УДК.658.51.011.56

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ПРИ λ>1

А.М. СИНОТИН

Разработан комбинированный метод определения эффективной теплопроводности для сложных систем, имеющих теплопроводность $\lambda > 1$. Проведено исследование точности предлагаемого метода.

A combined method of determining efficient heat condction for complex systems having thermal conductivity $\lambda > 1$ is developed. Investigating the accuracy of the method proposed is given.

Актуальность

Современные технические устройства различного назначения все более насыщаются радиоэлектронной аппаратурой. Это ведет к увеличению значительного числа входящих в него элементов, усложнению РЭА, к требованию дальнейшего усовершенствованию элементной базы при постоянном стремлении максимально снизить массу и габариты аппаратуры.

Энергетический коэффициент полезного действия радиоэлементов, как правило, невелик, и значительная доля энергии питания (до 90 %) превращается в тепловую, что приводит к перегреву аппаратуры. Поэтому разработчику очень важно еще на стадии проектирования выбрать такие конструктивные параметры, которые смогли бы обеспечить прибору нормальный тепловой режим в процессе его эксплуатации. Но для расчета температурного поля аппарата необходимо знание эффективной теплопроводности в основных направлениях. Существующие методы не дают оценки влияния элементов на общую эффективную теплопроводность, что приводит к значительным погрешностям расчета температурного поля аппарата. Да и сам радиоэлектронный элемент зачастую представляет сложную систему, состоящую из различных материалов по теплопроводности, значение эффективной теплопроводности которого не представлено в техническом паспорте и в соответствующей технической литературе.

Определение эффективной теплопроводности аналитическими методами связано со сложными математическими трудностями. Поэтому наиболее приемлемыми методами являются экспериментальные, из которых наиболее целесообразен существующий метод под названием «многих точек», разработанный для анизотропных тел основных форм (параллелепипеда и цилиндра) и при малых значениях теплопроводности. Но в литературе отсутствуют данные по исследованию его точности.

Цель исследования — обоснование предлагаемого комбинированного метода для определения эффективной теплопроводности сложных систем при $\lambda>1$ и исследование точности данного метода.

Постановка задачи и методы решения

Показать, что экспериментальные методы определения эффективной теплопроводности для сложных систем являются наиболее приемлемыми.

Рассмотрим простейшую тепловую модель аппарата, представленную на рис. 1 (нагретая зона 1, зазор 2, корпус 3). Нагретая зона составлена путем набора элементарных ячеек (рис. 2), на металлических платах которой

$$\lambda_x \approx \lambda_y = \lambda >>1 \tag{1}$$

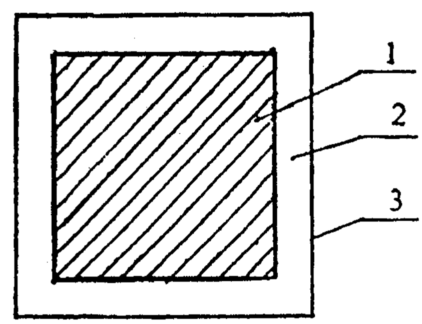

Рис.1. Схема тепловой модели аппарата

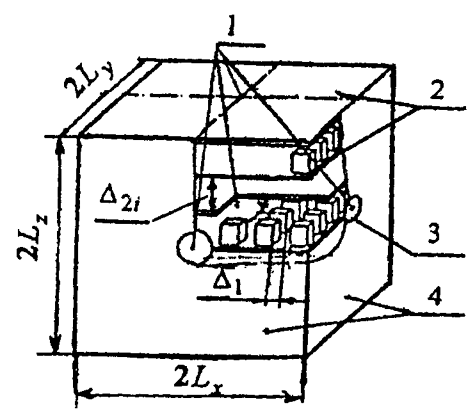

Рис. 2. Схема макета для определения эффективной теплопроводности

Запишем выражение для предельного темпа регулярного режима (m_∞) анизотропного тела в форме параллелепипеда при Bi=∞

$$m_\infty = \frac{\pi^2}{c\gamma}\left[\frac{\lambda_x}{L_x^2}+\frac{\lambda_y}{L_y^2}+\frac{\lambda_z}{L_z^2}\right],$$

или при условии (1)

$$m_\infty = \frac{\pi^2}{c\gamma}\left[\frac{\lambda_x}{L_x^2}+\frac{1}{L_y^2}+\frac{\frac{\lambda_z}{\lambda}}{L_z^2}\right], \tag{2}$$

где c – удельная теплоемкость, дж/кг.град.; γ – плотность, кг/м^3.

