

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ
АЛГОРИТМА СИНТЕЗА МНОГОПЛАТНЫХ РЭА ПО
МАКСИМАЛЬНОМУ ДОПУСТИМОМУ ПЕРЕГРЕВУ**

В многоплатных конструкциях всегда имеют место тепловые связи между элементами и платами, так как коэффициент плотности монтажа $\ell_{\max} / \Delta \geq 1$ [1].

Это позволяет применить к нагретой зоне понятие квазиоднородного тела с эффективной теплопроводностью λ_x, λ_y вдоль осей плат и λ_z перпендикулярно платам. Численные значения эффективных теплопроводностей для РЭА с воздушным наполнителем по данным [1-5] приведены на рис. 1 в функции зазора между платами Δ для монтажа средней плотности ($\eta_m \geq 1$) и нетеплопроводных плат с большой плотностью монтажа ($\eta_m \gg 1$).

$$\lambda_0 = \lambda_x \approx \lambda_y \approx \lambda_z = 0,2 \text{ Вт/м}\cdot\text{град.} \tag{1}$$

В случае теплопроводных плат (тепlostокoв) эффективная теплопроводность определяется вдоль тепlostокoв зависимостью

$$\lambda_i = \lambda_{0i} \left(1 + \frac{\lambda_n}{\lambda_{0i}} \cdot \frac{\delta_m}{\Delta + \delta_m} \right); i = x, y, z, \tag{2}$$

где λ_{0i} – эффективная теплопроводность при нетеплопроводных платах (рис. 1), Вт/м·град; λ_n – теплопроводность сплошных металлических плат (тепlostокoв), Вт/м·град; δ_m – толщина металлических плат (тепlostокoв), м; Δ – расстояние между платами, м.

Связь между температурным полем анизотропной нагретой зоны РЭА в форме параллелепипеда, теплофизическими коэффициентами (λ, c, γ), симметрично расположенными источниками и стоками тепла выражается интегральным уравнением:

$$\mathcal{G}_{(x,y,z,\tau)} = \frac{\int_0^{\ell_x} \int_0^{\ell_y} \int_0^{\ell_z} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{W(x,y,z,\tau) - Q(x,y,z,\tau)}{c\gamma} U_{nx} U_{my} U_{kz} \cdot \int_0^{\ell_x} \int_0^{\ell_y} \int_0^{\ell_z} U_{nx'}^2 \cdot U_{my'}^2 \cdot U_{kz'}^2 dx' \cdot dy' \cdot dz'}{\int_0^{\ell_x} \int_0^{\ell_y} \int_0^{\ell_z} U_{nx'} \cdot U_{my'} \cdot U_{kz'} \cdot x \cdot e^{-\frac{\sigma_n^2(\tau-t)}{c\gamma} \frac{q_v}{c\gamma}} \cdot dx' \cdot dy' \cdot dz' \cdot dt}, \tag{3}$$

где W – мощность рассеивания источников тепла нагретой зоны прибора, Вт/м³; Q – удельная мощность стоков тепловой энергии, Вт/м³; q_v – объемный коэффициент теплообмена, Вт/м² град.

Получение из (2) алгоритмов синтеза для произвольного закона изменения температуры $\mathcal{G}(x, y, z, \tau)$ представляет серьезные математические трудности, так как методы решения

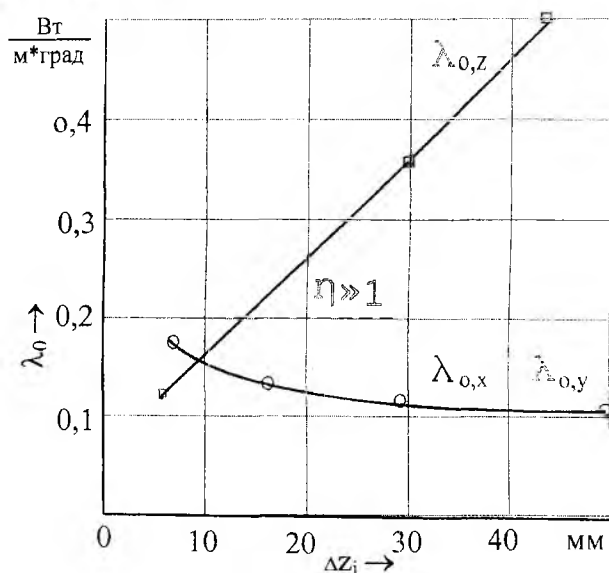


Рис. 1

некорректных многомерных задач теплопроводности начали широко разрабатываться лишь в последние годы.

