKA dlia proektirovaniia vysokonadezhnykh radioelektronnykh sredstv na printsipakh CALS-tekhnologii* [Automated system ASONIKA for designing highly reliable radioelectronic devices based on the principles of CALS technology]. Moscow, Enerroatomizdat Publ., 2007. 368 p. (in Russian).

11. Shelepin N. A. *Osnovnye printsipy sozdaniia SPICE-modelei mikroelektromekhanicheskikh sistem* [Basic principles of creating SPICE-models of microelectromechanical systems]. *Journal of nano and microsystem technique*, 2004, no. 9, pp. 30-35 (in Russian).

12. Sabonnad'er Zh. K., *Metod konechnykh elementov i SAPR* [The finite element method and CAD]. Moscow, Mir Publ., 1989. 192 p. (in Russian).

13. Vasil'ev N. P., Egorov A. A. *Opyt rascheta parametrov logisticheskoi regressii metodom N'iutona-Rafsona dlia otsenki zimostoičnosti rastenii* [Experience in calculating the parameters of logistic regression by the Newton-Raphson method for estimating the winter hardiness of plants]. *Matematicheskaiia biologiiia i bioinformatika*, 2011, vol. 6, no. 2, pp. 190-199 (in Russian).

14. Sukhodol'skii V. U. *Altium Designer: proektirovanie funktsional'nykh uzlov RES na pechatnykh platakh* [Altium Designer: design of functional units of radio-electronic devices on printed circuit boards]. Saint-Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2014. 224 p.

15. Razevig V. D. *Sistema proektirovaniia OrCAD 9.2* [OrCAD design system 9.2]. Moscow, Solon-R Publ., 2001. 250 p.

16. Petrosiants K. O. Realizatsiia protsessa elektroteplovogo modelirovaniia v SAPR BIS Mentor Graphics [Implementation of the process of electrothermal

modeling in CAD BIS Mentor Graphics]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)*, 2008, no. 4, pp. 243-246 (in Russian).

17. Dulnev G. N. *Teplovye rezhimy elektronnoi apparatury* [Thermal modes of electronic equipment]. Moscow, Energiia Publ., 1971. 248 p. (in Russian).

18. Dulnev G. N., *Teoriia teplo- i massoobmena* [Theory of Heat and Mass Transfer]. Sankt-Petersburg, Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics Publ., 2012. 195 p. (in Russian).

19. Uvaisov S. U., Iurkov N. K., *Metodika obespecheniia teplovoi kontroleprigodnosti radiotekhnicheskikh ustroystv na etape proektirovaniia* [Methods of ensuring the thermal testability of radio engineering devices at the design stage]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 7, pp. 16-21 (in Russian).

20. Avrunin O. G., Shchapov P. F. *Povyshenie dostovernosti kontroliia i diagnostiki ob"ektov v usloviakh neopredelennosti* [Increasing the reliability of monitoring and diagnostics of objects under conditions of uncertainty]. Kharkov, Kharkov National Automobile and Highway University Publ., 2011. 192 p. (in Russian).

21. Budko P. A., Vinogradenko A. M., Kuznetsov S. V., Goidenko V. K. Realization of a Method of Multilevel Complex Control of Technical Condition of a Sea Robot. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 4, pp. 71-101 (in Russian).

Статья поступила 3 декабря 2018 г.

Информация об авторе

Гойденко Владимир Константинович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры технического обеспечения связи и автоматизации. Военная академия связи. Область научных интересов: информационно-измерительные системы, сбор и обработка информации. E-mail: lglvl@ya.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

Complex thermal model of communication hardware and software system

V. K. Goydenko

Purpose. A significant number of failures in modern communication and automation systems is associated with a change in the operation temperature conditions of electronic modules. The thermal control of the electronic components is effective method of control and diagnosing communication and automation systems. The control system must allow: to detect latent defects arising in communication and automation systems in real time; to cover a significant list of latent defects that occur in communication and automation systems; to allow to replace the defect simulation on a physical model to a mathematical model in order to reduce the time of creating the state database. In order to research the thermal conditions of the electronic components, it is necessary to develop an integrated thermal model. The purpose of the present paper is to develop the complex thermal model of the hardware and software system, which allows to obtain temperature values of the electronic components in communication and automation systems in different operation

*modes. **Methods.** The method of physical processes complex modeling is using parameterized models. **Novelty.** In comparison with other models, the developed complex thermal model takes into account the influence of various operation modes in communication and automation systems on the thermal characteristics of electronic modules. **Results.** The developed model allows to determine the temperature values of electronic components in various operation modes with an accuracy of 3%. Moreover, it helps to calculate the tolerance intervals of temperature values and simulate gradual and sudden failures of the hardware and software system. **Practical relevance.** The state database is created on the basis of simulated data in reference states and with various faults. It improves the efficiency of determining the technical condition and helps to prevent failures.*

***Key words:** thermal model, thermal mode, control, diagnosis, temperature, thermal process, topological model.*

Information about Author

Vladimir Konstantinovich Goydenko – Doctoral Student. The postgraduate student of the department of technical ensuring communication and automation. Military-academy of communication. Area of scientific interests: information and measuring systems, data collection and processing. E-mail: lglvl@ya.ru

Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tihoreckiy prospekt, 3