

## ТЕПЛОФІЗИЧНИЙ АНАЛІЗ ГЕРМЕТИЧНОГО БЛОКА З ТЕПЛОПРОВІДНИМИ ДРУКОВАНИМИ ПЛАТАМИ

© Мелех Георгій, Бондарук Артур, 2004

**Наведено результати теплофізичного розрахунку та виготовлення п'ятикомірковог герметичного блока з теплопровідними друкованими платами.**

**The results of thermophysical design and manufacture of a five-cell hermetic unit with a heat-conducting printed board are presented.**

Однією з важливих проблем надійності радіоелектронної апаратури (РЕА) в процесі її експлуатації є забезпечення нормальних теплових режимів елементної бази. Причина цього криється в різних фізичних та хімічних процесах, які за підвищення температури або розвиваються лавиноподібно, або призводять до посиленого старіння матеріалів. Зі збільшенням температури всередині блоків на 10 °С інтенсивність відмов в середньому збільшується на 25 % [1]. У [2] показано, що ефективним методом температурного розвантаження елементної бази з одночасним зменшенням маси та габаритів блоків є використання теплопровідних друкованих плат. Існують математичні моделі різного рівня складності [3–5], за допомогою яких з'являється можливість прогнозування теплових навантажень блоків різного конструктивного виконання, в тому числі герметичних, де як комутаційні комірки використовуються звичайні дво- або багатошарові плати. При виготовленні герметичних блоків, в яких застосовуються теплопровідні друковані плати, істотно зменшується температурний градієнт по площині плати і відповідно поліпшуються теплові режими елементної бази. Але через те, що до останнього часу використання теплопровідних друкованих плат з різних причин було досить обмежене, аналіз ефективності їх використання практично не проводився. Метою роботи є порівняльний аналіз теплових режимів елементної бази герметичного блока із звичайними багатошаровими та теплопровідними платами.

Аналіз проводився для таких вихідних даних:

– робоча температура довкілля	+55 °С;
– атмосферний тиск	780 мм. рт. ст.;
– охолодження блока	природне, повітряне;
– габарити комірки	170 x 200 мм;
– розсіювані (теплові) потужності комірок	10 Вт;
– розсіювані (теплові) потужності мікросхем	0,05 ÷ 0,35 Вт;
– допустима робоча температура елементної бази	+85 °С;
– час неперервної роботи	8 год.

Конструктивні дані (компонування комірок в блоці та мікросхемі на комірках, розміри, матеріали і покриття конструктивних елементів блока і комірок) прийняті згідно з комплектом конструкторської документації (КД).

Розрахунок стаціонарного теплового режиму проводився в такій послідовності. На основі компонентування блока і комірок визначалась фізична модель розміщення основних елементів та вузлів конструкції, на підставі фізичної моделі складалась теплова модель-система тіл (елементів теплової моделі) з ізотермічними поверхнями та джерелами тепла, між якими здійснюється теплообмін. На базі теплової моделі складалась математична модель-система нелінійних алгебраїчних рівнянь теплового балансу для всіх елементів теплової моделі виду [3]:

$$\sigma_{ic}(t_i - t_c) + \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}(t_i - t_j) = P_i \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

де  $t_i, t_c$  – температури  $i$ -го елемента теплової моделі і довкілля, °C;  $\sigma_{ij}, \sigma_{ic}$  – теплові провідності між  $i$ -им та  $j$ -им елементами,  $i$ -м елементом і довкіллям при теплообміні конвекцією, випромінюванням і теплопровідністю, Вт/°C;  $P_i$  – розсіювана потужність  $i$ -го елемента, Вт;  $n$  – кількість елементів теплової моделі.

Теплова модель показана на рис. 1.

