

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИРОБНИЦТВА
РАДІОАПАРАТУРИ

УДК 621.396

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ
РАДІОЕЛЕКТРОННИХ МОДУЛІВ

Зінковський Ю.Ф., Уваров Б. М.

Розглянуті методи проектування радіоелектронних модулів у вигляді друкованих плат, що повинні забезпечити однакові показники надійності конструкції з умов віброміцності та теплового режиму електрорадіоелементів.

Вступ. Постановка задачі

Автоматизоване проектування радіоелектронної апаратури (РЕА) із найкращими показниками вимагає, передусім, визначення цільової функції – критерію, максимуму (чи мінімуму), якого необхідно досягти, обравши та оптимізуючи її параметри. Але у багатьох випадках постає проблема врахування різних показників пристрою, що визначають його якість, й оптимуму яких необхідно досягти. Розв'язання таких проблем здійснюється методами теорії багатоцільової оптимізації, яка дає можливість сформулювати багатоцільовий показник $K(x)$ у вигляді функціонала (згортки) окремих частинних критеріїв $K_i(x)$. Згортки можуть бути лінійними, мінімізаційними, максимізаційними, добутками, функціями виду

$$K(x) = \sum w_i K_i(x), \quad K(x) = \prod [w_i K_i(x)]^{\beta(i)}$$

і т.ін. [1]. Тому необхідно, передусім, визначити комплекс показників якості – частинних критеріїв $K_i(x)$, які й повинні у сукупності характеризувати основні властивості всього пристрою.

Прийнято властивості конструкції якісно визначати структурами

$$Z = \{z_i ; i = 1, 2 \dots n\},$$

як схемами стійких зв'язків між елементами конструкцій. Кількісно ці властивості характеризують їх параметрами

$$Y = \{y_j ; j = 1, 2 \dots m\},$$

при чому конкретна сукупність параметрів множини Y , яка задається вимогами технічного завдання, може бути реалізована різними структурами Z .

Цільова функція при автоматизованому проектуванні РЕА

Характерна особливість РЕА – вплив різноманітних дестабілізуючих факторів зовнішнього середовища на її роботу, які складають множину впливів $X = \{x_k ; k = 1, 2 \dots l\}$. Тому важливою вимогою до конструкції як раз і є забезпечення функціонування апарату при дії цих факторів, а також захист цього середовища від можливих шкідливих впливів самого апарата.

Стійкою конструкцією можливо назвати лише таку, у якій виконуються умови

$$j_j(x_k) \leq j_{j\text{дон}}(x_k), j = 1, 2 \dots m; y_j \in Y, x_k \in X; x_{k\text{min}} \leq x_k \leq x_{k\text{max}},$$

при заданому інтервалі зміни дії впливу $d_k = x_{k\text{max}} - x_{k\text{min}}$.

Виконання вказаних умов означає, що $Y(X) \leq Y_{\text{дон}}(X)$ при будь-яких $y_j \in Y$, та $x_k \in X$, за умови $x_k \in d_k$.

Як міру стійкості конструкції R_k від k -того впливу можна прийняти

$$R_k = \frac{d_k}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{j_{i0}} \int_{x_{k\text{min}}}^{x_{k\text{max}}} \Delta y_j(x_k) dx_k}.$$

Якщо вважати, що сумарне відхилення від одного впливу

$$\delta = \int_{x_{k\text{min}}}^{x_{k\text{max}}} \Delta y_j(x_k) dx_k,$$

то відносне відхилення визначиться як

$$\delta_{\text{відн}} = \frac{1}{y_{i0}} \delta.$$

При цьому сумарний вплив від x_k визначиться як

$$A = \sum_{j=1}^m \delta_{\text{відн}},$$

а вплив від множини X складе

$$B = \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^m \frac{1}{y_{j0}} \int_{x_{k\text{min}}}^{x_{k\text{max}}} \Delta y_j(x_k) dx_k.$$

При врахуванні $x_k \in X$ будемо мати $R = \{R_k; k = 1, 2 \dots l\}$, тому мірою стійкості конструкції від k -того впливу буде

$$R_k^{\text{відн}} = \frac{R_k}{\sum_{k=1}^l R_k},$$

де $R_k^{\text{відн}}$ – нормована стійкість від впливу.

