

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ПРИБОРЫ АВТОМАТИКИ

**Всеукраинский межведомственный
научно-технический сборник**

Основан в 1965 г.

Выпуск 127

Харьков
2004

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЕЙ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ТЕЛ

Рассматривается методика определения эффективных теплопроводностей сложных систем, каковыми являются радиотехнические устройства различного назначения.

Актуальность

Существующие расчетные методы определения эффективной теплопроводности ($\lambda_{эф.}$) сложных систем ограничены рамками принятых допущений: высокая плотность монтажа и, как следствие, пренебрежение конвективным теплообменом с газовым заполнителем. Методика предусматривает знание теплопроводности самих элементов, что существенно сказывается на сложности расчетов в целом. В работе [1] дается анализ тепловых режимов таких устройств, когда нагретую зону возможно рассматривать как однородное тело, теплофизические свойства которого таковы, что температурные поля реального и однородного тел мало отличаются. Определение эффективных коэффициентов теплопроводности системы сводится к более простой задаче - определению коэффициентов для элементарной ячейки.

Цель исследования - обоснование и выбор метода экспериментального определения эффективной теплопроводности ($\lambda_{эф.}$) сложных систем.

Если в системе наблюдается нарушение дальнего порядка, то путем мысленного перераспределения получают систему с ближним порядком. Данный прием позволяет перейти от сложной системы многих тел с различными физическими и геометрическими параметрами к однородному телу с эффективными значениями коэффициентов теплопроводности в направлениях x, y, z .

Полученные зависимости имеют следующий вид:

$$\lambda_x = \lambda_n \cdot N_n + \lambda_{zx} + (1 - N_n - N_z) \cdot \left[\frac{k_y}{\lambda_{mx} + \frac{1 - k_x}{\lambda_{5x}}} + (1 - k_y) \cdot \lambda_x \right]; \quad (1)$$

$$\lambda_y = \lambda_n \cdot N_n + \lambda_{zy} + (1 - N_n - N_z) \cdot \left[\frac{k_x}{\lambda_{my} + \frac{1 - k_y}{\lambda_{5y}}} + (1 - k_x) \cdot \lambda_y \right]; \quad (2)$$

$$\lambda_z = \frac{1}{\frac{N_n}{\lambda_n} + \frac{N_z}{\lambda_{3z}} + \frac{1 - N_n - N_z}{\lambda_{mz} \cdot k_x \cdot k_y} + \lambda_{4z} (1 - k_x \cdot k_y)}, \quad (3)$$

где $N_z = \frac{h_z^* \cdot m}{L_z + h_z^*}$, $N_n = \frac{h_n^* \cdot m}{L_z + h_z^*}$; $k_x = \frac{l_m}{l_m + l_z^*}$, $k_y = \frac{l_m}{l_m + \Delta_4}$;

$$h_z^* = \frac{L_z - (h_n^* + h_m) \cdot m}{m - 1}; \quad (4)$$

$h_n^* = h_1$ - средняя толщина установочной платы; $h_n^* = \frac{1}{N} \Sigma h_z$ - средняя высота установочного модуля; N - число микромодулей в нагретой зоне; h^* - средняя

высота зазора между платами; $l_m = l_2 = \Delta_2$ - размер основания микромодуля; L_x, L_y, L_z - габаритные размеры нагретой зоны; $\lambda_{mx}, \lambda_{my}, \lambda_{mz}$ - значения коэффициентов теплопроводности одиночного микромодуля средней высоты; l_3^* - средняя величина зазора между микромодулями в направлении x ; Δ_4^* - средняя величина зазора между микромодулями в направлении y .

Рекомендуемые аналитические зависимости (1)-(3), определения эффективной теплопроводности нагретых зон требуют знания теплопроводности самих элементов, что существенно сказывается на сложности расчетов в целом, особенно с учетом чрезвычайно быстрого развития и смены элементной базы РЭА. Метод определения $\lambda_{эф}$ ограничен рядом допущений: высокая плотность монтажа, как следствие, возможность пренебрежения конвективным теплообменом с газовым заполнителем.

При исследовании тепловых режимов различных систем особое внимание уделяли созданию методик расчета температурных полей сложных систем, считая, что теплофизические параметры заданы. Практически мало исследован вопрос создания методов определения теплофизических параметров сложных систем, т.е. не ставился вопрос решения обратной задачи.

Появление обратных методов теплопроводности вызвано развитием техники и естествознания, необходимостью установления начального распределения либо температур (задачи первого), либо краевых условий (задачи второго класса аналитической теории)

Этим методам посвящена монография [2], в которой рассмотрены два типа обратных задач:

- определение параметров внутреннего переноса энергии - коэффициентов тепло- и температуропроводности, теплоемкости, коэффициентов поглощения света, которые являются физическими характеристиками вещества.

- определение условий внешнего обмена энергией между телом и средой, т.е. нахождение граничных условий.

