УДК 658.51.011.56

А.М. Синотин

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПРИ РАСЧЁТЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НАГРЕТЫХ ЗОН РЭА

Проведены аналитические исследования точности метода "многих точек" используемых для экспериментального определения эффективной теплопроводности нагретых зон РЭА и установлено существование оптимальных условий проведения экспериментов.

***Ключевые слова**: эффективная теплопроводность, нагретая зона, анизотропность.*

Введение

Актуальность. При проектировании оптимальных радиоэлектронных аппаратов резко увеличился объём исходной информации. Получение такой информации требует тесной связи радиоэлектроники с другими отраслями науки и техники (математикой, физикой, теплофизикой, электроновычислительной техникой и др.). В потоке необходимой информации видное место занимают сведения о характере теплового режима прибора, который наряду с другими факторами существенно сказывается на надёжности, весовых и габаритных размерах системы в целом [1 – 4].

Цель исследования. Установление характера анизотропности нагретых зон РЭА, монтажные платы которых выполнены из различных материалов от металлов до пластичных масс ($\lambda = 380 - 0{,}3$ вт / м $\cdot$ град), влияния процентного содержания различных элементов на общую теплопроводность нагретой зоны, пределов изменения эффективной теплопроводности типовых конструкций нагретых зон РЭА и на этой основе упростить существующие расчётные методы определения λ [3, 4].

Постановка и решение задачи

Отсутствие в литературе исчерпывающего ответа анализа точности регулярного режима и оптимальных условий проведения эксперимента вызвало необходимость аналитического исследования этих методов экспериментального определения эффективной теплопроводности анизотропных тел. В общем случае для испытания нагретых зон РЭА на теплопроводность можно применять методы стационарного и нестационарного теплового потока. Методы стационарного теплового потока требуют создания сложных и дорогостоящих установок. Продолжительность эксперимента сравнительно велика. Все стационарные методы требуют изготовления специальных образцов из материала объекта испытаний.

В отличие от метода стационарного теплового потока, нестационарные методы, основанные на теории регулярного теплового режима, позволяют повысить скорость эксперимента и проводить эксперимент на реальных натурных объектах, не прибегая к специальным образцам. Отличительной особенностью теплопроводных свойств нагретых зон РЭА в общем случае является их анизотропность, т.е. различие коэффициентов теплопроводностей вдоль различных осей координат (x, y, z) $\lambda_{x,} \neq \lambda_y \neq \lambda_z$. Анизотропность нагретых зон РЭА вытекает из особенностей их конструкции и конструкции отдельных элементов монтажа, как много состоящих тел из различных материалов и заполнителей.

Нагретые зоны РЭА строятся из большого количества элементов, выполненных из металлических и диэлектрических материалов. Процентное содержание их в объёме аппарата и на платах может меняться в широких пределах. При этом мы будем предполагать, исходя из основных особенностей конструкции современных РЭА, что максимальный размер одиночного элемента (λ_{max}) монтажа много меньше, чем наибольший линейный размер (L_{max}) нагретой зоны, т.е. $\ell_{max} << L_{max.}$ Плотность размещения элементов на платах такова, что $\ell_{max}/\Delta_{i\,cp} \geq 1$, где $\Delta_{i\,cp}$ - среднее расстояние между элементами на плате. Плотность размещения самих плат такова, что $L_{max} / \Delta_{2i} \geq 1$, где Δ_{2i} – расстояние между i платами.

В результате анализа различных методов испытаний было принято в качестве основного метода для РЭА – метод регулярного режима, известный под названием «метод многих точек». Однако, приведенные выше аналитические исследования показали ограниченность этого метода малыми теплопроводностями ($\lambda < 1$), поэтому был разработан и исследован метод, когда две теплопроводности (например, $\lambda_x \approx \lambda_y >> \lambda_z$) много больше теплопроводности в третьем направлении.

Для контроля за порядком получаемых экспериментальных значений λ по методу многих точек целесообразно использовать методы основанные на другом принципе, например, принципе стационарного режима, известного под названием «метод пластины». Кроме того, данный метод также можно использовать для контроля метода многих точек.