Дестабілізуючі зовнішні фактори:

- а) механічні – зовнішній тиск чи вакуум, лінійні прискорення, вібрації, удари;
- б) кліматичні – температура, волога, агресивне середовище;
- в) магнітні, електричні та електромагнітні поля;
- г) різні види радіації (у деяких випадках).

Захист від дії цих факторів повинні забезпечити:

- а) конструкція корпусу - від підвищеного чи пониженого зовнішнього тиску, агресивного середовища;
- б) система вібро- та удароізоляції - від лінійних, вібраційних та ударних прискорень;

в) система тепло- та вологозахисту - від кліматичних факторів;

г) система екранування - від магнітних, електричних та електромагнітних полів;

д) система радіаційного захисту - від відповідних випромінювань.

Конструювання – це, наприклад, геометричне компонування (розміщення) необхідної кількості елементів у визначеному об'ємі чи на визначеній площині. Компонувальний параметр системи при цьому можна визначити як

$$K = F(q_q), q = 1, 2 \dots p,$$

де q – складові компонентів параметра, наприклад, об'єм, маса, енерговитрати, вартість та ін. У свою чергу,

$$K_q = F_q + F(q),$$

де F_q – параметри, що забезпечують виконання вимог технічного завдання, але які прямо не залежать від складових q (з'єднання функціональних вузлів, кріпильні деталі, заземлення, елементи екранування, т.ін.).

Оптимізація компонентів параметра K зводиться до розв'язання системи рівнянь

$$\partial F_q / \partial q = 0, q = 1, 2 \dots p,$$

а основна складність при створенні та розв'язанні цих рівнянь – врахування взаємозалежності параметрів q .

Нормальне функціонування більшості радіоелектронних засобів (РЕЗ) у значній мірі залежить від механічних впливів та температурного стану електрорадіоелементів (ЕРЕ), тому системам віброударозахисту та забезпечення теплових режимів при проектуванні приділяють особливу увагу.

Забезпечення віброзахисту РЕЗ та його функціональних вузлів

Функціональні вузли (ФВ), як і весь апарат, при дії вібрації можуть достатньо довгий час працювати чи у дорезонансній зоні, коли частота зовнішніх впливів ω менша частоти власних коливань ω_0 , чи у зарезонансній зоні, коли $\omega > \omega_0$ (при резонансі ω близька до ω_0 , але тривалий час у такому режимі апаратура звичайно не працює).

При низькій частоті зовнішніх впливів ω доцільно забезпечити умови для коефіцієнтів розладу $\nu = \omega / \omega_0 \rightarrow \min$, при цьому ФВ знаходяться у дорезонансній зоні й віброзахист не потрібний (якщо значення перевантажень не перевищують допустимих); це вимагає $\omega_0 \rightarrow \max$. При високій частоті ω необхідні коефіцієнти розладу такі, що $\nu = \omega / \omega_0 \rightarrow \max$, при цьому віброзахист буде забезпечений у зарезонансній зоні, і це вимагає $\omega_0 \rightarrow \min$. Але, якщо основний режим роботи – у зарезонансній зоні, все одно необхідно буде пройти зону резонансу, тобто деякий час апарат повинен працювати при резонансі.

При проектуванні пластинчатих несучих конструкцій, наприклад, друкованих плат (ДП), на власну частоту впливає розміщення на них ЕРЕ, а саме: якщо ЕРЕ зосереджені у центральній зоні, зведена маса елементів m_e буде більшою, а частота ω_0 – меншою; розташування ЕРЕ на периферійних зонах збільшує ω_0 . Але, при розміщенні ЕРЕ та ФВ із відносно великою масою (трансформаторів і т.п.) у центрі плати, зростають деформації та напруження у матеріалі останньої при проходженні зони резонансу – це може негативно вплинути на довговічність конструкції.

