

**ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ  
РАДІОЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ, ЩО ОБУМОВЛЮЮТЬСЯ  
ТЕПЛОВИМИ РЕЖИМАМИ**

*Уваров Б. М., д.т.н. професор, Нікітчук А. В., аспірант  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна, [kyivbmu@ukr.net](mailto:kyivbmu@ukr.net)*

**DETERMINATION OF RELIABILITY PARAMETERS OF RADIOELECTRONIC  
DEVICES, WHICH ARE DETERMINED BY THERMAL MODES**

*Uvarov B. M., Nikitchuk A. V.  
NTUU «KPI», Kyiv, Ukraine*

**Постановка задачі**

Для радіоелектронної апаратури (РЕА) показники надійності є визначальними, тому під час проектування методам їх розрахунків приділяють суттєву увагу.

Статистика свідчить, що 60–75% відмов РЕА у процесі експлуатації визначається зовнішніми дестабілізуючими впливами, до яких у першу чергу слід віднести два: механічні — вібраційні та ударні, й теплові — температури оточуючого середовища. До зовнішніх теплових впливів додаються також і внутрішні — тепловиділення в елементах електронної структури (ЕЕС).

Сумарна дія зовнішніх та внутрішніх теплових факторів може призвести до неприпустимого підвищення температур окремих ЕЕС, тобто до виходу їх з ладу, й у більшості таких випадків — до відмови всього РЕА. Статистика показує, що 40–55% відмов РЕА є наслідком дії теплових факторів.

Температури ЕЕС напряму пов'язані з надійністю останніх, тобто й з надійністю всього РЕА. Визначення температур ЕЕС — складна проблема, по-перше, тому що методи розрахунку теплового поля у структурно-конструктивних модулях (СКМ) РЕА самі по собі достатньо складні, а по-друге — тому, що таких елементів у сучасному РЕА можуть бути тисячі.

Розрахунки температур у СКМ можна провадити за рівняннями, одержаними як аналітичні рішення систем диференціальних рівнянь, що описують теплові процеси у СКМ, якщо останній можна представити геометричним об'єктом правильної форми. Труднощами такого підходу є складність розв'язання такої системи.

Для об'єктів складної геометричної форми використовують сіткові методи, коли модель теплового поля подають як взаємодію сукупності еле-

ментарних площинок чи об'ємів, що знаходяться у взаємному тепловому контакті. Параметри теплового поля знаходять з рівнянь теплового балансу для кожного з таких елементарних об'єктів методами послідовних ітерацій. У цьому випадку для одержання кінцевого результату необхідно провадити велику кількість обчислювальних процедур, що може суттєво загальмувати процес проектування.

Для розрахунків показників надійності, пов'язаних з температурами ЕЕС, існують напівемпіричні моделі, що дають можливість розрахувати, наприклад, імовірність безвідмовної роботи, технічний ресурс кожного з ЕЕС в залежності від його типу, а потім й всього РЕА [1, 2].

Всі ці обставини призводять до необхідності використовувати для розрахунків температур а також показників надійності самих ЕЕС та всього РЕА об'єктно-орієнтовані програмні модулі систем автоматизованого проектування (САПР).

У таких модулях раціонально використовувати аналітичні рішення для розрахунків як самих температур, так й пов'язаних з ними показників надійності – це найбільш ефективно у сенсі спрощення алгоритму та програми модуля, а також швидкості процесу розрахунків.

Задача створення програмних модулів САПР для визначення температур ЕЕС у СКМ РЕА та їх надійності завжди залишається актуальною.

### **Структурно-конструктивні елементи РЕА**

Основними структурно-конструктивними модулями першого рівня (СКМ1) будь-якого РЕА є т.зв. чарунки та мікрозбірки (МЗБ) — функціонально закінчені модулі, ЕЕС та функціональні вузли (ФВ) яких розміщені на пластмасовій, металевій чи керамічній друкованій платі (ДП). У деяких РЕА у СКМ1 зосереджені всі електромагнітні процеси, відтворення яких й визначає функціональне призначення пристрою; на долю інших елементів конструкції, які приймають участь у підтримці згаданих процесів, залишаються тільки забезпечення електричних зв'язків між модулями; СКМ1 може мати спеціальний каркас, системи тепловідводу та екранування.

У конструктивній ієрархії РЕА СКМ1 входять у склад конструкцій другого рівня — блочних каркасів (СКМ2), а останні — у склад конструкцій найвищого, третього рівня (СКМ3): стелажа, контейнера, пульта. Звичайно захист від зовнішніх механічних та кліматичних дестабілізуючих впливів здійснюють конструкції другого та третього рівня, які обладнують системами вібро-удароізоляції та підтримки необхідного температурного режиму.

