

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А.В. Белоусов

ОАО «Научно-производственный центр «Полус», г. Томск

E-mail: polus@online.tomsk.net

На основе тепловых моделей макроуровня элементов электронных устройств и конструкций создана методика анализа тепловых режимов негерметизированных электронных устройств космического аппарата. Методика включает формирование циклограммы электрических потерь для проведения связанного теплового и электрического анализа, что позволяет повысить точность и адекватность анализа тепловых режимов устройства и его элементов.

Необходимым этапом процесса проектирования электронных устройств (ЭУ) космического аппарата (КА) является анализ тепловых режимов, по результатам которого оценивается работоспособность ЭУ. Особенно актуален анализ тепловых режимов элементов ЭУ при размещении устройства вне герметического контейнера и увеличении требуемого срока активного существования КА до 10 и более лет.

Характерной особенностью электронных устройств на борту КА является их работа в динамических режимах, когда в зависимости от орбитального положения КА попеременно работают электронные устройства систем электроснабжения, координации орбиты и другие. Соответственно изменяется мощность тепловыделения и температурные поля в узлах и блоках ЭУ, что требует исследования динамических тепловых режимов ЭУ и его элементов.

Эту проблему можно решить только с использованием передовых технологий многодисциплинарных расчетов, в данном случае связанного электрического и теплового анализа, позволяющего учитывать взаимное влияние электрических и тепловых режимов ЭУ [1–6].

Имеющееся в настоящее время программное обеспечение (BETASoft, Ansys, Nastran, T-Flex, ABAQUS, CosmosWorks и др.) не позволяет проводить связанный электрический и тепловой анализ в одном пакете с возможностью определения трехмерных полей температуры по конструкции ЭУ и температуры на теплонагруженных элементах устройства [5, 6].

В то же время современные пакеты схемотехнического моделирования позволяют исследовать переходные и установившиеся процессы электрических схем ЭУ и на основе моделей макроуровня рассчитывать динамику тепловыделения на элементах схемы. Однако в них не формализована процедура формирования эквивалентной схемы тепловой модели ЭУ и нет функционала взаимной передачи данных между электрическими и тепловыми моделями, а также остается открытым вопрос точности расчета. Поэтому, создание тепловых моделей электрорадиоизделий (ЭРИ) и элементов конструкции устройства и методики анализа теплового режима, позволяющей решить задачи связанного анализа, является актуальным.

Тепловые модели могут быть представлены математическими моделями микро- или макроуровня [2, 7]. Модель микроуровня описывается дифференциальным уравнением теплопроводности в частных производных вместе с краевыми условиями. Число совместно исследуемых различных сред в практически используемых моделях микроуровня не может быть большим из-за сложности вычислений. Снизить вычислительные затраты можно, введя допущение о дискретизации пространства, что дает возможность перейти к моделям макроуровня (макромодели). Математическими моделями макроуровня являются системы алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений. На основе этих моделей предложена методика, позволяющая проводить анализ тепловых режимов ЭУ с учетом компоновки теплонагруженных ЭРИ.

Исходными данными для формирования моделей макроуровня служат компонентные и топологические уравнения. Компонентными уравнениями описываются свойства элементов (компонентов), а топологическими — их взаимосвязи в анализируемой системе. Одинаковая форма записи математических соотношений, которыми описываются электрические и тепловые процессы, обуславливает формальную аналогию их компонентных и топологических уравнений и эквивалентных схем. Это дает возможность, задав коэффициенты перехода, исследовать тепловые режимы с помощью пакета схемотехнического моделирования и проводить связанный электрический и тепловой анализ ЭУ в одном пакете, что на данный момент не реализовано в пакетах, использующих компонентно-топологические модели [7].

Предложенная методика позволяет формировать по конструкции ЭУ сетку, аналогичную конечно-элементной, и подключать модели ЭРИ без изменения сетки, что нельзя сделать, используя метод конечных элементов. Подключение моделей ЭРИ к эквивалентной схеме производится через тепловые сопротивления, включаемые между узлом, в котором определяется средняя температура посадочной поверхности ЭРИ, и узлами треугольных элементов сетки конструкции ЭУ. Благодаря этому можно создавать упрощенные модели ЭРИ и сохранять их в библиотеке моделей, что является несомненным преимуществом данного подхода.

Для установления количественной связи между тепловыми и электрическими параметрами вводятся коэффициенты: $k_c = 1 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\Phi/\text{Дж}$; $k_R = 1 \text{ Вт}\cdot\text{Ом}/^\circ\text{C}$; $k_t = 1 \text{ В}/^\circ\text{C}$; $k_q = 1 \text{ А}\cdot\text{с}/\text{Дж}$. Этими коэффициентами связываются параметры: $C_3 = k_c C_T$ – теплоемкость и электрическая емкость; $R_3 = k_R R_t$ – электрическое и тепловое сопротивление; $\varphi = k_t t$ – электрический потенциал и температура; $I = k_q q$ – электрический ток и тепловой поток.