Наиболее целесообразными для исследования эффективной теплопроводности ($\lambda_{эф}$) нагретых зон РЭА являются экспериментальные исследования. Нагретая зона РЭА комплектуется большим количеством элементов с разными теплофизическими свойствами. Каждый элемент является по своей структуре сложной системой. Учет всех свойств каждого радиоэлемента и их взаимодействие является чрезвычайно сложной математической задачей.

Анализ существующих экспериментальных методов определения коэффициентов эффективной теплопроводности сложных систем показывает, что наиболее приемлемым из них является метод регулярного режима, основанный на не стационарном тепловом потоке и известный под названием метода "многих точек".

Все же остальные методы практически применимы только для однородных тел.

Для определения эффективной теплопроводности сложных систем по методу "многих точек" необходимы следующие физические предпосылки:

- коэффициенты теплоотдачи принимаются различными на разных поверхностях образца и являются постоянными (каждый на своей поверхности);
- температура среды постоянна, т.е. не меняется во времени;
- анизотропное тело однородно, т.е. коэффициенты его (теплопроводности

$\lambda_{эф}$ и температуропроводности "а") зависят только от направления и не зависят от координат точки; кроме того, теплоемкость "с" от направления не зависит.

Решение задачи

В основу решения задачи положено дифференциальное уравнение теплопроводности, полученное для анизотропных тел методом элементарных балансов тепла:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = c\gamma \frac{\partial \theta}{\partial \tau}, \quad (5)$$

где $\theta_{(x,y,z,\tau)} = t_{(x,y,z,\tau)} - t_c$ - избыточная температура или разность температур, отсчитываемая от температуры окружающей среды, град; t_c - температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$; $t_{(x,y,z,\tau)}$ - температура тела, $^{\circ}\text{C}$; λ - коэффициент теплопроводности в направлении координат x, y, z , Вт/м.град ; c - удельная теплоемкость, дж/кг.град ; γ - плотность материала, кг/м^3 ; τ - время, с.

При расположении начала координат в центре системы тел (рисунок) краевые задачи можно записать в виде:

$$\begin{aligned} -\lambda_{x_x} \frac{\partial \theta_x}{\partial x} &= \pm s_{0_x} \alpha_x (t_{s_{0_x}} - t_c)_{x=\pm L}; \\ -\lambda_{y_y} \frac{\partial \theta_y}{\partial y} &= \pm s_{0_y} \alpha_y (t_{s_{0_y}} - t_c)_{y=\pm L}; \\ -\lambda_{z_z} \frac{\partial \theta_z}{\partial z} &= \pm s_{0_z} \alpha_z (t_{s_{0_z}} - t_c)_{z=\pm L}. \end{aligned} \quad (6)$$

В данном случае уравнение (5) записано с учетом того, что в регулярном режиме температура каждой точки образца должна меняться по экспоненциальному закону:

$$\theta_{(x,y,z,\tau)} = AU_{(x,y,z)} \cdot e^{-m\tau}, \quad (7)$$

где $\theta_{(x,y,z,\tau)} = t_{(x,y,z,\tau)} - t_0$ - температура, отсчитываемая от температуры среды, град; $U_{(x,y,z,\tau)}$ - некоторая функция координат точек тела; A - величина постоянная, зависящая от начального распределения температур в теле; m - темп охлаждения, $1/\text{с}$.

Подставив выражение (7) в (5), получим уравнение для собственных функций задачи:

$$a_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + a_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + mu = 0, \quad (8)$$

где тепловые коэффициенты связаны зависимостями:

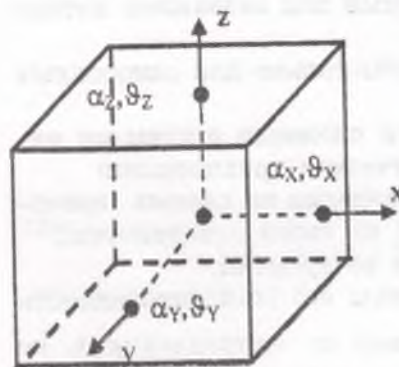
$$a_x = \frac{\lambda_x}{c\gamma}; \quad a_y = \frac{\lambda_y}{c\gamma}; \quad a_z = \frac{\lambda_z}{c\gamma}, \quad (9)$$

здесь a_i - коэффициент температуропроводности в направлении координат x, y, z , $\text{м}^2/\text{с}$.