Поэтому ограничимся рассмотрением случая, когда требуемый температурный режим задаётся максимальной температурой в установившемся режиме $\vartheta_0 (\tau \rightarrow \infty)$.

Решение уравнения (2) будем получать при симметричных законах распределения источников и стоков энергии.

С учётом этих допущений, ограничиваясь первым членом ряда общего решения при $\tau \rightarrow \infty$, получим связь между максимальной температурой и всеми остальными параметрами теплового процесса:

$$\frac{P}{\lambda_{\max}} \cdot \frac{\ell_{\min}^2}{V} \zeta^2 \cdot F_w \frac{A}{(\mu_x \cdot \xi_x)^2 + (\mu_y \cdot \xi_y)^2 + (\mu_z \cdot \xi_z)^2 + \frac{q_v \ell_{\min}^2 \zeta^2}{\lambda_{\max}}} = \vartheta_0; \quad (4)$$

$$A = \{0,82 \cdot A_x \cdot A_y \cdot A_z, \xi_x \approx \xi_y \approx \xi_z = 1;\}$$

$$A = \{0,82 \cdot A_x \cdot A_y, \xi_x \approx \xi_y; \xi_z \rightarrow 0;\} \quad (5)$$

$$A = \{0,82 \cdot A_x, \xi_y \approx \xi_z \rightarrow 0,\}$$

где A_i, μ_i – значения амплитуд и собственных значений при V_i (табл.2);

ξ_{i_0} – относительные длины сторон (8) параллелепипеда;

ζ – смотри соотношение (22).

Возможность ограничения суммы первыми членами ряда с условиями (5) вытекает из табл. 1, в которой дана сравнительная оценка суммы и первого члена ряда уравнения теплопроводности при $V_i = \infty$.

Т а б л и ц а 1

Форма параллелепипеда	Сумма ряда	Первый член ряда	Погрешность %	Требуемая поправка
Куб	0,223	0,273	22,5	0,82
Квадратный «брус»	0,297	0,332	11,8	0,90
Квадратная пластина	0,500	0,510	2,0	0,98

Выразим в (4) наименьший линейный размер нагретой зоны в форме параллелепипеда $2\ell_{\min}$ через фиксированный объём V (m^3) и относительные размеры сторон:

$$V = 8\ell_x \cdot 8\ell_y \cdot 8\ell_z = 8\ell_{\min}^3 \frac{1}{\xi_{x_0} \cdot \xi_{y_0} \cdot \xi_{z_0}}; \quad (6)$$

$$\ell_{\min} = 0,5\sqrt[3]{V} \cdot \sqrt{\xi_{x_0} \cdot \xi_{y_0} \cdot \xi_{z_0}}; \quad (7)$$

$$\xi_{i_0} = \frac{\ell_{\min}}{\ell_i}, \quad i = x, y, z. \quad (8)$$

После подстановки (7) и (2) в (6) и группирования по параметрам придем к математическому выражению алгоритма синтеза РЭА по заданной максимальной температуре в виде уравнения связи между параметрами синтеза F_j при отсутствии объёмных стоков энергии ($q_v = 0$).

$$F_0 \cdot F_\phi \cdot F_\lambda \cdot F_{a\lambda} \cdot F_{ак} \cdot F_w \leq 1, \quad (9)$$

где F_0 – начальный параметр;

$$F_0 = \frac{P_0}{\vartheta_0} \cdot \frac{1}{4\lambda_0 \cdot V^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{0,82 \cdot A_0^3}{3\mu_0^2}; \quad (10)$$

$$B_{i_0} = \frac{K_0}{\lambda_0} \cdot \frac{1}{2} \sqrt[3]{V}, \quad (11)$$

где P_0 – суммарная мощность источников тепла, Вт;

