

## ТЕХНОЛОГІЯ ТА КОНСТРУЮВАННЯ РАДІОАПАРАТУРИ

УДК 621.396.67

### ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

*Зінковський Ю.Ф., д.т.н., професор, Уваров Б.М., д.т.н., професор  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

#### Вступ. Формулювання проблеми

Однією з важливих, а іноді й визначальною характеристикою радіоелектронної апаратури (РЕА) є її надійність, яку необхідно забезпечити у реальній конструкції радіотехнічного пристрою (РТП), а досягнення високих показників надійності повинно бути передбачено ще на етапах проектування. Показники надійності РЕА великою мірою визначаються відповідними показниками "електронної" структури РЕА — її елементної бази, до складу якої у першу чергу слід віднести напівпровідникові елементи (мікросхеми — МС, діоди, транзистори), резистори, конденсатори. Дуже часто суттєвий вклад у показники надійності РТП можуть внести такі функціональні вузли, як котушки індуктивності та трансформатори.

У процесі проектування показники надійності (імовірність безвідмовної роботи, технічний ресурс та ін.) РТП та їх електрорадіоелементів (ЕРЕ) розраховують згідно зі стандартами за моделлю  $DN$ -розподілу (дифузійного немонотонного) [1,2]:

$$P(x) = \Phi\left(\frac{1-x}{v\sqrt{x}}\right) + e^{\frac{2}{v^2}} \Phi\left(-\frac{1+x}{v\sqrt{x}}\right) \quad (1)$$

де  $\Phi(u)$  — функція нормального розподілу.

Відрізок часу, який повністю відповідає функціональній придатності об'єкту, вважають базовим й позначають  $\mu$ ; якщо реальний час  $\tau$  роботи технічного об'єкту відрізняється від  $\mu$ , вводять відносний час роботи  $x = \tau / \mu$ ;  $v$  — коефіцієнт варіації розподілу відмов.

Як показали дослідження,  $DN$ -розподіл суттєво точніше відображає типові процеси деградації у ЕРЕ, ніж експоненціальний [3,4]. Причому для інтегральних мікросхем (ІС) середнє напрацювання на відмову, одержане за експоненціальним розподілом, може відрізнятися від точного (бути більшим), що визначено за  $DN$ -розподілом, у сотні разів [4].

Розрахунок параметрів надійності окремих радіоелементів провадять згідно з математичними моделями [5,6]:

$$\lambda_p = \lambda_0 K_p \times \prod_{i=1}^n K_i, \quad (2)$$

де  $\lambda_p$  — робоча (експлуатаційна) інтенсивність відмов елемента,  $\lambda_0$  — вихідна (базова) інтенсивність відмов за номінального електричного навантаження та нормальної температури оточуючого середовища  $t_{oc} = 25^\circ\text{C}$ ;  $K_p$  — коефіцієнт режиму, який подають функцією температури  $t$  та коефіцієнту навантаження  $\alpha$ :  $K_p = f(t, \alpha)$ ;  $K_i$  — коефіцієнти, які враховують зміну експлуатаційної інтенсивності відмов як функцій різних факторів.

Кількість окремих РЕ та функціональних вузлів (ФВ) у РТП може досягати сотень, а для складних РТП навіть тисяч, тому для розрахунків показників надійності пристроїв РЕА необхідно створювати програмні модулі об'єктно-орієнтованих систем автоматизованого проектування (САПР).

#### Математичні моделі показників надійності

Вирази коефіцієнтів режиму  $K_p$  у математичних моделях для інтегральних мікросхем (ІС) мають вигляд:

$$K_p = A \cdot \exp[B(t + 273)], \quad (3)$$

де  $A$  та  $B$  — константи, які визначені для відповідних груп ІС.

Інші особливості конкретних ІС (напруга живлення, тип корпусу, степінь жорсткості умов експлуатації і т.п.) враховуються у моделі (2) коефіцієнтами  $K_i$ .

