

УДК 681.883.41

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА МАГНІТНОГО ПОЛЯ

В.С.Осадчук, О.В.Осадчук, А.Г.Яровенко

Вінницький державний технічний університет

Теплові режими мікроелектронних частотних перетворювачів магнітного поля суттєво впливають на функцію перетворення, що приводить до похибок у визначенні магнітної індукції. Аналіз теплового стану інтегральної схеми перетворювача є складною задачею, розв'язок якої можливо зробити на основі математичного моделювання з врахуванням фізичних процесів і особливостей конструкції інтегральної схеми. На основі результатів математичного моделювання можна врахувати похибки, які виникають у результаті перегріву елементів інтегральної схеми і оптимізувати параметри мікроелектронних перетворювачів магнітного поля [1-3]. Слід підкреслити, що моделювання теплових процесів в інтегральних тензоперетворювачах на основі тензорезисторів зроблено у роботах [4-7], а розрахунки розподілу температури в інтегральній планарній схемі зроблено у роботах [8,9]. В даній роботі на відміну від згаданих вище досліджень зроблена спроба промодельовати тепловий режим для мікроелектронних частотних перетворювачів магнітного поля.

Теплова модель мікроелектронного перетворювача складається з тонкої кремнієвої пластини певних розмірів, в поверхневому прошарку якої сформовані два комплементарні польові транзистори, резистор, ємність і плівкова індуктивність, які об'єднані за допомогою струмоведучих шарів у вимірювальну схему. Польові транзистори і опори нагріваються під час проходження через них струму, що порушує тепловий режим мікроелектронного перетворювача і впливає на точність його роботи. Довжина каналу польових транзисторів і дифузійного резистора лежать у межах від одиниць до десятків мікрометрів, а товщина кремнієвої підкладки складає декілька сот мікрометрів [10].

Розподіл температури у просторі і часі в мікроелектронній схемі перетворювача описується за допомогою рівняння теплопровідності, яке має вигляд [11]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = F(x, y, z) + \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

де T – температура, $F(x, y, z)$ - густина потужності тепловиділення, c – питома теплоємність матеріалу, ρ - густина матеріалу, λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу, x, y, z - координати транзисторів і опору, t – час.

Стационарне теплове поле в об'ємі і на поверхні аналізуємої теплової моделі (рис.1), виходячи із виразу (1), описується рівнянням

$$\frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial z^2} = -\frac{1}{\lambda} F(x, y, z), \quad (2)$$

де $T(x, y, z)$ - температура перегріву вузла теплової моделі з координатами x, y, z відносно температури корпусу перетворювача. Граничні умови для теплової моделі мають вигляд

$$\left. \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial x} \right|_{x=0, l_x} = \left. \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial y} \right|_{y=0, l_y} = 0, \quad (3)$$

$$\left[\frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z} - hT(x, y, z) \right]_{z=0} = 0, \quad (4)$$

$$\left[\frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z} - hT(x, y, z) \right]_{z=l_z} = 0, \quad (5)$$

де $h = \frac{\alpha}{\lambda}$ - відносний коефіцієнт теплообміну.

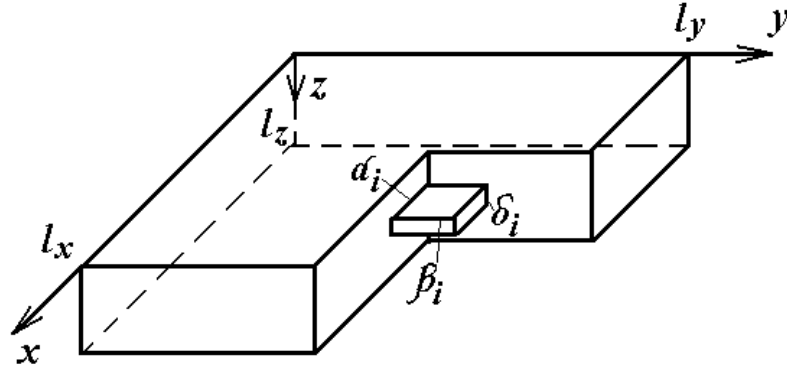


Рис.1.Теплова модель мікроелектронного перетворювача

Функція $F(x, y, z)$ у рівнянні (2) визначає густину потужності тепловиділення, яка залежить від геометричних розмірів, розташування і потужності джерел тепла