У загальному об'ємі всієї різноманітної РЕА СКМ1 складають не менш ніж 67–85% структурних елементів, тому можна вважати, що вони й повинні розглядатися як основні об'єкти, для яких у першу чергу й потрібно визначати температури ЕЕС та показники їх надійності.

### Визначення температур ЕЕС чарунок та мікрозбірок

Теплову модель СКМ1 у більшості випадків можна подати у вигляді теплопровідної пластини з розмірами  $a \times b \times h$ , на якій розташовані тепловідділяючі елементи (ТВЕ) (рис. 1).

Від кожного з ТВЕ 2 тепловий потік  $Q_i$  передається через площинку основи кондукцією до плати 1 СКМ1, а від останньої – конвекцією до оточуючого середовища та елементів конструкції (критерії тепловіддачі  $\alpha$ ).

Від бічної поверхні кожного ТВЕ частина теплоти відводиться конвекцією та радіацією (критерії тепловіддачі  $\alpha$ ) до оточуючого середовища, температура якого  $T_c$ . Додатково у точній моделі необхідно врахувати тепловіддачу від торцевих поверхонь

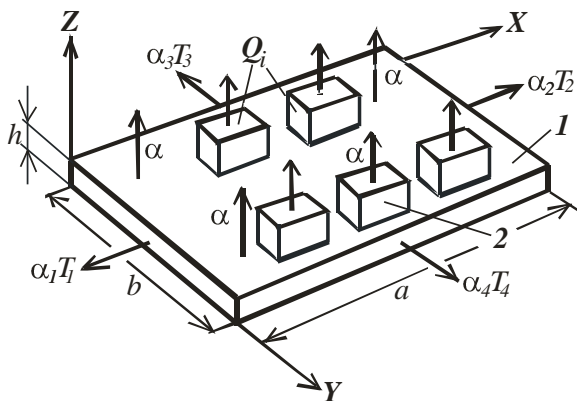


Рис.1. Схема теплових потоків для СКМ1

плати (критерії тепловіддачі  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ) — це може бути суттєвим для МЗб; у МЗб досить часто ці торцеві поверхні мають прямий тепловий контакт з її корпусом чи з іншими елементами конструкції СКМ1, і тому значення  $\alpha_i$  можуть бути різними. Температури елементів конструкції, до яких теплота відводиться з торців пластини, позначені як  $T_1, T_2, T_3, T_4$ .

Якщо товщина пластини  $h$  значна менше її довжини  $a$  чи ширини  $b$  (для більшості плат чарунок чи пластин МЗб), можливо розглядати двомірну задачу, а перепад температур за товщиною пластини можна не враховувати, якщо ж товщина пластини-основи відносно велика, необхідно розглядати трьохмірну модель. Крім того, у МЗб критерії теплопровідності матеріалу основи у різних напрямках можуть бути різними:  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda$  — відповідно до напрямків координатних осей  $X, Y, Z$ .

Мікрозбірки у СКМ дуже часто працюють у нестационарних режимах — розігріву чи охолодження — тому доцільно розглянути модель нестационарного теплового процесу; температури стаціонарного процесу можуть бути одержані за розрахунковими формулами нестационарного як частковий випадок, коли значення часу  $\tau = \infty$ .

Початкове розподілення температур у пластині для нестационарного режиму повинно бути заданим у вигляді функції  $\varphi(x,y)$ ; у деяких випадках ці температури можуть бути однаковими по всій пластині:  $T(x,y) = T_0$ .

Якщо прийняти температуру  $T_c = 0$ , диференціальне рівняння нестационарного процесу для температурного поля пластини можна записати у вигляді:

$$c\rho \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \lambda_2 \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} - \frac{\alpha}{h} T(x, y, \tau) + \sum_{i=1}^n \frac{q_i(x, y)}{h}, \quad (1)$$

де  $T(x, y, \tau)$  — температура точки пластини з координатами  $x, y$  для моменту часу  $\tau$ ;  $c$  — теплоємність матеріалу,  $\rho$  — його густина;  $q_i$  — поверхнева щільність теплового потоку від локальних ТВЕ, координати центрів основ яких  $x_i, y_i$ , розміри основ кожного з них  $\Delta x_i \times \Delta y_i$ :

$$q_i(x_i, y_i) = q_i u(x_i) u(y_i);$$

$$u(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{для } (x_i - 0,5\Delta x_i) \geq x_i \leq (x_i + 0,5\Delta x_i); \\ 0 & \text{для } x_i \leq (x_i - 0,5\Delta x_i), \quad x_i \geq (x_i + 0,5\Delta x_i); \end{cases} \quad (2)$$

$$u(y_i) = \begin{cases} 1 & \text{для } (y_i - 0,5\Delta y_i) \geq y_i \leq (y_i + 0,5\Delta y_i); \\ 0 & \text{для } y_i \leq (y_i - 0,5\Delta y_i), \quad y_i \geq (y_i + 0,5\Delta y_i). \end{cases}$$