Більш складні і деталізовані вирази  $K_p$  у моделях для дискретних напівпровідникових пристроїв (НПП) — транзисторів, діодів.

Для кремнієвих НПП:

$$K_p = A \cdot \exp\left[\frac{N_T}{\varphi} + \left(\frac{\varphi}{T_M}\right)^L\right]; \quad \varphi = 273 + t + (175 - t_{\text{пм}}) + \Delta t \cdot K_{\text{ел}} \left(\frac{t_{\text{пм}} - t_{\text{зн}}}{150}\right), \quad (4)$$

де  $A$ ,  $N_T$ ,  $T_M$ ,  $L$ ,  $\Delta t$  — сталі моделі;  $K_{\text{ел}}$  — відношення робочого електричного навантаження до максимально допустимого;  $t_{\text{зн}}$  — максимальна температура, для якої температура переходу не перевищує максимальну  $t_{\text{пм}}$ .

Для резисторів:

$$K_p = A \cdot \exp\left[B\left(\frac{t + 273}{N_t}\right)\right]^G \exp\left[\frac{\alpha}{N_s} \cdot \left(\frac{t + 273}{273}\right)^J\right]^H, \quad (5)$$

де  $A, B, N_t, G, N_s, J, H$  — сталі моделі;  $\alpha$  — відношення робочої потужності розсіювання резистора до його номінальної.

Для конденсаторів:

$$K_p = A \cdot \left[ \left( \frac{\alpha}{N_s} \right)^H + 1 \right] \cdot \exp \left[ B \left( \frac{t + 273}{N_t} \right)^G \right], \quad (6)$$

де  $A, B, N_t, G, N_s, H$  — сталі моделі;  $\alpha$  — відношення робочої напруги на конденсаторі до її номінальної.

Для трансформаторів:

$$K_p = A \cdot \exp \left[ \left( \frac{t_m + 273}{T_m} \right)^G \right], \quad (7)$$

де  $A, G, T_m$  — сталі моделі;  $t_m$  — температура максимально нагрітої точки трансформатора:  $t_m = t + t_{\text{п}}$ ;  $t_{\text{п}}$  — температура перегріву:  $t_{\text{п}} = 0,5 t_{\text{т}} \cdot (\alpha^2 + 1)$ ,  $t_{\text{т}}$  — максимально допустима за технічними умовами температура.

У технічній літературі для визначення  $K_p$  наводять також відповідні таблиці (іноді їх замінюють графіками), що охоплюють діапазон робочих температур  $t$  та значень коефіцієнтів навантажень  $\alpha$ . Але для програмних модулів САПР використання таблиць вимагає великих масивів пам'яті, а також створення інтерполяційних підпрограм (найчастіше — сплайнових); графіки для визначення  $K_p$  у САПР взагалі непридатні.

Тому у САПР найбільш раціонально використовувати аналітичні моделі (3) — (7).

### **Визначення імовірності безвідмовної роботи РЕА**

Метою розрахунків надійності будь-якого об'єкту звичайно є визначення ймовірності безвідмовної роботи  $P(\tau)$  на протязі відрізка часу

$0 < \tau < T$ , де символом  $T$  позначають ресурс, або середній термін служби, або наробіток до відмови.

Реальні процеси характеризують також коефіцієнтами варіації  $v$  параметрів — відношенням середньоквадратичного відхилення спараметрудо його середнього значення  $\bar{z}$ :  $v = s/\bar{z}$ . Рекомендовані стандартом [2] значення коефіцієнтів варіації факторів — електричних процесів (електролізу, міграції зарядів, електродифузії), що призводять до руйнації напівпровідникових приладів, інтегральних схем, конденсаторів, інших виробів електронної техніки — знаходяться у діапазоні  $v = 0,70 \dots 1,5$ . Такі ж значення приймають для розрахунків показників надійності вказаних елементів РТП.

Імовірність безвідмовної роботи  $P(x)$  розраховують за рівнянням (1).

