

КОНСТРУЮВАННЯ РАДІОАПАРАТУРИ

УДК 621.396

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВУЗЛІВ ТА ЕЛЕКТРОРАДІОЕЛЕМЕНТІВ НА ДРУКОВАНІЙ ПЛАТІ

Уваров Б.М.

Під час проектування чарунок радіоелектронного апарату (РЕА) розміщення функціональних вузлів (ФВ) та електрорадіоелементів (ЕРЕ) на друкованій платі визначають, найчастіше, за умов забезпечення електричних та електромагнітних зв'язків. Але надійність всього пристрою залежить, в значній мірі, від теплового режиму ЕРЕ. Оптимізація теплового режиму у чарунці може бути досягнута відповідним розміщенням тепловідділяючих елементів (ТВЕ), тому що температура кожного з них визначається конвективними, кондуктивними та радіаційними зв'язками з елементами конструкції та один з одним. Тому необхідні методи визначення розташування ТВЕ на друкованих платах, які дають можливість забезпечити оптимальний тепловий режим – максимально знизити температури ФВ та ЕРЕ. Така ж проблема виникає й при проектуванні мікросбірок із розміщеними на їх підкладках інтегральними мікросхемами.

Температура тепловідділяючих елементів на платі

Температури ТВЕ звичайно знаходять розв'язуючи рівняння теплового балансу, яке для одного ТВЕ має вигляд: $P=Q_k+Q_t+Q_r$, де P – потужність ТВЕ; Q_k , Q_t , Q_r – тепло, що віддається, відповідно, конвекцією, кондукцією (теплопровідністю), радіацією.

Тепловіддача конвекцією

Значення Q_k можна визначити, якщо відомі коефіцієнт конвекційної тепловіддачі α_k , площа ТВЕ S_k , з якої віддається тепло конвекцією, та різниця температур поверхні ТВЕ T та оточуючого середовища T_c (найчастіше, повітря чи інший газ): $Q_k = \alpha_k S_k (T - T_c)$.

Закономірності конвекційного теплообміну достатньо вивчені; коефіцієнт α_k розраховують, визначивши критерій Нусельта Nu для відповідного режиму тепловіддачі [3]:

$$\alpha_k = Nu\lambda/d, \quad (1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності повітря у внутрішньому об'ємі РЕА (чи самої чарунки, якщо вона герметична); d – визначальний розмір ТВЕ.

Для природної конвекції $Nu = Nu(GrPr)$, для вимушеної $Nu = Nu(Re)$, де Gr , Pr , Re – критерії Грасгофа, Прандтля, Рейнольдса, відповідно.

Тепловіддача кондукцією

Якщо ТВЕ встановлений на платі із розмірами $a \times b$ та товщиною δ , кое-

фіцієнт теплопровідності матеріалу якої λ , тепло, що відводиться кондукцією до плати (потім воно віддається від поверхні плати до оточуючого середовища) можна розрахувати згідно [2]: $Q_{\tau} = \frac{\lambda \delta}{\theta(x, y)} (T - T_c)$, де $\theta(x, y)$ –

функція, що визначає відносну температуру у точці плати із координатами $\xi = x/a$, $\vartheta = y/b$ в залежності від координат ТВЕ на платі $\xi_0 = x_0/a$, $\vartheta_0 = y_0/b$, розмірів контактної площини ТВЕ $\Delta \xi = \Delta x/a$, $\Delta \vartheta = \Delta y/b$:

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

де критерії Bi та Bi_x, Bi_y , що визначають конвективний теплообмін для плати:

$$Bi = \frac{\alpha ab}{\lambda \delta}; \quad Bi_x = \frac{\alpha a^2}{\lambda \delta}; \quad Bi_y = \frac{\alpha b^2}{\lambda \delta}; \quad \mu_n = \pi(n-1); \quad \mu_m = \pi(m-1); \quad \beta = \frac{b}{a}.$$

Тепловіддача радіацією

Частина тепла, що віддається від ТВЕ радіацією [3], визначається як:

$$Q_p = c_0 \varepsilon S_p (T^4 - T_c^4),$$

де c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; ε – ступінь чорноти випромінюючої поверхні; S_p – поверхня ТВЕ, від якої тепло відводиться радіацією.

