

ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО АПАРАТУ, ОБУМОВЛЕНІ ТЕПЛОВИМИ ПРОЦЕСАМИ У НЬОМУ

*Зіньковський Ю. Ф., д.т.н. професор, Уваров Б. М., д.т.н. професор,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна,
kyivbmu@ukr.net*

FUNCTIONAL PARAMETERS OF RADIO-ELECTRONIC SYSTEM STIPULATED BY THERMAL PROCESSES IN IT.

*Zinkovsky Yu. F., Doctor of Engineering, Professor;
Uvarov B. M., Doctor of Engineering, Professor
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

Вступ. Постановка задачі

Функціональні характеристики радіоелектронного апарату (РЕА), наприклад, зображення на екрані монітора, вихідні сигнали каналів відеотракта чи звукових частот, файли з масивами інформації, керуючі сигнали на виході контролера — створюються у апараті як результат зовнішніх керуючих сигналів, дестабілізуючих електромагнітних, механічних та теплових впливів, внутрішніх фізико-хімічних процесів [1].

Функціональні характеристики РЕА можливо розглядати як множину векторів Y_m , а їх сукупністю буде також вектор $Y = [Y_1, \dots, Y_m, \dots, Y_t]^T$ (T — оператор транспонування).

Суттєвий вплив на функціонування РЕА мають внутрішні процеси, що відбуваються у ньому, які також можна подати вектором $P = [P_1, \dots, P_j, \dots, P_q]^T$. Ці внутрішні процеси P можна поділити на дві групи: основні процеси P_1 та процеси P_2 , які є результатом дії основних.

Перші — це підсилення, генерація, передавання та приймання радіо- та інформаційних сигналів; перетворення сигналів: цифро-аналогове, аналого-цифрове, за частотою, фазою; відвод механічної енергії від конструктивних модулів РЕА у віброізоляторах; виникнення механічних напружень у елементах конструкції під час деформацій; тепломасоперенос тощо. Загальні енергетичні витрати на процеси P_1 в усьому РЕА складають 10–25%.

Неідеальність будь-якого енергетичного процесу характеризують коефіцієнтом корисної дії η , для більшості таких процесів $\eta < 1$; наслідком такої неідеальності процесів P_1 є поява процесів групи P_2 . До останніх відносяться: виділення тепла у резистивних плівках й перехідних зонах діодів й транзисторів; зворотний струм у них же; внутрішнє розсіяння енергії у елементах конструкції; електролітичні процеси у конденсаторах; зміни з

часом властивостей конструкційних матеріалів внаслідок їх старіння.

Енергетичні витрати на процеси другої групи складають 75–90% загальних витрат у всьому РЕА, тому доцільно провести аналіз енергетичної досконалості як радіоелектронних пристроїв у цілому, так й окремих елементів їх електронної структури.

Суттєвий вплив на функціонування РЕА мають теплові процеси, що відносяться до групи P_2 , їх наслідком можуть бути відмови апаратури у процесі експлуатації: статистика показує, що доля відмов РЕА, викликаних тепловими факторами, досягає 45–50%. Як правило, показники надійності всього РЕА визначаються температурами ЕЕС, тому необхідні методи розрахунку як самих температур, так й пов'язаних з ними показників надійності.

У даній статті розглянуті методи розрахунку температур ЕЕС у структурно-конструктивних модулях першого конструктивного рівня — чарунках та мікрозбірках.

Коефіцієнти корисної дії структурних елементів РЕА

Енергетичний коефіцієнт корисної дії (ККД) РЕА — це відношення потужності N_F (чи енергії), яка необхідна для виконання його прямого функціонального призначення до загальної потужності N_Σ , яка потрібна для забезпечення функціонування самого РЕА:

$$\eta = N_F / N_\Sigma. \quad (1)$$

Для РЕА N_F це потужність, необхідна для створення фізичних процесів, що відображаються у математичній моделі пристрою функціоналом \mathcal{F} чи компонентами останнього — векторами Z_n .

ККД побутових апаратів на електронних лампах (приймачів, підсилювачів) досить низький — 2,5–6%; низький ККД у великих електронних комплексів — так, для радіолокаційних станцій він не перевищує 1,5–3%. Застосування напівпровідникових пристроїв (НПП) дало можливість суттєво підвищити ККД РЕА: для аналогових мікросхем (МС) їх власний ККД знаходиться у межах 50–65%. Також зріс й ККД РЕА, основними ЕЕС яких стали НПП. Так, ККД підсилювача низької частоти *Denon PMA-520AE* (потужність, яку він споживає від джерела живлення, дорівнює 185 Вт) становить 38%.