$$F(x, y, z) = \sum_{i=1}^I \frac{f_i}{V_i} q_i(x)q_i(y)q_i(z) , \quad (6)$$

де $V_i = \alpha_i \beta_i \delta_i$ - об'єм джерела тепла з номером i , $q_i(x)$, $q_i(y)$, $q_i(z)$ - координатні функції, які приймають значення 1 в області i -го джерела і значення 0 поза ним. Рівняння (2)-(5) вирішують за допомогою метода інтегральних перетворень Фур'є [12,13] з кінцевими межами із застосуванням припущення суперпозиції температурних полів. Покладаючи, що

$$\tilde{T}(n, m, k) = \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \int_0^{l_z} T(x, y, z) \cos \frac{n\pi x}{l_x} \cos \frac{m\pi y}{l_y} [\gamma_k l_z \cos \gamma_k z + h l_z \sin \gamma_k z] dx dy dz , \quad (7)$$

де $\tilde{T}(n, m, k)$ - зображення температури $T(x, y, z)$, γ_k - позитивні корені рівняння

$$\operatorname{ctg} \gamma_k l_z = \frac{\gamma_k^2 - h^2}{2\gamma_k h} \quad (k = 0, 1, 2, \dots) , \quad (8)$$

тоді рівняння (2) переводиться в простір зображень Фур'є. Для цього обидві частини рівняння (2) помножуються на ядро перетворень (7) та інтегруються по x від 0 до l_x , по y від 0 до l_y , по z від 0 до l_z , тобто

$$\begin{aligned} & \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \int_0^{l_z} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \cos \frac{n\pi x}{l_x} \cos \frac{m\pi y}{l_y} [\gamma_k l_z \cos \gamma_k z + h l_z \sin \gamma_k z] dx dy dz = \\ & = -\frac{1}{\lambda} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \int_0^{l_z} F(x, y, z) \cos \frac{n\pi x}{l_x} \cos \frac{m\pi y}{l_y} [\gamma_k l_z \cos \gamma_k z + h l_z \sin \gamma_k z] dx dy dz . \end{aligned} \quad (9)$$

Інтеграли у лівій частині тотожності (9) визначаються

$$\int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \int_0^{l_z} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cos \frac{n\pi x}{l_x} \cos \frac{m\pi y}{l_y} [\gamma_k l_z \cos \gamma_k z + h l_z \sin \gamma_k z] dx dy dz = -\left(\frac{n\pi}{l_x} \right)^2 \tilde{T}(n, m, k) , \quad (10)$$

$$\int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \int_0^{l_z} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \cos \frac{n\pi x}{l_x} \cos \frac{m\pi y}{l_y} [\gamma_k l_z \cos \gamma_k z + h l_z \sin \gamma_k z] dx dy dz = -\left(\frac{m\pi}{l_y} \right)^2 \tilde{T}(n, m, k) , \quad (11)$$

$$\int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \int_0^{l_z} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \cos \frac{n\pi x}{l_x} \cos \frac{m\pi y}{l_y} [\gamma_k l_z \cos \gamma_k z + h l_z \sin \gamma_k z] dx dy dz = -\gamma_k^2 \tilde{T}(n, m, k) , \quad (12)$$