Уравнение (8) для собственных функций U решается методом разделения переменных, функция отыскивается в виде

$$u_{(x,y,z)} = \theta_x \cdot \theta_y \cdot \theta_z. \quad (10)$$

Подставляя в уравнение (8) полученное для "u" выражение, после некоторых преобразований получаем:



Распределение точек замера температур у испытываемого теплового макета

$$\vartheta_x = A \cdot \cos \sqrt{\frac{\mu^2}{a_x}} \cdot x; \quad \vartheta_y = B \cdot \cos \sqrt{\frac{v^2}{a_y}} \cdot y; \quad \vartheta_z = C \cdot \cos \left(\sqrt{\frac{k^2}{a_z}} \cdot z + \omega \right), \quad (11)$$

где параметры μ, v, k связаны соотношением

$$\mu^2 + v^2 + k^2 = m. \quad (12)$$

Таким образом, собственная функция задачи принимает вид:

$$u = \cos \sqrt{\frac{\mu^2}{a_x}} \cdot x \cdot \cos \sqrt{\frac{v^2}{a_y}} \cdot y \cdot \cos \left(\sqrt{\frac{k^2}{a_z}} \cdot z + \omega \right). \quad (13)$$

Чтобы связать параметры, характеризующие функцию U , с условиями охлаждения теплового макета, использованы краевые условия задачи с учетом $\alpha_6 \neq \alpha_n \neq \alpha_n$ (коэффициенты теплоотдачи на каждой грани). При этом температура выражена уравнением регулярного режима охлаждения (7), где U дана в (10).

Подчиняя уравнение (11) граничным условиям и вводя обозначения

$$\sqrt{\frac{\mu^2}{a_x}} \cdot L_x = P_x; \quad (14)$$

$$\sqrt{\frac{v^2}{a_y}} \cdot L_y = P_y; \quad (15)$$

$$\sqrt{\frac{k^2}{a_z}} \cdot L_z = P_z; \quad (16)$$

получаем следующие соотношения:

$$P_x \cdot \text{tg} \cdot P_x = \frac{\alpha_x \cdot L_x}{\lambda_x} = B_{i_x}; \quad (17)$$

$$P_y \cdot \text{tg} P_y = \frac{\alpha_y \cdot L_y}{\lambda_y} = B_{i_y}; \quad (18)$$

$$P_z \cdot \text{tg}(P_z + \omega) = \frac{\alpha_n \cdot L_z}{P_z \cdot \text{tg}(P_z + \omega)}; \quad (19)$$

$$P_z \cdot \text{tg}(P_z - \omega) = \frac{\alpha_n \cdot L_z}{P_z \cdot \text{tg}(P_z - \omega)}. \quad (20)$$

Из (17)-(20) видно, что для определения значений эффективных коэффициентов теплопроводностей для сложных систем необходимо в формулы подставить размеры макетов, параметры P_x, P_y, P_z, ω и величины коэффициентов теплоотдачи для соответствующей грани системы.

Все эти величины определяются опытным путем. Раздельные коэффициенты теплоотдачи $\alpha_6, \alpha_n, \alpha_n$ на боковых, верхней и нижней гранях образца могут быть найдены при охлаждении той же сложной системы, путем замера температур в центральных точках соответствующих граней. Расчет коэффициентов теплоотдачи i -й грани производится по формуле (3.4) [1].

Метод "многих точек" разработан для определения теплопроводности анизотропных тел основных форм (параллелепипеда и цилиндра).

Выводы

1. Наиболее целесообразными для определения эффективной теплопроводности ($\lambda_{\text{эф}}$) нагретых зон РЭА являются экспериментальные исследования. Нагретая зона РЭА комплектуется большим количеством элементов с разными теплофизическими свойствами. Каждый элемент является по своей структуре сложной системой. Учет всех свойств каждого радиовламента и их взаимодействие — чрезвычайно сложная задача.

2. Установлено, что для экспериментального исследования эффективной теплопроводности ядра трехсоставной системы тел необходимо оболочку совместить с ядром, обеспечив при этом малое значение полной теплоемкости оболочки ($C_{\text{об.}} \ll C_{\text{я}}$). При этих условиях для определения $\lambda_{\text{эф}}$ может быть использован метод регулярного режима "многих точек".

Список литературы: 1. Дульнев Г.Н., Тарнавский Н.Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. Л.: Энергия. 1971. 360 с. 2. Темкин А.Г. Обратные методы теплопроводности. М.: Энергия. 1973. 287 с. 3. Емченко М.П. Метод определения термических коэффициентов анизотропных тел // Исследование в области тепловых измерений. 1956. №20. С.37-41. 3. Майко И.М. Синотин А.М. Экспериментальное определение эффективной теплопроводности нагретых зон РЭА // Вопросы радиоэлектроники. 1972. №2. 6 с. 4. Синотин А.М., Невалюдов И.Ш. Минимизация параметра эффективной теплопроводности нагретых зон радиоволновых аппаратов // Радиоэлектроника и информатика. 2002. №3. С. 18-19.

Поступила в редколлегию 21.01.2004

Синотин Анатолий Мефодиевич, канд. техн. наук, доцент кафедры социальной информатики ХНУРЭ. Научные интересы: проектирование, автоматизация и производство радиоволновой аппаратуры. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-591.

Семенец Валерий Васильевич, д-р техн. наук, профессор, проректор ХНУРЭ. Научные интересы: логический синтез. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина, 14.