Згідно із стандартом [2], середній наробіток ЕРЕ до відмови  $T_0$  необхідно знаходити з рівняння:

$$\sqrt{\frac{T_0}{2\pi \tau_b^3}} \exp\left[-\frac{(\tau_b - T_0)^2}{2\tau_b T_0}\right] = \lambda_p, \quad (8)$$

де  $\tau_b$  — тривалість випробувань (у годинах), за якою була одержана  $\lambda_0$ .

Для більшості ЕРЕ рекомендований діапазон  $10^4 < \tau_b < 5 \cdot 10^4$ ; для практичних розрахунків можна прийняти  $\tau_b \approx 3 \cdot 10^4$  годин.

Якщо визначена  $\lambda_0$ , згідно з (2) — (7) можна розрахувати  $\lambda_p$  для відповідного ЕРЕ, з рівняння (8) знайти значення  $T_0$ , а з рівняння (1) — імовірність його безвідмовної роботи  $P(\tau)$ .

### Визначення показників надійності у САПР

Проектування РТП за допомогою САПР потребує представлення характеристик та параметрів їх конструкцій у формульному вигляді та у числовій формі. Показники надійності ЕРЕ та електронних ФВ — розрахункові інтенсивності відмов  $\lambda_p$  — визначають, згідно з формулою (1) як добуток експериментально знайдених  $\lambda_0$  та коефіцієнтів  $K_p$  (а також додаткових  $K_i$ ), розрахованих згідно з вищезазначеними моделями.

Використання у програмах САПР значень будь-яких фізичних величин з таблиць можливо за допомогою сплайнової інтерполяції. Сплайновий інтерполятор забезпечує максимальну точність відображення табличних даних, але потребує створення спеціальної програми, а також відносно великого об'єму пам'яті для зберігання даних з відповідної таблиці; крім того, саме інтерполювання вимагає деякого додаткового часу роботи комп'ютера (щоправда, для сучасних потужних комп'ютерів ці витрати пам'яті та робочого часу можуть вважатися незначними). Ці витрати часу можуть стати помітними у процедурах параметричної оптимізації з великим числом обчислювальних циклів. Доцільно сплайнову інтерполяцію застосовувати у програмах з мінімальним числом ітерацій.

У програмах САПР для розв'язання рівнянь, подібних до (8), звичайно використовують ітераційні процедури, але це вимагає додаткових витрат часу на обчислення; останнього можна уникнути, використовуючи апроксимаційні вирази для прямого обчислення необхідних параметрів, без ітераційних процедур.

Значення  $T_0$ , як функції параметрів  $\lambda_p$  та  $\tau_b$  (для  $\tau_b \approx 3 \cdot 10^4$  годин) можна розрахувати за апроксимаційним виразом (з похибкою менше 1%):

$$T_0(\lambda_p) = a \log(\lambda_p) + b; \quad a = -1,574; \quad b = 2,697. \quad (9)$$

Характер апроксимації показаний на рис. 1,  $a$  — на діаграмі наведені графіки: функції  $y = f(x)$  — це точні значення  $T_0$  з рівняння (8), та значення  $T_0$ , розраховані згідно з (9).

Визначивши  $T_0$ , приймають  $\mu = T_0$ , задають необхідний час роботи  $\tau$ , а показники надійності ЕРЕ визначають в залежності від параметра  $x = \tau / \mu$  та коефіцієнта варіації  $v$ .