Таким чином, рівняння теплового балансу для одного ТВЕ можна подати як:

$$P = \alpha_k S_k (T - T_c) + \frac{\lambda \delta}{\theta(x, y)} (T - T_c) + c_0 \varepsilon S_p (T^4 - T_c^4).$$

Якщо вважати температуру T_c заданою (наприклад, $T_c = 273$ К) та виділити складові із температурою T , останню можна знайти із рівняння:

$$c_0 \varepsilon S_p T^4 + \left(\alpha_k S_k + \frac{\lambda \delta}{\theta(x, y)} \right) T = P + \left(\alpha_k S_k + \frac{\lambda \delta}{\theta(x, y)} \right) T_c + c_0 \varepsilon S_p T_c^4.$$

Якщо на платі знаходиться всього один ТВЕ, це рівняння можна розв'язати чисельними методами.

Температурне поле плати із багатьма ТВЕ

У реальних чарунках на платі розміщують іноді десятки ТВЕ, тому задача визначення температур суттєво ускладнюється: необхідно враховува-

ти для кожного з них вплив усіх інших на температуру плати, а також взаємний радіаційний теплообмін.

Температурне поле плати із m ТВЕ можна визначити із системи рівнянь:

$$\sum_{i=1}^m \left[\alpha_{ki} S_{ki} (T_i - T_c) + \frac{\lambda \delta}{\theta_i(x, y)} (T_i - T_c) + c_0 \varepsilon_i S_{pi} (T_i^4 - T_c^4) + \sum_{j=1}^m c_0 \varepsilon_{nj} (\varphi_{ij} F_i T_i^4 - \varphi_{ji} F_j T_j^4) - P_i = 0 \right] \quad (3)$$

розв'язання якої й дасть температури кожного ФВ чи ЕРЕ.

Оптимізація теплового режиму ТВЕ

Звичайно при проектуванні намагаються зменшувати температури ФВ та ЕРЕ. Цього можна досягнути відповідним розміщенням останніх, віддаляючи їх один від одного, щоб зменшити взаємний вплив та покращити умови тепловіддачі. Оптимізація теплового режиму може бути досягнута вибором координат x, y кожного із ТВЕ, що призводить до типової проблеми параметричної оптимізації цільової функції (ЦФ) – $F(x_1, x_2 \dots x_n)$ багатьох змінних. У якості такої функції може бути обрана, наприклад, сума температур усіх ТВЕ; більш кваліфіковано можна її створити, пов'язавши температури ТВЕ із показниками надійності – інтенсивністю відмов λ кожного з елементів.

Методи оптимізації функції багатьох змінних

Найкращі програми умовної оптимізації, що придатні для розв'язання такої задачі – це методи випадкового пошуку із зменшенням інтервалу пошуку (ВПЗП) та узагальнений алгоритм змінного порядку (УАЗП) [5].

За методом ВПЗП мінімум ЦФ знаходять послідовними ітераціями, генеруючи вектори параметрів x_{ik} , які будуть варіюватися, випадковим чином: $x_{ik} = x_{imink} + (x_{imaxk} - x_{imink})\eta_{ik}$, $i = 1, 2 \dots n$, де η_{ik} – множник, що створюється генератором рівномірно розподілених чисел; k – номер ітерації.

Для надійного утримання ЦФ у заданих межах кількість генерованих комплектів x_{ik} (і відповідних значень ЦФ) повинна бути достатньо великою: 30 – 80. Якщо під час оптимізації процес “розходиться”, можна застосувати більш складний метод УАЗП чи комбіновані методи [5].

Програма автоматизованого розміщення ТВЕ

Програма **Optim2** (оптимізація конструкції друкованої плати) – розміщення ФВ та ЕРЕ на друкованій платі (взагалі – на будь-якій пластині), яка може бути модулем системи автоматизованого проектування (САПР) чарунки чи блока РЕА, складається із декількох програмних модулів. Алгоритм програми забезпечує розв'язання системи (4). Програмне середовище – **C++Builder 6**.