Вплив мас m_i окремих ЕРЕ та їх відносних координат $\xi = x/a$ у продольному напрямку, та $\vartheta = y/b$ у поперечному (на платі із розмірами $a \times b$), на зведену масу m_e визначається формулою [2]

$$m_e = + \frac{1}{ab} \sum_i \frac{m_i \varphi_i^2(\xi) \varphi_k^2(\vartheta)}{\int_a \varphi_i^2(\xi) d\xi \int_b \varphi_k^2(\vartheta) d\vartheta}, \quad (1)$$

де $\varphi_i(\xi)$ та $\varphi_k(\vartheta)$ – функції прогину.

При проектуванні плати необхідно розмістити ЕРЕ так, щоб забезпечити $m_e \rightarrow \min$ (чи $m_e \rightarrow \max$); це можливо зробити методами параметричної оптимізації – зміною координат x_i та y_i розміщення ЕРЕ.

Власна частота ω_0 визначає, якими будуть коефіцієнти динамічного підсилення κ при дії періодичних силових та передачі η – кінематичних факторів:

$$\kappa = \frac{s_B}{s_{ст}} = \frac{1}{\sqrt{(1-v^2)^2 + 4\delta^2 v^2}}; \quad \eta = \frac{s_B}{s_0} = \frac{\sqrt{1 + 4\delta^2 v^2}}{\sqrt{(1-v^2)^2 + 4\delta^2 v^2}}, \quad (2)$$

де $s_B, s_{ст}, s_0$ - амплітуди відповідних переміщень, а саме: s_B – амплітуда вимушених переміщень апарата (ФВ, ЕРЕ), $s_{ст}$ – амплітуда статичних переміщень апарата (ФВ, ЕРЕ) від дії зовнішньої періодичної сили, s_0 – амплітуда переміщень основи, до якої кріпиться ФВ; δ – коефіцієнт в'язкого демпфірування.

Коефіцієнти κ та η визначають деформації елементів конструкції у резонансній та зарезонансній зонах.

Внаслідок деформацій від вібраційних та ударних зовнішніх навантажень у елементах конструкції виникають вібронапруження, а з ними пов'язаний процес накопичення пошкоджень, що може привести до відмови пристрою. Врахувати вплив всіх різноманітних факторів, які впливають на надійність та витривалість конструкції РЕЗ, можливо за допомогою функції надійності [3]:

$$P(t) = P\{v(\tau) \in \Omega; \tau \in [0, t]\},$$

яка визначає ймовірність перебування елемента $v(\tau)$ у допустимій області Ω на відрізок часу $[0, t]$. У такій формі функція надійності може враховувати випадки повторних відмов, ремонти, відновлення, т.п. У ролі параметра t може виступати не тільки фізичний час, але й напрацювання на відмову, технічний ресурс, кількість циклів, т.ін. Дуже важливо, що функція $P(t)$ може враховувати випадковий характер процесів зовнішніх механічних впливів.

Таким чином, розміщення ЕРЕ та ФВ на платі визначає її частотні параметри; це впливає на показники надійності всього пристрою при експлуатації – ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$, технічний ресурс τ , що й потрібно враховувати при проектуванні РЕЗ з високими показниками якості.

Забезпечення оптимального теплового режиму ФВ

Тепловий режим ФВ визначається тепловиділенням кожного ЕРЕ, та взаємним розташуванням останніх. Розрахунок температурного поля такого ФВ досить складна задача, яку розв'язують, наприклад, структурними методами (R -функцій), інтегральних перетворень, конформних відображень, що вимагає створення відповідного програмного забезпечення [4].

Аналогічні проблеми виникають й при розрахунках температурних полів у корпусі всього апарату – це трьохмірна задача, яка додатково ускладнюється при розрахунках нестационарних теплових процесів, й найкраще для її розв'язання придатний той же метод R -функцій,

Надійність роботи ЕРЕ пов'язана із їх температурою T_i – від неї залежать інтенсивності відмов λ_i кожного елемента. Якщо функції $\lambda_i = \lambda_i(T_i)$ визначити, можна одержати зв'язок параметрів $P(t)$ та τ РЕЗ із конфігурацією температурного поля ФВ (ДП), тобто з координатами x_i та y_i ЕРЕ.