Відведення теплоти від торців пластини може здійснюватися різними способами — конвекцією чи кондукцією; у першому випадку необхідно задавати значення критеріїв конвективного теплообміну  $\alpha_i$ , у другому — визначати інтенсивність теплових потоків  $q_i$  з кожного торця.

Граничні умови на торцях пластини за конвективного теплообміну:

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_1 T &= \alpha_1 T_1 \quad \text{за } x = 0; & \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_2 T &= \alpha_2 T_2 \quad \text{за } x = a; \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \alpha_3 T &= \alpha_3 T_3 \quad \text{за } y = 0; & \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \alpha_4 T &= \alpha_4 T_4 \quad \text{за } y = b; \end{aligned} \quad (3)$$

Початкова умова — це розподілення температури за площиною пластини у момент часу  $\tau = 0$ :  $T(x, y, 0) = \varphi(x, y)$ ; у найпростішому випадку  $\varphi(x, y) = 0$  — це стан елементів МЗб після тривалого неробочого періоду.

Аналітичне розв’язання рівняння (1) за умов (3) та  $\varphi(x, y) = 0$  одержано у [4, 5] методом скінченних інтегральних перетворень.

Ядра інтегральних перетворень для двомірної пластини з розмірами  $a \times b \times h$ , тепло від якої відводиться також й від її торців, згідно з [4, 5], мають таку форму:

$$\left. \begin{aligned} K(\mu_n, x) &= \sqrt{\frac{2}{a}} \cdot \frac{\mu_n \cos\left(\frac{\mu_n}{a} x\right) + \text{Bi}_1 \sin\left(\frac{\mu_n}{a} x\right)}{\sqrt{(\mu_n^2 + \text{Bi}_1^2) \cdot \left(1 + \text{Bi}_1 + \frac{\text{Bi}_2}{\mu_n^2 + \text{Bi}_2^2}\right)}}; \\ K(\nu_m, y) &= \sqrt{\frac{2}{b}} \cdot \frac{\nu_m \cos\left(\frac{\nu_m}{b} y\right) + \text{Bi}_3 \sin\left(\frac{\nu_m}{b} y\right)}{\sqrt{(\nu_m^2 + \text{Bi}_3^2) \cdot \left(1 + \text{Bi}_3 + \frac{\text{Bi}_4}{\nu_m^2 + \text{Bi}_4^2}\right)}}; \end{aligned} \right\}$$

де  $\mu_n, \nu_m$  — корені характеристичних рівнянь:

$$\tan \mu_n = \frac{\mu_n (Bi_1 + Bi_2)}{\mu_n^2 - Bi_1 Bi_2}; \quad \tan \nu_m = \frac{\nu_m (Bi_3 + Bi_4)}{\nu_m^2 - Bi_3 Bi_4}. \quad (4)$$

У цих рівняннях критерії Біо:

$$Bi_1 = \frac{\alpha_1 a}{\lambda_1}; \quad Bi_2 = \frac{\alpha_2 a}{\lambda_1}; \quad Bi_3 = \frac{\alpha_3 b}{\lambda_2}; \quad Bi_4 = \frac{\alpha_4 b}{\lambda_2}; \quad Bi = \frac{\alpha h}{\lambda};$$

Рівняння для розрахунку температур є сумою таких складових:

$$T_Q(x, y, \tau) = \sum_{i=1}^k 16 \frac{Bi}{\alpha h^2} \frac{Q_i}{\Delta x_i \Delta y_i} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\varphi_1(\mu_n, x) \varphi_2(\nu_m, y) I_n(x_i) I_m(y_i)}{K_n K_m C_{n,m}} \Phi_{n,m}(\tau); \quad (5)$$

$$T_x(x, y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4}{K_n K_m} \frac{\theta_{1(n,m)}}{C_{n,m}} \varphi_1(\mu_n, x) \varphi_2(\nu_m, y) \Phi_{n,m}(\tau); \quad (6)$$

$$T_y(x, y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4}{K_n K_m} \frac{\theta_{2(n,m)}}{C_{n,m}} \varphi_1(\mu_n, x) \varphi_2(\nu_m, y) \Phi_{n,m}(\tau). \quad (7)$$

У рівняннях (5) – (7):