Для ЭУ, выполненного вне гермоконтейнера, справедливо допущение об отсутствии градиента температуры по толщине элементов конструкции (рис. 1, а), поскольку их линейные размеры существенно превышают толщину [4]. Принятое допущение позволяет представить тепловые модели элементов конструкции в виде набора тонких пластин (рис. 1, б). При таком подходе формирование эквивалентной схемы ЭУ производится по следующему алгоритму:

1. На полученных тонкостенных пластинах в интерактивном режиме выделяются области (рис. 1, в), для каждой из которых задаются теплофизические свойства материала и шаг дискретизации.
2. В каждой области, в соответствии с заданным шагом дискретизации, автоматически создается треугольная сетка (рис. 1, г), удовлетворяющая критерию Делоне [3, 8], согласно которому внутри окружности, описанной вокруг любого треугольного элемента, не должны попадать другие узлы этой сетки. После этого производится сквозная нумерация узлов треугольной сетки.

3. Каждый i -й треугольный элемент сетки задан тремя узлами (вершинами), которые также являются узлами в эквивалентной схеме (рис. 1, д). В эти узлы, для имитации инерционности тепловых процессов, устанавливаются теплоемкости $C_i^{(1)}$, $C_i^{(2)}$, $C_i^{(3)}$, которые соединяются тепловыми сопротивлениями $R_i^{(1-2)}$, $R_i^{(2-3)}$, $R_i^{(1-3)}$. Данные сопротивления имитируют кондуктивную теплопередачу по конструкции устройства. Их значения для i -го треугольного элемента рассчитываются по формулам:

$$\begin{cases} R_i^{(1-2)} = \frac{4S}{\delta\lambda((y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3))}; \\ R_i^{(2-3)} = \frac{4S}{\delta\lambda((y_3 - y_1)(y_1 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_2 - x_1))}; \\ R_i^{(1-3)} = \frac{4S}{\delta\lambda((y_2 - y_3)(y_1 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_2 - x_1))}, \end{cases}$$

где $R_i^{(1-2)}$, $R_i^{(2-3)}$, $R_i^{(1-3)}$ – тепловые сопротивления между узлами треугольного элемента, $^\circ\text{C}/\text{Вт}$; δ – толщина элемента, м; $\{x_1, y_1\}$, $\{x_2, y_2\}$, $\{x_3, y_3\}$ – координаты вершин треугольного элемента, м; λ – коэффициент теплопроводности материала элемента, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$; S – площадь треугольного элемента, м^2 .

В свою очередь, $S = 0,5[(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)]$.

Значения теплоемкостей $C_i^{(1)}$, $C_i^{(2)}$ и $C_i^{(3)}$ рассчитываются по формуле