У першому наближенні оптимальним тепловим режимом можна вважати такий, при якому температура кожного ЕРЕ близька до допустимої (але не перевищує її), а цього можна досягнути, віддаляючи найбільш потужні (у тепловому розумінні) ЕРЕ один від одного, а також наближаючи їх до стінок корпусу (у більшості випадків – до країв плати). Це й повинна забезпечити параметрична оптимізація координат x_i та y_i .

Електромагнітна сумісність

При конструюванні РЕА, а саме на стадії розробки компоувальної схеми, слід враховувати вимоги по електромагнітній сумісності. При цьому вказані вимоги висуваються як до ФВ, які заповнюють внутрішній об'єм РЕЗ, так і до ЕРЕ, які розміщуються на ДП.

Показник електромагнітної сумісності часто суттєво впливає на компоування апарату (чи окремого ФВ), і його потрібно розглядати як частинний показник якості $K_i(x)$. Якщо цей показник інтерпретувати як коефіцієнт заглушення (екранування) електромагнітних полів, то це складна

функція $K(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma}, \bar{\epsilon})$, де $\bar{\alpha}$ – множина параметрів екрануючих матеріалів; $\bar{\beta}$ – множина характеристик та параметрів електричного, магнітного, електромагнітного "паразитних" полів; $\bar{\gamma}$ – множина функцій чутливості (сприйнятливості) елементів до вказаних полів; $\bar{\epsilon}$ – множина характеристик, що оцінюють "паразитні" випромінювальні якості елементів та апаратури в цілому. Кожен із складових множини $\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma}, \bar{\epsilon}$, а також коефіцієнт екранування K мають бути оптимізовані по ряду вихідних конструктивних параметрів РЕА розв'язанням рівнянь

$$\partial K / \partial q = 0, \quad q = 1, 2 \dots p,$$

де q – маса, об'єм т.ін., ФВ (ЕРЕ)

Конструкція РЕЗ оптимальна з точки зору надійності

Цю проблему можна розглядати інверсно як оптимальну надійність конструкції. Першим у цій проблемі стоїть завдання (воно повинно вирішуватися замовником РЕА) щодо вибору представницьких параметрів надійності – це можуть бути ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$, ймовірність відмов $Q(t)$, інтенсивність відмов $\lambda(t)$, ремонтпридатність та інші.

Іншим наріжним каменем має бути імперативна ідея, що надійність – це характеристика, яка обов'язково повинна оптимізуватися по деяким важливим для замовника параметрам, бо її максимізування часто-густо робить апаратуру непридатною для успішного використання. Класичною є залежність вартості B апаратури від надійності $P(t)$, знайденої із рівняння $\partial B / \partial P = 0$, якщо виходити із того, що від збільшення надійності РЕА вартість її експлуатації зменшується, а виробництва – збільшується.

Для складної апаратури при великій кількості її класів $P(t)$ знаходиться у межах 0,75 – 0,9. Оптимальна ймовірність $P(t)$

$$P_{\text{опт}}(t) = \exp \sqrt{\frac{C_0}{C} \cdot \frac{N t^2 \lambda}{T_p}},$$

де C – вартість однієї відмови; C_0 – вартість "норми" забезпечення надійності, N – кількість відмов за час загального напрацювання T_p ; t – загальний час роботи РЕА.

На прикладі відносно простого у конструктивному відношенні ФВ РЕЗ – друкованої плати – зрозуміло, що при її проектуванні можуть виникнути протиріччя: для зменшення власної частоти плати ω_0 необхідно ЕРЕ зосереджувати у її центрі, але це призведе до збільшення механічних напружень у її матеріалі, а для зменшення температур елементів останні потрібно розміщувати на периферії плати.

При проектуванні всього РЕЗ частинні критерії $K_i(x)$ (ними можуть бути показники різної розмірності, які необхідно звести до безрозмірних

величин методами теорії подібності), необхідно об'єднати у комплексний показник якості всього апарату $K(x)$, оптимум якого й потрібно забезпечити багатоцільовою оптимізацією параметрів.