$Q_i$  – потужності окремих ТВЕ;

$$\varphi_1(\mu_n, x) = \mu_n \cos\left(\frac{\mu_n}{a} x\right) + Bi_1 \sin\left(\frac{\mu_n}{a} x\right);$$

$$\varphi_2(\nu_m, y) = \nu_m \cos\left(\frac{\nu_m}{b} y\right) + Bi_3 \sin\left(\frac{\nu_m}{b} y\right)$$

– функції розподілу температур вздовж осей  $X$  та  $Y$  відповідно;

$$K_n = (\mu_n^2 + Bi_1^2) \left(1 + Bi_1 + \frac{Bi_2}{\mu_n^2 + Bi_2^2}\right);$$

$$K_m = (\nu_m^2 + Bi_3^2) \left(1 + Bi_3 + \frac{Bi_4}{\nu_m^2 + Bi_4^2}\right);$$

$$\Phi_{n,m}(\tau) = 1 - \exp\left\{-\frac{1}{c\rho} \left[ \lambda_1 \left(\frac{\mu_n}{a}\right)^2 + \lambda_2 \left(\frac{\nu_m}{b}\right)^2 + \lambda \frac{Bi}{h^2} \right] \tau\right\}$$

– функція, що враховує вплив часу  $\tau$  на температурне поле пластини.

$$\left. \begin{aligned} \theta_{1,n,m} &= [T_1 \mu_n \text{Bi}_1 + T_2 (\mu_n \cos \mu_n + \text{Bi}_1 \sin \mu_n) \text{Bi}_2] \times \\ &\times \left[ \sin v_m + \frac{\text{Bi}_3}{v_m} (1 - \cos v_m) \right]; \\ \theta_{2,n,m} &= [T_3 v_m \text{Bi}_3 + T_4 (v_m \cos v_m + \text{Bi}_3 \sin v_m) \text{Bi}_4] \times \\ &\times \left[ \sin \mu_n + \frac{\text{Bi}_1}{\mu_n} (1 - \cos \mu_n) \right]; \end{aligned} \right\}$$

Якщо відведення теплоти з торцевих поверхонь незначне, можна прийняти

$$T(x, y, \tau) \approx T_Q(x, y, \tau) + T_c.$$

Параметри теплового поля пластини у стаціонарному режимі одержимо з рівнянь (5 – 7), прийнявши  $\tau = \infty$ , що відповідає значенню  $\Phi_{п,т}(\tau) = 1$ .

### Показники надійності ТВЕ як функції їх температур

Розрахунок параметрів надійності окремих радіоелементів провадять згідно з математичними моделями [2]:

$$\lambda_p = \lambda_0 K_p \times \prod_{i=1}^n K_i, \quad (8)$$

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.

Вирази коефіцієнтів режиму  $K_p$  у математичних моделях для більшості ЕЕС наведені у [2].

Інші особливості конкретних ЕЕС (напряга живлення, степінь жорсткості умов експлуатації і тому подібне) враховуються у моделі (8) коефіцієнтами  $K_i$ , які повинні задаватися у процесі проектування.

### Програмне забезпечення визначення показників надійності

Для автоматизованого розрахунку температур ЕЕС чарунок чи МЗб, а по них — показників надійності — у інтегрованому програмному середовищі *Visual Studio* створена програма *ReliaREA*.

Для розрахунку температур ЕЕС і температурного поля чарунки чи МЗб повинні бути задані значення критеріїв тепловіддачі  $\alpha$  від бічних поверхонь пластини-основи та температура теплоносія  $T_c$  у внутрішньому об'ємі корпусу.

Ці показники одержують з попередніх етапів проектування, на яких визначають форму й розміри чарунок, корпусу РЕА, параметри теплового

режиму у корпусі.

На перших етапах проектування використовують програми **BlTermo1** та **BlTermo2**, описані у [3]; перша призначена для розрахунків макропоказників теплових режимів герметичних та перфорованих блоків, друга — для блоків з щільною компоновкою.

Розрахунок температур ТВЕ, розташованих на пластині з розмірами  $a \times b \times h$ , можна провести за допомогою програми **Termo5**, також описаної у [3]; температури розраховуються за рівняннями (5) – (7). Для врахування тепловідводу від торцевих поверхонь (для МЗб) повинні бути задані критерії  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  та температури елементів конструкції  $T_1, T_2, T_3, T_4$ , до яких відводиться теплота від торців [3].

Комплексна програма **ReliaREA** дозволяє розраховувати для чарунки чи МЗб показники надійності, що визначаються температурами ЕЕС. У ній для розрахунку температур використані модулі програми **Termo5**.