Визначення ККД за формулою (1) для ЕЕС нульового функціонального рівня (основних й найбільш розповсюджених) — резисторів, конденсаторів, котушок індуктивності — можна зробити за допомогою схем еквівалентних двополюсників для цих ЕЕС, коли кожний з них представлений як з'єднання ідеальних резистора R , конденсатора C , індуктивності L (рисунок 1) з так званими «паразитними» їх параметрами R_n , C_n , L_n .

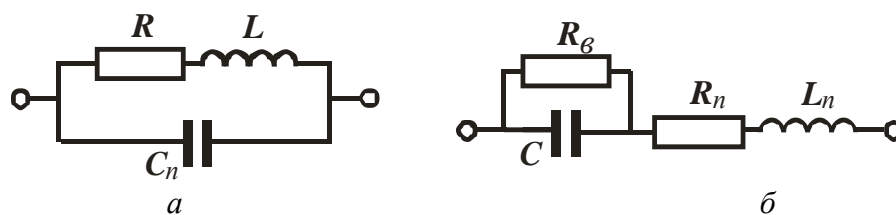


Рис. 1. Еквівалентні двополіусники:

a – для резистора та індуктивності; *б* – для ємності

Для резистора та індуктивності схема еквівалентного двополіусника представлена на рисунку 1, *a*: резистор R та індуктивність L ввімкнені послідовно, а конденсатор C_n позначає паразитну ємність. Згідно з еквівалентною схемою повний імпеданс Z_Σ двополіусника одержимо у вигляді:

$$Z_\Sigma = \frac{R + j\omega L}{1 + j\omega C(R + j\omega L)}, \quad (2)$$

де R — електричний опір резистора, C та L — паразитні ємність та індуктивність, ω — частота гармонійної напруги на вході двополіусника, j — уявна одиниця.

Для резистора ККД у формі (6) як відношення «корисного» імпедансу Z_R до повного Z_Σ :

$$\eta_R = \frac{Z_R}{Z_\Sigma} = \frac{R[1 + j\omega C(R + j\omega L)]}{R + j\omega L},$$

для відносно низької частоти ($\omega \ll 1$) $\eta_R \approx 1$.

Для резистора доцільно розглянути показник енергетичної досконалості — можливість повністю використати його навантажувальну спроможність Q_p , тобто таку, яка повинна визначатися допустимою температурою T_k корпуса резистора, точніше — матеріалу його резистивного шару. Цю температуру орієнтовно можна розрахувати з рівняння теплового балансу для резистора, якщо розглянути процес природного повітряного охолодження (найбільш частий випадок):

$$Q_p = k \cdot S(T_k - T_{oc}),$$

де k — критерій тепловіддачі від поверхні резистора до оточуючого середовища; S — площа поверхні резистора, від якої відводиться теплота; T_{oc} — температура оточуючого середовища.

Для резистора основне функціональне призначення — створення падіння напруги на ньому $U = I \cdot R$ (де I — струм через резистор, R — опір його). Внаслідок проходження струму через резистивний шар у корпусі резистора виділяється теплота $Q = I^2 R$, яка повинна бути відведена до оточуючого середовища.

Наприклад, для широко розповсюджених резисторів МЛТ у технічних умовах визначено, що максимальна температура зовнішнього середовища,

за якої резистори можуть експлуатуватися при повному електричному навантаженні, становить $T_{oc} = +75$ °С.

Для резистора МЛТ-2 (тобто з номінальною тепловою потужністю 2 Вт) це дає змогу розрахувати максимальну допустиму температуру $(T_k)_P \approx 200$ °С. Але якщо T_{oc} менша, електричне навантаження можна збільшити: наприклад, за $T_{oc} = +20$ °С воно може бути $Q_P = 2,9$ Вт. Технічні умови для $T_{oc} = +125$ °С вимагають зменшення Q_P до 0,6 Вт, але розрахунок показує, що за $(T_k)_P \approx 200$ °С для резисторів МЛТ-2 $Q_P = 1,4$ Вт.

Показник енергетичної досконалості для резисторів — це відношення потужності реального електричного навантаження $Q = I^2 R$ до значення Q_P , яке відповідає температурі експлуатації T_{oc} : $\eta_{екв} = Q/Q_P$; значення цього показника залежить від T_{oc} .

Для ЕЕС, індуктивність якого L , повний імпеданс визначається формулою (2), а енергетичний ККД у формі (1):

$$\eta_L = \frac{Z_L}{Z_\Sigma} = \frac{j\omega L [1 + j\omega C (R + j\omega L)]}{R + j\omega L},$$

де R — активний опір, C_n — паразитна індуктивність елемента з індуктивністю L .