Отсутствие в литературе исчерпывающего анализа точности методов регулярного режима и оптимальных условий проведения эксперимента вызвало необходимость аналитического исследования этих методов экспериментального определения эффективной теплопроводности анизотропных тел.

Метод многих точек разработан для определения теплопроводности анизотропных тел основных форм (цилиндра или параллелепипеда). При этом авторы метода не дали рекомендаций об оптимальных условиях проведения эксперимента и какими величинами λ ограничен в большую и меньшую стороны. Для ответа на эти вопросы ниже проведено исследование точности метода многих точек в зависимости от точности определения параметров, входящих в расчётные зависимости, на примере тела в форме параллелепипеда. Основные расчётные зависимости метода многих точек для тел в форме параллелепипеда имеют вид:

$$e^{-\rho_x}=\left(\vartheta_x/\vartheta_0\right)\cdot\cos P_x;\, e^{-\rho_y}=\left(\vartheta_y/\vartheta_0\right)\cdot\cos P_y; \quad e^{-\rho_z}=\left(\vartheta_z/\vartheta_0\right)\cdot\cos P_z; \tag{1}$$

$$P_x\ \mathrm{tq}\cdot P_x=\frac{\alpha_x\cdot L_x}{\lambda_x}=B_{ix};\, P_y\ \mathrm{tq}\cdot P_x=\frac{\alpha_y\cdot L_y}{\lambda_y}=B_{iy}; \quad P_z\cdot\mathrm{tq}\cdot P_z=\alpha_z\cdot L_z/\lambda_z=B_{iz}; \tag{2}$$

где $\vartheta_{x,y,z}$ – избыточная температура в центре поверхностей соответствующих граней; $\vartheta=t-t_{ср.}$; $P_{x,y,z}$ – безразмерные параметры, определяемые по данным эксперимента через $\rho_{x,y,z}$;

$$\rho_{x,y,z}=\ell n\,\vartheta_0-\ell n\,\vartheta_{x,y,z};$$

$Bi_{x,y,z}$ – критерий Био на соответствующей грани.

Таким образом, построив в полулогарифмической шкале экспериментальные данные охлаждения блока в центре $\vartheta_0(\tau)$ и на поверхности $\vartheta_{x,y,z}(\tau)$, получим непосредственно из (2) значения $\rho_{x,y,z}$.

Расчётные зависимости для λ могут быть получены из (1) и (2):

$$\lambda_{x,y,z}=\alpha_{x,y\,z}\cdot L_{x,y,z}\Big/\left(P_{x,y,z}\cdot\mathrm{tq}\,P_{x,y,z}\right).$$

Так как из (1) имеем:

$$P_x=\arccos\left(\vartheta_x/\vartheta_0\right);\qquad \sin P_x=\sqrt{1-\left(\vartheta_x/\vartheta_0\right)^2};$$

$$\mathrm{tq}\,P_x=\sin P_x/\cos P_x=\sqrt{1-\left(\vartheta_x/\vartheta_0\right)^2}\Big/\left(\vartheta_x/\vartheta_0\right),$$

то
$$\lambda_x=\frac{\alpha_x\cdot L_x}{\arccos\left(\vartheta_x/\vartheta_0\right)\cdot\sqrt{1-\left(\vartheta_x/\vartheta_0\right)^2}}\cdot\frac{\vartheta_x}{\vartheta_0}. \tag{3}$$

Аналогичные выражения получим для $\lambda_{y,z}$.

Обозначим $\vartheta_x/\vartheta_0=\Theta$, тогда из (3) получим, опуская индекс «x»:

$$\lambda=\alpha\cdot L\cdot\theta\Big/\left(\arccos\theta\cdot\sqrt{1-\theta^2}\right). \tag{4}$$

Точность определения λ согласно (4) зависит от точности определения коэффициента теплоотдачи к среде α, линейного размера тела L и точности определения отношения температур ϑ_x/ϑ_0, определяемое точностью их измерения в процессе опыта.

