

КОНСТРУЮВАННЯ РАДІОАПАРАТУРИ

УДК 621.396

ПРИНЦИПИ ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ ІЗ ОПТИМАЛЬНИМИ ПОКАЗНИКАМИ ЯКОСТІ*Уваров Б.М.*

Розглянуті проблеми, що виникають під час проектування оптимальних конструкцій радіоелектронної апаратури, а також методи створення цільової функції пристрою, що забезпечать найвищі показники якості об'єкту проектування

Головна мета процесу проектування будь-якого технічного об'єкту – одержати проектне рішення, яке забезпечить найвищі показники якості пристрою. У стислому вигляді кінцеве проектне рішення повинно бути відображене у цільовій функції (ЦФ) пристрою, яка містить зв'язок основних функціональних характеристик з більшістю його параметрів. Одержання ЦФ у вигляді рівняння (чи системи рівнянь) найчастіше само по собі буває проблемою, яку необхідно розв'язувати вперше.

Методи проектування технічних об'єктів

Доцільно методи проектування поділити на три групи:

- а) структурні – створюють на початковому етапі таку структуру об'єкту, яка не потребує подальшої суттєвої зміни її складових, бо відомо, що оптимум ЦФ буде забезпечений;
- б) адаптивні – структуру та її складові у процесі проектування змінюють, наближуючи показники пристрою до оптимальних;
- в) структурно-оптимізаційні – створюють структуру, близьку до оптимальної, а далі у процесі параметричної оптимізації одержують максимальну якість об'єкту.

Структурно-аналітичні методи потребують створення математичної моделі об'єкту проектування з глибокою деталізацією всіх (або значної більшості) його показників та зв'язків параметрів. За цих методів процес проектування – це дослідження згаданої моделі, визначення ЦФ. Для цього потрібний відповідний математичний апарат та ЕОМ великої потужності.

Адаптивні методи потребують вихідної математичної моделі пристрою й ЦФ, яка може й не враховувати всіх особливостей створюваного об'єкту, але передбачає можливість зміни моделі та її параметрів у процесі проектування – це евристичні методи проектування, методи морфологічного синтезу; всі вони потребують розвиненої бази знань у вигляді формалізованих моделей фізичних та технологічних процесів, методів зміни характеристик та параметрів об'єктів (евристичних прийомів), можливості проводити оцінку значень ЦФ для кожного варіанту об'єкту проектування, а також суттєвої участі людини-проектувальника у самому процесі [1]. Інструментальні обчислювальні засоби за цих методів повинні зберігати велику кількість інформації у базах знань та даних.

За структурно-оптимізаційних методів намагаються перед усім створити таку ЦФ, яка б могла забезпечити оптимальну структуру об'єкту, поєднувала в собі основні параметри пристрою, й не потребувала б зміни її самої на подальших етапах проектування; оптимуму її досягають параметричною оптимізацією – зміною параметрів таким чином, щоб досягнути максимального значення показника якості. Головна проблема за цих методів полягає у створенні ЦФ, адекватної майбутньому технічному пристрою: вона повинна містити у собі всі зв'язки між окремими параметрами конструкції та визначати їх вплив на головний показник якості цього пристрою, а оптимум ЦФ забезпечують умовною оптимізацією параметрів для чого повинні бути створені спеціальні (об'єктно-орієнтовані) системи автоматизованого проектування (САПР), у склад яких входять програми оптимізації. До ЕОМ пред'являються вимоги великої швидкодії: оптимізація провадиться послідовними ітераціями, на кожній з яких здійснюється великий об'єм обчислень.

Створення цільової функції пристрою методами теорії подібності

Методи подібності та розмірностей [2] можуть бути основою для створення структурної моделі пристрою та її ЦФ за структурно-оптимізаційного методу проектування.

Теорія подібності дає змогу визначити зв'язки між параметрами процесу, що розглядається, у вигляді критеріальних рівнянь, які замінюють повну систему диференціальних рівнянь, що цей процес описують. Наявність цих рівнянь, у які входять параметри технічного пристрою, пов'язані із реалізацією процесу, дозволяє створити модель нульового рівня, яка на наступних етапах проектування не потребує змін структури й принципів рішень, вимагає тільки параметричної оптимізації, завдяки чому суттєво скорочується об'єм проектних операцій та час проектування. Згідно з π -теоремою теорії подібності, кількість π_k безрозмірних критеріїв подібності K_i дорівнює $\pi_k = \pi_{\text{рп}} - \pi_{\text{ов}}$, де $\pi_{\text{рп}}$ – кількість розмірних параметрів; $\pi_{\text{ов}}$ – кількість основних одиниць вимірювання системи фізичних величин.