Для створення комплексного критерію можна використати лінійну згортку показників у вигляді $K(x) = \sum w_i K_i(x)$, але для цього необхідно визначити коефіцієнти впливу w_i , а обґрунтований вибір останніх складно зробити – це проблема прийняття рішень в умовах невизначеності (аналогічні проблеми розглядає теорія багатоцільової оптимізації).

Один із варіантів виходу із цієї ситуації – прийняти однаковими значення частинних ймовірностей безвідмовної роботи $P_i(t)$, що визначаються різними факторами, тобто вважати рівномірним згублення функціональних властивостей ФВ від будь-якого з них. Оптимізація параметрів повинна провадитися таким чином, щоб досягнути максимуму всіх $P_i(t)$ й одночасної рівності їх значень:

$$P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_i(t) \rightarrow \max.$$

Тоді частинна ймовірність $P_i(t)$ стає функцією розташування ЕРЕ на платі, тобто частинним критерієм якості, який визначається координатами x_i, y_i : $P_i(t) = K_i(x_i, y_i)$. При цьому коефіцієнти впливу та комплексний показник якості:

$$\sum w_i = 1; \quad w_i = 1/n; \quad K(x) = \sum w_i K_i(x_i, y_i) \rightarrow \max,$$

де n – кількість частинних критеріїв $K_i(x)$, які враховують при визначенні комплексного показника якості всієї конструкції.

Програмне забезпечення для проектування оптимальних конструкцій РЕА

Програмне забезпечення, яке може застосовуватися при проектуванні РЕА із високими показниками якості, потребує програмних комплексів:

а) для визначення функціональних показників – вібраційних характеристик, температурних та електромагнітних полів, показників міцності та витривалості, пов'язаних із конструктивною структурою ФВ чи всього РЕЗ;

б) для формування цільової функції (комплексного критерію якості) та визначення коефіцієнтів впливу на основі багатоцільової оптимізації;

в) суто оптимізаційних програм параметричної умовної оптимізації (із обмеженнями параметрів).

Програми першої групи достатньо складні, якщо форма двох- або трьох-мірних об'єктів відрізняється від простої геометричної (прямокутної пластини чи паралелепіпеда). Частотні та температурні характеристики ФВ чи РЕЗ довільної форми можуть бути розраховані методами R -функцій [5].

Математичний апарат теорії багатоцільової оптимізації дає змогу створити програми визначення комплексного критерію якості конструкції як функції $K(x) = \sum w_i K_i(x)$.

Обчислювальні аспекти оптимізації конструкцій ФВ.

Для оптимізації показників якості технічного об'єкту, коли необхідно змінювати велику кількість параметрів (десятки, іноді сотні), на які накладені умови обмеження, необхідні ЕОМ великої швидкодії, але навіть при їх застосуванні час проектування може бути надто великим.

Для оцінки можливостей застосування апарату R -функцій й програмних засобів сучасних інформаційних технологій при оптимізації конструкції, були проведені розрахунки теплового режиму ДП прямокутної форми в умовах природного охолодження із встановленими на ній тепловиділяючими ЕРЕ, а також частот механічних коливань та деформацій її при кінематичному збудженні.

Оцінка теплового режиму – температурного поля пластини із джерелами тепла, що виділяється у межах прямокутних ділянок невеликих, порівняно із розмірами всієї пластини, розмірів.

Температурне поле такої пластини можливо знайти розв'язанням рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial^2 \theta(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y)}{\partial y^2} - Bi \theta(x, y) + \frac{1}{\lambda d} \sum_1^n q_i(x, y) = 0, \quad (3)$$

де $\theta(x, y)$ – температура пластини у точці з координатами x, y ; $q_i(x, y)$ – тепловий потік від джерела тепла у відповідній зоні пластини; λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу пластини, d – її товщина; Bi – критерій Біо, що враховує тепловіддачу від поверхні пластини у оточуючий простір.

Вигляд функції температури $T(x, y)$ для пластини із розмірами $a \times b$, знайдений за допомогою кінцевих інтегральних перетворень [6]:

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

де $\beta = a/b$; Δx , Δy – розміри пластинки джерела $q_i(x, y)$; ξ , ϑ – відносні координати розрахункової точки на пластині (індекс "0" відноситься до координат джерела тепла); $\mu_n = \pi(n - 1)$, $\mu_m = \pi(m - 1)$.