Для конденсатора ємністю C еквівалентна схема наведена на рисунку 1, б, де резистор R_g символізує канал струму витічки (суттєвий для електrolітичних конденсаторів та конденсаторів з поганою ізоляцією), R — опір збитків, L_n — паразитна індуктивність конденсатора.

Повний імпеданс для конденсатора:

$$Z_C = j\omega L + R + \frac{R_g \left(\frac{1}{j\omega C} \right)}{R_g + \frac{1}{j\omega C}}.$$

Якщо струмом витіку зневажати (приймавши $R_g \approx \infty$), для конденсатора ККД у формі (1) одержимо у вигляді:

$$\eta_C = \frac{Z_C}{Z_\Sigma} = \frac{1}{1 + j\omega C (R + j\omega L)}.$$

Показник енергетичної досконалості конденсатора, що характеризує його навантажувальну спроможність Q_P , можна визначити подібно тому, як це визначено для аналогічного показника резистора, використавши значення допустимої температури T_k корпуса конденсатора. У технічних умовах на конденсатори наводяться два показника, що визначають умови нормальної його експлуатації: допустима напруга U_P та температура зовнішнього середовища T_{oc} . Для полікарбонатних конденсаторів T_{oc} знаходиться

у межах (– 55... +125) °С, поліімідні та фторопластові можуть експлуатуватися при температурі до +250 °С.

У робочому режимі у корпусі конденсатора ємністю C виділяється теплота Q_a (активна потужність), яка повинна бути відведена у оточуючий простір з температурою T_{oc} ; температура корпусу T_k може бути знайдена з рівняння теплового балансу:

$$Q_a = U_p^2 \omega C \tan(\delta) = kS(T_k - T_{oc}),$$

де ω — частота гармонійної напруги на виводах конденсатора; $\tan(\delta)$ — тангенс кута збитків; k — критерій тепловіддачі від поверхні конденсатора до оточуючого середовища; S — площа поверхні конденсатора, від якої відводиться теплота.

Показником енергетичної досконалості для конденсаторів може бути відношення температури його корпусу T_k у робочому режимі до максимально допустимої температури корпусу $T_{кР}$: $\eta_{екв} = T_k/T_{кР}$; значення цього показника залежить від T_{oc} , також, як й для резисторів.

На жаль, у технічних умовах на конденсатори значення $T_{кР}$ не наводиться; тому показника енергетичної досконалості конденсаторів у вигляді відношення $\eta_{екв} = T_k/T_{кР}$ поки що неможливо визначити.

Внутрішні теплові процеси у РЕА

Функціонування РЕА суттєво залежить від внутрішніх процесів-векторів P та зовнішніх Q . Серед перших значну роль відіграє виділення теплоти у ЕЕС, а серед других — зовнішні теплові впливи. Сукупність цих двох факторів визначає температури ЕЕС, а вони напряду пов'язані з надійністю останніх, тобто й з надійністю всього РЕА. Статистика показує, що 40 – 55% відмов РЕА є наслідком дії теплових факторів. ККД РЕА можуть бути досить малими (іноді меншими 1 %), тому тотальне явище перегріву РЕА за рахунок своєї недосконалості і є причиною більшості її відмов.

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.

У зв'язку з цим розрахунки температур ЕЕС необхідно провадити за допомогою об'єктно-орієнтованих програмних модулів систем автоматизованого проектування (САПР), а для них раціонально використовувати аналітичні рішення, одержані як розв'язання систем диференціальних рівнянь, що описують теплові процеси у СКМ.

Основні структурні елементи РЕА

Основними структурно-конструктивними модулями першого рівня (СКМ1) будь-якого РЕА є т.зв. чарунки та мікрозбірки (МЗБ) — функціо-

нально закінчені модулі, ЕЕС та функціональні вузли (ФВ) яких розміщені на полімерній, 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): шафи, стояка, 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 70–85% структурних елементів, тому можна вважати, що вони й повинні розглядатися як основні об'єкти, для яких у першу чергу й потрібно визначати їх функціональні характеристики.

Теплове поле чарунки та мікробірки

Теплову модель СКМ1 у більшості випадків можна подати у вигляді теплопровідної пластини з розмірами $a \times b \times h$, на якій розташовані тепловиділяючі елементи (ТВЕ), тобто ЕЕС (Рисунок 2).

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 α).

