УДК. 658.51.011.56

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ НАГРІТИХ ЗОН РЕА

Д.т.н. А. М. Сінотін[1], к.т.н. О. М. Замірець[2], к.т.н. Р. Ю. Аллахверанов[1]
1. Харківський національний університет радіоелектроніки
2. Державне підприємство Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування, м.Харків

У роботі запропонований метод багатьох точок для розрахунку температурних радіоелектронних апаратів, проведено дослідження для експериментального визначення ефективної теплопровідності РЕА.

В работе предложен метод многих точек для расчета температурных радиоэлектронных аппаратов, проведено исследование для экспериментального определения эффективной теплопроводности РЭА.

The paper offers a method of many points for the calculation of temperature-sensitive radio-electronic devices, and researches for the experimental determination of the effective thermal conductivity of RED.

Ключові слова: *радіоелектронні апарати, тепловий режим, експеримент*

Вступ

Для розрахунку температурних радіоелектронних апаратів (РЕА) на стадії проектування потрібні знання ефективної теплопровідності нагрітих зон, значення яких відсутні в літературі. Для встановлення значень необхідні експериментальні дослідження, які базуються на стаціонарних і нестаціонарних теплових режимах. Методи стаціонарного теплового режиму потребують створення складних і дорогих установок. Тривалість експерименту порівняно велика. Усі стаціонарні методи потребують виготовлення спеціальних зразків із матеріалу об'єкту досліджень.

На відміну від методу стаціонарного теплового потоку, нестаціонарні методи, які базуються на теорії регулярного теплового режиму, дозволяють збільшити швидкість експерименту і проводити експеримент на реальних натуральних об'єктах без застосування спеціальних зразків.

Задачі експериментальних досліджень

Особливістю теплопровідних властивостей нагрітих зон РЕА в загальному випадку є їх анізотропія, тобто різниця коефіцієнтів теплопровідностей уздовж різних вісей координат (x, y, z) $\lambda_x, \neq \lambda_y \neq \lambda_z$. Анізотропія нагрітих зон РЕА витікає із особливостей їх конструкції і конструкції окремих елементів монтажу, як багато тіл з різноманітних матеріалів і наповнювачів.

Тому перша задача експериментального дослідження – встановлення характеру анізотропії нагрітих зон РЕА, монтажні плати яких виготовлені з різних матеріалів – від металів до пластичних мас ($\lambda = 380 - 0{,}3\ вт/м \cdot град$).

Нагріті зони РЕА будуються з великої кількості елементів, виконаних із металічних і діелектричних матеріалів. Їх відсотковий вміст в об'ємі апарату і на платах може змінюватися в широкому діапазоні.

Друга задача дослідження – встановлення впливу відсоткового вмісту різних елементів на загальну теплопровідність нагрітої зони.

Третя задача дослідження – встановити межі зміни ефективної теплопровідності типових конструкцій нагрітих зон РЕА і на цій основі спростити існуючі розрахункові методи визначення λ.

При цьому, виходячи з основних особливостей сучасних РЕА, припустимо, що максимальний розмір одиничного елементу ($\lambda_{\max}$) монтажу набагато менший, ніж найбільший лінійний розмір (L_{max}) нагрітої зони, тобто $\lambda_{\max} << L_{\max}$.

Щільність розміщення елементів на платах така, що $\frac{\lambda_{\max}}{\Delta_{i\ cp}} \geq 1$, де $\Delta_{i\ cp}$ - середня відстань між елементами на платі. Щільність розміщення самих плат така, що $L_{\max} / \Delta_{2i} \geq 1$, де Δ_{2i} - відстань між 2i платами.

У результаті аналізу різних методів досліджень [1-3] у якості основного методу для РЕА було прийнято метод регулярного режиму, відомий під назвою «метод багатьох точок». Однак наведені нижче аналітичні дослідження показали обмеженість цього методу малими теплопровідностями ($\lambda < 1$), тому був розроблений і досліджений метод, коли дві теплопровідності (наприклад, $\lambda_x \approx \lambda_y >> \lambda_z$) мають набагато більше теплопровідності в третьому напрямку.

Для контролю за порядком отримуваних експериментальних λ методом багатьох точок доцільно використовувати методи, які базуються на іншому принципі, наприклад, принципі стаціонарного режиму, відомого під назвою «метод платини». Крім того, даний метод також можна використовувати для контролю методу багатьох точок.

Відсутність у літературі достатнього аналізу точності методів регулярного режиму і оптимальних умов проведення експерименту викликало необхідність аналітичного дослідження цих методів експериментального визначення ефективної теплопровідності анізотропійних тіл.