Вхідні дані для програми **ReliaREA** задаються у вікнах програми, або за допомогою завантаження вхідного файлу.

Вікно для введення параметрів плати-основи наведено на рис. 2, у нього потрібно ввести розміри плати: довжину  $a$ , ширину  $b$ , товщину  $h$ ; критерій теплопровідності матеріалу плати; критерії тепловіддачі  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ; температури  $T_1, T_2, T_3, T_4$  — у відповідних комірках.

Задавши параметри плати, на ній необхідно розмістити ТВЕ. Для цього на екран виводиться вікно задання параметрів ТВЕ: розміру елемента, координат положення на платі, теплової потужності. Розташування елемента відображається у вікні параметрів плати (рис. 2). Аналогічно на плату послідовно додається решта елементів. У програмі також передбачена можливість редагування параметрів ЕЕС та плат.

Якщо плат декілька, їх розраховують послідовно, за допомогою кнопки «Додати» (рис. 2).

Після введення параметрів останнього ЕЕС програмні модулі (аналогічні модулям програми **Termo5**) розраховують температури кожного ЕЕС та записують їх у файл результатів.

Для розрахунку показників надійності у наступному вікні (рис. 3) необхідно для кожного ЕЕС ввести його тип (з додатковими ознаками, які завжди є), коефіцієнти електричного навантаження  $K_n$  та додаткові коефіцієнти впливу  $K_i$ . Температура кожного ЕЕС розраховується модулями програми **Termo5** та вноситься у відповідну комірку вікна рис. 3.

У самій програмі **ReliaREA** записана база даних (БД) ЕЕС, що найчастіше застосовують у електричних схемах РЕА:

- резисторів ти-пів Р, С, РП, СП, ПП, КМТ, ММТ, СТ, ТР, 301-319, НР, Б, ПР ;
- конденсаторів типів: К, СГМ, МБГ, ФТ, КТ, Б, КС, КБП;
- трансформаторів типів ТА, ТН, ТО, ТВ, ТП, БТИ, МТИ, ММТИ, ТИ,

- ТИИ, ТИМ, ТИР, ФИТ, ГХ, ММТС, Т, ТВЛ,ТНЧ, ТОТ, ТУМ, ТФ;  
- напівпровідникових приладів типів Д, 2Д, 2Ц, 2В, 2ДС, 2С, 2Т, 1НТ, 2ТС, 2ПС, 2П, 3П, 2У, 2А, 3А;  
- інтегральних мікросхем.