Інтеграл у правій частині виразу (9) можна визначити таким чином

$$\begin{aligned}
 & \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \int_0^{l_z} F(x, y, z) \cos \frac{n\pi x}{l_x} \cos \frac{m\pi y}{l_y} [\gamma_k l_z \cos \gamma_k z + h l_z \sin \gamma_k z] dx dy dz = \\
 & = \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \int_0^{l_z} \sum_{i=1}^I \frac{f_i}{V_i} q_i(x) q_i(y) q_i(z) \cos \frac{n\pi x}{l_x} \cos \frac{m\pi y}{l_y} [\gamma_k l_z \cos \gamma_k z + h l_z \sin \gamma_k z] dx dy dz = \\
 & = \sum_{i=1}^I \frac{f_i}{V_i} \int_{x_i - \frac{\alpha_i}{z}}^{x_i + \frac{\alpha_i}{z}} \cos \frac{n\pi x}{l_x} dx \int_{y_i - \frac{\beta_i}{z}}^{y_i + \frac{\beta_i}{z}} \cos \frac{m\pi y}{l_y} dy \int_{z_i - \frac{\delta_i}{z}}^{z_i + \frac{\delta_i}{z}} \gamma_k l_z \cos \gamma_k z + h l_z \sin \gamma_k z dz = \\
 & = \sum_{i=1}^I \frac{8 f_i l_x l_y l_z}{\pi^2 n m \gamma_k V_i} \cos \frac{n\pi x_i}{l_x} \sin \frac{n\pi \alpha_i}{z l_x} \cos \frac{m\pi y_i}{l_y} \cos \frac{m\pi \beta_i}{z l_y} * \\
 & * (\gamma_k \cos \gamma_k z_i + h \sin \gamma_k z_i) \sin \gamma_k \frac{\delta_i}{2}, \quad (n \geq 1, \quad m \geq 1).
 \end{aligned} \tag{13}$$

Отже, в просторі зображень Фур'є рівняння (2) має вигляд

$$\begin{aligned}
 & \left[\left(\frac{n\pi}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{l_y} \right)^2 + \gamma_k^2 \right] \tilde{T}(n, m, k) = \frac{1}{\pi \lambda^2} \sum_{i=1}^I \frac{8 f_i}{n m \gamma_k} \cos \frac{n\pi x_i}{l_x} \sin \frac{n\pi \alpha_i}{2 l_x} * \\
 & * \cos \frac{m\pi y_i}{l_y} \cos \frac{m\pi \beta_i}{2 l_y} (\gamma_k \cos \gamma_k z_i + h \sin \gamma_k z_i) \sin \gamma_k \frac{\delta_i}{2}, \quad (n \geq 1, \quad m \geq 1).
 \end{aligned} \tag{14}$$

Формула звернення для перетворення (7) має вигляд

$$T(x, y, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8 \tilde{T}(n, m, k) \cos \frac{n\pi x}{l_x} \cos \frac{m\pi y}{l_y} (\gamma_k \cos \gamma_k z + h \sin \gamma_k z)}{(\delta_{n0} + 1)(\delta_{m0} + 1) l_x l_y l_z [2 h l_z + (h^2 + \gamma_k^2) l_z^2]}, \tag{15}$$

де δ_{n0}, δ_{m0} - дельта функції Кронепера

$$\delta_{n0} = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ 0 & n \neq 0 \end{cases}, \tag{16}$$

$$\delta_{m0} = \begin{cases} 1 & m = 0 \\ 0 & m \neq 0 \end{cases}. \tag{17}$$

Враховуючи, що

$$\tilde{T}(0, 0, 0) = \frac{1}{\lambda \gamma_0^2} \sum_{i=1}^I \frac{2 f_i l_z}{\delta_i \gamma_0} (\gamma_0 \cos \gamma_0 z_i + h \sin \gamma_0 z_i) \sin \gamma_0 \frac{\delta_i}{2}, \tag{18}$$

$$\tilde{T}(n, 0, 0) = \frac{1}{\lambda \pi \left[\left(\frac{n\pi}{l_x} \right)^2 + \gamma_0^2 \right]} \sum_{i=1}^I \frac{4 f_i l_x l_z}{n \alpha_i \delta_i \gamma_0} \cos \frac{n\pi x_i}{l_x} \sin \frac{n\pi \alpha_i}{2 l_x} * \tag{19}$$

$$* (\gamma_0 \cos \gamma_0 z_i + h \sin \gamma_0 z_i) \sin \gamma_0 \frac{\delta_i}{2}$$