Для получения количественной зависимости относительной ошибки определения эффективной теплопроводности $\partial\lambda=\Delta\lambda/\lambda$ от относительных ошибок параметров $\partial\alpha=\Delta\alpha/\alpha$; $\partial L=\Delta L/L$; $\partial\vartheta=\Delta\vartheta/\vartheta_0$ воспользуемся методом полного дифференциала. Для этого прологарифмируем выражение (4) и возьмём полный дифференциал от левой и правой части, заменив в нём дифференциалы переменных величин их конечными приращениями ($d\alpha\approx\Delta\alpha$; $dL\approx\Delta L$; $d\vartheta\approx\Delta\vartheta$).

Из (4) имеем:

$$\ell n\,\lambda=\ell n\alpha+\ell n\,L+\ell n\,\theta-\ell n\sqrt{1-\theta^2}-\ell n\arccos\theta \tag{5}$$

Продифференцируем левую и правую части выражения (5).

$$\frac{d\lambda}{\lambda}=\frac{d\alpha}{\alpha}+\frac{dL}{L}+\frac{d\theta}{\theta}+\frac{\theta}{1-\theta^2}d\theta+\left(1\Big/\sqrt{1-\theta^2}\arccos\theta\right)d\theta. \tag{6}$$

Перейдём в (6) от дифференциала к малым конечным приращениям и сгруппируем члены с $\Delta\Theta$: После преобразований в скобках:

$$\Delta\lambda/\lambda=\Delta\alpha/\alpha+\Delta L/L+\left[\frac{1}{1-\theta^2}+\frac{1}{\alpha L}\left(\theta\cdot\alpha\cdot L\Big/\left(\sqrt{1-\theta^2}\cdot\arccos\theta\right)\right)\right]\cdot\frac{\Delta\theta}{\theta} \tag{7}$$

согласно (4) и (2) выражение стоящее в круглых скобках есть λ, а отношение $\lambda/\alpha L=1/Bi$. Кроме того, из (1) следует, что $1-\Theta^2=\sin^2 P$, тогда

$$\Delta\lambda/\lambda=\Delta\alpha/\alpha+\Delta L/L+\left[1/\sin^2 P+1/Bi\right]\cdot\Delta\theta/\theta. \tag{8}$$

Найдём выражение для $\Delta\theta$.

$$\Delta\theta=\Delta\left(\vartheta_x/\vartheta_0\right)=\left|\Delta\vartheta_x/\vartheta_0\right|+\left|\left(\Delta\vartheta_0/\vartheta_0^2\right)\cdot\vartheta_x\right|. \tag{9}$$

После подстановки (9) в (8), получим:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=\frac{\Delta\alpha}{\alpha}+\frac{\Delta L}{L}+\left(\frac{1}{\sin^2 P}+\frac{1}{Bi}\right)\frac{\dfrac{\Delta\theta_x}{\vartheta_0}+\dfrac{\Delta\vartheta_0}{\vartheta_0^2}\cdot\vartheta_x}{\vartheta_x/\theta_o}=$$

$$=\frac{\Delta\alpha}{\alpha}+\frac{\Delta L}{L}+\left(\frac{1}{\sin^2 P}+\frac{1}{Bi}\right)\cdot\left(\frac{\Delta\vartheta_x}{\theta_x}+\frac{\Delta\vartheta_0}{\vartheta_0}\right). \tag{10}$$

Величины $\Delta\vartheta_ч$ и $\Delta\vartheta_0$ представляют собой практически ошибки измерения температуры в центре и на поверхности тела. Обычно их измерение ведётся датчиками одного типа с регистрацией одним и тем же прибором. Поэтому можно считать $\Delta\vartheta_x = \Delta\vartheta_0 = \Delta\vartheta$, тогда из (10)

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\Delta L}{L} + \left(\frac{1}{\sin^2 P} + \frac{1}{Bi}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{\vartheta_x/\vartheta_0}\right) \cdot \frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_0}$$

или, так как из (10) $\vartheta_x/\vartheta_0 = \cos P$, получим:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\Delta L}{L} + \left(\frac{1}{\sin^2 P} + \frac{1}{Bi}\right)\left(1 + \frac{1}{\cos P}\right)\frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_0} \quad (11)$$

Перейдём к обозначениям относительных ошибок, тогда окончательно запишем:

$$\delta\lambda = \delta\alpha + \delta L + N_{\vartheta} \cdot \delta\vartheta, \quad (12)$$

где $N_{\vartheta} = \left(\frac{1}{\sin^2 P} + \frac{1}{Bi}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos P}\right) = N_{\vartheta}(Bi)$ - в силу того, что, и sinP и cosP, согласно (2) зависят только от критерия Bi.

cos P, согласно (2) зависят только от критерия Bi.