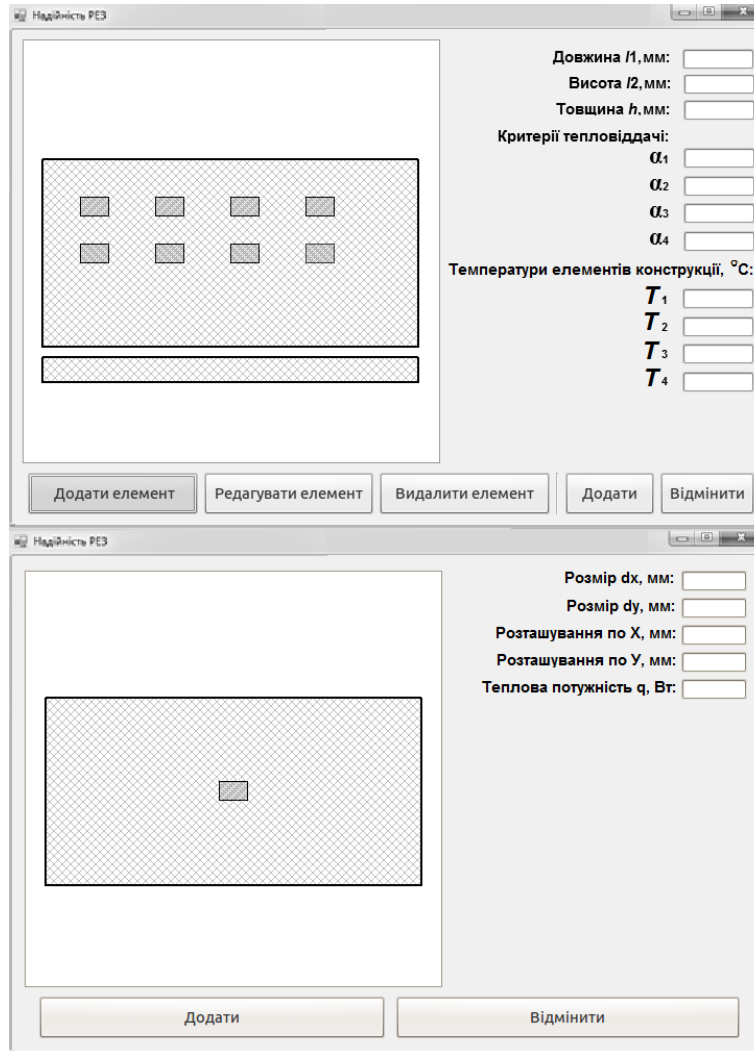


Рис. 2. Задання параметрів плати та елементів на платі

Згідно з цими даними, а також відповідними математичними моделями (які знаходяться в БД), програма розраховує коефіцієнт режиму  $K_p$ . Коефіцієнти впливу  $K_i$  додаються за допомогою натискання кнопки із знаком «+».

У комірках «Елементи», «Група», «Тип елемента» (рис.3) потрібно обрати з БД згідно з електричною схемою потрібний елемент. Наприклад, оберемо «Резистори», група «Металодіелектричні» та тип «Р1-1». Значення інтенсивності відмов для обраного елемента знаходяться у БД, програма їх визначає сама.

Якщо для групи однакових ЕЕС значення параметрів  $K_H$ ,  $T$  та  $K_i$  суттєво не відрізняються, число таких ЕЕС можна задати загальною групою, у комірці «Кількість елементів». У це ж вікно послідовно необхідно ввести параметри всіх ЕЕС.



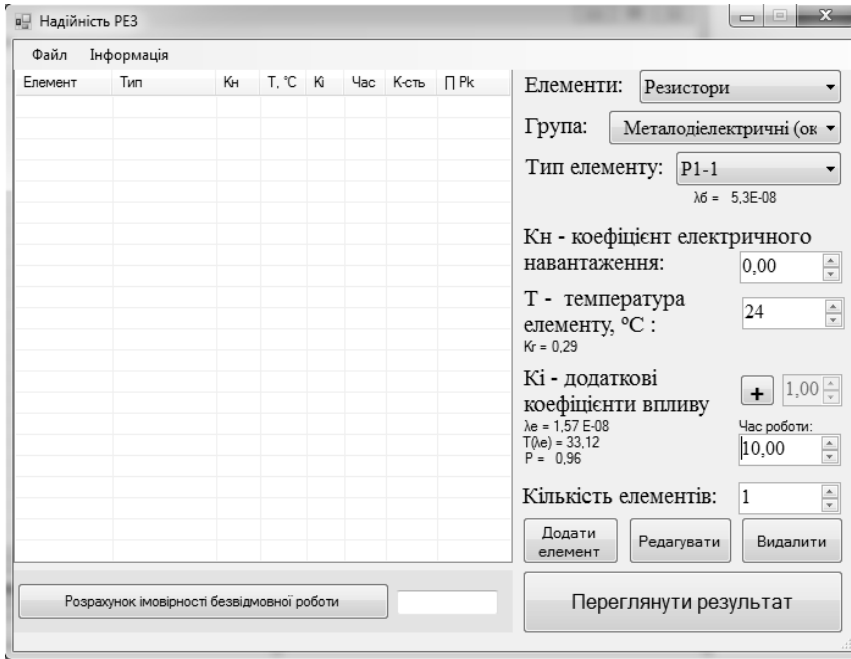


Рис. 3. Введення параметрів елементів

Після вибору всіх параметрів і заповнення всіх комірок, для додавання елемента до складу пристрою необхідно натиснути кнопку «Додати елемент» у вікні. Програмно передбачено редагування параметрів та видалення доданих елементів.

Отримані температури використовуються у про-

грамі для розрахунку імовірності безвідмовної роботи кожного ЕЕС згідно з моделлю *DN*-розподілу (дифузійного немонотонного) [1]:

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

де

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

– функція нормального розподілу;  $\tau$  — час роботи об’єкту;  $x = \tau/\mu$  — відносний час роботи;  $\mu$  — базовий відрізок часу, який повністю відповідає функціональній придатності об’єкту;  $v$  — коефіцієнт варіації розподілу відмов.

Імовірність безвідмовної роботи всього РЕА програма **ReliaREA** розраховує за припущенням, що відмова кожного з ЕЕС призводить до відмови всього РЕА — як добуток від ймовірностей  $P_k(\tau)$  кожного з елементів [1]:

$$P(\tau) = \prod_{k=1}^m P_k(\tau). \quad (9)$$

Результати розрахунків зберігаються у відповідному файлі — це показники надійності: коефіцієнти режиму, експлуатаційні інтенсивності відмов, час напрацювання на відмову, імовірність безвідмовної роботи. Вміст вихідного файлу можливо переглянути за допомогою будь якого вбудованого редактора операційної системи.