Метод багатьох точок розроблений для визначення теплопровідності анізотропних тіл основних форм (циліндру або паралелепіпеда). При цьому автори методу не дали рекомендацій про оптимальні умови проведення експерименту і якими величинами λ він обмежений у більшу чи в меншу сторону.

Для відповіді на ці питання нижче наведено дослідження точності методу багатьох точок у залежності від точності визначення параметрів, які входять у розрахункові залежності на прикладі тіла в формі паралелепіпеда.

Основні розрахункові залежності методу багатьох точок для тіл у форму паралелепіпеда мають вигляд:

$$e^{-\rho_x} = \frac{\vartheta_x}{\vartheta_0}\cos P_x;$$

$$e^{-\rho_y} = \frac{\vartheta_y}{\vartheta_0}\cos P_y;$$

$$e^{-\rho_z} = \frac{\vartheta_z}{\vartheta_0}\cos P_z; \qquad (1)$$

$$P_x \cdot tq \cdot P_x = \frac{\alpha_x \cdot L_x}{\lambda_x} = B_{ix};$$

$$P_y \cdot tq \cdot P_x = \frac{\alpha_y \cdot L_y}{\lambda_y} = B_{iy};$$

$$P_z \cdot tq \cdot P_z = \frac{\alpha_z \cdot L_z}{\lambda_z} = B_{iz}; \qquad (2)$$

де $\vartheta_{x,y,z}$ – надлишкова температура в центрі поверхонь відповідних граней $\vartheta = t - t_{среды.}$;

$P_{x,y,z}$ – безрозмірні параметри, які визначаються за даними експерименту через $\rho_{x,y,z}$; $\rho_{x,y,z} = \lambda n\,\vartheta_0 - \lambda n\,\vartheta_{x,y,z}$; $Bi_{x,y,z}$ – Критерій B_{i0} на відповідній грані.

Таким чином, побудувавши в напівлогарифмічній шкалі експериментальні дані охолодження блоку в центрі $\vartheta_0(\tau)$ і на поверхні $\vartheta_{x,y,z}(\tau)$, отримаємо безпосередньо з (2) значення $\rho_{x,y,z}$.

Розрахункові залежності для λ можуть бути отримані з (1) і (2):

$$\lambda_{x,y,z} = \frac{\alpha_{x,y\ z} \cdot L_{x,y,z}}{P_{x,y,z} \cdot tq\,P_{x,y,z}}.$$

Так як із (1) маємо:

$$P_x = arc\cos\frac{\vartheta_x}{\vartheta_0};\ \sin P_x = \sqrt{1-\left(\frac{\vartheta_x}{\vartheta_0}\right)^2};$$

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

тоді

$$\lambda_x = \frac{\alpha_x \cdot L_x}{arc\cos\frac{\vartheta_x}{\vartheta_0}\cdot\sqrt{1-\left(\frac{\vartheta_x}{\vartheta_0}\right)^2}}\cdot\frac{\vartheta_x}{\vartheta_0} \qquad (3)$$

Аналогічні вирази отримаємо для $\lambda_{y,z}$.

Позначимо $\vartheta_x/\vartheta_0 = \Theta$, тоді з (3) отримаємо, опустивши індекс «х»:

$$\lambda = \frac{\alpha \cdot L \cdot \theta}{arc \cdot \cos\theta \cdot \sqrt{1-\theta^2}}. \qquad (4)$$

Точність визначення λ згідно (4) залежить від точності визначення коефіцієнту тепловіддачі до середовища α, лінійного розміру тіла L і точності визначення відношень температур ϑ_x/ϑ_0, яке визначається точністю їх вимірювання в процесі дослідження.

Для отримання кількісної залежності відносної помилки визначення ефективної теплопровідності $\partial\lambda = \Delta\lambda/\lambda$ від відносних помилок параметрів $\partial\alpha = \Delta\alpha/\alpha$; $\partial L = \Delta L/L$; $\partial\vartheta = \Delta\vartheta/\vartheta_0$ використаємо метод повного диференціалу. Для цього прологарифмуємо вираз (4) і візьмемо повний диференціал від лівої і правої частини, замінивши в ньому диференціали змінних величин на їх кінцеві прирости ($d\alpha \approx \Delta\alpha$; $dL \approx \Delta L$; $d\vartheta \approx \Delta\vartheta$).

З (4) маємо:

$$\lambda n\,\lambda = \lambda n\,\alpha + \lambda n\,L + \lambda n\,\theta - \lambda n\sqrt{1-\theta^2} - \lambda n\,arc\cos\theta) \qquad (5)$$

Диференціюємо ліву і праву частини виразу (5).

