РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ДАТЧИКА В АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В. Ф. Кравченко, А. П. Слесаренко, В. Л. Рвачев, В. П. Лысов, О. Д. Бакланов

Харьков

Процесс теплообмена в радиоэлектронной аппаратуре привлекает внимание многих исследователей. Авторами [1—3] предлагаются различные методы расчета теплового режима электронных приборов. Эти приборы работают в условиях обычной или повышенной температуры, а охлаждаются с помощью различных устройств и за счет конвекции через систему вентиляционных отверстий в кожухе прибора.

Данное исследование ставит своей целью распространить предложенную в работе [4] методику расчета тепловых полей для ряда приборов с учетом их геометрической формы (например, расчет температурного поля термохимического датчика в автоматических системах).

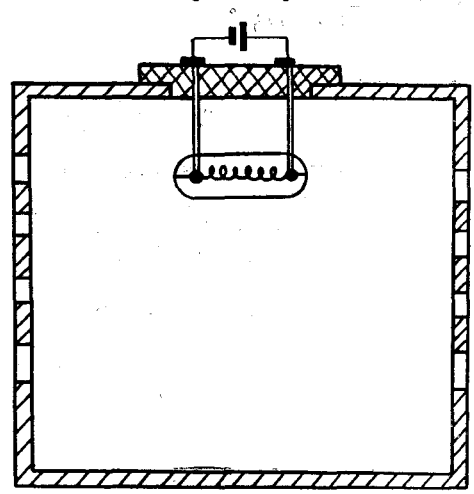
Предлагаемая в настоящей работе модель, естественно, не полностью соответствует процессам теплообмена, которые протекают в реальных приборах. Очевидно, что в некоторых конкретных ситуациях может возникнуть потребность в ее корректировке. Это позволит прежде всего учесть отклонения от принятой идеализации и дать оценку их влияния на тепловой режим прибора.

1. На рисунке приведен схематический вариант термохимического датчика в автоматических системах.

Математически моделировка задачи может быть следующей.

а) Пусть в центре диска радиусом R_0 и толщиной δ расположен источник энергии, занимающий область радиусом r_0. Полные коэффициенты теплоотдачи поверхностей диска и сетчатого патрона термохимического датчика — $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_m$.

Коэффициенты теплопроводности материала диска и частей сетки патрона — $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_m$. Предполагаем, что энергия, рассеиваемая с краев диска, настолько мала по сравнению с энергией, рассеиваемой с его поверхности, что ею можно пренебречь.



Для того, чтобы учесть теплообмен краев диска с окружающей средой, следует за радиус диска R_0 принимать величину, большую реального радиуса R_{0p} на половину толщины диска, т. е.

$$R_0 = R_{0p} + 0{,}5\delta. \qquad (1)$$

Такой способ позволяет без усложнения расчетных формул с удовлетворительной для практических целей точностью учитывать теплообмен краев диска с окружающей средой [5].

Температурное поле круглого диска может быть описано с помощью системы уравнений [3]

$$\Delta u - B^2 u = -F; \qquad (2)$$

$$\left.\frac{\partial u}{\partial \nu}\right|_{\Gamma} = 0; \quad F = \begin{cases} \dfrac{P}{\pi r_0^2 \lambda \delta} & \rho \leqslant r_0, \\ 0 & r_0 < \rho \leqslant R_0. \end{cases}$$

Уравнение (2) описывает процесс переноса тепловой энергии в круглом диске, поверхности которого рассеивают энергию в окружающую среду.

Решение задачи ищем в виде

$$u = \Phi - \omega D_1 \Phi, \qquad (3)$$

где

$$D_1\Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial x}\frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y}\frac{\partial \omega}{\partial y}.$$

Учитывая симметрию задачи, берем

$$\Phi = \sum_{i=0}^{n} C_i \rho^i, \qquad (4)$$

где

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

После этого решение можно представить в виде

$$u = \sum_{i=0}^{n} C_i \chi_i,$$

где

$$\omega = \frac{1}{2}(1-\rho^2)$$

и

$$\chi_i = \rho^i\left(\frac{2+i}{2}\right) - \frac{i}{2}\rho^{i+2}. \quad (5)$$

Возьмем $r_0 = 0{,}1$; $R_0 = 1{,}0$; положим $C_i = \frac{P}{2\lambda\delta}C_i^*$ и F представим как $F = \frac{P}{2\lambda\delta}\frac{2}{\pi r_0^2}$.