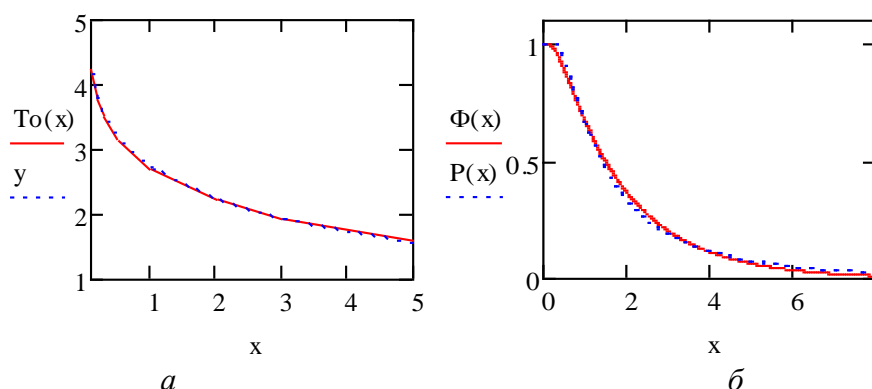


Рис. 1. Апроксимація функцій:  $a$  —  $T_0 = f(\lambda_p)$ ,  $b$  —  $P(x)$

Згідно з моделлю  $DN$ -розподілу, імовірність безвідмовної роботи  $P(x)$  розраховують за рівнянням (1). Для створення програмних модулів САПР найчастіше використовується інтегроване середовище  $C++Builder$ , але в його математичній бібліотеці немає “вбудованої” функції нормального розподілу  $\Phi(x)$ , тому необхідно створити спеціальну підпрограму для обчислення цієї функції. Спростити таку математичну операцію можливо за допомогою апроксимаційного виразу:

$$P(x) = 0,5 \left[ \left( 1 + \tanh(ku_1) \right) + e^{\frac{2}{v^2}} \left( 1 + \tanh(ku_2) \right) \right]; \quad (10)$$

$$u_1 = \frac{1-x}{v\sqrt{x}}; \quad u_2 = -\frac{1+x}{v\sqrt{x}},$$

де, в свою чергу,  $k = 0,31v^2 - 0,915v + 1,554$  для конкретних значень  $v$ , а саме:  $k = 1,065$  для  $v = 0,7$  (це значення найбільш реальне для ЕРЕ);  $k = 0,952$  для  $v = 1$ ;  $k = 0,9$  для  $v = 1,2$ ;  $k = 0,88$  для  $v = 1,5$ .

Порівняння результатів, одержаних за виразами (1) та (10), показане на рис. 1,  $b$ ; похибка апроксимації у діапазоні  $0 < x < 4$  для  $P(x)$  не перевищує 2%.

Показники надійності РЕА можуть бути розраховані за допомогою вищезгаданих математичних моделей, але першоджерелом для цих розрахунків повинні бути значення температур ЕРЕ та ФВ. Значна кількість відмов ЕРЕ у процесі експлуатації є результатом дії зовнішніх та внутрішніх теплових впливів. Внутрішні теплові впливи у РТП — це нагрівання ЕРЕ внаслідок протікання електричних процесів у них, а також взаємний теплообмін між ЕРЕ, ФВ, елементами конструкції.

Таким чином, основою комплексної САПР, яка визначає показники надійності будь-якого РТП, повинні бути програмні модулі визначення температур кожного з елементів електронної структури.

**Визначення температурного режиму конструктивних модулів РЕА**

Основними структурно-конструктивними модулями першого та другого структурно-конструктивних рівнів (СКМ1 та СКМ2) РЕА є мікрозбірки, чарунки та блоки; їх у складі РЕА може бути 75 — 80 %.

Тепловий стаціонарний режим СКМ2 (блока РТП) визначається системою тепловідведення від його внутрішнього об'єму до оточуючого середовища. Узагальненою характеристикою теплового режиму блока є критерій  $K_T$ , що одержаний як відношення абсолютних температур оточуючого середовища  $\theta_0$  до температур ЕРЕ та ФВ  $\theta_{ел}$  (остання не повинна перевищувати допустиму). Схема теплових потоків у блоці РТП наведена на рис.2 [7]:

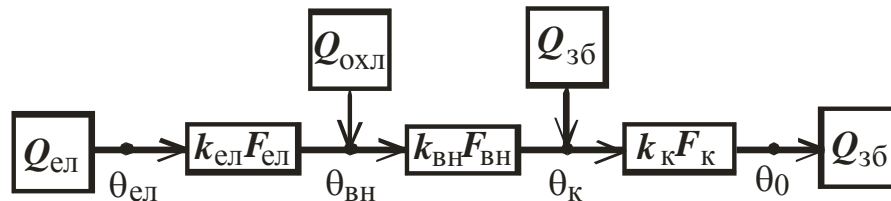


Рис. 2. Схема теплових потоків у РТП

Теплота, що виділяється елементами у внутрішньому об'ємі корпусу  $Q_{ел}$  та теплота, яка потрібна для роботи системи охолодження  $Q_{охл}$  повинні бути відведені у оточуюче середовище:  $Q_{ел} + Q_{охл} = Q_{зб}$ ; теплообмін здійснюється через поверхні тепловідводу елементів  $F_{ел}$ , що виділяють теплоту та зовнішню корпусу  $F_к$ ;  $k_{ел}$ ,  $k_{вн}$ ,  $k_{ст}$ ,  $k_к$  — критерії тепловіддачі від поверхні елементів до внутрішнього об'єму, від внутрішнього об'єму до корпусу, через стінку корпусу, від корпусу до зовнішнього середовища, відповідно.

Критерій  $K_T$  сформований, як функція: температур, які забезпечені у апараті — зовнішньої корпусу  $\theta_к$ , внутрішньої корпусу  $\theta_{вн}$ ; теплоти, що виділяють ЕРЕ  $Q_{ел}$ ; теплоти, що виділяє система підтримки необхідного теплового режиму (вентиляції, охолодження ФВ) у внутрішньому об'ємі  $Q_{охл}$ :

$$K_T^{st} = \frac{\theta_0^{st}}{\theta_{ел}^{st}} = 1 - \frac{Q_{зб}^{st}}{\theta_0^{st} F_к} \left( \frac{F_к}{k_{ел}^{st} F_{ел}^{st}} \cdot \frac{Q_{ел}^{st}}{Q_{зб}^{st}} + \frac{1}{k_{вн}^{st}} + \frac{1}{k_{ст}^{st}} + \frac{1}{k_к^{st}} \right), \quad (11)$$

Якщо розглядати внутрішню структуру блока як паралелепіпед (т.зв. "нагріту зону") з розмірами  $l_1 \times l_2 \times l_3$ , у об'ємі якого виділяється теплота  $Q_\Sigma$ , температуру у будь-якій її точці з координатами  $x, y, z$  можна обчислити за рівнянням [8]:

$$\theta(x, y, z) = \frac{8Q_{\Sigma}}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\mu_n \frac{x}{l_1}\right) \cdot \sin\left(\mu_m \frac{y}{l_2}\right)}{\mu_n \mu_m k^2} \left[ 1 - \frac{\cosh k(0,5l_3 - z)}{\cosh 0,5kl_3} \right] + \theta_0, \quad (12)$$

де  $k^2 = \left[ \left( \frac{\mu_n}{l_1} \right)^2 + \left( \frac{\mu_m}{l_2} \right)^2 \right]$ ;  $\mu_n = (2n-1)\pi$ ;  $\mu_m = (2m-1)\pi$ ;  $n, m$  — числа

натурального ряду;  $\lambda$  — усереднений у об'ємі зони коефіцієнт теплопровідності.

У реальній конструкції РТП нагріта зона найчастіше являє собою сукупність СКМ1 — чарунок, але за усереднену температуру  $\theta_k$  об'єма частини РТП, де знаходиться чарунка, можна прийняти температуру, що обчислена за рівнянням (12).

Конструктивно більшість чарунок можна представити як пластину з розташованими на ній тепловиділяючими елементами (ТВЕ) — мікробірками, ФВ та ЕРЕ, яка охолоджується потоком теплоносія (повітря, газу, рідини); при цьому відводом теплоти від торців пластини можна знехтувати.

У реальних СКМ1 на платі розміщують іноді десятки ТВЕ, тому задача визначення температур суттєво ускладнюється: необхідно врахувати для кожного з них вплив усіх інших на температуру плати, а також взаємний радіаційний теплообмін між ними.