$$\tilde{T}(0, m, 0) = \frac{1}{\lambda\pi \left[\left(\frac{n\pi}{l_y} \right)^2 + \gamma_0^2 \right]} \sum_{i=1}^I \frac{4f_i l_y l_z}{n\beta_i \delta_i \gamma_0} \cos \frac{m\pi y_i}{l_y} \sin \frac{m\pi \beta_i}{2l_y} * \quad (20)$$

$$*(\gamma_0 \cos \gamma_0 z_i + h \sin \gamma_0 z_i) \sin \gamma_0 \frac{\delta_i}{2}$$

$$\tilde{T}(0, 0, k) = \frac{1}{\lambda\gamma_k^2} \sum_{i=1}^I \frac{2f_i l_z}{\delta_i \gamma_k} (\gamma_k \cos \gamma_k z_i + h \sin \gamma_k z_i) \sin \gamma_k \frac{\delta_i}{2}, \quad (21)$$

формула розрахунків температури у будь-якій точці об'єму перетворювача магнітного поля приймає вигляд

$$T(x, y, z) = T_c + \frac{2}{\lambda\gamma_0^3 l_x l_y v_0} \sum_{i=1}^I \frac{f_i}{\delta_i} (\gamma_0 \cos \gamma_0 z_i + h \sin \gamma_0 z_i) \sin \gamma_0 \frac{\delta_i}{2} (\gamma_0 \cos \gamma_0 z_i + h \sin \gamma_0 z_i) +$$

$$+ \frac{4}{\lambda\gamma_0 \pi l_y v_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \left[\left(\frac{n\pi}{l_x} \right)^2 + \gamma_0^2 \right]} \sum_{i=1}^I \frac{f_i}{\alpha_i \delta_i} \cos \frac{n\pi x_i}{l_x} \sin \frac{n\pi \alpha_i}{2l_x} (\gamma_0 \cos \gamma_0 z_i + h \sin \gamma_0 z_i) *$$

$$* \sin \gamma_0 \frac{\delta_i}{2} \cos \frac{n\pi x}{l_x} (\gamma_0 \cos \gamma_0 z + h \sin \gamma_0 z) + \frac{4}{\lambda\gamma_0 \pi l_x v_0} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m \left[\left(\frac{m\pi}{l_y} \right)^2 + \gamma_0^2 \right]} *$$

$$\sum_{i=1}^I \frac{f_i}{\beta_i \delta_i} \cos \frac{m\pi y}{l_y} \sin \frac{m\pi \beta_i}{2l_y} (\gamma_0 \cos \gamma_0 z_i + h \sin \gamma_0 z_i) \sin \gamma_0 \frac{\delta_i}{2} \cos \frac{m\pi y}{l_y} *$$

$$*(\gamma_0 \cos \gamma_0 z + h \sin \gamma_0 z) + \frac{2}{\lambda l_x l_y} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\gamma_k^2 v_k^2} \sum_{i=1}^I \frac{f_i}{\delta_i} (\gamma_k \cos \gamma_k z_i + h \sin \gamma_k z_i) \sin \gamma_k \frac{\delta_i}{2} *$$

$$*(\gamma_k \cos \gamma_k z + h \sin \gamma_k z) + \frac{64}{\lambda\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos \frac{n\pi x}{l_x} \cos \frac{m\pi y}{l_y} (\gamma_k \cos \gamma_k z + h \sin \gamma_k z)}{nm\gamma_k \left[\left(\frac{n\pi}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{l_y} \right)^2 + \gamma_k^2 \right]} *$$

$$* \sum_{i=1}^I \frac{f_i}{v_i} \cos \frac{n\pi x_i}{l_x} \sin \frac{n\pi \alpha_i}{2l_x} \cos \frac{m\pi y_i}{l_y} \sin \frac{m\pi \beta_i}{2l_y} (\gamma_k \cos \gamma_k z_i + h \sin \gamma_k z_i) \sin \gamma_k \frac{\delta_i}{2}, \quad (22)$$

де T_c - температура навколишнього середовища,

$$\gamma_0 = 2l_z h + (h^2 + \gamma_0^2) l_z^2, \quad (23)$$

$$\gamma_k = 2l_z h + (h^2 + \gamma_k^2) l_z^2, \quad (24)$$

Ряд (22) є тригонометричним рядом, який швидко сходиться, тому при його розрахунках кількість членів ряду обмежується числами $N = 2^r$, $M = 2^d$, $K = 2^e$, де r, d, e – цілі числа, які обираються виходячи з вимог точності розрахунків. Такий вибір N, M, K дозволяє використовувати швидкі перетворення Фур'є при розрахунках температури.

