

УДК 658.51.011.56

А.М. Синотин

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ АППАРАТОВ С ОПТИМАЛЬНЫМ РАЗМЕЩЕНИЕМ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассматривается учёт неравномерности распределения удельной мощности источников тепла в нагретой зоне РЭА при теплофизическом конструировании в стационарном режиме. Представлены экспериментальные данные, подтверждающие теоретические предпосылки.

**Ключевые слова:** анизотропность, нагретая зона, эффективная теплопроводность, относительный параметр теплопроводности, коэффициент теплоотдачи.

### Введение

При расчёте и проектировании теплонагруженных аппаратов радиоэлектронных систем возникает необходимость учёта их тепловых режимов. Из-за неравномерной концентрации тепловыделяющих элементов, либо вследствие применения в электрических схемах элементов с различной рассеиваемой мощностью по объёму прибора создаётся неоднородное тепловыделение. Поэтому наряду с другими параметрами [1] необходимо учитывать параметр неравномерности распределения удельной мощности ( $W$  Вт / м<sup>3</sup>) источников тепла  $\beta_w$ .

Аналогичное выражение для  $\beta_w$  можно получить из общего решения уравнения теплопроводности для квазиоднородного, анизотропного по теплопроводности тела (нагретая зона РЭА с плотным монтажом [1]) в форме параллелепипеда  $2l_x \cdot 2l_y \cdot 2l_z$  с неравномерным симметричным распределением мощности источников тепла. На границе тела происходит теплообмен по закону Ньютона (граничные условия 3 рода) при нулевых начальных условиях.

**Цель исследования.** Определение влияния характера расположения тепловыделяющих радиоэлектронных элементов в нагретой зоне на тепловой режим аппарата.

### Основной материал

Применяя для решения дифференциального уравнения теплопроводности метод двойного разделения переменных [2] и ограничиваясь первым членом ряда общего решения, приходим к следующему выражению для  $\beta_w$  в стационарном режиме:

$$\beta_w = \frac{\int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \int_0^{l_z} \frac{W(x,y,z)}{W} U_x \cdot U_y \cdot U_z \cdot dx \cdot dy \cdot dz}{\int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \int_0^{l_z} U_x \cdot U_y \cdot U_z \cdot dx \cdot dy \cdot dz}; \quad (1)$$

$$U_i = \cos \mu_i \frac{\mu_i}{l_i}; \quad \cos \mu_i \frac{\mu_i}{l_i}; \quad i = x, y, z. \quad (2)$$

$$\mu_i \cdot \text{tg} \mu_i = B_i; \quad B_i = \frac{K_i}{\lambda_i} l_i; \quad (3)$$

$$W = \frac{P}{8l_x \cdot l_y \cdot l_z},$$

где  $P$  – мощность всех источников тепла  $\sum_{i=1}^n P_i$ , Вт;

$K_i$  – коэффициент теплопередачи от  $i$ -й грани к окружающей среде, Вт / (м<sup>2</sup>·К);

$\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности вдоль оси симметрии параллелепипеда  $i = x, y, z$ , Вт / (м·К).

Собственные значения  $\mu_i$  затабулированы в функции критерия Био для граничных условий 3-го рода в работе [3].

Таким образом, связь между параметрами теплофизического конструирования, рассеиваемой мощностью и допустимой максимальной температурой перегрева  $\vartheta_0$  град. с учётом параметра  $\beta_w$  [1]:

$$3,62P \cdot \beta_w = \vartheta_0. \quad (5)$$

Конструктивные условия минимизации параметра  $\beta_w$  при равномерном распределении мощности также рассмотрены в работе [1]. Для оценки условий минимизации параметра  $\beta_w$  рассмотрим решение выражения (1) для крайне неравномерного случая распределения мощности, когда источники тепла мощностью  $W$  сконцентрированы в симметрично расположенных ограниченных объёмах  $2a_x \cdot 2a_y \cdot 2a_z$  (рис. 1) вдоль одной из осей. Интегрирование уравнения (1) с учётом (2) – (4) (рис. 1) и последующие преобразования дают следующие выражения:

$$\beta_w = \prod_i \frac{\sin \mu_i \cdot \frac{a_i}{l_i}}{\frac{a_i}{l_i} \cdot \sin \mu_i} \cdot \frac{\cos \mu \left( \frac{h_z}{l_z} + \frac{a_z}{2l_z} \right)}{\cos \mu_z \cdot \frac{a_z}{2l_z}}, \quad i = x, y, z. \quad (6)$$