В силу условия (1) $\lambda_z/\lambda << 1$, а величины L_x, L_y, L_z, характеризующие размер параллелепипеда, имеют один порядок, поэтому третьим членом в скобках можно пренебречь и выражение (2) примет вид

$$m_\infty = \frac{\lambda}{c\gamma}\pi^2\left[\frac{1}{L_x^2}+\frac{1}{L_y^2}\right]$$

или
$$\lambda = \frac{m_\infty}{\pi^2\left[\frac{1}{L_x^2}+\frac{1}{L_y^2}\right]}c\gamma = \frac{m_\infty c}{\pi^2 v\left[\frac{1}{L_x^2}+\frac{1}{L_y^2}\right]}, \qquad (3)$$

где V – объем тела, м^3; c – полная теплоемкость, дж/град.

Таким образом, производя эксперименты при $B_i=\infty$ (при $\alpha >>1$), например, в воде с интенстивным перемешиванием, можно построить зависимость охлаждения $\ln\theta = af(\tau)$ во времени и получить из графика значение

$$m_\infty = \frac{\ln\vartheta_1 - \ln\vartheta_2}{\tau_2-\tau_1}. \qquad (4)$$

В литературе этот метод получил название первого метода регулярного режима.

Для оценки точности метода применим к (3) метод полного дифференциала считая, что объем тела, его полная теплоемкость c и размеры L_x, L_y определены без ошибки ($\Delta v = \Delta c = \Delta L = 0$), тогда

$$\frac{\nabla\lambda}{\lambda} = \frac{\nabla m_\infty}{m_\infty}. \qquad (5)$$

Из (4) имеем

$$\frac{\Delta m_\infty}{m_\infty} = \frac{\frac{\Delta\vartheta_1}{\vartheta_1}+\frac{\Delta\vartheta_2}{\vartheta_2}}{\ln\vartheta_1-\ln\vartheta_2}+\frac{2\Delta\tau}{\tau_2-\tau_1}. \qquad (6)$$

На стадии регулярного режима с точностью до постоянного множителя можно записать

$$\vartheta_1 \approx e^{-m_\infty\tau_1}; \qquad \vartheta_2 \approx e^{-m_\infty\tau_2}$$

и их отношение

$$\frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} = e^{-m_\infty(\tau_1-\tau_2)}. \qquad (7)$$

С учетом (7) $\ln\vartheta_1 - \ln\vartheta_2 = \ln\frac{\vartheta}{\vartheta_2} - m_\infty(\tau_1-\tau_2)$, тогда

$$\frac{\Delta m_\infty}{m_\infty} = \frac{1+e^{-m_\infty(\tau_1-\tau_2)}}{-m_\infty(\tau_1-\tau_2)}\frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_1}+\frac{2\Delta\tau}{\tau_2-\tau_1}. \qquad (8)$$

Будем измерять отрезок времени в долях $1/m_\infty$, то есть

$$\tau_2-\tau_1 = n\cdot\frac{1}{m_\infty}, \qquad (9)$$

где n – любое положительное число.

Подставим (9) в (8), тогда получим выражение для относительной ошибки

$$\partial\lambda = \frac{1+e^n}{n}\frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_1}+\frac{2}{n}\frac{\Delta\tau}{\frac{1}{m_\infty}},$$

или
$$\delta\lambda = k_{n_1}\delta\vartheta + k_{n_2}\delta\tau, \qquad (10)$$

где $\delta\vartheta$ и $\delta\tau$ – соответственно ошибки измерения температуры и времени, численно равного одной постоянной времени регулярного процесса $1/m_\infty$

$$k_{n_1} = \frac{1+e^n}{n}; \qquad (11)$$

$$k_{n_2} = \frac{2}{n}. \qquad (12)$$

На рис. 3 представлена зависимость $k_{n_1} = f(n)$, из которой следует, что для получения наименьшей ошибки $\delta\lambda$, необходимо брать разность логарифмов температуры в (4) на отрезке времени, численно равном $\tau_2-\tau_1 = 1{,}25/m_\infty$, то есть при n = 1,25.