Геометричні розміри контрольованої інтегральної схеми перетворювача і її активних елементів, значення коефіцієнтів теплопровідності матеріалу і коефіцієнтів тепловіддачі з її поверхні, кількість активних елементів і координати їх центрів визначаються з конструкції перетворювача. Для визначення кільк-

кості невідомих потужностей тепловиділення $f_i (i = 1, \dots, I$ де I – кількість джерел тепла) підставляють дискретні значення температури у ліву частину формули (22) при цьому обмежуючись кінцевим числом складових ряду у правій частині (22). В результаті отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих потужностей тепловиділення. Температура на поверхні активних елементів перетворювача визначається рівнянням

$$\begin{aligned}
 T(x_p, y_p, 0) = & T_c + \frac{2}{\lambda \gamma_0^3 l_x l_y v_0} \sum_{i=1}^I \frac{f_i \gamma_0}{\delta_i} (\gamma_0 \cos \gamma_0 z_i + h \sin \gamma_0 z_i) \sin \gamma_0 \frac{\delta_i}{2} + \frac{4}{\lambda \gamma_0 \pi l_y v_0} * \\
 & * \sum_{n=1}^N \frac{\cos \frac{n\pi x_p}{l_x}}{n \left[\left(\frac{n\pi}{l_x} \right)^2 + \gamma_0^2 \right]} \sum_{i=1}^I \frac{f_i \gamma_0}{\alpha_i \delta_i} \cos \frac{n\pi x_i}{l_x} \sin \frac{n\pi \alpha_i}{2l_x} (\gamma_0 \cos \gamma_0 z_i + h \sin \gamma_0 z_i) \sin \gamma_0 \frac{\delta_i}{2} + \\
 & + \frac{4}{\lambda \gamma_0 \pi l_x v_0} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos \frac{m\pi y_p}{l_y}}{m \left[\left(\frac{m\pi}{l_y} \right)^2 + \gamma_0^2 \right]} \sum_{i=1}^I \frac{f_i \gamma_0}{\beta_i \delta_i} \cos \frac{m\pi y_i}{l_y} \sin \frac{m\pi \beta_i}{2l_y} (\gamma_0 \cos \gamma_0 z_i + h \sin \gamma_0 z_i) * \\
 & * \sin \gamma_0 \frac{\delta_i}{2} + \frac{2}{\lambda l_x l_y} \sum_{k=1}^K \frac{\gamma_k}{\gamma_k^2 v_k^2} \sum_{i=1}^I \frac{f_i}{\delta_i} (\gamma_k \cos \gamma_k z_i + h \sin \gamma_k z_i) \sin \gamma_k \frac{\delta_i}{2} + \\
 & + \frac{64}{\lambda \pi^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \frac{\gamma_k \cos \frac{n\pi x_p}{l_x} \cos \frac{m\pi y_p}{l_y}}{nmv_k \left[\left(\frac{n\pi}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{l_y} \right)^2 + \gamma_k^2 \right]} \sum_{i=1}^I \frac{f_i}{v_i} \cos \frac{n\pi x_i}{l_x} \sin \frac{n\pi \alpha_i}{2l_x} * \\
 & * \cos \frac{m\pi y_i}{l_y} \sin \frac{m\pi \beta_i}{2l_y} (\gamma_k \cos \gamma_k z_i + h \sin \gamma_k z_i) \sin \gamma_k \frac{\delta_i}{2} \quad , \quad (p = 1, 2, 3 \dots p),
 \end{aligned} \tag{25}$$

де p – кількість активних елементів перетворювача.