В случае вырождения в точечный источник (предельная неравномерность распределения мощности  $a_i \rightarrow 0$ )

$$\beta_w = \prod_i \frac{\mu_i}{\sin \mu_i} \cdot \cos \mu_z \frac{h_z}{l_z}, \quad (7)$$

Таблица 1

Численные значения  $\beta_w$

$B_i$	Точечный источник			Плоский источник $a_x = l_x; a_y = l_y;$ $a_z = 0$		
	$\left(\frac{h_z}{l_z}\right)_0$	$\beta_w$		$\left(\frac{h_z}{l_z}\right)_0$	$\beta_w$	
		$\frac{h_z}{l_z} = 0$	$\frac{h_z}{l_z} = 1$		$\frac{h_z}{l_z} = 0$	$\frac{h_z}{l_z} = 1$
0,5	0,39	1,2	0,9	0,23	1,1	0,9
1	0,51	1,4	0,9	0,31	1,1	0,7
2	0,69	1,8	0,8	0,39	1,2	0,6
5	0,74	2,5	0,6	0,47	1,3	0,3
10	0,78	3,0	0,4	0,51	1,4	0,2
50	0,82	3,7	0,1	0,55	1,5	0,1
	0,83	3,9	0,0	0,56	1,6	0,0

В табл. 1 приведены численные значения  $\beta_w$  для предельных случаев, когда мощность сконцентрирована в центре нагретой зоны ( $h_z/l_z = 0$ ) или на периферии ( $h_z/l_z = 1$ ). Здесь же даны положения источников  $(h_z/l_z)_0$ , соответствующие  $\beta_w = 1$  при различных значениях критерия  $B_i$ . В расчетах принимались одинаковые условия теплообмена на границе  $B_{i1} = B_i$ .

Из выражения (7) следует, что при малых значениях критерия  $B_i$ , когда согласно формуле (3)  $\sin \mu \approx \mu$ , а  $\cos \mu_z \frac{h_z}{l_z} \approx 1$ , параметр  $\beta_w \approx 1$  независимо от места расположения источников  $(h_z/l_z)$ , т.е. минимизация  $\beta_w$  невозможна.

Большие значения критерия  $B_i$  и концентрация источников в центре (табл. 1,  $h_z/l_z = 0$ ) вызывает существенный рост  $\beta_w$ , достигающий при  $B_i = \infty$  четырехкратного увеличения по сравнению с равномерным распределением мощности ( $\beta_w = 1$ ). Концентрация тепловыделений на периферии ( $h_z/l_z \rightarrow 1$ ) способствует уменьшению  $\beta_w$ , начиная же  $(h_z/l_z)$  происходит минимизация параметра  $\beta_w$  по сравнению с равномерным распределением мощности.

В целях проверки полученных закономерностей проведены температурные испытания тепловых макетов РЭА при различных законах концентрации

мощности ( $h_z/l_z$ ) в объеме нагретой зоны. Эксперименты проводились в условиях естественного воздушного охлаждения ( $B_i = 2,3$ ).

Нагретая зона теплового макета набиралась из девяти стеклотекстолитовых плат размером  $130 \times 130 \times 1,5$  мм. В качестве тепловых источников на платах размещались резисторы МЛТ-2, 11кОм. Равномерное распределение мощности создавалось путём подачи питания на все платы. Отключение от центральной и последующих плат при сохранении постоянства рассеиваемой мощности  $P = 25$  Вт имитировало изменение концентрации источников от равномерного к периферийному ( $h_z/l_z = 0-1$ ). Результаты температурных испытаний представлены на рис. 2, 3.

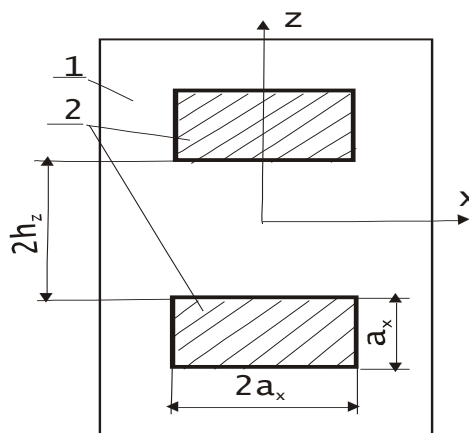


Рис. 1. Размещение источников тепла в объеме нагретой зоны: 1 – нагретая зона РЭА в форме параллелепипеда  $2l_x \cdot 2l_y \cdot 2l_z$ ; 2 – источники тепла размеров  $2a_x \cdot 2a_y \cdot 2a_z$  с удельной мощностью  $W$  Вт/м<sup>3</sup>