Розрахунок температури $\theta(x, y)$, із врахуванням 100 членів у кожному ряду, на сучасній ПЕОМ із тактовою частотою 3,3 *MHz* здійснюється за частки секунди. Температури пластини із багатьма джерелами тепла можна одержати суперпозицією результатів для одного такого джерела, розрахованих за формулою (4).

Розв'язання рівняння (3) методом *R*-функцій дає такий вираз для температури $\theta(x, y)$:

$$\theta(x, y) = \Phi - W \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \cdot \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \cdot \frac{\partial W}{\partial y} \right),$$

де, у свою чергу,

$$\Phi(x, y) = \sum_{i+j=0}^n C_{ij} (x^{i+j} y^j + x^i y^{i+j})$$

є невизначена функція, яка забезпечує виконання умов тепловіддачі на поверхні пластини;

$W(x, y)$ – *R*-функція, що описує форму пластини [5]; для прямокутника у загальному випадку вона має вигляд:

$$W(x, y) = \frac{1}{1 + \alpha_0} \times \left[-\sqrt{(x - x^2)^2 + (y - y^2)^2} - 2\alpha_0(x - x_0)(y - y_0) \right], \quad (5)$$

але, прийнявши $\alpha_0 = 0$ (довільний коефіцієнт, $-1 \leq \alpha_0 \leq 1$), цю функцію можна для використання представити у більш простому вигляді:

$$W(x, y) = x - x^2 + y - y^2 - \sqrt{(x - x^2)^2 + (y - y^2)^2}.$$

Коефіцієнти C_{ij} знаходять із умови мінімуму функціонала

$$I(\theta) = \int_{\Omega} \left[\text{grad}^2 \theta + Bi \theta^2 - 2 \frac{q_i}{\lambda d} \theta \right] d\Omega \rightarrow \min,$$

це означає, що все тепло від джерела $q_i(x, y)$ передається матеріалу плати у межах ділянки $\Omega = \Delta x \Delta y$ (потім воно розсіюється з поверхні плати конвекцією).

Система Рітца для визначення C_{ij} призводить до розв'язання системи рівнянь:

$$\sum_{i,j>0}^n C_{ij} \int_{\Omega} \left[\frac{\partial X_{ij}}{\partial x} \cdot \frac{\partial X_{ks}}{\partial x} + \frac{\partial X_{ij}}{\partial y} \cdot \frac{\partial X_{ks}}{\partial y} + Bi \cdot X_{ij} X_{ks} \right] dx dy = \int_{\Omega} \frac{q}{\lambda d} X_{ks} dx dy, \quad (6)$$

де $i+j = 0, 1, \dots, n$; $k+s = 0, 1, \dots, n$; i функція X_{ij} , яка визначає розподілення тепла,:

$$X_{ij} = x^{i+j} y^i + x^i y^{i+j} - W \times \left\{ \left[(i+j)x^{i+j-1} y^i + ix^{i-1} y^{i+j} \right] \frac{\partial W}{\partial x} + \left[iy^{i-1} x^{i+j} + (i+j)y^{i+j-1} x^i \right] \frac{\partial W}{\partial y} \right\}, \quad (7)$$

причому інтегрування проводиться у межах всієї пластини.

Аналогічний вигляд має функція X_{ks} , але інтегрування проводиться у межах ділянки, яку займає джерело $q_i(x,y)$.

Забезпечення достатньої точності розрахунку температур вимагає визначення від 6 до 10 коефіцієнтів C_{ij} .

При числовому моделюванні розрахунок температур $\theta(x,y)$ за вищевказаною методикою проводився за допомогою пакета *MathCad12* на згаданій вище ПЕОМ, для чого складена відповідна програма (лістинг займає 25 сторінок у символах *MathCad*).