### Результати імітаційного моделювання

За допомогою програми *ReliaREA* проведено моделювання температурних режимів та визначення показників надійності чарунки, на склотекстолітовій платі якої встановлені різні ЕЕС — інтегральні мікросхеми, напівпровідникові прилади, резистори, конденсатори, трансформатор.

У якості прикладу наведені результати розрахунків температур та надійності для восьми ЕЕС (у програму можливо ввести до 50 елементів). Схема розташування елементів на платі наведена на рис. 4.

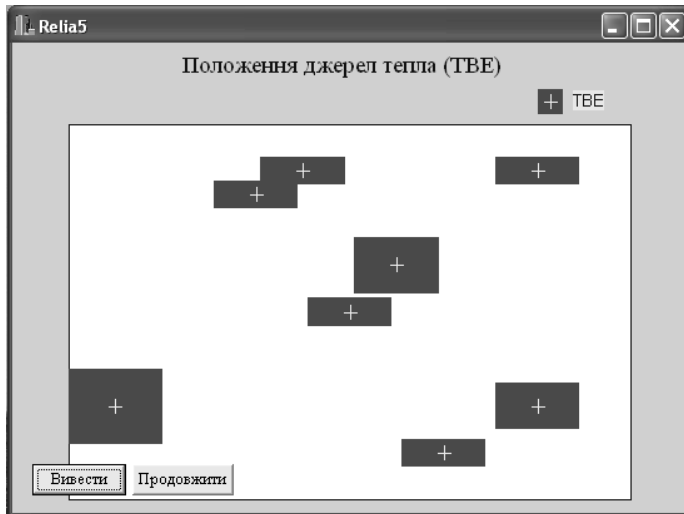


Рис. 4. Розташування ЕЕС на платі

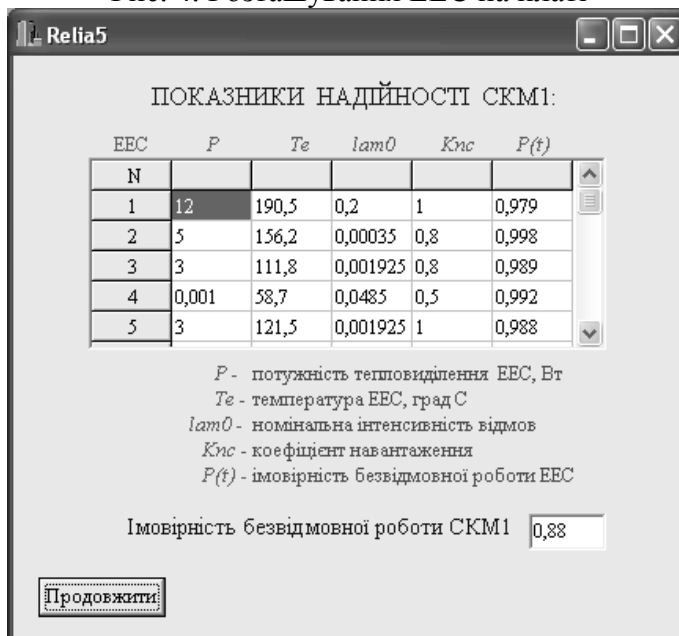


Рис. 5. Результати розрахунків

Результати розрахунків параметрів кожного елементу виводяться у вікні, наведеному на рис. 5 (у вікні показані групи параметрів для перших п'яти елементів): потужності ЕЕС, одержані температури, номінальні (базові) інтенсивності відмов  $\lambda$ , імовірності безвідмовної роботи для кожного з ЕЕС. За формулою (9) для всієї чарунки розраховується імовірність безвідмовної роботи, яка також виводиться у вікні.

### Висновки

Теплові процеси у структурно-конструктивних модулях — чарунках, мікрозбірках — у значній мірі визначають функціональну придатність всього радіоелектронного апарату. Під час проектування показники надійності останнього розраховують згідно з відповідними математичними моделями як функції температур ЕЕС. Внаслідок різноманітності конструкцій РЕА часто виникає необхідність створювати методи розрахунку температур у них, а рівняння для розрахунку температур доцільно одержувати

аналітичним розв'язанням системи диференціальних рівнянь математичної моделі теплового поля.

У сучасному РЕА кількість ЕЕС різної номенклатури може досягати сотень й тисяч, тому їх температури та показники надійності можливо реально розрахувати тільки за допомогою програм САПР, які необхідно створювати та вдосконалювати.

