

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В СЛОЖНЫХ МИКРОМОДУЛЯХ,
ГЕРМЕТИЗИРУЕМЫХ КОМПАУНДОМ**

Запропоновано новий підхід до фізико-математичного моделювання розподілення теплових полів в вузлах радіоапаратури на основі введення «ефективних параметрів» системи. Роботоздатність моделей та комп'ютерної реалізації показано на прикладі стандартного мікромодуля, герметизованого компаундом.

При разработке технологии монтажа и условий эксплуатации современных герметизированных электронных систем необходимо учитывать влияние на прочность как физико-механических, так и температурных факторов.

В работе [1] получены и исследованы физико-математические модели для расчета радиальных и тангенциальных напряжений в материале резистора

$$\sigma_{r_1} = \frac{PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{R_1^2}{r^2} - 1 \right), \quad (1)$$

$$\sigma_{t_1} = -\frac{PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{R_1^2}{r^2} + 1 \right). \quad (2)$$

в материале компаунда

$$\sigma_{r_2} = -\frac{PR_2^2}{R_3^2 - R_2^2} \left(\frac{R_3^2}{R^2} - 1 \right), \quad (3)$$

$$\sigma_{t_2} = -\frac{PR_2^2}{R_3^2 - R_2^2} \left(\frac{R_3^2}{R^2} + 1 \right), \quad (4)$$

где P - остаточное давление, возникающее на границе компаунд-электронный элемент:

$$P = \frac{[(1 + \mu_1)\alpha_1 - (1 + \mu_2)\alpha_2]\Delta T + \mu_2\varepsilon_{z_2} - \mu_1\varepsilon_{z_1}}{\frac{(1 + \mu_1)[R_2^2(1 - 2\mu_1) + R_1^2]}{E_1(R_2^2 - R_1^2)} + \frac{(1 + \mu_2)[R_2^2(1 - 2\mu_2) + R_3^2]}{E_2(R_3^2 - R_2^2)}} = k\Delta T + b, \quad (5)$$

k и b - соответствующие константы.

В работе [2] предложен один из вариантов моделирования тепловых полей для отдельного электронного элемента в узлах РЭА, содержащих стеклоспаи.

В настоящей работе предлагается подход к физико-математическому моделированию распределения температурных полей в микромодуле в целом на основе введения «эффективных параметров», учитывающих неоднородности компаунда за счет электронных элементов, и численных методов расчета распределения температуры. На их основе оценены напряжения и остаточные давления для одной системы, распространенной на практике.

Из формулы (5) видно, что P линейно зависит от изменения температуры ΔT , т.е. от распределения T по объёму компаунда во времени. Зависимость эта тем существенней, чем больше k . Его значения оцениваются для конкретных компаундов и электронных компонентов, а вклад b , как правило, не превышает 6% [1].

Задача моделювання теплових полів решалась в два етапи. На першому розраховувалося розподілення температурного поля в мікромодулі в вигляді рішення нестационарних задач теплопровідності [3].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\chi} \frac{\partial T}{\partial t} + A(x, y, z), \quad (6)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad T|_S = \varphi(t); \quad (7) \quad T|_{t=0} = T_0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_S = 0, \quad (8)$$

де $\chi = \frac{K}{\rho c}$, K - коефіцієнт теплопровідності (Вт/(м·град)), C - удельна теплоємність (Вт·час/кг·град), ρ - удельна щільність (кг/м³), $T = T(x, y, z, t)$ - температура твердого ізотропного тіла, t - час, S - поверхня, обмежуюча тіло, n - нормаль до поверхні, $A(x, y, z)$ - тепловий джерело.

Фізико-механічні властивості мікромодуля задавалися в вигляді ефективних параметрів: $V = \sum_{i=1}^n V_i$; $\chi = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \chi_i$; $\alpha_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$; $i=1$ (К- компаунд), 2, ... , n (різні електронні компоненти) - для імітації «усередненого» температурного фону по об'єму мікромодуля.

Затем в різних місцях мікромодуля імітувався електронний елемент в вигляді полого циліндра з радіальним розподіленням температур [3] і початковими умовами $T|_{t=0} = T_0$, $T|_{R=R_2} = \psi(t)$, $\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{R=R_1} = 0$, де $\psi(t)$ - чисельне значення температури для відповідних координат зовнішньої поверхні електронного елемента в момент часу t .