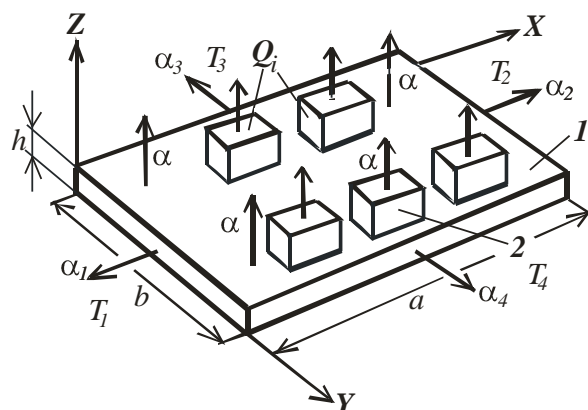


Рисунок 2. Схема теплових потоків для СКМ1

Від бічної поверхні кожного ТВЕ частина теплоти відводиться конвекцією та радіацією (критерії тепловіддачі α) до оточуючого середовища, температура якого T_c . Додатково у моделі необхідно врахувати тепловіддачу від торцових поверхонь плати (критерії тепловіддачі $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$) — це може бути суттєвим для МЗб; у МЗб досить часто ці торцові поверхні

мають прямий тепловий контакт з її корпусом чи з іншими елементами конструкції СКМ1, і тому значення α_i можуть знаходитися у значному діапазоні. 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 аналізувати трьохмірну модель. Крім того, у МЗб критерії теплопровідності матеріалу основи у різних напрямках можуть бути різними (для анізотропного матеріалу): $\lambda_1, \lambda_2, \lambda$ — відповідно до напрямків координатних осей X, Y, Z .

Мікрозбірки у СКМ дуже часто працюють у нестационарних режимах, 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 оточуючого середовища T_c за умовний 0, диференціальне рівняння нестационарного процесу для температурного поля пластини, теплообмін з бічних поверхонь якої визначається критерієм α , можна записати у вигляді:

$$c\rho \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \lambda_2 \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} - \frac{\alpha}{h} T(x, y, \tau) + \sum_{i=1}^n \frac{q_i(x, y)}{h}, \quad (3)$$

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

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

Граничні умови на торцях пластини за конвективного теплообміну:

$$\begin{aligned} -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_1 T &= \alpha_1 T_1 \quad \text{за } x = 0; & \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_2 T &= \alpha_2 T_2 \quad \text{за } x = a; \\ -\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial y} + \alpha_3 T &= \alpha_3 T_3 \quad \text{за } y = 0; & \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial y} + \alpha_4 T &= \alpha_4 T_4 \quad \text{за } y = b; \end{aligned}$$

Початкова умова – це розподілення температури за площиною пласти-

ни 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 (3) одержано 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 [2, 3], мають форму:

$$\left. \begin{aligned} K(\mu_n, x) &= \sqrt{\frac{2}{a}} \cdot \frac{\mu_n \cos\left(\frac{\mu_n}{a} x\right) + \text{Bi}_1 \sin\left(\frac{\mu_n}{a} x\right)}{\sqrt{(\mu_n^2 + \text{Bi}_1^2) \cdot \left(1 + \text{Bi}_1 + \frac{\text{Bi}_2}{\mu_n^2 + \text{Bi}_2^2}\right)}}; \\ K(v_m, y) &= \sqrt{\frac{2}{b}} \cdot \frac{v_m \cos\left(\frac{v_m}{b} y\right) + \text{Bi}_3 \sin\left(\frac{v_m}{b} y\right)}{\sqrt{(v_m^2 + \text{Bi}_3^2) \cdot \left(1 + \text{Bi}_3 + \frac{\text{Bi}_4}{v_m^2 + \text{Bi}_4^2}\right)}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де μ_n, v_m — корені характеристичних рівнянь:

$$\tan \mu_n = \frac{\mu_n (\text{Bi}_1 + \text{Bi}_2)}{\mu_n^2 - \text{Bi}_1 \text{Bi}_2}; \quad \tan v_m = \frac{v_m (\text{Bi}_3 + \text{Bi}_4)}{v_m^2 - \text{Bi}_3 \text{Bi}_4} \quad (5)$$

У цих рівняннях критерії Біо:

$$\text{Bi}_1 = \frac{\alpha_1 a}{\lambda_1}; \quad \text{Bi}_2 = \frac{\alpha_2 a}{\lambda_1}; \quad \text{Bi}_3 = \frac{\alpha_3 b}{\lambda_2}; \quad \text{Bi}_4 = \frac{\alpha_4 b}{\lambda_2};$$

Тепловіддача у поперечному (нормальному до поверхні пластини) напрямку характеризується відповідним критерієм Біо: $\text{Bi} = \frac{\alpha h}{\lambda}$.