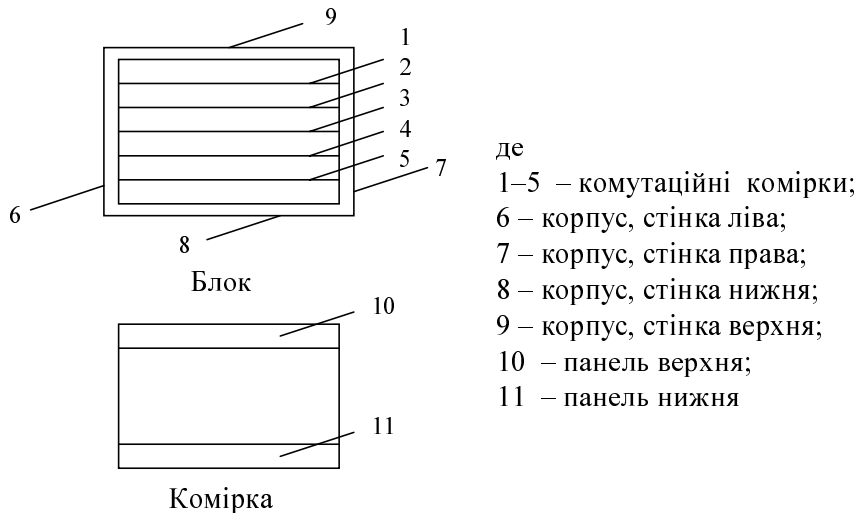


Рис. 1. Теплова модель блока

Теплові провідності розраховуються за формулами [3]

$$\sigma_{ij}^{KB} = \sigma_{ic}^K + \sigma_{ic}^B, \quad (2)$$

$$\sigma_{ij}^{nB} = \sigma_{ij}^n + \sigma_{ij}^B, \quad (3)$$

$$\sigma^K = \alpha^K F^K, \quad (4)$$

$$\sigma^B = \alpha^B F^B, \quad (5)$$

$$\sigma^n = \alpha^n F^n, \quad (6)$$

$$\sigma_{ij}^T = \frac{1}{R_{ij}^T}, \quad (7)$$

де  $\sigma_{ic}^{KB}$  – теплова провідність за рахунок вільної конвекції в необмеженому просторі;  $\sigma_{ij}^n$  – теплова провідність природної конвекції у повітряних прошарках;  $\sigma_{ic}^b, \sigma_{ij}^b$  – випромінювання;  $\sigma_{ij}^T$  – теплопровідність, Вт/град;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup>·град;  $F$  – площа теплопровідності, м<sup>2</sup>;  $R_{ij}^T$  – тепловий опір, град/Вт.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням розраховується за формулами

$$\alpha_{ij}^b = \varepsilon_{nij} \varphi_{ij} f(t_i \cdot t_j), \quad (8)$$

$$f(t_i, t_j) = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(t_i + 273,2)^4 - (t_j + 273,2)^4}{t_i - t_j}; \quad (9)$$

$$\varepsilon_{nij} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_j} - 1}, \quad (10)$$

де  $\varepsilon$  – ступінь чорноти;  $\varphi$  – коефіцієнт опромінювання.

Коефіцієнти конвективної тепловіддачі пластини за рахунок вільної конвекції в необмеженому просторі розраховується за формулами [4]

$$\alpha_{ic}^K = \frac{Nu_L \cdot \lambda}{L}, \quad (11)$$

$$Nu_L = C (Gr \cdot Pr)_L^n, \quad (12)$$

де  $Nu_L$  – критерій Нусельта;  $Pr$  – критерій Прандтля;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/м·град.;  $L$  – вертикальний розмір пластини, м;  $C, n$  – емпіричні коефіцієнти.

Коефіцієнти конвективної тепловіддачі у повітряних прошарках між комутаційними платами розраховуються за формулами [5]

$$\alpha_{ij}^n = \frac{Nu_\delta \cdot \lambda}{\delta}, \quad (13)$$

$$Nu_\delta = 0,18 (Gr \cdot Pr)^{0,25}, \quad (14)$$

де  $\delta$  – товщина повітряного прошарку, м.

Теплові опори при кондуктивній теплопередачі розраховуються за формулою

$$R^T = \frac{l}{\lambda^T \cdot F^T}, \quad (15)$$

де  $l$  – довжина провідника тепла, м;  $\lambda^T$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу провідника тепла, Вт/м·град;  $F^T$  – площа поперечного січення провідника тепла, м<sup>2</sup>.

Система рівнянь для п'ятикоміркового блока має такий вигляд:

$$\begin{aligned} 1 \quad & \sigma_{1-2}^{Bn} (t_1 - t_2) + \sigma_{1-6}^T (t_1 - t_6) + \sigma_{1-7}^T (t_1 - t_7) + \sigma_{1-8}^{Bn} (t_1 - t_8) = 10, \\ 2 \quad & \sigma_{2-1}^{Bn} (t_2 - t_1) + \sigma_{2-3}^{Bn} (t_2 - t_3) + \sigma_{2-6}^T (t_2 - t_6) + \sigma_{2-7}^T (t_2 - t_7) = 10, \\ 3 \quad & \sigma_{5-4}^{Bn} (t_5 - t_4) + \sigma_{5-6}^T (t_5 - t_6) + \sigma_{5-7}^T (t_5 - t_7) + \sigma_{5-9}^{Bn} (t_5 - t_9) = 10, \\ 4 \quad & \sigma_{4-3}^{Bn} (t_4 - t_3) + \sigma_{4-5}^{Bn} (t_4 - t_5) + \sigma_{4-6}^T (t_4 - t_6) + \sigma_{4-7}^T (t_4 - t_7) = 10, \\ 5 \quad & \sigma_{5-4}^{Bn} (t_5 - t_4) + \sigma_{5-6}^T (t_5 - t_6) + \sigma_{5-7}^T (t_5 - t_7) + \sigma_{5-9}^{Bn} (t_5 - t_9) = 10, \\ 6 \quad & \sigma_{6-1}^T (t_6 - t_1) + \sigma_{6-2}^T (t_6 - t_2) + \sigma_{6-3}^T (t_6 - t_3) + \sigma_{6-4}^T (t_6 - t_4) + \sigma_{6-5}^T (t_6 - t_5) + \\ & \sigma_{6-8}^T (t_6 - t_8) + \sigma_{6-9}^T (t_6 - t_9) + \sigma_{6-10}^T (t_6 - t_{10}) + \sigma_{6-11}^T (t_6 - t_{11}) + \sigma_{6-c}^{BK} (t_6 - t_c) = 0, \\ 7 \quad & \sigma_{7-1}^T (t_7 - t_1) + \sigma_{7-2}^T (t_7 - t_2) + \sigma_{7-3}^T (t_7 - t_3) + \sigma_{7-4}^T (t_7 - t_4) + \sigma_{7-5}^T (t_7 - t_5) + \\ & \sigma_{7-8}^T (t_7 - t_8) + \sigma_{7-9}^T (t_7 - t_9) + \sigma_{7-10}^T (t_7 - t_{10}) + \sigma_{7-11}^T (t_7 - t_{11}) + \sigma_{7-c}^{BK} (t_7 - t_c) = 0, \\ 8 \quad & \sigma_{8-1}^{Bn} (t_8 - t_1) + \sigma_{8-6}^T (t_8 - t_6) + \sigma_{8-7}^T (t_8 - t_7) + \sigma_{8-10}^T (t_8 - t_{10}) + \sigma_{8-11}^T (t_8 - t_{11}) + \\ & \sigma_{8-c}^{BK} (t_8 - t_c) = 0, \\ 9 \quad & \sigma_{9-5}^{Bn} (t_9 - t_5) + \sigma_{9-6}^T (t_9 - t_6) + \sigma_{9-7}^T (t_9 - t_7) + \sigma_{9-10}^T (t_9 - t_{10}) + \sigma_{9-11}^T (t_9 - t_{11}) + \\ & \sigma_{9-c}^{BK} (t_9 - t_c) = 0, \\ 10 \quad & \sigma_{11-6}^T (t_{11} - t_6) + \sigma_{11-7}^T (t_{11} - t_7) + \sigma_{11-8}^T (t_{11} - t_8) + \sigma_{11-9}^T (t_{11} - t_9) + \sigma_{11-c}^{BK} (t_{11} - t_c) = 0, \\ 11 \quad & \sigma_{10-6}^{Bn} (t_{10} - t_6) + \sigma_{10-7}^T (t_{10} - t_7) + \sigma_{10-8}^T (t_{10} - t_8) + \sigma_{10-9}^T (t_{10} - t_9) + \sigma_{10-c}^{BK} (t_{10} - t_c) = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Розв'язок системи рівнянь проводився чисельним методом за допомогою спеціально розробленої програми. Результати розрахунків наведені у таблиці на рис. 2.

1 – звичайна багатошарова плата завтовшки 3 мм,  $\lambda = 2$ ;

2 – багатошарова плата з металевою основою з алюмінієвого сплаву АМЦН,  $\lambda = 155$ ;

3 – багатошарова плата з основою з алюмінієвого сплаву АДІН,  $\lambda = 218$ ;

4 – багатошарова плата з основою з міді М1,  $\lambda = 385$ .

Товщина металевої основи – 2 мм.