Для багатьох ТВЕ рівняння теплообміну можливо подати у вигляді системи (13) [7].

У рівняннях цієї системи складові:

$\alpha_k F_k (\theta - \theta_c)$  — тепловіддача конвекцією від поверхні ТВЕ до оточуючого середовища;

$\frac{\lambda \delta}{\phi(x, y)} (\theta - \theta_c)$  — тепловіддача кондукцією через основу ТВЕ до пластини;

$c_0 \varepsilon F_p (\theta^4 - \theta_c^4)$  — тепловіддача радіацією від поверхні ТВЕ до оточуючого середовища;

$\sum_{j=1}^m c_0 \varepsilon_{nj} (\phi_{1j} F_1 \theta_1^4 - \phi_{j1} F_j \theta_j^4)$  — радіаційний теплообмін з іншими

ТВЕ;

$\phi(x, y)$  — функція розподілу температури по пластині [8]:

$$\begin{aligned} \phi(x, y) = \frac{\theta(x, y)\lambda d}{Q_i} = \frac{\beta}{Bi} + \frac{4a^2}{b\Delta x} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\cos(\mu_n \xi_0) \sin(\mu_n \Delta \xi / 2)}{\mu_n (Bi_x + \mu_n^2)} \cos(\mu_n \xi) + \\ + \frac{4b^2}{a\Delta y} \sum_{m=2}^{\infty} \frac{\cos(\mu_m \vartheta_0) \sin(\mu_m \Delta \vartheta / 2)}{\mu_m (Bi_y + \mu_m^2)} \cos(\mu_m \vartheta) + \frac{16ab}{\Delta x \Delta y} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=2}^{\infty} \frac{\sin(\mu_n \Delta \xi / 2) \sin(\mu_m \Delta \vartheta / 2)}{Bi + \mu_n^2 / \beta + \beta \mu_m^2} \times \\ \times \cos(\mu_n \xi_0) \cos(\mu_m \vartheta_0) \cos(\mu_n \xi) \cos(\mu_m \vartheta), \end{aligned}$$

де  $\theta(x, y)$  — температура перегріву відносно оточуючого середовища у точці з координатами  $x, y$ ;  $\beta = a/b$ ;  $\Delta x, \Delta y$  — розміри площинки джерела  $Q_i(x, y)$ ;  $\xi, \vartheta$  — відносні координати розрахункової точки на пластині (індекс "0" відноситься до координат джерела теплоти);  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності матеріала пластини;  $\mu_n = \pi(n - 1)$ ,  $\mu_m = \pi(m - 1)$ ;  $Bi$  — критерій Біо, що враховує тепловіддачу від поверхні пластини у оточуючий простір.

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{k1} F_{k1} (\theta_1 - \theta_c) + \frac{\lambda \delta}{\phi_1(x, y)} (\theta_1 - \theta_c) + c_0 \varepsilon_1 F_{p1} (\theta_1^4 - \theta_c^4) - \\ - \sum_{j \neq i}^m \frac{\lambda \delta}{\phi_j(x, y)} (\theta_1 - \theta_j) + \sum_{j=1}^m c_0 \varepsilon_{nj} (\phi_{1j} F_{1j} \theta_1^4 - \phi_{j1} F_{j1} \theta_j^4) - Q_1 = 0; \\ \alpha_{k2} F_{k2} (\theta_2 - \theta_c) + \frac{\lambda \delta}{\phi_2(x, y)} (\theta_2 - \theta_c) + c_0 \varepsilon_2 F_{p2} (\theta_2^4 - \theta_c^4) - \\ - \sum_{j \neq i}^m \frac{\lambda \delta}{\phi_j(x, y)} (\theta_2 - \theta_j) + \sum_{j=1}^m c_0 \varepsilon_{nj} (\phi_{2j} F_{2j} \theta_2^4 - \phi_{j2} F_{j2} \theta_j^4) - Q_2 = 0; \\ \dots \\ \alpha_{km} F_{km} (\theta_m - \theta_c) + \frac{\lambda \delta}{\phi_m(x, y)} (\theta_m - \theta_c) + c_0 \varepsilon_m F_{pm} (\theta_m^4 - \theta_c^4) - \\ - \sum_{j \neq i}^m \frac{\lambda \delta}{\phi_{mj}(x, y)} (\theta_m - \theta_j) + \sum_{j=1}^m c_0 \varepsilon_{nj} (\phi_{mj} F_{mj} \theta_m^4 - \phi_{jm} F_{jm} \theta_j^4) - Q_m = 0. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$