Після застосування прямого та зворотного перетворень з ядрами (4) до рівняння (3), одержимо вираз температурного поля пластини у вигляді такої суми (за умови $\varphi(x, y) = 0$):

$$T(x, y, \tau) = T_Q(x, y, \tau) + T_x(x, y, \tau) + T_y(x, y, \tau) + T_c. \quad (6)$$

де окремі складові:

$$T_Q(x, y, \tau) = \sum_{i=1}^k 16 \frac{\text{Bi}_i}{\alpha h^2} \frac{Q_i}{\Delta x_i \Delta y_i} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\varphi_1(\mu_n, x) \varphi_2(v_m, y)}{K_n K_m} \frac{I_n(x_i) I_m(y_i)}{C_{n,m}} \Phi_{n,m}(\tau); \quad (7)$$

$$T_x(x, y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4}{K_n K_m} \frac{\theta_{1(n,m)}}{C_{n,m}} \varphi_1(\mu_n, x) \varphi_2(v_m, y) \Phi_{n,m}(\tau); \quad (8)$$

$$T_y(x, y, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4}{K_n K_m C_{n,m}} \theta_{2(n,m)} \varphi_1(\mu_n, x) \varphi_2(v_m, y) \Phi_{n,m}(\tau). \quad (9)$$

У рівняннях (7) – (9):

Q_i — потужності окремих ТВЕ;

$$\varphi_1(\mu_n, x) = \mu_n \cos\left(\frac{\mu_n}{a} x\right) + Bi_1 \sin\left(\frac{\mu_n}{a} x\right); \quad \varphi_2(v_m, y) = v_m \cos\left(\frac{v_m}{b} y\right) + Bi_3 \sin\left(\frac{v_m}{b} y\right)$$

– функції розподілу температур вздовж осей X та Y відповідно;

$$\left. \begin{aligned} I_n(x_i) &= \left[\cos\left(\frac{\mu_n}{a} x_i\right) + \frac{Bi_1}{\mu_n} \sin\left(\frac{\mu_n}{a} x_i\right) \right] \sin\left(\frac{\mu_n}{a} \frac{\Delta x_i}{2}\right); \\ I_m(y_i) &= \left[\cos\left(\frac{v_m}{b} y_i\right) + \frac{Bi_3}{v_m} \sin\left(\frac{v_m}{b} y_i\right) \right] \sin\left(\frac{v_m}{b} \frac{\Delta y_i}{2}\right); \end{aligned} \right\}$$

– функції, що враховують вплив джерел теплоти Q_i на розподіл температур;

$$\left. \begin{aligned} \theta_{1,n,m} &= \left[T_1 \mu_n Bi_1 + T_2 (\mu_n \cos \mu_n + Bi_1 \sin \mu_n) Bi_2 \right] \cdot \left[\sin v_m + \frac{Bi_3}{v_m} (1 - \cos v_m) \right]; \\ \theta_{2,n,m} &= \left[T_3 v_m Bi_3 + T_4 (v_m \cos v_m + Bi_3 \sin v_m) Bi_4 \right] \cdot \left[\sin \mu_n + \frac{Bi_1}{\mu_n} (1 - \cos \mu_n) \right]; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

– функції, що враховують тепловіддачу від торців на температуру пластини;

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

часу τ на температурне поле пластини;

$$\begin{aligned} K_n &= (\mu_n^2 + Bi_1^2) \left(1 + Bi_1 + \frac{Bi_2}{\mu_n^2 + Bi_2^2} \right); \quad K_m = (v_m^2 + Bi_3^2) \left(1 + Bi_3 + \frac{Bi_4}{v_m^2 + Bi_4^2} \right); \\ C_{n,m} &= \frac{\lambda_1}{\lambda} \left(\frac{\mu_n}{a}\right)^2 + \frac{\lambda_2}{\lambda} \left(\frac{v_m}{b}\right)^2 + \frac{Bi}{h^2}. \end{aligned}$$

Складові температури $T(x, y, \tau)$, які повинні розраховуватися за рівняннями (7) – (9), визначені за умови, коли значення температури оточуючого середовища умовно прийнято $T_c = 0$. Реальні температури ТВЕ необхідно розраховувати за рівнянням (6) при реальному значенні $T_c \neq 0$, а температури T_1, T_2, T_3, T_4 , що входять до функцій (10), визначати як відносні до температури T_c .

Якщо відведення теплоти з торцевих поверхонь незначне, можна при-

йняти

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

Параметри теплового поля пластини у стаціонарному режимі одержимо з рівняння (6), прийнявши $\tau = \infty$, що відповідає значенню $\Phi_{n,\tau}(\tau) = 1$.

Розрахунки температур мікробірки

Оцінка впливу тепловідведення від торців пластини МЗб проведена на прикладі розрахунку температур ЕЕС для випадків, коли такого відведення немає та коли він є. Розрахунки температур проведені за рівнянням (6) для стаціонарного режиму.