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{d\alpha}{\alpha} + \frac{dL}{L} + \frac{d\theta}{\theta} + \frac{\theta}{1-\theta^2}d\theta + \frac{1}{\sqrt{1-\theta^2}\ \arccos\theta}d\theta \cdot \qquad (6)$$

Перейдемо в (6) від диференціалу до малих кінцевих приростів і згрупуємо члени з $\Delta\Theta$:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\Delta L}{L} + \left(1 + \frac{\theta^2}{1-\theta^2} + \frac{\theta}{\sqrt{1-\theta^2}\cdot arc\cos\theta}\right)\cdot\frac{\Delta\theta}{\theta}$$

або після перетворень у дужках:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\Delta L}{L} + \left[\frac{1}{1-\theta^2} + \frac{1}{\alpha L}\left(\frac{\theta\cdot\alpha\cdot L}{\sqrt{1-\theta^2}\cdot arc\cos\theta}\right)\right]\cdot\frac{\Delta\theta}{\theta} \qquad (7)$$

згідно (4) і (2) вираз, який знаходиться в круглих дужках, є λ, а відношення $\lambda/\alpha L = 1/Bi$. Крім того, із (1) слідує, що 1 - $\Theta^2 = \sin^2 P$, тоді

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

Знайдемо вираз для $\Delta\theta$.

$$\Delta\theta = \Delta\left(\frac{\vartheta_x}{\vartheta_0}\right) = \left|\frac{\Delta\theta_x}{\theta_0}\right| + \left|\frac{\Delta\vartheta_0}{\vartheta_0^2} \cdot \vartheta_x\right|. \qquad (9)$$

Після підстановки (9) в (8) отримаємо:

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

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

Величини $\Delta\vartheta_ч$ і $\Delta\vartheta_0$ представляють собою практично помилки вимірювання температури в центрі і на поверхні тіла. Зазвичай їх вимірювання проводяться за допомогою датчиків одного типу з реєструванням одним і тим же пристроєм.

Тому потрібно рахувати $\Delta\vartheta_x = \Delta\vartheta_0 = \Delta\vartheta$, тоді з (10)

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

або так як з (10) $\frac{\vartheta_x}{\vartheta_0} = \cos P$, отримаємо:

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

Перейдемо до позначень відносних помилок, тоді остаточно запишемо:

$$\delta\lambda = \delta\alpha + \delta L + N_\vartheta . \cdot \delta\vartheta \qquad (12)$$

де $N_\vartheta = \left(\frac{1}{\sin^2 P} + \frac{1}{Bi}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos P}\right) = N_\vartheta (Bi)$

– в силу того, що, і *sinP* і *cosP*, згідно (2) залежать тільки від критерію *Bi*.

З виразу (12) слідує, що помилка експериментального λ залежить від значення критерію $B_i = \alpha \cdot L/\lambda$, при якому проводиться експеримент. Ця залежність визначається функцією N_ϑ. Помилка $\delta\lambda$ буде мати найменше значення, при заданій точності визначення коефіцієнту тепловіддачі $(\delta\alpha)$, лінійного розміру (δL) і температури в центрі тіла $(\delta\vartheta)$, тоді N_ϑ прийме найменше значення. Отже, для отримання λ з найменшою помилкою необхідно проводити експерименти в умовах $Bi \approx 3$.

Таким чином, виконане теоретичне дослідження показало, що метод багатьох точок дозволяє з найменшою помилкою визначати в умовах природної конвекції значення λ, які не перевищують одиницю. При експериментальному визначенні λ більше одиниці ($B_i < 3$) метод призводить в умовах природньої конвекції до великих помилок.

Висновки

Аналітичні дослідження точності методу багатьох точок показали, що цей метод можна ефективно використовувати для експериментального визначення ефективної теплопровідності РЕА при значеннях λ ≤ 1 вт/м град.

Отримання мінімуму помилки визначення λ методом "багатьох точок" можливо при значеннях критерію B_{i0} близьких до 3, тобто встановлено існування оптимальних умов визначення експериментів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. *Синотин А. М. Метод определения коэффициента формы аппарата сложной конфигурации / А. М. Синотин // Радиоэлектроника и информатика. – 2004. – № 3. – С. 20 – .*
2. *Николаєнко Ю.Е. Схемные решения организации теплоотвода от функциональных модулей ЭВМ с помощью двухфазных теплопередающих элементов и устройств // Управляющие системы и машины. – 2005. – № 2. – С. 29 – 37.*
3. *Кравец В. Ю., Конышин В. И., Пархоменко Г. А. Система водяного охлаждения мощного процессора ПЭВМ // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005 с. 42 – 44.*