Програма проводить:

- а) обчислення коефіцієнтів X_{ij} та X_{ks} згідно із рівнянням (7);
- б) обчислення інтегралів у правій та лівій частинах рівняння (6);
- в) складання матриць з інтегралів

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial X_{ij}}{\partial x} \cdot \frac{\partial X_{ks}}{\partial x} + \frac{\partial X_{ij}}{\partial y} \cdot \frac{\partial X_{ks}}{\partial y} + Bi \cdot X_{ij} X_{ks} \right] dx dy, \quad \int_{\Omega} \frac{q}{\lambda d} X_{ks} dx dy ;$$

г) визначення 10 коефіцієнтів C_{ij} розв'язанням системи лінійних рівнянь методом Гауса – Жордана;

- д) розрахунок температурного поля плати із джерелами тепла;
- е) побудову трьохмірної поверхні температурного поля плати.

На проведення всіх вказаних обчислювальних процедур згадана ПЕОМ витрачає біля 6 хвилин. При розрахунках поля температур плати, форма якої відрізняється від прямокутної, витрати машинного часу суттєво не збільшуються, тому що вони залежать від кількості обчислень функцій (6) та (7) при числовому диференціюванні та інтегруванні, а не від виразу функції (5), яка змінюється згідно із формою пластини.

Але використання *MathCad* у системі автоматизованого проектування (САПР) нераціональне – у такому середовищі неможливо забезпечити великі ітераційні обчислювальні цикли, які звичайно потрібні у процедурах оптимізації. Звичайно програми САПР функціонують в інтегрованих пакетах типу *Ci++Builder 5*, тому саме у цьому середовищі і створена програма для розрахунку поля температур плати за описаним вище алгоритмом. Витрати часу ПЕОМ приблизно такі ж (вони залежать від бажаної точності одержуваних результатів), але у подальшому подібна програма може бути

використана як модуль пакету вирішення задачі оптимізації при проектуванні реальної конструкції ФВ РЕА.

Частоти власних коливань та деформації ДП.

Для ДП складної форми, чи з різним закріпленням сторін на окремих ділянках, як частоти коливань, так і деформації необхідно визначати методами R -функцій – формули для частот плати ω_i та динамічних прогинів w_i можуть бути одержані як суми рядів:

$$\omega_i = \Phi^2 \sum_{i+j=0}^m B_{ij} T_i(\xi) T_j(\vartheta); \quad w_i = \Phi^2 \sum_{i+j=0}^m C_{ij} T_i(\xi) T_j(\vartheta),$$

де Φ – R -функція, що описує форму плати; $T_i(\xi)$, $T_j(\vartheta)$ – поліноми Чебишева.

Коефіцієнти B_{ij} , C_{ij} знаходять як коефіцієнти матриці Рітца із умов екстремуму функціоналів для кінетичної та потенційної енергії при коливаннях й прогинах [4]. Ці функціонали являють собою подвійні інтеграли, у які входять похідні функції Φ , тому для їх визначення, розв'язання матриці Рітца при обчисленні B_{ij} , C_{ij} витрачається значний час (до десятків хвилин) навіть при використанні швидкодіючої ПЕОМ.

Для ДП прямокутної форми із встановленими на ній ЕРЕ частоту власних коливань при віброзбудженні можливо розрахувати наближеним методом Релея – Рітца [2]:

$$\omega_o = \frac{\varphi(\beta)}{a^2} \sqrt{\frac{D}{m_e}}, \quad (8)$$

де $\varphi(\beta)$ – функція, що визначається співвідношенням сторін плати $\beta = a/b$, при цьому a – подовжня сторона, b – поперечна, та способами закріплення сторін; D – циліндрична жорсткість плати.

Деформації плати, які необхідні для визначення витривалості її самої, а також встановлених на ній ЕРЕ, при кінематичному збудженні із амплітудою зміщення основи z_o можуть бути розраховані за формулою:

$$z(x, y) = \sum_i \sum_k z_o K \eta \varphi_i(\xi) \varphi_k(\vartheta), \quad (9)$$

де K – коефіцієнт, що враховує спосіб закріплення сторін плати; η – коефіцієнт передачі.