Розглядався тепловий режим для МЗб розмірами $a \times b \times h = 50 \times 30 \times 3$ мм, на якій розташовані чотири ЕЕС згідно зі схемою на рисунку 3. Потужності ТВЕ (Вт) такі: $Q_1 = 0,5$, $Q_2 = 0,1$, $Q_3 = 0,3$, $Q_4 = 1$. Критерії: тепловіддачі від поверхні пластини до оточуючого середовища $\alpha = 20$ Вт/м².К, теплопровідності матеріала пластини (полікора) $\lambda = 31,5$ Вт/м.К. Для виключення впливу тепловідводу від торців критерії тепловіддачі від них прийняті незначними ($\alpha_1 \dots \alpha_4 = 0,1$ Вт/м².К).

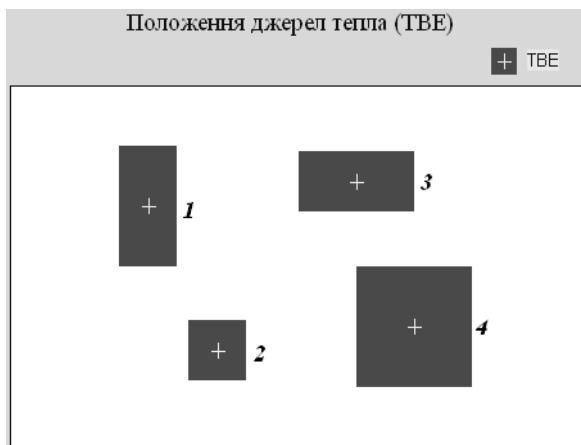


Рис. 3. Положення ЕЕС (ТВЕ)

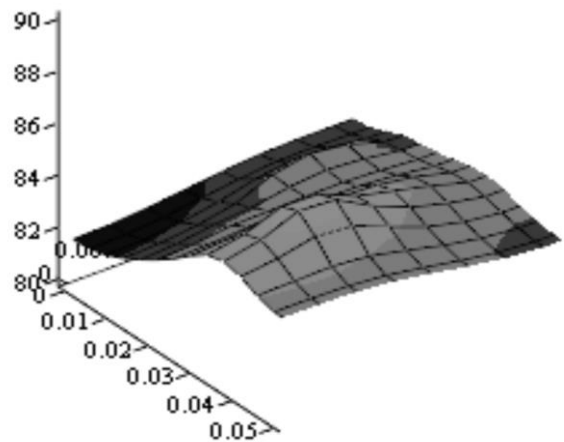


Рис. 4. Діаграма температур на пластині: 1–4 – номери ТВЕ пластини

Температури пластини та ТВЕ розраховані за допомогою пакета *MathCad*, 3D–діаграма температур наведена на рисунку 4; температури знаходяться у діапазоні 82,4 – 83,5 °С (останнє значення — для ТВЕ № 4), для температури оточуючого середовища було прийняте значення $T_c = 20$ °С.

Вплив тепловідводу від торців на температурне поле досліджений на тій же пластині, але критерії тепловіддачі від торців прийняті $\alpha_1 \dots \alpha_4 = 50$ Вт/м².К, причому критерій тепловіддачі від поверхні прийнятий вчетверо меншим: $\alpha = 5$ Вт/м².К. Такий же рівень температур ТВЕ, як й у попередньому випадку, може бути забезпечений, навіть якщо збільшити теплові потужності ТВЕ майже вдвічі, до значень: $Q_1 = 1$, $Q_2 = 0,5$, $Q_3 = 0,1$,

$Q_4 = 2$ Вт. Значення температур ТВЕ знаходяться у діапазоні $83,1 - 83,5$ °С, 3D-діаграма температур наведена на рисунку 5.

Кондуктивний відвод теплоти від торців основи до елементів конструкції РЕА з достатньо низькою температурою може суттєво покращити тепловий режим МЗБ. Це досліджено на тій же моделі МЗБ, що розглянута у попередніх прикладах; кондуктивний тепловідвод з торців з координатами $x = 0$ та $y = 0$ імітований призначенням для них критеріїв тепловіддачі $\alpha_1 = \alpha_3 = 200$ Вт/м².К, на інших торцях $\alpha_2 = \alpha_4 = 10$ Вт/м².К. Критерій тепловіддачі з поверхні пластини прийнятий зовсім незначним: $\alpha = 1$ Вт/м².К. Навіть при тому, що теплові потужності ТВЕ суттєво збільшені: $Q_1 = 2$, $Q_2 = 0,3$, $Q_3 = 0,5$, $Q_4 = 5$ Вт, їх температури не перевищують $88,5$ °С. Найнижча температура пластини – $74,1$ °С – у точці з координатами $x = y = 0$. Діаграма температур наведена на рисунку 6.