Одиничні критерії подібності, створені із фізичних величин, звичайно мають форму степеневих комплексів типу $K_i = a^\alpha b^\beta c^\gamma d^\delta$, де $a, b, c, d \dots$ – розмірні параметри, $\alpha, \beta, \gamma, \delta \dots$ – коефіцієнти впливу відповідного розмірного параметру на критерій K_i . Одиничні критерії K_i , що відносяться до якоїсь однієї сторони процесу можуть бути об'єднані у частинні критерії:

$$\bar{K}_i = \sum_k^n w_{ik} K_i, \quad (1)$$

де w_{ik} – функції впливу кожного з одиничних критеріїв на частинний.

Система n частинних критеріїв \bar{K}_i характеризує один і той же процес, що здійснюється у технічному пристрою, тому всі критерії взаємопов'язані, й можливо, згідно із принципом взаємності Онзагера [3], сфор-

мувати систему n лінійних рівнянь:

$$\begin{aligned} \bar{K}_1 &= w_{11}K_1 + w_{12}K_2 + w_{13}K_3 + \dots = \sum_i^n w_{1i}K_i \\ \bar{K}_2 &= w_{21}K_1 + w_{22}K_2 + w_{23}K_3 + \dots = \sum_i^n w_{2i}K_i \\ &\dots \\ \bar{K}_n &= w_{n1}K_1 + w_{n2}K_2 + w_{n3}K_3 + \dots = \sum_i^n w_{ni}K_i \end{aligned} \quad (2)$$

Комплексним показником якості у деяких випадках можна обирати будь-який з частинних критеріїв \bar{K}_i із системи (2), якщо він визначає найбільш важливі для конкретного пристрою властивості, але із врахуванням впливів всіх інших одиничних критеріїв.

Загальний комплексний критерій – ЦФ – найчастіше створюється, як лінійна згортка у теорії багатоцільової оптимізації [6]:

$$\bar{K} = \sum_i^n \bar{K}_i = \sum_i^n \sum_k^n w_{ik} K_i. \quad (3)$$

Функції w_{ii} із однаковими індексами – основні, вони визначають найбільший вплив критеріїв K_i на частинний; із різними – w_{ik} – перехресні, це впливи решти критеріїв K_k на \bar{K}_i , причому перехресні функції взаємного впливу дорівнюють одна одній: $w_{ik}=w_{ki}$; вони можуть бути визначені різними способами – теоретично, виходячи з математичної моделі процесу, методами теорії багатоцільової оптимізації, методами регресійного аналізу на основі статистичних досліджень.

Загальний комплексний критерій \bar{K} , який враховує вплив всіх параметрів на показники об'єкту, що проектується, дає можливість визначити, які параметри і яким чином впливають на його якість, тобто дозволяють спроектувати пристрій із найвищими показниками якості, починаючи із створення структурної моделі нульового рівня.

Комплексний безрозмірний критерій якості та модель нульового рівня конструкції радіоелектронного апарату

Показники якості систем захисту РЕА від зовнішніх впливів

Характерна особливість РЕА – вплив різноманітних дестабілізуючих факторів зовнішнього середовища на її роботу, тому важливою вимогою до конструкції як раз і є забезпечення функціонування апарату під час дії цих факторів, а також захист цього середовища від можливих шкідливих впливів самого апарата.

Дестабілізуючі зовнішні фактори: а) механічні – зовнішній тиск, вакуум, лінійні прискорення, вібрації, удари; б) кліматичні – температура, волога; в) магнітні, електричні та електромагнітні поля; г) різні види радіації; д) агресивне середовище, лід, пил, т.п. Для всіх цих параметрів є одиниці вимірювання (тобто вони розмірні), і значення кожного з них Φ_k при проектуванні апарату відоме, а також відоме (з умов нормальної роботи функціональних елементів та вузлів апарату) допустиме значен-

ня $\Phi_{кР}$ фактору у внутрішньому об'ємі.

Рівень захищеності від впливу конкретного фактору можливо визначати за допомогою параметричних критеріїв $(K_{\Phi_k})_{сз} = \frac{\Phi_k}{\Phi_{кР}}$, кожний із яких висуває вимоги

до системи захисту внутрішнього об'єму апарату від кожного із зовнішніх дестабілізуючих факторів, причому, чим більше критерій, тим вище якість. На основі інженерного досвіду проектування РЕА можна знайти для кожної із вказаних систем значення критеріїв $(K_{\Phi_k})_{сз}$, тобто визначити, яку із існуючих необхідно застосувати для апарату, що створюється, і які повинні бути її параметри. Якщо жодна із відомих систем не може забезпечити необхідного значення конкретного $(K_{\Phi_k})_{сз}$, це означає, що потрібне нове рішення даної технічної проблеми. У дійсності елементи всіх цих систем є органічними частками конструкції апарату, вони впливають на його об'єм та масу (відповідні коефіцієнти w_{ik} дуже суттєві), тому доцільно ще додатково оцінити масову характеристику кожної системи захисту критерієм $(K_{m_k})_{сз} = 1 - \frac{m_{сз}}{M}$, де

$m_{сз}$ – маса елементів системи захисту.