Розв'язання системи рівнянь (13) можливо здійснити тільки числовими методами, а це вимагає створення спеціалізованих програмних модулів САПР.

Методи розрахунків стаціонарних та нестаціонарних теплових режимів мікрозбірок викладені у [7].

Для мікрозбірки з багатьма ЕРЕ (кожний з яких виділяє теплоту), теплове стаціонарне поле описується рівнянням Фур'є, а його розв'язання методом скінченних інтегральних перетворень дає такий вираз для температур у основі мікрозбірки — пластині розмірами  $l \times b \times h$ , для точки з координатами  $x, y$ :

$$\theta^{st}(x, y) = 8 \sum_{i=1}^k \frac{Bi_i^{st}}{\alpha^{st}} \frac{lb}{h^2} \frac{Q_i^{st}}{\Delta x_i \Delta y_i} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} (K_n^{st})^2 (K_m^{st})^2 \frac{I_n^{st}(x_i) I_m^{st}(y_i)}{\mu_n^2 \frac{b}{l} + \mu_m^2 \frac{l}{b} + Bi \frac{lb}{h^2}} \times$$
$$\times \left[ \cos\left(\frac{\mu_n}{l} x\right) + \frac{Bi_1}{\mu_n} \sin\left(\frac{\mu_n}{l} x\right) \right] \cdot \left[ \cos\left(\frac{\mu_m}{b} y\right) + \frac{Bi_2}{\mu_m} \sin\left(\frac{\mu_m}{b} y\right) \right] + \theta_c, \quad (14)$$

де  $K_n, K_m$  — ядра інтегральних перетворень;  $I_n(x_i), I_m(y_i)$  — функції розподілу температур у напрямках  $x$  та  $y$ ; критерії  $Bi, Bi_1, Bi_2$  визначають умови теплообміну на поверхнях пластини;  $\mu_n, \mu_m$  — корені характеристичних рівнянь;  $Q_i$  — теплова потужність ЕРЕ,  $\Delta x_i, \Delta y_i$  — розміри площинок їх основ; (верхні індекси  $st$  позначають імовірнісність — стохастичність — відповідної величини чи функції),  $\theta_c$  — температура оточуючого середовища.

Якщо температури всіх електронних складників РТП визначені, можна розрахувати показники надійності кожного з них, а потім й для всього РТП згідно зі структурною схемою надійності (ССН) у вигляді відповідного сполучення окремих структурних складників [1].

Розглянуті методи й визначають структуру програмних модулів комплексної САПР для розрахунків теплових режимів та показників надійності структурно-конструктивних модулів РТП.

### **Висновки**

1. Визначені вимоги до структури комплексної САПР для розрахунків теплових режимів та показників надійності структурно-конструктивних модулів РТП — блоків, чарунок, мікрозбірок.

2. Показано, що середньоінтегральні температури чарунок у блоках РТП можна розрахувати аналітично, представивши сукупність внутрішніх конструктивних складових РТП як нагріту зону.

3. Для розрахунків температур окремих ЕРЕ та ФВ у чарунках запропоновані математичні моделі у вигляді системи рівнянь, що описують всі види теплообміну: конвективний, кондуктивний, радіаційний. Розв'язання таких систем можливо здійснювати числовими методами за допомогою

об'єктно-орієнтованих програм САПР.