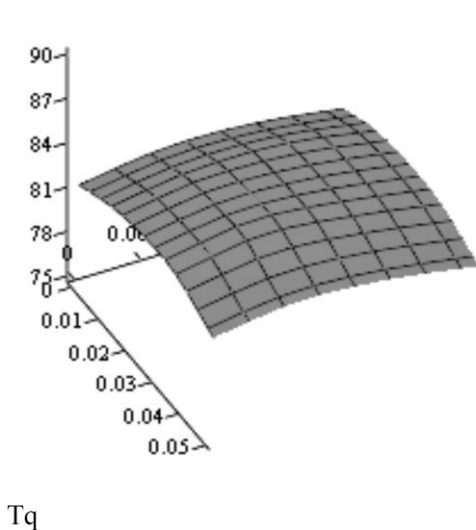


Рис. 5. Діаграма температур

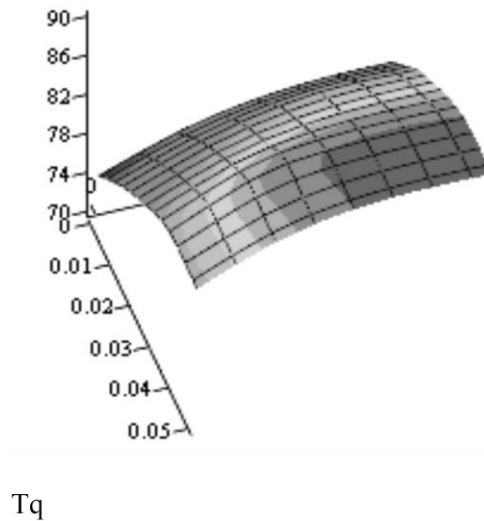


Рис. 6. Діаграма температур для $\alpha_1 \dots \alpha_4 = 50$ Вт/м².К для $\alpha_1 = \alpha_3 = 200$ Вт/м².К

Програмне забезпечення для визначення температур СКМ1

Моделювання теплових полів, результати якого наведені вище, проведено за допомогою математичного пакету *MathCad*. Особливість такого моделювання у тому, що для кожного з режимів необхідно скласти конкретну програму (реалізується у вигляді лістингу), в яку вводяться всі вихідні дані (розміри плати, координати положення ЕЕС на ній, теплофізичні характеристики матеріалу, значення критеріїв теплопровідності та тепловіддачі, температури оточуючого середовища тощо). Для визначення температур за рівняннями (6) – (10) необхідно у кожному випадку розраховувати значення коренів характеристичних рівнянь (5), що вимагає великої кількості обчислювальних процедур — число таких коренів може досягати декількох десятків. Крім того, сам процес розрахунку досить повільний (іноді для одержання результатів необхідний час у декілька де-

сятків секунд, а то й декількох хвилин).

Тому моделювання теплових режимів за допомогою пакету *MathCad* нераціонально; але найбільш суттєвим недоліком такого моделювання є неможливість використання процедур *MathCad* у системах автоматизованого проектування. Останні створюються на базі сучасних інтегрованих середовищ типу *C++Builder*, для них як раз найкраще підходять аналітичні рішення, розглянуті вище.

Значення температур, знайдені з рівнянь (6) – (10) дають можливість розрахувати показники надійності кожного з ЕЕС, окремої МЗб, всього РЕА за відомими нормативними документами [4, 5].

Висновки

Визначальними функціональними показниками для більшості РЕА є показники надійності (імовірність безвідмовної роботи, строк служби тощо), які у значній мірі залежать від температур ЕЕС. Тепловий режим у СКМ РЕА — результат неідеальності енергетичних процесів, які відбуваються у електронній структурі чарунок та мікрозбірок.

Під час проектування особливо складно визначити температури у мікрозбірках — на тепловий режим у них суттєво впливають тепловідводи від торців пластини-основи, тому необхідно створювати для МЗб методи розрахунку температур, які враховують відводи теплоти від поверхонь і самої пластини, і ЕЕС. Методи, побудовані на математичних моделях теплового поля у вигляді систем диференціальних рівнянь, дають можливість одержати аналітичні вирази для розрахунку температур ЕЕС, які найбільш органічно можна використовувати у системах автоматизованого проектування.

Внаслідок великої кількості ЕЕС у чарунках та мікрозбірках розрахунки температур можна провадити тільки за допомогою комп'ютерних програм, які ефективно працюють у сучасних інтегрованих середовищах. Тому створення таких програмних продуктів завжди є актуальною задачею.