ϑ_0 – максимальный допустимый перегрев аппарата, град.;

λ_0 – эффективная теплопроводность при отсутствии теплостоков при газовом (воздушном) заполнителе (рис. 1), Вт/м. град;

V – объём нагретой зоны, m^3 ;

A_0, μ_0 – амплитуда и собственные значения при B_{i_0} (табл. 2);

K_0 – средний поверхностный коэффициент теплопередачи;

F_ϕ – параметр формы параллелепипеда.

$$F_\phi = 3 \frac{A_1}{A_0^3} \cdot \mu_0^2 \frac{\sqrt{\xi_{x_0}^2 \cdot \xi_{y_0}^2 \cdot \xi_{z_0}^2}}{(\mu_{x_1} \cdot \xi_{x_0})^2 + (\mu_{y_1} \cdot \xi_{y_0})^2 + (\mu_{z_1} \cdot \xi_{z_0})^2}; \quad (12)$$

$$B_{i_j} = B_{i_0} \frac{\sqrt[3]{\xi_{x_0} \xi_{y_0} \xi_{z_0}}}{\xi_{i_0}}; \quad (13)$$

$$A_1 = A_{x_1}^* \cdot A_{y_1}^* \cdot A_{z_1}^* : A_{i_1}^* = A_{i_1} - (A_{i_1} - 1) \cdot (1 - \xi_{i_0}); \quad i = x, y, z, \quad (14)$$

где ξ_{i_0} – относительные длины сторон (8) параллелепипеда;

$A_{i_1}; \mu_{i_1}; A_0; \mu_0$ – значения амплитуд и собственных значений при критерии B_{i_0} и B_{i_1} , (табл. 2).

F_λ – параметр эффективной теплопроводности нагретой зоны.

$$F_\lambda = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_m}{\lambda_0} \cdot \frac{\delta_m}{\Delta + \delta_m}} \cdot \frac{A_2}{A_1} \cdot \frac{(\mu_{x_1} \cdot \xi_{x_0})^2 + (\mu_{y_1} \cdot \xi_{y_0})^2 + (\mu_{z_1} \cdot \xi_{z_0})^2}{(\mu_{x_2} \cdot \xi_{x_0})^2 + (\mu_{y_2} \cdot \xi_{y_0})^2 + (\mu_{z_2} \cdot \xi_{z_0})^2}, \quad (15)$$

$$B_{i_2} = B_{i_0} \cdot \frac{\sqrt{\xi_{x_0} \cdot \xi_{y_0} \cdot \xi_{z_0}}}{\xi} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda_{\max}}, \quad i = x, y, z, \quad (16)$$

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_M}{\lambda_0} + \frac{\delta_M}{\Delta + \delta_M}}, \quad (17)$$

$$A_2 = A_{x_2}^* \cdot A_{y_2}^* \cdot A_{z_2}^*; \quad A_{i_2}^* = A_{i_2} - (A_{i_2} - 1) \cdot (1 - \xi_{i_0}), \quad i = x, y, z, \quad (18)$$

где A_{i_2}, μ_i – значения амплитуд и собственных значений при B_{i_2} (табл.2)

Таблица 2

B_i	A_i	μ_i
0,00	1,0000	0,0000
0,01	1,0020	0,0998
0,10	1,0159	0,3111
0,50	1,0701	0,6533
0,60	1,0813	0,7051
0,70	1,0918	0,7506
0,80	1,1016	0,7910
0,90	1,1192	0,8603
1,00	1,1192	0,8603