При відсутності конвективного теплообміну між поверхнею мікроелектронного перетворювача і навколишнім середовищем можна записати

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0, \quad \text{при } (x, y) \in S_i, \tag{26}$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \text{при } (x, y) \in S_i, \tag{27}$$

де h – товщина активного елемента перетворювача, S_i – площа, яку займає i -ий елемент. Отже, тепла модель мікроелектронного перетворювача при стаціонарному тепловому режимі описується системою рівнянь (22)-(27).

На рис.2 подано температурне поле мікроелектронного перетворювача, яке має вигляд кривих з однаковою зміною температури по площі інтегральної схеми. Криві показують температуру перегріву у градусах Цельсія. Конструктивні параметри перетворювача мають наступні розміри: інтегральна схема має прямокутну форму 1000x800 мкм, товщина каналу польових транзисторів дорівнює 3 мкм. Довжина резистора дорівнює 130 мкм, ширина – 26 мкм, а товщина – 6 мкм. Номінал опору складає 4,7 кОм. Максимальна потужність, яка розсіюється транзисторами складає 20 мВт резистором 30 мВт. Як видно з рис.2, максимальний перегрів області транзисторів і резистора, для яких утруднений відвід тепла на корпус перетворювача.

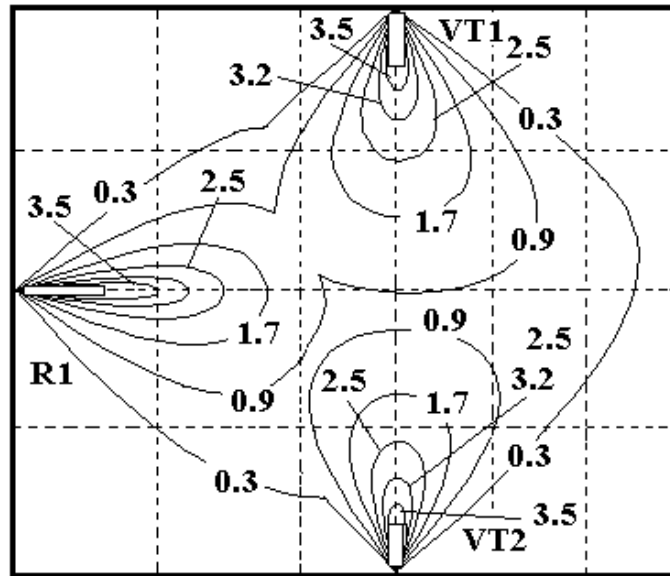


Рис.2. Температурне поле мікроелектронного перетворювача

Рішення двовимірного нестационарного рівняння теплопровідності, яке має вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (28)$$

при наступних початкових і граничних умовах

$$\begin{aligned} T|_{t=0} = T_c, \quad T(x)|_{y=0} = 0, \quad T(y)|_{x=0} = 0, \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial z}|_{z=h} = 0, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z}|_{z=0} = 0. \end{aligned} \quad (29)$$

Дозволяє визначити параметри перехідного процесу, який відтворює залежність температури від часу для різних ділянок поверхні інтегральної схеми перетворювача. Розв'язок рівняння (28) описується виразом [12]

$$T(x, y, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi, \eta) \frac{1}{2a\sqrt{\pi t}} e^{-\frac{(\xi-x)^2 - (\eta-y)^2}{4a^2 t}} d\xi d\eta, \quad (30)$$

де $a = c\rho/\lambda$, t – час.