$$C_i^{(1)} = \frac{c_{уд}\rho S\delta}{3},$$

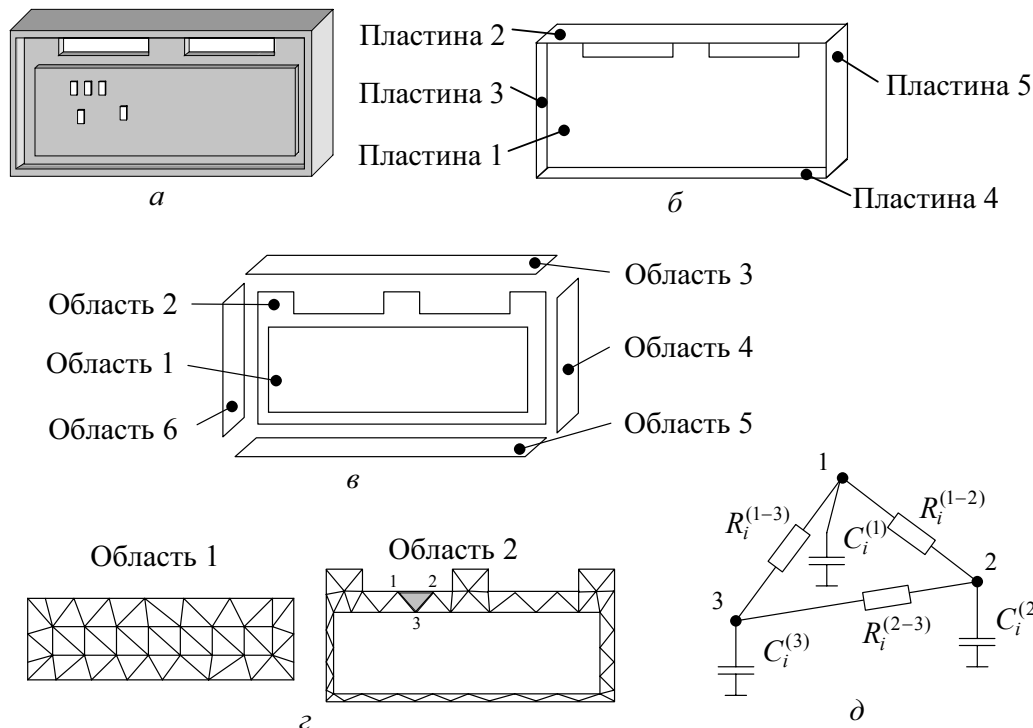


Рис. 1. Этапы формирования эквивалентной схемы тепловой модели: а) объемная модель; б) конструкция, представленная в виде тонких пластин; в) на тонких пластинах определены области; г) области, разбитые на треугольные элементы; д) часть эквивалентной схемы области 2

где $C_i^{(1)}=C_i^{(2)}=C_i^{(3)}$ – теплоемкости в узлах треугольного элемента, Дж/°C; δ – толщина элемента, м; $c_{уд}$ – удельная теплоемкость материала элемента, Дж/(кг·°C); ρ – удельная плотность материала элемента, кг/м³.

4. Благодаря проведенной сквозной нумерации узлов создание эквивалентной схемы области сводится к подключению подсхемы треугольного элемента к соответствующим узлам треугольной сетки, на которую разбита область. За счет общих узлов, расположенных на границах областей, производится автоматическое объединение эквивалентных схем областей, в результате чего формируется эквивалентная схема ЭУ.
5. Для учета теплообмена излучением в интерактивном режиме выделяются основные излучающие области. После этого в автоматическом режиме из первой области выбирается первый треугольник, а из второй области – такой, который позволяет получить наименьшее расстояние между ними. Затем в узлы двух подсхем треугольных элементов включается нелинейное тепловое сопротивление $R_{и}$, которым имитируется теплообмен излучением. По такому алгоритму перебираются все треугольники выделенных областей.

Нелинейное тепловое сопротивление $R_{и}$, °C/Вт, определяется по формуле

$$R_{и} = K_R \frac{t_1 - t_2}{\left(\frac{t_1 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100}\right)^4},$$

где t_1, t_2 – средние температуры треугольных элементов, участвующих в теплообмене, °C; $K_R=(5,67\varepsilon\varphi\delta)^{-1}$ – коэффициент, зависящий только от геометрических параметров тела и условий теплообмена излучением, °C⁴/Вт; ε – степень черноты; φ – коэффициент облученности.

Значение коэффициента облученности φ двух взаимно параллельно расположенных треугольных элементов в зависимости от расстояния между ними рассчитывается по формуле [1]

$$\varphi = 0,837 \left(1 - e^{\frac{-0,452a}{h}} \right),$$

где a – сторона треугольного элемента, м; h – среднее расстояние между двумя треугольными элементами, м.

6. В интерактивном режиме выделяются области, участвующие в конвективной теплоотдаче в условиях естественной конвекции. Затем, в автоматическом режиме, между узлом, где задана температура среды, и узлами треугольных элементов областей, в которых определяется средняя температура элемента, включается нелинейное тепловое сопротивление $R_{кон}$, имитирующее теплообмен конвекцией [1]

$$R_{кон} = \frac{1}{NAS \left(1,662 - 0,0031 \left(\frac{t + t_{cp}}{2} \right) \right) (t - t_{cp})^{1/3}},$$

где N – коэффициент, учитывающий ориентацию поверхности; A – коэффициент, учитывающий физические параметры среды, Вт/(м²·°C^{7/3}); t – средняя температура в треугольном элементе, °C; t_{cp} – температура среды, °C.

Таким образом, тепловые модели элементов конструкции устройства формируются в виде эквивалентных схем, значения параметров элементов которых рассчитываются по приведенным формулам.

Поскольку для анализа теплового режима элемента РЭА достаточно определить среднюю температуру его корпуса, модель элемента создается упрощенной (рис. 2).