Модуль вхідних даних

Вхідні дані для програми задають у файлі із ім'ям *Optim2.dat*

Формування ЦФ. ЦФ $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, мінімуму якої намагаються досягнути під час параметричної оптимізації, у даній програмі формується як сума температур окремих ТВЕ: $F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_n T_i$;

Її значення обчислюється на кожному кроці оптимізації, якщо змінюються параметри x_i , тобто координати центрів ТВЕ (x_i, y_i) .

Модуль формування ЦФ

Якщо координати розташування ТВЕ визначені (на кожному кроці оптимізаційного процесу), їх температури T_i знаходять із системи рівнянь (4), при цьому на кожному кроці застосований метод Ньютонa, за яким формується система лінійних рівнянь із матрицею частинних похідних $\partial f_j(x_i)/\partial x_i$, векторами нев'язок Δx_i та самих функцій $f_j(x_i)$:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \dots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_1 \\ \dots \\ -f_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

В (5) функції $f_j(x_i)$ сформовані з відповідних рівнянь системи (4):

$$f_i = \frac{1}{\alpha S_{ki} + \frac{\lambda \delta}{\theta_i(x, y)}} \left[\frac{P_i - c_0 \varepsilon_i S_{pi} (T_i^4 - T_c^4) + \sum_{j \neq i}^n \frac{\lambda \delta}{\theta_{ij}(x, y)} (T - T_c) + c_0 F_{ij} (T_j^4 - T_i^4) + T_c \right] - T_i$$

Розв'язання самої системи лінійних рівнянь, тобто визначення Δx_i , проводилося методом Гауса. Коли досягалися $\Delta x_i \leq 10^{-3}$, вважалося, що температури T_i визначені. Після цього обчислювалося значення ЦФ.

Модуль параметричної оптимізації

Цей програмний модуль відповідає алгоритму метода ВПЗП. На кожному кроці оптимізації генеруються 84 комплекти параметрів x_i (кількість x_i удвічі більша кількості ТВЕ: для кожного з останніх є дві координати – x та y), й обчислюються 84 значення ЦФ; з останніх обирається така, що має мінімальне значення. У процесі визначення координат виконуються умовні обмеження – виключаються можливості перекриття контактних площин ТВЕ одна одною. Якщо після деякого кроку зміна ЦФ стає меншою 10^{-3} , оптимізація закінчується.

Модуль візуалізації розміщення ФВ та ЕРЕ

Перед початком оптимізації та по її закінченні конструктивна схема плати із розміщенням ФВ може бути виведена на екран монітора. Розміри плати та площин контакту ТВЕ, місця розміщення останніх зображуються у масштабі, й можна порівняти оптимальну компоновку ФВ та ЕРЕ з вихідною. На рис.1 показано положення

ФВ (модуль візуалізації): *a* – початкове; *б* – після оптимізації.