Технічну досконалість РЕА у більшості випадків оцінюють його функціональними параметрами (вони розмірні); комплексна оцінка повинна врахувати й особливості його конструкції, для чого потрібні безрозмірні кількісні критерії, які б поєднували і функціональні ознаки, і конструктивні характеристики.

Макропоказники якості конструкції корпусу

Внутрішній склад та компонування апарату залежать від конкретного функціонального призначення, а всі можливі варіанти корпусу РЕЗ, якими б вони не були – чи індивідуальної конструкції, чи у вигляді уніфікованих типових конструкцій (УТК), можливо "генерувати" методом морфологічного синтезу [1], але вибір оптимального (у тому числі й уніфікованих) потребує безрозмірних критеріїв якості.

Важливими показниками для РЕА є коефіцієнти заповнення об'єму корпусу k_3 та використання маси k_m ; $k_3 = \bar{V} / V$ – характеристика раціональності компоновки (\bar{V} – об'єм, зайнятий електрорадіоелементами – ЕРЕ та функціональними вузлами – ФВ); $k_m = \bar{M} / M$ – характеристика маси радіоелектронної структури в апараті (\bar{M} – маса ЕРЕ та ФВ).

Безрозмірний одиничний критерій K_V – коефіцієнт використання об'єму РЕЗ, може бути створений у вигляді:

$$K_V = \frac{(N - \bar{N})\tau^3 k_m k_3^{2/3}}{MV^{2/3}} \quad (4)$$

Показники степеня у k_3 та k_m такі ж, як і у параметрів, із якими ці коефіцієнти пов'язані (тобто V та M). Вираз (4) – макропоказник конструктивної структури РЕЗ та технічних рішень, що забезпечили її реалізацію: чим менше об'єм та маса корпусу, у якому здійснюється функціонування радіоелектронної структури апарату, тим досконаліше конструкція; видно також, який значний вплив на якість апарату має

технічний ресурс τ .

Показники захисту РЕЗ від зовнішніх механічних впливів

Досконалість системи захисту пристрою від вібраційних та ударних впливів можливо оцінювати за допомогою коефіцієнтів динамічного підсилення $K_{\text{дин}}$ за силового чи передачі $K_{\text{кін}}$ – за кінематичного збудження [4]. У резонансній зоні ефективність захисту можна оцінити значеннями $K_{\text{еф}}=1/K_{\text{дин}}$ та $K_{\text{еф}}=1/K_{\text{кін}}$ ($K_{\text{дин}} > 1$ та $K_{\text{кін}} > 1$), а у зарезонансній – $K_{\text{еф}}=1-K_{\text{дин}}$ чи $K_{\text{еф}}=1-K_{\text{кін}}$ ($K_{\text{дин}} < 1$ та $K_{\text{кін}} < 1$).

Власна частота РЕЗ ω_0 , який розглядають як тверде фізичне тіло, залежить від конструкції корпусу, масових та інерційних характеристик ФВ, внутрішньої компоновки – розміщення останніх у корпусі, тобто масових та інерційних характеристик всієї конструкції. Оптимальна компоновка ФВ у корпусі – та, що забезпечує необхідне значення ω_0 : за низької частоти $\omega_0 \rightarrow \max$, за високої $\omega_0 \rightarrow \min$; у останньому випадку у зарезонансній зоні буде забезпечений віброзахист. Зменшення ударних навантажень на елементи конструкції можливе, якщо коефіцієнт розладу $\nu = \omega_{\text{уд}}/\omega_0 > 1.873$ за напівсинусоїдального ударного імпульсу, та $\nu = \omega_{\text{уд}}/\omega_0 > 3$ за прямокутного ($\omega_{\text{уд}} = \pi/\tau_{\text{уд}}$ – умовна частота ударного імпульсу тривалістю $\tau_{\text{уд}}$).

Таким чином, для забезпечення захисту від вібраційних та ударних навантажень необхідно забезпечити відповідні масові та інерційні характеристики РЕЗ, які залежать від конструкції корпусу та розміщення ФВ у його внутрішньому об'ємі.