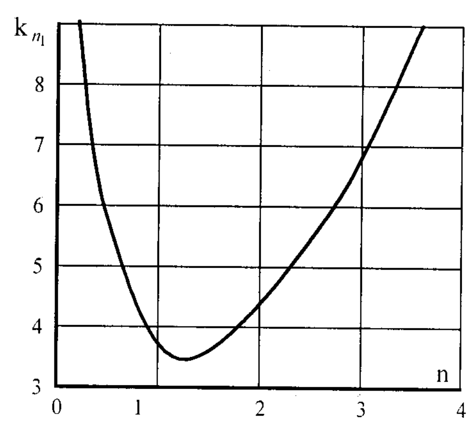

Рис. 3. Зависимость $k_{n_1} = f(n)$

Из (12) и (10) следует, что для уменьшения влияния ошибки времени на точность определения λ необходимо увеличить n.

Учитывая, что практически весь нестационарный процесс длится до $n \le 2$, то есть две постоянные времени процесса ($2/m_\infty$), приходим к выводу, что для получения λ с наименьшей ошибкой при $B_i = \infty$ необходимо вести обработку в (4) на интервале $\tau_2-\tau_1 = 1\div 2/m_\infty$.

Для одноблочных аппаратов с линейным размером порядка L≈10^{-1} м, произведением

$$c\gamma \approx 10^3\cdot 10^3 = 10^6 \text{ дж/м}^3\cdot\text{град},$$

при определенном значении λ имеем, что

$$m_\infty = 10^{-3} \cdot \lambda \ \ 1/\text{с},$$

где λ – вт/м·град.

Постоянная времени процесса $1/m_\infty$ соответственно равна

$$\frac{1}{m_\infty} = \frac{10^3}{\lambda}, \ \text{с.} \qquad (13)$$

Из (13) следует, что по первому методу регулярного режима можно практически определять эффективные теплопроводности нагретых зон РЭА до $\lambda \leq 20$ вт/м·град.

При больших значениях λ нестационарный процесс будет столь скоротечным (например , при $\lambda = 50$ вт/м·град. из (13) имеем $1/m_\infty = 20$ с., то есть весь процесс закончится за $2\,(1/m_\infty) = 40$ с.), что практически фиксировать изменение температуры во времени обычными средствами окажется невозможным в силу инерционности. Потребуется специальная аппаратура, что существенно осложнит эксперимент и сделает его экономически нецелесообразным.

Таким образом, производя эксперимент при $B_i = \infty$, мы сможем определить эффективную теплопроводность $1 < \lambda < 20$ вт/м·рад. анизотропного тела в двух направлениях, а для определения в третьем направлении, при условии. что $\lambda_z < 1$, можно использовать метод многих точек в условиях естественной конвекции и $B_i = 3$, то есть приходим к комбинированному методу.

Метод может быть использован, как самостоятельный при $\lambda_ч \approx \lambda_н \approx \lambda_я$.

Выводы

1. Разработан комбинированный метод для экспериментального определения эффективной теплопроводности для анизотропного тела, обладающего в двух направлениях $1 < \lambda < 20$ вт/м·град, а для определения в третьем направлении при условии, что $\lambda_z < 1$, может быть применен метод многих точек в условиях естественной конвекции и $B_i = 3$.

2. Метод может быть использован как самостоятельный или как поверочный при $\lambda_x \approx \lambda_y \approx \lambda_z$.

Литература. 1. *Майко И.М., Синотин А.М.* Экспериментальное определение эффективной теплопроводности нагретых зон радиоэлектронных аппаратов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО,1972. Вып. 2. С. 13–17. 2. *Майко И.М., Детинов Ю.М., Синотин А.М.* О теплофизическом конструировании одноблочных радиоэлектронных аппаратов с заданным тепловым режимом // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. 1974. Вып. 1. С. 80-87. 3. *Дульнев Г.Н., Тарновский Н.Н.* Тепловые режимы электронной аппаратуры. Л.: Энергия, 1971. 248 с.

Поступила в редколегию 11.12.03 г.

Синотин Анатолий Мефодиевич, канд. техн. наук, доцент кафедры социальной информатики ХНУРЭ. Область научных интересов: проектирование, автоматизация и производство радиоэлектронной аппаратуры.