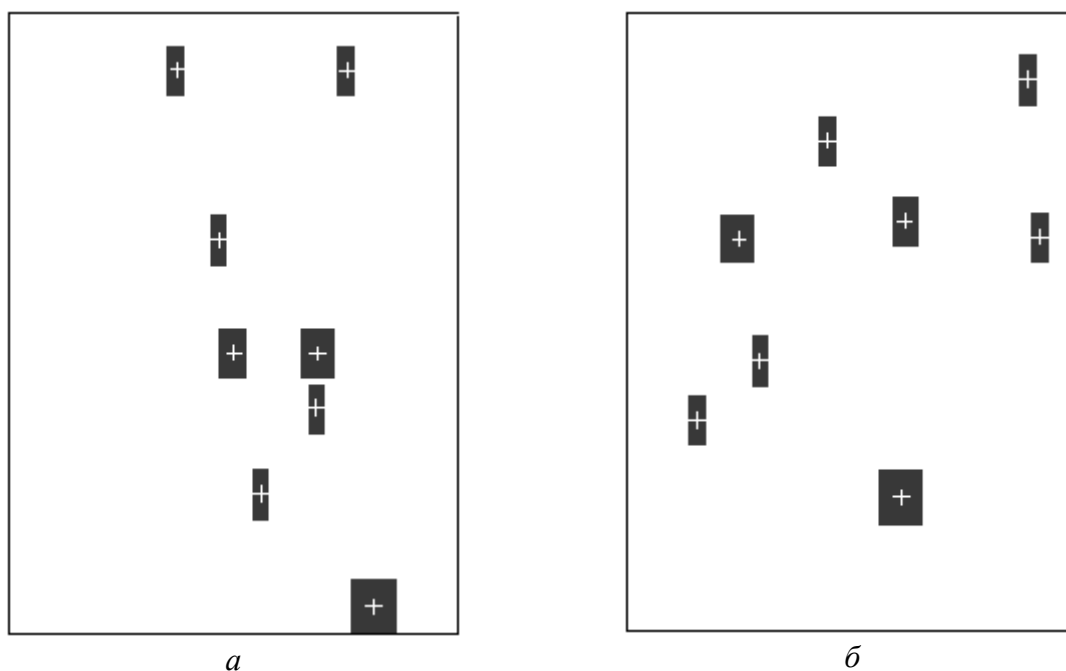


Рис.1. Розміщення ФВ на платі

Загальні характеристики роботи програми

При роботі з програмою основний час витрачається на редагування вхідного файлу *Optim2.dat*, тобто внесення до нього значень початкових параметрів. Тривалість самого ітераційного процесу залежить від потужності комп'ютера та кількості ТВЕ. Для сукупності вихідних параметрів, що наведені вище – для 8 ТВЕ – машина з тактовою частотою 3,3 ГГц проводить оптимізацію за 3 ітерації та 247 обчислень ЦФ; на це витрачається 15 с. Для 5 ТВЕ необхідно стільки ж ітерацій та обчислень ЦФ, але результат був отриманий через 5 с.

Оптимізувати температурне поле чарунки з багатьма ТВЕ досить ефективно можна завдяки раціональному розміщенню останніх на платі. При цьому збільшується надійність її та всього РЕА. Результатом оптимізації є зниження теплового навантаження ТВЕ внаслідок зменшення їх взаємного теплового впливу. Це зниження для конкретного ТВЕ буде тим помітнішим, чим більша його тепла потужність. Якщо виявиться, що температура якогось із них неприпустимо висока, це буде вказівкою для проектувальника: необхідно застосувати додаткове охолодження цього елемента.

Експлуатація програми "Оптимізація конструкції друкованої плати" показує, що за її допомогою можна одержати оптимальне розміщення ФВ та ЕРЕ, встановлених на платі чарунки чи на підкладці мікрозбірки, а також розраховувати їх температури.

Література

1. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. – М.: Радио и связь, 1990. 312 с.
2. Зінковський Ю.Ф., Уваров Б.М. Методи оптимізації конструкцій радіоелектронних модулів // Вісник НТУУ "КПІ". Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2006, вип. 33.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А, Сукомел А.С. Теплопередача. М., Энергия, 1975. 488 с.
4. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М., Наука, 1978. 512 с.
5. Петренко А.И., Ладогубец В.В., Чкалов В.В. Оптимальное схемотехническое проектирование в машиностроении. К., УМКВО, 1989. 164 с.

Уваров Б. М. Оптимізація розміщення тепловиділяючих функціональних вузлів та електрорадіоелементів на друкованій платі. Розглядаються методи та програма автоматизованого розміщення тепловиділяючих функціональних вузлів та електрорадіоелементів на друкованій платі радіоелектронного апарату, які забезпечують оптимальність теплового режиму

Ключові слова: конструювання радіоапаратури, теплообмін, оптимізація конструкції

Уваров Б. М. Оптимизация размещения тепловыделяющих функциональных узлов и электрорадиоэлементов на печатной плате. Рассматриваются методы и программа автоматизированного размещения тепловыделяющих функциональных узлов и электрорадиоэлементов на печатной плате радиоэлектронного аппарата, обеспечивающие оптимальность теплового режима

Ключевые слова: конструирование радиоаппаратуры, теплообмен, оптимизация конструкции

Uvarov B.M. Optimization of accommodation functional units and radioelements allocating is warmly on the printed-circuit-board. The methods and program of the automated accommodation of functional units and radioelements allocating is warmly on the printed-circuit-board of the radioelectronic device ensuring an optimality of a thermal mode are considered

Key words: design radioapararat, heat exchange, optimithation construct