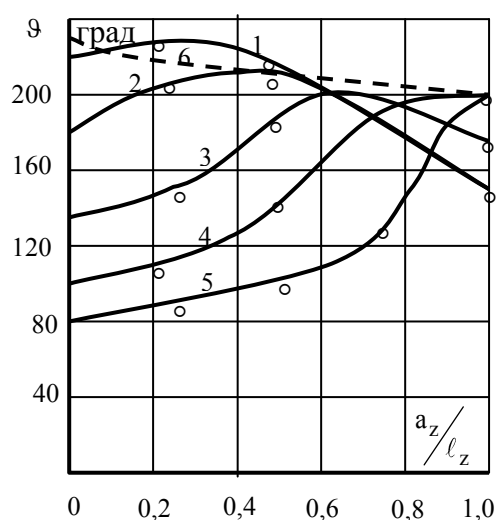


Рис. 2. Характер изменения температуры в центре плат при различных законах размещения тепловыделяющих элементов ( $h_z/l_z$ ) в условиях естественного охлаждения ( $B_i = 2,3$ )

Экспериментальные данные подтверждают слабое влияние закона распределения мощности при малых значениях  $B_i$  на максимальную температуру перегрева РЭА. Имеет место лишь перемещение максимального перегрева (рис. 2, штрих пунктирная линия) из центральной зоны, при равномерном распределении мощности, к периферии в зону концентрации источников тепловыделения.

Количественные значения параметра  $\beta_w$ , рассчитанные из выражения (6), удовлетворительно совпадают с опытными данными (рис. 3).

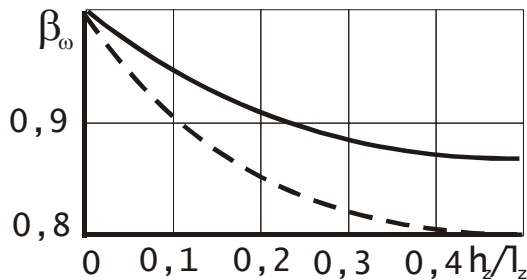


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные значения параметра ( $\beta_w = \beta_w(h_z/l_z)$ ) при  $B_i = 2,3$ ;  
— расчёт по выражению (6);  
---- эксперимент

Аналитические и экспериментальные исследования влияния закона распределения мощности на температурный режим аппарата позволяют сделать следующие выводы и рекомендации для теплофизического конструирования РЭА.

### Выводы

1. Для малогабаритных РЭА не более 0,15 м, что в условиях естественного охлаждения ( $K = 5 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$  и  $\lambda = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$ ) [1] обеспечивает  $B_i < 2$ , неравномерным характером распре-

деления мощности можно пренебречь, полагая в выражении (5)  $\beta_w = 1$  (см. табл. 1).

2. В крупногабаритных РЭА и аппаратах с интенсивным поверхностным охлаждением нагретой зоны ( $B_i > 2$ ) необходимо предусматривать периферийное размещение тепловыделяющих элементов и мощных источников тепла с минимальным относительным удалением от центральной зоны на  $h_z/l_z$  (см. табл. 1). Это приводит к минимизации параметра  $\beta_w$ , к повышению эффективности поверхностного охлаждения и при заданном максимальном перегреве даёт более высокие значения мощности рассеиваемой конструкции РЭА (5).

3. Количественные значения параметров  $\beta_w$  могут быть определены при принятом законе размещения источников тепла (радиоэлементов) по выражениям (1), (6).

### Список литературы

1. Майко И.М. О теплофизическом конструировании одноблочных РЭА с заданным тепловым режимом / И.М. Майко, А.М. Синотин // Вопросы радиоэлектроники. – 1974. – Вып. 1. – С. 80-87.
2. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1966. – 724 с.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высш. школа, 1967. – 600 с.

Поступила в редколлегию 20.08.2012

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

### ПРОЕКТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ З ОПТИМАЛЬНИМ РОЗМІЩЕННЯМ ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ

А.М. Сінотін

*Розглядається облік нерівномірності розподілу питомої потужності джерел тепла в нагрітій зоні РЕА при теплофізичному конструюванні в стаціонарному режимі.*

**Ключові слова:** анізотропія, нагріта зона, ефективна теплопровідність, відносний параметр теплопровідності, коефіцієнт тепловіддачі.

### PLANNING OF VEHICLES WITH OPTIMUM RADIO ELECTRONIC DISTRIBUTION OF HEAT-GENERATING ELEMENTS

A.M. Sinotin

*Consideration of unevenness of distributing of specific power of sources of heat in the heated area REA at the thermalphysic constructing in the stationary mode is considered.*

**Keywords:** anisotropy, heated area, effective heat conductivity, relative parameter of heat conductivity, coefficient of heat emission.