### Результати розрахунків

Елемент теплової моделі		Розрахункова температура, °С			
		1	2	3	4
1	Комірка 1	131,34	71,47	70,71	69,82
2	Комірка 2	168,80	72,94	71,89	70,70
3	Комірка 3	179,96	73,13	72,03	70,79
4	Комірка 4	170,82	72,98	71,92	70,72
5	Комірка 5	136,27	71,75	70,93	69,99
6	Корпус стінка ліва	62,93	65,38	65,40	65,43
7	<b>Корпус стінка права</b>	62,92	65,38	65,40	65,43
8	Корпус стінка задня	64,71	63,26	63,24	63,22
9	Корпус стінка передня	64,79	62,93	62,91	62,89
10	Панель верхня	61,66	61,63	61,63	61,63
11	Панель нижня	61,94	62,12	62,12	62,12

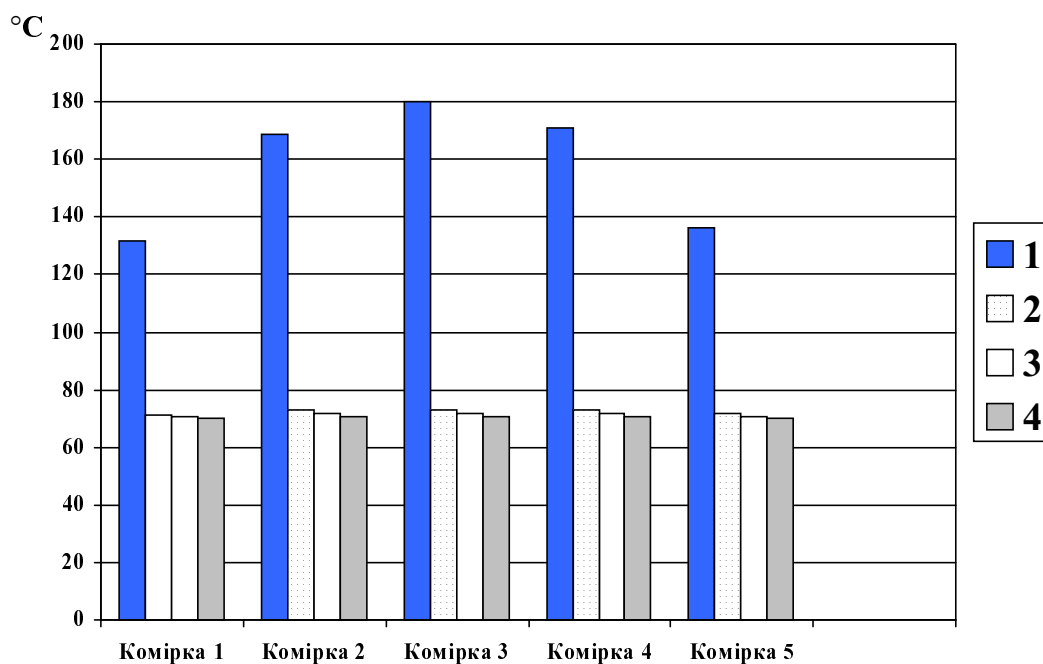


Рис. 2. Результати розрахунків теплових режимів комірок 1–5

### Висновки

Аналіз отриманих розрахунків і заміри теплових режимів на реальних виробках показують:

1. За відсутності кондуктивного тепловідведення від комірок до корпусу блока (звичайні багатошарові плати) середня температура комірок збільшується на 60–107 °С.

2. За відсутності індуктивного тепловідведення температури комірок відрізняються між собою на 49 °С.

3. За наявності теплостоків температури комірок практично не відрізняються (на 1,7 °С).

4. Без застосування теплостоків (теплопровідних друкованих плат) температури комірок недопустимо високі.

5. Для забезпечення оптимального теплового режиму в конструкцію комірки повинен входити теплосток завтовшки близько 2 мм з коефіцієнтом теплопровідності приблизно 155 Вт/м·град.

Застосовувати матеріали з більшою теплопровідністю немає необхідності.

Виконаний теплофізичний аналіз доводить ефективність використання теплопровідних друкованих плат і може бути основою для конструювання герметичних теплонавантажених блоків перспективної спеціалізованої РЕА і відмовою від застосування дорогих матеріалів з більшою теплопровідністю.

1. Роктон Л.П., Спокойный Ю.Е. *Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА.* – М., 1976. 2. Овсицер П.И. и др. *Несущие конструкции радиоэлектронной аппаратуры.* – М., 1988. 3. Дульнев Г.Н., Тарновский Н.Н. *Тепловые режимы электронной аппаратуры.* – Л., 1971. 4. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. *Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах.* – Л., 1968. 5. *Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общей ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина.* – М., 1982.