$F_{a\lambda}$ – параметр анизотропности по теплопроводности $\lambda_x \neq \lambda_y \neq \lambda_z$:

$$F_{a\lambda} = \zeta^2 \cdot \frac{A_3}{A_2} \cdot \frac{(\mu_{x_1} \cdot \xi_{x_0})^2 + (\mu_{y_1} \cdot \xi_{y_0})^2 + (\mu_{z_1} \cdot \xi_{z_0})^2}{(\mu_{x_2} \cdot \xi_{x_0})^2 + (\mu_{y_2} \cdot \xi_{y_0})^2 + (\mu_{z_2} \cdot \xi_{z_0})^2}, \quad (19)$$

$$B_{i_3} = B_{i_0} \cdot \frac{\sqrt{\xi_{x_0} \cdot \xi_{y_0} \cdot \xi_{z_0}}}{\xi_{i_0}} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda_{\max}} \cdot \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_i}, \quad i = x, y, z, \quad (20)$$

$$A_3 = A_{x_3}^* \cdot A_{y_3}^* \cdot A_{z_3}^*; \quad A_{i_3}^* = A_{i_3} - (A_{i_3} - 1) \cdot (1 - \xi_{i_0}), \quad i = x, y, z. \quad (21)$$

$$\zeta = \frac{i^{\min} \left(\ell_i \sqrt{\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_i}} \right)}{\ell_{\min}}; \quad \xi_i = \xi_{i_0} \cdot \frac{\zeta}{\sqrt{\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_i}}}, \quad i = x, y, z, \quad (22)$$

где $A_{i_3}; \mu_{i_3}$ – значения амплитуд и собственных значений при B_{i_3} (табл. 2).

$$F_{ак} = \frac{A}{A_3} \cdot \frac{(\mu_{x3} \cdot \xi_x)^2 + (\mu_{y31} \cdot \xi_y)^2 + (\mu_{z3} \cdot \xi_{z0})^2}{(\mu_x \cdot \xi_x)^2 + (\mu_y \cdot \xi_y)^2 + (\mu_z \cdot \xi_z)^2}, \quad (23)$$

$$B_i = B_{i_0} \cdot \frac{\sqrt{\xi_{x_0} \cdot \xi_{y_0} \cdot \xi_{z_0}}}{\xi_{i_0}} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda_i} \cdot \frac{\kappa_i}{\kappa_0}, \quad i = x, y, z, \quad (24)$$

$$A = A_x^* \cdot A_y^* \cdot A_z^*; \quad A_i^* = A_i - (A_i - 1) \cdot (1 - \xi_i), \quad i = x, y, z, \quad (25)$$

где $A_i; \mu_i$ – значения амплитуд и собственных значений при B_i (табл. 2); κ_i – коэффициенты теплопередачи на гранях нагретой зоны, Вт/м·град [5];

F_w – параметр влияния закона концентрации мощности источников тепла в объёме нагретой зоны [4].

При введении объёмных температурозависимых стоков, мощность которых существенно превышает мощность поверхностных стоков, алгоритм синтеза по максимальной стационарной температуре при отсутствии поверхностных стоков выражается уравнением связи вида

$$F_Q \leq 1, \quad (26)$$

$$F_Q = \frac{P_0}{V \cdot q_v}. \quad (27)$$

Согласно (9) и (26) для получения оптимальных конструкций РЭА, позволяющих использовать в схемах элементы с максимальной потребляемой мощностью при заданном максимальном перегреве, необходимо минимизировать параметры синтеза F_j в пределах ограничений, наложенных на каждый параметр техническим заданием на разработку аппарата.

Вывод: для создания оптимальной конструкции РЭА по заданному максимально допустимому перегреву необходимо произвести оптимизацию по каждому из рассмотренных параметров.

Список литературы: 1. Дутьнева Н.М. Исследование тепловых режимов радиоэлектронных блоков в микро-модульном исполнении. // Автореферат канд. диссер., ЛПИ., 1972. 21 с. 2. Майко И.М., Синотин А.М. Экспериментальное определение эффективной теплопроводности нагретых зон РЭА, // Вопросы радиоэлектроники. ТРТО. 1972. № 2. 3. Майко И.М. Исследование нестационарных тепловых режимов РЭА. // Автореферат канд. диссер., ЭНИН. 1971. 4. Майко И.М., Синотин А.М., Детинов Ю.М. О теплофизическом конструировании одноблочных радиоэлектронных аппаратов с заданным тепловым режимом. // Вопросы радиоэлектроники. ТРТО. 1974. № 1. 5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Госэнергоиздат. 1952. 6. Михеев М.А. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат. 1956. 315 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 20.03.2003.