Різноманітність практичних задач не дозволяє широко використовувати для подібної задачі відомі аналітичні методи рішення задач (6)-(8). Тут використовувалися чисельні методи рішення цих задач на ПЕВМ. Можливості цих методів і висока наочність комп'ютерного інтерфейсу дозволяють значно розширити коло подібних задач, обмежити час їх дослідження і вибір оптимальних рішень.

Комп'ютерна реалізація виконана в середі MATHCAD 7 з використанням підпрограм erf, а також ELCUT. Чисельне моделювання і дослідження задач проводилося в широких інтервалах температур для заполімеризованного бруска в формі прямокутного паралелепіпеда, яким можна представити мікромодуль.

В якості прикладу наведені характерні результати моделювання для компаундного изделия з одним типом електронного елемента задачі (6)-(7) з нульовим джерелом тепла, $\varphi(t) = T_1$ з наступними початковими даними: марка компаунда ЭЗК-25, розміри изделия (мм) 22×16×8, частковий об'єм компаунда $V_K = 2816 \text{ мм}^3$ і електронного елемента $V_Э = 510 \text{ мм}^3$, $T_1 = -60 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_0 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, $K_K = 0,41 \text{ Вт/(м·град)}$, $K_Э = 0,837 \text{ Вт/(м·град)}$, C_K

$= 0,419$ Вт·час/кг·град, $c_3 = 0,253$ Вт·час/кг·град, $\rho_K = 1600$ кг/м³, $\rho_3 = 1400$ кг/м³, $k = 0,2037$ Н/(мм²· град), коэффициент Пуассона $\mu_K = 0,3$, $\mu_3 = 0,292$, коэффициент линейного расширения $\alpha_K = 46 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, $\alpha_3 = 6 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, модуль упругости $E_K = 1,21 \cdot 10^{10}$ Н/м², $E_3 = 13,1 \cdot 10^{10}$ Н/м², время $t = 1$ с (рис.1,2(а)) и $t = 1500$ с (рис.1,2(б)).

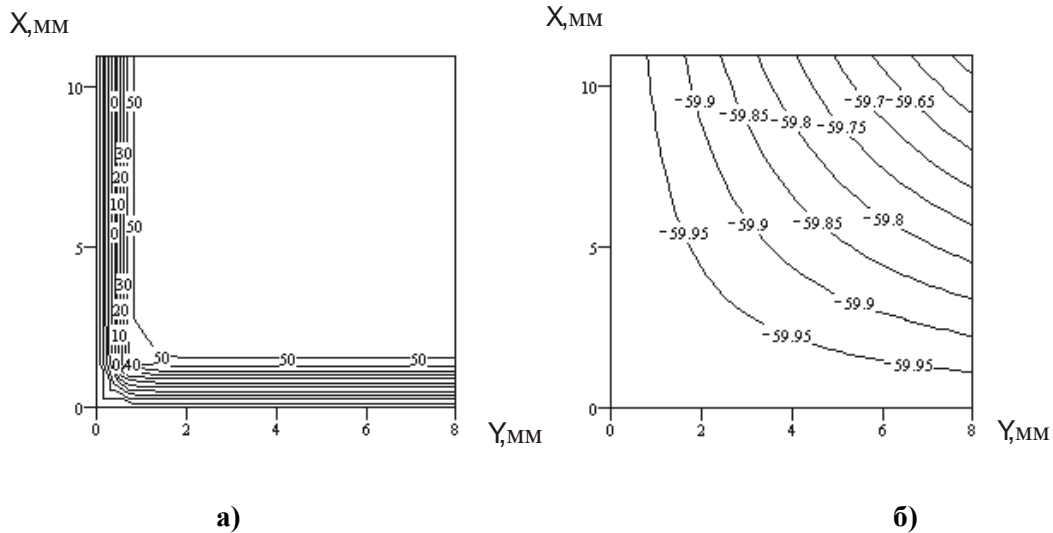


Рис. 1. Распределение температур в 1/4 сечения компаунда при $t=1$ с (а) и при $t=1500$ с (б)