4. Для розрахунків температур у мікробірках запропоновані аналітичні рішення, які враховують відвод теплоти з усіх поверхонь пластини-основи до оточуючого її об'єму.

5. Визначені математичні моделі для аналітичного розрахунку показників надійності складників електронної структури та всього РТП.

#### **Література**

1. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення.
2. ДСТУ 2992-96. Вироби електронної техніки. Методи розрахунку надійності.
3. Стрельников В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем / В. П. Стрельников, А. В. Федухин. — К. : Логос, 2002. — 486 с.
4. Стрельников В.П. Оценка ресурса изделий электронной техники // Математичні машини та системи, 2004. — № 2. — С. 121 — 129.
5. Прытков С.Ф., Горбачева В.М., Мартынова М.Н., Петров Г.А. Надежность электрорадиоизделий / Справочник. — МО РФ и НИИ “Электронстандарт”. — 2004. — 620 с.
6. MilitaryHandBook. Reliability prediction of electronic equipment. — Mil-Hdbk-217F. 1991. — 285 с.
7. Уваров Б.М., Зиньковський Ю.Ф. Оптимізація теплових режимів та надійності конструкцій радіоелектронних засобів з імовірнісними характеристиками — К. : ”Корнійчук”. — 2011. — 248 с.
8. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. — М. : Радио и связь. — 1990. — 312 с.

*Зиньковський Ю.Ф., Уваров Б.М. **Визначення показників надійності в системах автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв.** Розглянуті проблеми розрахунку показників надійності пристроїв радіоелектронної апаратури, які визначаються тепловими режимами. Показано, що такі розрахунки повинні базуватися на методах визначення температур окремих складників електронної структури радіоелектронного пристрою (РТП). Розглянуті методи розрахунків теплових режимів електронних блоків, чарунок, мікробірок. Для усереднених температур чарунок у блоці можуть бути використані аналітичні моделі; для розрахунку температур електрорадіоелементів (ЕРЕ) на пластині чарунки запропонована система рівнянь теплообміну; для розрахунку температур мікробірки — аналітичне рішення. Визначені аналітичні математичні моделі для розрахунків показників надійності ЕРЕ та всього РТП.*

**Ключові слова:** розрахунок теплового режиму, блок, чарунка, мікробірка, математична модель, показник надійності

*Зиньковський Ю.Ф., Уваров Б.М. **Определение показателей надежности в системах автоматизированного проектирования радиоэлектронных устройств.** Рассмотрены проблемы расчета показателей надежности устройств радиоэлектронной аппаратуры, определяемых тепловыми режимами. Показано, что такие расчеты должны базироваться на методах определения температур отдельных составляющих электронной структуры радиотехнического устройства (РТУ). Рассмотрены методы расчетов тепловых режимов электронных блоков, ячеек, микросборок. Для усредненных температур ячеек в блоке могут быть использованы аналитические модели; для расчета температур электрорадиоэлементов (ЭРЭ) на пластине ячейки предложена*

система уравнений теплообмена; для расчета температур микросборки — аналитическое решение. Определены аналитические математические модели для расчетов показателей надежности ЭРЭ и всего РТУ.

**Ключевые слова:** расчет теплового режима, блок, ячейка, микросборка, математическая модель, показатель надежности

*Zinkovskiy Yu.F., Uvarov B.M. **The reliability parameters definition in radioelectronic devices automated designing systems.** The reliability parameters calculating problems for radioelectronic devices determined by thermal modes are considered. It is shown that such calculations should be based on temperature definition methods for separate components of radio engineering device (RED) electronic structure. The thermal modes calculating methods for electronic blocks, cells, microassemblies are considered. The analytical models may be used for the average temperatures of cells in the block; the heat exchange equations system is proposed for radio component temperature estimation on the cell plate; the analytical solution is offered for microassembly temperature estimation. The analytical mathematical models for reliability indexes calculations of radio components and whole RED are determined.*

**Keywords:** thermal mode calculation, block, cell, microassembly, mathematical model, reliability index.