#### Перелік посилань

1. Вироби електронної техніки. Методи розрахунку надійності : ДСТУ 2992-95. – К. : Держстандарт України. – 77 с. – (Національні стандарти України).
2. Надежность электрорадиоизделий / С.Ф. Прытков, В.М. Горбачева, М.Н. Мартынова, Г.А. Петров. – МО РФ и НИИ «Электронстандарт», 2004. – 620 с.
3. Уваров Б.М. Автоматизація визначення показників механічної витривалості, теплових режимів та надійності радіоелектронних апаратів [Електронний ресурс] / Б.М. Уваров. – К. : НТУУ «КПІ», 2013. – 111 с.
4. Лыков А. В. Тепломассообмен / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.
5. Беляев Н.М. Методы теории теплопроводности / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. – М. : Высшая школа, 1982. – 327 с.

#### References

1. DSTU 2992-95. (1996) *Vyrobny elektronnoy tekhniky. Metody rozrakhunku nadiynosti* [State Standard 2992-95. Electronics products. Methods of calculation of reliability]. Kyiv, 77 p.
2. Prytkov S. F., Horbacheva V.M., Martynova M.N. and Petrov H.A. (2004) *Nadezhnost elektroradyoyzdelyi* [The reliability of radio electronic products]. Moscow, НИ «Elektronstandart», 620 p.
3. Uvarov B. M. *Avtomatizatsiia vyznachennja pokaznykiv mekhanichnoji vytryvalosti, teplovykh rezhymiv ta nadiynosti radioelektronnykh aparativ* [Automation of determination of mechanical endurance, thermal modes and reliability of radioelectronic devices]. Kyiv, NTUU "KPI", 2013. 111 p.
4. Lykov A. V. (1978) *Teplomassoobmen* [Heat and Mass Transfer]. Moscow, Energiya Publ., 480 p.
5. Belyaev N. M. and Ryadno A.A. (1982) *Metody teorii teploprovodnosti* [Methods of the theory of heat conduction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 327 p.

*Уваров Б. М., Нікітчук А. В. Визначення показників надійності радіоелектронних апаратів, що обумовлюються тепловими режимами. У роботі розглянуто основні характеристики показників надійності радіоелектронних засобів (РЕЗ), методи їх розрахунку. Запропоновані математичні моделі для визначення параметрів теплового поля та одержані аналітичні рішення для розрахунків температур у мікробірках, які враховують відвід теплоти з усіх поверхонь пластини-основи до оточуючого її об'єму. Описаний комплексний програмний модуль для розрахунків температур елементів електронної структури, встановлених на основі мікробірки, та показників її надійності.*

**Ключові слова:** надійність, РЕЗ, відмова, мікробірка, теплове поле, тепло, показники надійності, автоматизація, розрахунок надійності.

Уваров Б. М., Никитчук А. В. **Определение показателей надежности радиоэлектронных аппаратов, что связаны с тепловыми режимами.** В работе рассмотрены основные характеристики показателей надежности радиоэлектронных средств (РЭС), методы их расчета. Предложены математические модели для определения параметров теплового поля и получены аналитические решения для расчетов температур в микросборках, учитывающие отвод теплоты со всех поверхностей пластины-основы к окружающему ее объему. Описан комплексный программный модуль для расчетов температур элементов электронной структуры, установленных на основе микросборки, и показателей ее надежности.

**Ключевые слова:** надежность, РЭС, отказ, микросборка, тепловое поле, тепло, интенсивность отказов, показатели надежности, автоматизация, расчет надежности.

Uvarov B. M. Nikitchuk A. V. **Determination of reliability parameters of radioelectronic devices determined by thermal modes.**

Statement of the problem. The reliability is important (and sometimes crucial) functional characteristic for RED. So it is necessary to analyze the impact on them of destabilizing external factors - mechanical, temperature, humidity, ionizing radiation.

Structural-design elements REA. SCM are the main objects for which you first need to determine the temperature of the EES and performance reliability.

Determination of the temperature of the EES cells and microassemblies. The basic mathematical models are presented to determine the temperatures of the electronic structure elements of cells and microassemblies.

Indicators of HEE reliability as a function of their temperature. The value of the operational failure rate of most groups RED calculated by mathematical models. These indicators include: basic failure rate, the rate regime, the coefficients that take into account changes in operational failure rate depending on various factors.

Software definition of reliability parameters. The software product allows you to switch from "manual" calculation reliability REDs to a fully automated modeling components. The program is applicable for calculating the reliability and to find a more "sustainable" elements to increase the probability of failure-free operation.

Conclusions. Primary tasks performed in the work are listed.

**Keywords:** reliability, RED, failure, microassembly, thermal field, heat, failure rate, reliability particular, automation, reliability calculation.