Перелік посилань

1. Уваров Б.М. Оптимізація теплових режимів та надійності конструкцій радіоелектронних засобів з імовірнісними характеристиками / Б.М. Уваров, Ю.Ф. Зінковський: – К. : “Корнійчук”, 2011. – 201 с.
2. Лыков А.В. Тепломассообмен (Справочник) / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.
3. Беляев Н.М. Методы теории теплопроводности / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. – М. : Высш. школа, 1982. – 327 с.
4. Вироби електронної техніки. Методи розрахунку надійності : ДСТУ 2992-95. – [Чинний від 1996 – 01 – 01]. – К. : Держстандарт України. – 77 с. – (Національні стандарти України).
5. Прытков С.Ф. Надежность электрорадиоизделий / С.Ф. Прытков, В.М. Горбачева, М.Н. Мартынова, Г.А. Петров. – М. : МО РФ и НИИ “Электронстандарт”, 2004. – 620 с.

References

1. Uvarov B.M. and Zinkovskiy Yu.F. (2011) *Optimizatsiia teplovykh rezhymiv ta nadiinosti konstruksii radioelektronnykh zasobiv z imovirnisnymy kharakterystykamy*, Kyiv, Korniiichuk Publ., 201 p.
2. Lykov A.V. (1978) *Teplomassoobmen (Spravochnik) [Heat and Mass transfer (directory)]*. Moscow, Energiya Publ., 480 p.
3. Belyaev N.M. and Ryadno A.A.(1982) *Metody teorii teploprovodnosti [Methods of the theory of heat conduction]*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 327 p.
4. *Vyrobny elektronnoi tekhniki. Metody rozrakhunku nadiinosti : DSTU 2992-95 [Electronic devices. methods calculating the reliability: GOST 2992-95]*
5. Prytkov S.F., Gorbacheva V.M., Martynova M.N. and Petrov G.A. (2004) *Nadezhnost' elektroradioizdelii*, Moscow, MO RF i NII "Elektronstandart", 620 p.

Зиньковський Ю. Ф., Уваров Б. М. Функціональні параметри радіоелектронного апарату, обумовлені тепловими процесами у ньому. Розглянуті особливості теплових процесів у структурних модулях першого конструктивного рівня радіоелектронного апарату – чарунках та мікросбірках, елементах їх електронної структури. Проаналізовані коефіцієнти корисної дії структурно-конструктивних модулів, показники енергетичної досконалості резисторів, конденсаторів, індуктивностей на основі моделей еквівалентних двополюсників. Запропонована математична модель теплового поля мікросбірки, одержано аналітичне рівняння для визначення температур всіх її елементів.

Ключові слова: електронний апарат, чарунка, мікросбірка, модель двополюсника, тепла модель, температури елементів.

Zinkovskiy Yu. F., Uvarov B. M. Функціональні параметри радіоелектронного апарату, обумовлені тепловими процесами в ньому. Розглянуті особливості теплових процесів в структурних модулях першого конструктивного рівня радіоелектронного апарату – ячейках і мікросборках, елементах їх електронної структури. Проаналізовані коефіцієнти корисної дії структурно-конструктивних модулів, показники енергетичного совершенства резисторів, конденсаторів, індуктивностей на основі моделей еквівалентних двополюсників. Предложена математическая модель теплового поля микросборки, получено аналитическое решение для определения температур всех её элементов.

Ключевые слова: електронний апарат, ячейка, мікросборка, модель двополюсника, тепла модель, температури елементів.

Zinkovsky Yu. F., Uvarov B. M. Functional parameters of radio-electronic system stipulated by thermal processes in it.

Statement of the problem. The features of thermal processes in the structural modules of radio-electronic apparatus - cells and microassemblies, elements of their electronic structure are reviewed.

Internal thermal processes. The internal thermal processes in elements of electronic structure are considered. Efficiency factor of modules, energy efficiency indicators of resistors, capacitors, inductances based on models of equivalent two-terminal are analyzed.

The basic structural elements of radioelectronic devices. The design feature of cells and mikroassemblies are considered.

Thermal field of a cell and microassembly. The basic mathematical models to determine the temperatures of the elements of cells and microassemblies electronic structure are pro-

posed. Thermal field of microassemblies is modeled, analytical equation for determining the temperature of all its elements is obtained.

Account of temperatures of microassembly. The results of imitating modeling of temperatures microassemblies with various conditions of cooling are submitted.

Software definition of temperatures for cells and microassemblies. The automated designing programs for the temperature modes account in cells and microassembly of the radio-electronic are described.

Conclusions. The primary tasks performed in the work are listed.

Keywords: electronics, the unit cell, microassemblies, model of two-terminal, thermal model, temperature of elements, the automated designing programs.