Из выражения (12) следует, что ошибка экспериментального определения λ зависит от значения критерия Bi = $\alpha \cdot L / \lambda$ при котором проводится эксперимент. Эта зависимость определяется функцией N_{ϑ}. Ошибка $\delta\lambda$ будет иметь наименьшее значение, при заданной точности определения коэффициента теплоотдачи $(\delta\alpha)$, линейного размера (δL) и температуры в центре тела $(\delta\vartheta)$, тогда N_{ϑ} примет наименьшее значение. Следовательно, для получения λ с наименьшей ошибкой необходимо проводить эксперименты в условиях $Bi \approx 3$ (13).

Для одноблочных радиоэлектронных аппаратов, имеющих линейный размер порядка 10^{-1}м, в условиях естественной конвекции, когда α имеет порядок 10^1= вт$/(м^2 \cdot град)$, получим, что

$$Bi = 10^1 \cdot 10^{-1}/\lambda = 1/\lambda, \text{ где } \lambda = вт/(м^2 \cdot град). \quad (14)$$

Из (14) имеем, что для выполнения условия (13) необходимо, чтобы теплопроводность исследуемой нагретой зоны была бы меньше единицы.

Таким образом, выполненное теоретическое исследование показало, что метод многих точек позволяет с наименьшей ошибкой определять в условиях естественной конвекции значения, λ не превышающие единицы. При экспериментальном определении λ больше единицы (Bi < 3) метод приводит в условиях естественной конвекции к большим ошибкам.

Выводы

1. Аналитические исследования точности метода многих точек показали, что этот метод можно эффективно использовать для экспериментального определения эффективной теплопроводности РЭА при значениях $\lambda \leq 1$ вт /м ·град.

2. Получение минимума ошибки определения λ по методу "многих точек" возможно при значениях критерия Био, близких к 3, т.е. установлено существование оптимальных условий определения экспериментов.

Список литературы

1. Дальнев Г.Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры / Г.Н. Дальнев, Н.Н. Тарнавский. – Л.: Энергия, 1971. – 287 с.

2. Лыков А.В. Теория теплопроводности / Л.В. Дыков. – М. : Госэнергоиздат. 1952. – 392 с.

3. Майко И.М. Экспериментальное определение эффективной теплопроводности нагретых зон РЭА / И.М. Майко, А.М. Синотин // Вопросы радиоэлектроники. – ТРТО, 1972. – № 2. – С. 23-25.

4. Майко И.М. О теплофизическом конструировании одноблочных радиоэлектронных аппаратов с заданным тепловым режимом / И.М. Майко, А.М. Синотин, Ю.М. Детинов // Вопросы радиоэлектроники. – ТРТО, 1974. – № 1. – С. 14-18..

Поступила в редколлегию 2.02.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Тимофеев, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ МЕТОДІВ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ НАГРІТИХ ЗОН РЕА

А.М. Сінотін

Проведені аналітичні дослідження точності методу "багатьох точок" який використовується для експериментального визначення ефективної теплопровідності нагрітих зон РЕА і встановлено існування оптимальних умов проведення експериментів.

Ключові слова: *ефективна теплопровідність, нагріта зона, анізотропія.*

ANALYTICAL RESEARCHES OF EXACTNESS OF THE METHODS OF REGULAR THERMAL MODE, USED FOR EXPERIMENTAL DETERMINATION OF EFFECTIVE HEAT CONDUCTIVITY OF THE HEATED AREAS REA

A.M. Sinotin

Analytical researches of exactness of method of "many points" of used are conducted for experimental determination of effective heat conductivity of the heated areas REA and existence of optimum terms of conducting of experiments is set.

Keywords: *effective heat conductivity, heated area, anisotropy.*