Тогда

$$\varphi = \frac{2(t-t_c)\lambda\delta}{P} = \sum_{i=0}^{n} C_i^*\chi_i, \quad (6)$$

где C_i^* определяются из системы Бубнова — Галеркина [6]; $\mathrm{Bi} = b^2R_0^2$, где Bi — критерий Био.

Возьмем $\mathrm{Bi} = 1{,}0$; тогда $b^2 = 1{,}0$.

Система (7) решалась на ЭВМ «Минск-22» при $n = 5$:

$$\varphi = \frac{2(t-t_c)\lambda\delta}{P} = 1{,}328 - 1{,}6285\chi_1 + 0{,}3881\chi_2 + 2{,}7069\chi_3 - 3{,}6632\chi_4 + 1{,}4343\chi_5. \quad (7)$$

Данные значений φ в зависимости от ρ приведены в табл. 1.

Таблица 1

ρ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
φ	1,3279	1,0981	0,9136	0,7844	0,7029	0,6537	0,6209	0,5951	0,5751	0,5655	0,5654

б) Пусть в центре диска радиусом R_0 и толщиной δ расположен источник энергии, занимающий область радиусом r_0, но поверхности этой области не участвуют в теплообмене с окружающей их газообразной средой и вся энергия от источника рассеивается в среду благодаря конвекции и излучению с поверхности $2\pi(R_0^2 - r_0^2)$. Полные коэффициенты теплоотдачи поверхностей диска и сетчатого патрона термохимического датчика — $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_m$. Коэффициенты теплопроводности материала диска и частей сетки патрона — $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_m$.

Учет теплообмена краев диска с окружающей средой с удовлетворительной для практических целей точностью производим, взяв R_0 в виде (1).

Температурное поле в этом случае описывается следующей системой уравнений:

$$\Delta u - b^2u = 0; \quad (8)$$

$$\left.\frac{\partial u}{\partial \rho}\right|_{\Gamma_1} = -\frac{P}{2\pi\lambda r_0\delta}; \quad \left.\frac{\partial u}{\partial \rho}\right|_{\Gamma_2} = 0;$$

$$b^2 = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_m}{\lambda\delta}.$$

В этом случае

$$\omega_1 = \frac{1}{2r_0}(\rho^2 - r_0^2); \quad \omega_2 = (R_0^2 - \rho^2); \quad (9)$$

$$\omega = \frac{(\rho^2 - r_0^2)(R_0^2 - \rho^2)}{2\rho(R_0^2 - r_0^2)}.$$

При этом

$$\omega_1\big|_{\Gamma_1} = 0;\ \omega_1 > 0 \text{ при } r_0 < \rho \leqslant R_0;\ \frac{\partial\omega_1}{\partial\nu}\Big|_{\Gamma_1} = 1;$$
$$\omega_2\,|\,\Gamma_2 = 0;\ \omega_2 > 0 \text{ при } 0 \leqslant \rho < R_0; \qquad (10)$$
$$\omega\Big|_{\Gamma_1 \cup \Gamma_2} = 0;\ \omega > 0 \text{ при } r_0 < \rho < R_0;\ \frac{\partial\omega}{\partial\nu}\Big|_{\Gamma_1 \cup \Gamma_2} = 1.$$

В полярных координатах (ρ, θ) решение имеет вид

$$u = \Phi_1 + \frac{\omega_1\omega_2^2 f}{\omega_1 + \omega_2^2} - \omega\frac{\partial\Phi_1}{\partial\rho}\cdot\frac{\partial\omega}{\partial\rho}, \qquad (11)$$

где

$$f = -\frac{P}{2\lambda\delta\pi r_0}.$$

Положим

$$\Phi_1 = \frac{P}{2\lambda\delta}\Phi.$$

Тогда

$$\varphi = \frac{2(t - t_c)\lambda\delta}{P}\Phi - \frac{1}{2\pi r_0^2}\cdot\frac{(\rho^2 - r_0^2)(R_0^2 - \rho^2)^2}{\rho^2 - r_0^2 + (R_0^2 - \rho^2)^2} -$$
$$- \frac{(\rho^2 - r_0^2)(R_0^2 - \rho^2)}{2\rho(R_0^2 - r_0^2)}\cdot\frac{\partial\Phi}{\partial\rho}\frac{\partial\omega}{\partial\rho}. \qquad (12)$$

В данной задаче $r_0 = 0{,}1$; $R_0 = 1{,}0$.
Критерий Био $\mathrm{Bi} = 1{,}0$; следовательно, $b^2 = 1{,}0$.
Функцию Φ берем в виде (4).
Тогда решение можно представить как

$$\varphi = \Phi_0 + \sum_{i=0}^{n} C_i\chi_i, \qquad (13)$$

где

$$\chi_i = \frac{1}{3{,}9204}[(3{,}9204 - 1{,}0401i)\rho^i + 4{,}04i\rho^{i+2} - 3i\rho^{i+4} + 10^{-4}i\rho^{i-4}]; \qquad (14)$$

$$\Phi_0 = -\frac{50}{\pi}\cdot\frac{(\rho^2 - 0{,}01)(1 - \rho^2)^2}{(-\rho^2 + \rho^4 + 0{,}99)}.$$

Коэффициенты C_i определяются из системы Бубнова — Галеркина [6].