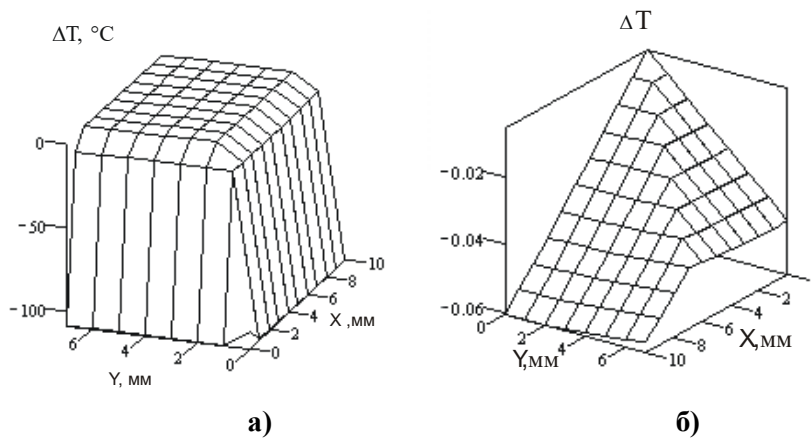


Рис. 2. Распределение разности температур ΔT , возникающих в смежных точках 1/4 сечения компаунда при $t=1$ с(а) и при $t=2000$ с(б)

Из произведенных расчетов при $t=1$ с напряжения в резисторе $\max \sigma_{t_1} = -86,36$ Н/мм², напряжения в компаунде $\max \sigma_{t_2} = 43,03$ Н/мм² и при $t=1500$ с $\sigma_{t_2} \approx 0$, $\sigma_{t_1} \approx 0$.

ΔT были определены из решения соответствующих задач и отвечающие характерным разностям $R_2 - R_1 \approx 0,5$ мм электронных компонентов и временам выхода решения T на стационар (рис. 3). Приведенные значения $\max \sigma_{t_2}$ и $\max \sigma_{t_1}$ существенно отличаются от используемых ранее оценок

$\sigma_{t_1} = -123,8 \text{ Н/мм}^2$ и $\sigma_{t_2} = 61,47 \text{ Н/мм}^2$ [1] и указывают пути возможного варьирования толщиной компаунда.

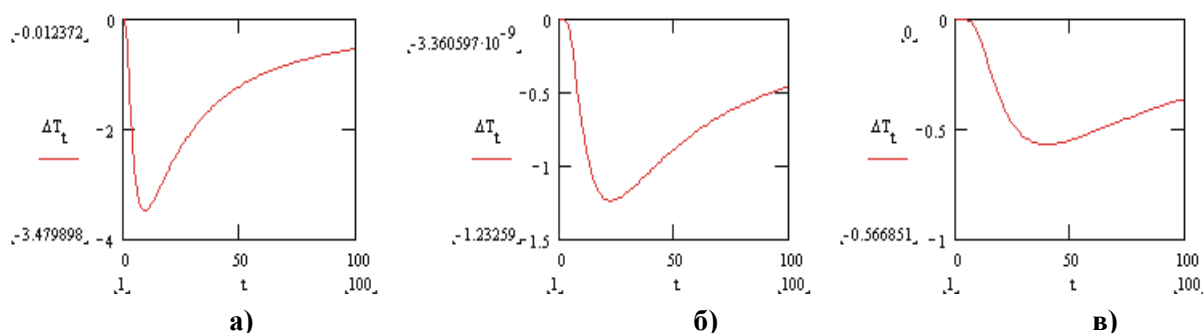


Рис. 3. Временная зависимость разности температур ΔT_t , возникающих в смежных точках 1/4 сечения компаунда на расстоянии от боковой грани компаунда $x=1\text{мм}$ (а), $x=2\text{мм}$ (б), $x=5\text{мм}$ (в).

Кроме того, проведённые модельные эксперименты позволяют говорить о возможной оптимизации формы и неравномерности толщины слоёв компаундного покрытия в зависимости от места расположения “ответственных” электронных элементов, времени прохождения “температурных ударов”, возможных допустимых значений σ_t , а также времени установления температуры (выхода решения T на стационар) - технологическое время застывания компаунда и др.

Для более “тонкой” оценки распределения температурного поля по объёму компаунда и электронных элементов решаются задачи (6)-(8) в общих постановках, моделируются различные формы изделий. Результаты будут приведены в последующих публикациях.

Литература:

1. Ройзман В., Григоренко С. Міцність пасивних електронних компонентів, герметизованих компаундом, при термоударах // Вісник ДУ «Львівська політехніка», «Радіоелектроніка та телекомунікації» - 2000. - №387. - с.265-270.
2. Шайко-Шайковский А.Г. Моделирование тепловых полей в узлах и деталях РЭА, содержащих стеклоспай // Цифровые модели в проектировании и производстве РЭС: Межвуз. сб. науч. тр. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. - Вып.- С.231-240.
3. Карлсруоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. - М.: Наука, 1964.-488 с.

Надійшла 7.11.2000 р.