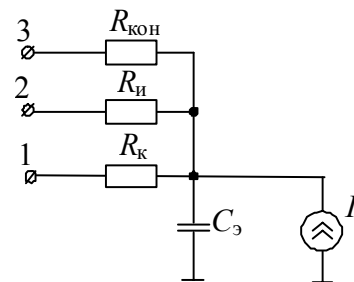


Рис. 2. Упрощенная тепловая модель элемента конструкции

Эквивалентная схема такой модели состоит из теплового сопротивления $R_{к}$, имитирующего кондуктивную теплопередачу по корпусу и креплению ЭРИ, нелинейных тепловых сопротивлений $R_{и}$ и $R_{кон}$, имитирующих теплообмен излучением и конвективную теплоотдачу, теплоемкости C_3 и источника тепловыделения I . Соединение элементов в эквивалентной схеме производится согласно рис. 2. Значение теплового сопротивления $R_{к}$, °C/Вт, рассчитывается по формуле

$$R_{к} = \frac{b}{\lambda_3 S_{п}},$$

где b – толщина слоя между ЭРИ и посадочным местом, м; λ_3 – эффективный коэффициент теплопроводности материала слоя, Вт/(м·°C); $S_{п}$ – площадь, определяемая поверхностью контакта ЭРИ с его посадочным местом, м².

Приведенная тепловая модель ЭРИ позволяет использовать заданные в технических условиях или полученные экспериментальным путем значения тепловых сопротивлений $R_{к}$ и теплоемкости C_3 , что повышает ее точность и адекватность.

Для задания тепловых нагрузок при проведении связанного теплового и электрического анализа разработана методика, на первом этапе которой формируется циклограмма режимов работы (T_i, P_i), определяющая последовательность режимов работы ЭУ (рис. 3), где T_i – длительность режима работы ЭУ, с; P_i – мощность на нагрузке, Вт; $i=1...N$ – количество режимов. После этого проводится электрическое моделирование, где каждый режим исследуется на интервале времени, соответствующем времени установления переходных процессов в схеме.

Затем, по результатам электрического моделирования каждого режима работы устройства создается массив $(i, P_1, \dots, P_j, \dots, P_M)$, в котором $j=1 \dots M$ – количество учитываемых источников тепловыделения; P_j – значение электрических потерь на j -м источнике тепловыделения, которое экстраполируется до времени T_i окончания соответствующего режима работы.

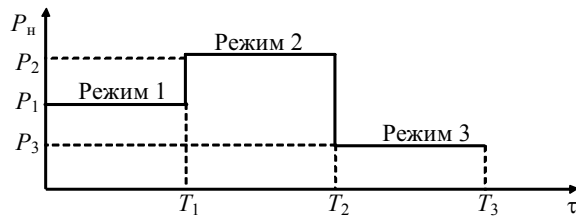


Рис. 3. Циклограмма режимов работы ЭУ

Анализ тепловых режимов проводится с использованием пакета схемотехнического моделирования Spice по тепловой модели ЭУ и расчетным значениям электрических потерь, что позволяет

точнее рассчитывать средние и пиковые значения температуры на элементах ЭУ.

Разработанная методика анализа тепловых режимов ЭУ КА, выполненных вне гермоконтейнера, основана на моделях макроуровня, что дает возможность проводить связанный тепловой и электрический анализ в одном пакете, нарабатывать библиотеку типовых элементов конструкции и ЭРИ, использовать заданные в технических условиях и полученные экспериментально тепловые параметры ЭРИ или элемента конструкции. Методика включает формирование циклограммы электрических потерь для проведения связанного теплового и электрического анализа, что позволяет повысить точность и адекватность анализа тепловых режимов устройства и его элементов. Применение предложенной методики для анализа тепловых режимов ЭУ системы электроснабжения спутниковой системы «Глонасс» позволило снизить перегревы на элементах устройства, повысить надежность и улучшить динамические показатели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
2. Мадера А.Г. Моделирование теплообмена в технических системах. – М.: НО Научный Фонд «Первая исследовательская лаборатория им. акад. В.А. Мельникова», 2005. – 208 с.
3. Сабоннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР. – М.: Мир, 1989. – 192 с.
4. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справочник / В.И. Мяченков, В.П. Мальцев, В.П. Майборода и др.; Под общ. ред. В.И. Мяченкова. – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с.
5. Шалумов А.С., Кофанов Ю.Н., Малютин Н.В., Носков В.Н. Создание интегрированной системы автоматизированного проектирования и комплексного компьютерного моделирования высоконадежной радиоэлектронной аппаратуры в рамках CALS-технологий // EDA-Express. – 2005. – № 11. – С. 9–12.
6. Кофанов Ю.Н., Потапов Ю.В., Сарафанов А.В. Подсистема анализа и обеспечения тепловых характеристик радиоэлектронной аппаратуры Асоника-Т // EDA-Express. – 2001. – № 4. – С. 17–19.
7. Норенков И.П. Автоматизированное проектирование. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 188 с.
8. Галанин М.П., Щеглов И.А. Разработка и реализация алгоритмов триангуляции сложных пространственных областей: итерационные методы. – М.: Изд-во ИПМ им. М.В. Келдыша, 2006. – 34 с.

Поступила 16.11.2006 г.