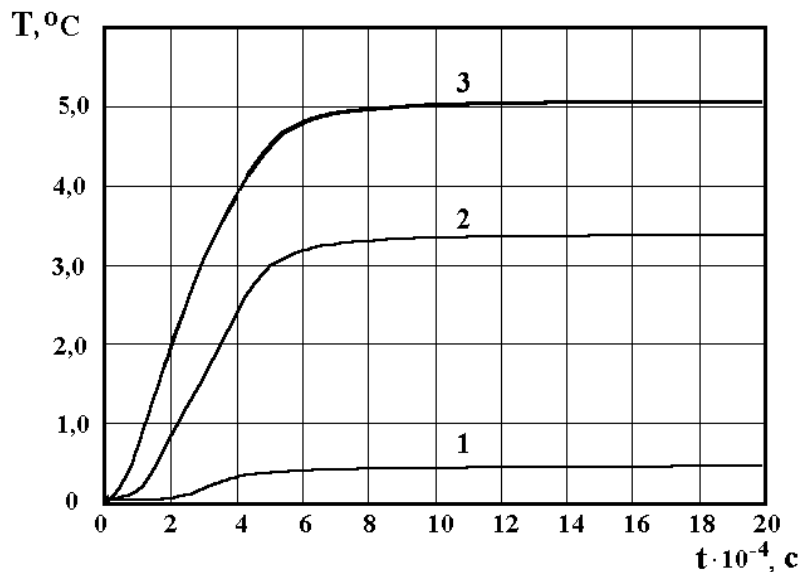


Рис.3. Перехідний процес теплового режиму перетворювача

На рис.3 подані розрахунки нестационарного теплового режиму мікроелектронного перетворювача. Час досягнення усталеного режиму не перевищує $2 \cdot 10^{-3}$ с. При цьому максимальна температура перегріву для елементів інтегральної схеми перетворювача не перевищує $5,1^{\circ}\text{C}$. Розрахунки температурного поля і перехідного процесу зроблені за допомогою програми "Matlab 5.3" [14].

ВИСНОВКИ

Проведено моделювання температурних полів мікроелектронного перетворювача магнітного поля на основі теплової моделі за допомогою розв'язку рівняння теплопровідності, що дозволило визначити зони перетворювача, які мають максимальний перегрів, і оптимізувати їх конструкцію.

ЛІТЕРАТУРА

1. Осадчук В.С., Осадчук Е.В., Осадчук А.В. Полупроводниковый датчик магнитного поля Патент Российской Федерации №2068568, 1996. Бюл. №30.
2. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Дослідження магнітного частотного перетворювача на основі планарного біполярного і польового транзисторів з від'ємним опором // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. –1999. -№1. –С.80-85.
3. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Математична модель частотного магнітного перетворювача на основі польових транзисторів з керувальним р-п переходом // Вісник ВПІ. –2000. -№2. –С.77-81.
4. Ваганов В.И. Измерительные тензопреобразователи. –М.: Энергоатомиздат, -1983. –136 с.
5. Красильникова В.В. Моделирование тепловых режимов интегральных тензопреобразователей // Приборы и системы управления. –1991. №7. –С.16-17.
6. Красильникова В.В. Расчет температурного поля интегральных тензопреобразователей. Датчики на основе технологии микроэлектроники: материалы конференции. –М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1986. С.53-56.
7. Ваганов В.И., Носкин А.Б. Исследование зависимости характеристик интегральных тензопреобразователей от потребляемой мощности // Приборы и системы управления. –1981. -№3. –С.26-28.
8. Bodea M., Jonescu M., Silard A., Visan H. Determinarea analitica a distributilor stalonare de temperatura in circuitele monolitice. Automatica si Electronica, N1, vol.26, 1982. –P.8-13.
9. Осадчук В.С., Паламарчук Е.А., Стронский В.В., Яровенко А.Г. Способ теплового контроля качества объёмных интегральных схем. Авт. Свид. СССР. Кл. G 06 F 15/46, №1675908, 1991. Бюл. №33.
10. Черняев В.И. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. –М.: Радио и связь, 1987. –464 с.
11. Лыков А.В. Теория теплопроводности. –М.: Высшая школа, 1967. –596 с.
12. Смирнов М.М. Дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка. –М.: Наука, 1964. –205 с.
13. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. –М.: Наука, 1981. –718 с.
14. Потемкин В.Г. Система инженерных и научных расчетов Matlab 5.x. В двух томах. Том 1. –М.: Диалог-МИФИ, 1999. -366 с.