Задача решалась на ЭВМ «Минск-22» при $n = 5$:

$$\varphi = \Phi_0 + 0{,}8743\chi_0 + 0{,}7406\chi_1 + 19{,}3217\chi_2 - 14{,}4294\chi_3 - 20{,}4195\chi_4 + 14{,}487\chi_5. \qquad (15)$$

Значения точного решения согласно [3], полученного в виде (15), приведены в табл. 2.

Таблица 2

ρ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
φ_n	1,1253	0,9297	0,7953	0,7145	0,6724	0,6344	0,5998	0,5871	0,5787	0,5748
φ_T	1,1350	0,9190	0,7990	0,7180	0,670	0,630	0,6020	0,5870	0,5770	0,5740

2. Мы рассмотрели математические модели а) и б) данной задачи и структурный метод решения ее.

Теперь, пользуясь задачей а), обратимся к решению вопроса о выборе оптимальной конфигурации и состава материала термохимического датчика.

Пусть пропускаемым газом N_1 будет воздух. Из-за окисления в окрестности сетки патрона и нагретой спирали нам придется исследовать не источник И, а уже

$$И^* = И + И_1. \tag{16}$$

Тогда в правой части уравнения (2) вместо F окажется

$$F^* = F + F_{1окисл}. \tag{17}$$

Присутствие воздуха изменяет конвекцию и излучение с поверхностей термохимического датчика, что вызывает изменение в b^2. Геометрическая форма и размеры сетчатого патрона также влияют как на величину $F_{1окисл}$, так и на b^2.

Пусть S_i — поверхность сетчатого патрона; $i = 1, 2, \ldots, n$ — варианты конфигурации сетчатого патрона;

$$F^* = F + F_{j\,окисл},$$

где $j = 1, 2, \ldots, m$ — порядковый номер пропускаемого газа. Пропускаемые газы N_1, N_2, ..., N_m и n вариантов конфигураций сетчатого патрона характеризуются матрицей для B^2_{mn}

$$\begin{pmatrix} B^2_{11} & B^2_{12} & \ldots & B^2_{1n} \\ B^2_{21} & B^2_{22} & \ldots & B^2_{2n} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ B^2_{m1} & B^2_{m2} & \ldots & B^2_{mn} \end{pmatrix} \tag{18}$$

m-я строка матрицы дает набор b^2_{mi}, где $i = 1, 2, \ldots, n$. Для случая, когда пропускается газ N_m, перебираем n вариантов конфигурацией камеры с целью отыскания оптимальной конфигурации. В b^2 входит и характеристика материала отдельных частей термохимического датчика, а также размеры сетчатого патрона и его форма.

Таким образом, для выбора оптимальной конфигурации как отдельных элементов, так и в целом термохимического датчика, а также состава материалов, из которых изготавливаются отдельные элементы датчика, определения диапазона стабильной работы датчика для газов N_1, N_2, ..., N_m необходимо задание числовых значений матрицы (18), значений $F_{j\,окисл}$, где $j = 1, 2, \ldots, m$, геометрических размеров, формы сетчатого патрона и камеры, а также толщины стенок камеры и эквивалентной толщины стеклянного баллончика, в котором заключена нить накала.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. Изд-во «Высшая школа», М., 1967.
2. П. Шнейдер. Инженерные проблемы теплопроводности. Изд-во иностр. лит., М., 1960.
3. Г. Н. Дульнев. Теплообмен в радиоэлектронных устройствах. Госэнергоиздат, М. — Л., 1963.
4. В. Л. Рвачев, А. П. Слесаренко, В. Ф. Кравченко. О расчете тепловых полей радиоэлектронных аппаратов методом R-функций. Сообщение 1. Сб. «Приборы и системы автоматики», вып. 15. Изд-во ХГУ, 1970.
5. В. М. Боришанский, С. С. Кутателадзе. Справочник по теплопередаче. Госэнергоиздат, М., 1959.
6. Л. В. Канторович, В. И. Крылов. Приближенные методы высшего анализа. Физматгиз, Л., 1962.