Для розрахунків за формулами (8) – (9) параметрів плати використовувалися існуючі програми САПР, що функціонують у інтегрованому середовищі *Ci ++Builder 5*. На ПЕОМ із тактовою частотою 3,3 *MHz* результати одержуються практично миттєво (не потрібно визначати числовими методами похідні та подвійні інтеграли).

Програми умовної оптимізації.

Для досягнення максимуму комплексного показника якості конструкції при параметричній оптимізації необхідні програми пошуку екстремуму функції багатьох змінних із обмеженнями параметрів: площинки установки ЕРЕ на платі не повинні перекриватися та виходити за межі плати. Звичайно такі обмеження забезпечуються за допомогою так званих штрафних функцій, але останні створюються під конкретні умови, тобто для конкретної конструкції.

Такі програми, створені із використанням існуючих алгоритмів [7,8], мають бути розглянуті у подальших публікаціях.

Висновки

Комплексний показник якості складних об'єктів РЕА, який враховує вплив температурних режимів ЕРЕ, механічної міцності та витривалості, параметрів електромагнітної сумісності для ФВ та всього приладу, повинен бути сформований за допомогою показників надійності конструкції методами багатоцільової оптимізації,

Розрахунки параметрів теплового режиму, для ФВ та приладів, які мають складну геометричну форму й довільне розташування тепловиділяючих елементів, доцільно проводити методами *R*-функцій, інтегральних перетворень, конформних відображень – це дає можливість одержати достатньо точні значення температур ЕРЕ, що необхідно для оцінки параметрів їх надійності.

Такі ж методи потрібні, якщо розраховують параметри механічних коливальних процесів при віброзбудженні – частоти коливань та деформації елементів конструкції, і внаслідок цього виникаючі у них механічні напруження (що й визначає параметри надійності), у тому випадку, коли форма ФВ чи приладу відрізняється від прямокутника (для ДП) чи паралелепіпеду (для приладу), а також коли умови закріплення елементів конструкції відрізняються від звичайних.

На першому етапі проектування, коли створюється модель нульового рівня конструкції (яка потім є основою для майбутньої), і проводиться її параметрична оптимізація, можливо використовувати наближені оцінки параметрів конструкцій простої геометричної форми, для яких існують аналітичні рішення (які вважаються “точними”), що дозволяють розраховувати температурне поле й параметри коливань прямокутної пластини; їх можна прийняти як перше наближення для оцінки параметрів майбутньої конструкції – це дає суттєву економію часу проведення оптимізаційних розрахунків для моделі нульового рівня.

Література

1. Хоменюк В.В. Элементы теории многоцелевой оптимизации. М.: Наука, 1983. – 124 с.
2. Токарев М.Ф., Талицкий Е.Н., Фролов В.А. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.А. Фролова. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
3. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций.–М.: Машиностроение, 1990.–448 с.

4. Рвачев В.Л., Курпа Л.В. *R-функции в задачах теории пластин.* – Киев, Наукова думка, 1987. – 176 с.
5. Рвачев В.Л., Слесаренко А.П. *Алгебра логики и интегральные преобразования в краевых задачах.* – К.: Наукова думка, 1976. – 288 с.
6. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. *Методы расчета теплового режима приборов.* – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
7. Бейко И.В., Бублик Б.Н., Зинько П.Н. *Методы и алгоритмы решения задач оптимизации.* – К.: Вища школа. 1983.– 512 с.
8. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. *Оптимизация в технике: В 2-х кн. Пер. с англ.* – М.: Мир, 1986.

<p>Зиньковский Ю.Ф., Уваров Б.М. Методы оптимизации конструкций радиоэлектронных модулей Рассмотрены методы проектирования радиоэлектронных модулей в виде печатных плат, которые должны обеспечить одинаковую надежность конструкции по условиям вибропрочности и теплового режима электрорадиоэлементов</p>	<p>Zinkovsky J.F., Uvarov B.M. Optimization methods of designs of radioelectronic modules The methods of designing of radioelectronic modules as printed-circuit-boards are considered which should ensure identical reliability of a design on conditions vibration strength and thermal mode of radioelectronic components.</p>
--	--

Надійшла до редакції 5 жовтня 2006 року