Міцність та витривалість елементів конструкції корпусу

Показник використання несучої спроможності матеріалів – одиничний критерій: у елементах конструкції виникають діючі напруження σ , τ , σ_k (нормальні, дотичні, контактні); допустимі їх значення σ_p , τ_p , σ_{kp} визначаються властивостями матеріалів. Цей критерій показує, наскільки використана спроможність матеріалу "нести навантаження":

$$K_M = \left(\frac{\sigma}{\sigma_p} \right)^\alpha \left(\frac{\tau}{\tau_p} \right)^\beta \left(\frac{\sigma_k}{\sigma_{kp}} \right)^\gamma, \text{ де } \alpha, \beta, \gamma - \text{коефіцієнти впливу відповідних напружень на загальну міцність конструкції} - \text{останні можуть бути знайдені розрахунками чи методами регресійного аналізу; максимальне значення } K_M = 1 \text{ для пристрою найвищої якості. Намагання досягти значення } K_M = 1 \text{ при проектуванні буде вимагати раціоналізації конструкції основних деталей, мінімізації їх розмірів (маси) - додатковий вплив на зменшення загальної маси } M.$$

них напружень на загальну міцність конструкції – останні можуть бути знайдені розрахунками чи методами регресійного аналізу; максимальне значення $K_M = 1$ для пристрою найвищої якості. Намагання досягти значення $K_M = 1$ при проектуванні буде вимагати раціоналізації конструкції основних деталей, мінімізації їх розмірів (маси) – додатковий вплив на зменшення загальної маси M .

Показники системи забезпечення теплового режиму РЕЗ визначає одиничний критерій K_T , який можна сформулювати, розглядаючи значення абсолютних температур: T_0 – оточуючого середовища; температури, які забезпечені у апараті – $T_{\text{вн}}$ – внутрішню у корпусі, $T_{\text{ел}}$ – ЕРЕ та ФВ; витрати енергії $N_{\text{охл}}$ на функціонування систем підтримки необхідного теплового режиму (вентиляції, охолодження ФВ) у внутрішньому об'ємі, що виділяється елементами у внутрішньому об'ємі корпусу $N_{\text{ел}}$ та потужність, яка потрібна для роботи системи охолодження $N_{\text{охл}}$:

$$K_T = \frac{T_o}{\Delta T_{\text{вн}}} = \frac{T_o k_{\text{вн}} F_{\text{ел}}}{N_{\text{зб}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{k_{\text{вн}} F_{\text{ел}}}{k_{\text{к}} F_{\text{к}}}} \left(1 - \frac{N_{\text{охл}}}{N_{\text{ел}}} \right),$$

де $F_{\text{ел}}$, $F_{\text{к}}$ – площа тепловідводу елементів, що виділяють тепло, та зовнішня корпусу, відповідно; $k_{\text{ел}}$, $k_{\text{к}}$ – коефіцієнти тепловіддачі від поверхні елементів до внутрішнього об'єму та від корпусу до зовнішнього середовища. Це співвідношення дозволяє визначити вимоги до параметрів $k_{\text{вн}}$, $k_{\text{к}}$, $F_{\text{ел}}$, $F_{\text{к}}$, які й необхідно забезпечити при проектуванні.

Показники системи забезпечення електромагнітної сумісності

Захищеність апаратури від впливу зовнішніх електромагнітних завад (а також вплив самого апарату на зовнішнє середовище) визначають норми електромагнітної сумісності [6]; ці показники – одиничні критерії, що увійдуть у комплексну оцінку.

Показники технологічності конструкції

Технологічна досконалість конструкції може бути визначена за допомогою основних показників технологічності: коефіцієнтів рівня технологічності $K_{\text{рт}}$ – за трудомісткістю виготовлення, та $K_{\text{св}}$ – собівартості, які безрозмірні, їх можна об'єднати у один: $K_{\text{тех}} = K_{\text{рт}} K_{\text{св}}$. Існують нормативні документи, де викладена методика розрахунку вказаних коефіцієнтів.

Коефіцієнт корисної дії РЕЗ

Для РЕА, у яких створення потоку енергії на виході – головна функція, коефіцієнт корисної дії (ККД) $\eta = \bar{N} / N$ також необхідно використовувати, як одиничний критерій $K_{\eta} = \eta$ із своїм коефіцієнтом впливу w_{ik} ; якщо $\bar{N} = 0$, відповідні коефіцієнти впливу $w_{ii} = w_{ik} = 0$.

Комплексний показник якості конструкції формується у вигляді рівняння (3) із частинних та одиничних критеріїв – це й є модель нульового рівня, яка на подальших етапах проектування повинна перетворитися у конструкцію реального РЕЗ, а її максимального значення необхідно добиватися оптимізацією параметрів, що входять до всіх критеріїв.

Параметрична оптимізація ЦФ провадиться зміною параметрів для одержання максимуму частинних критеріїв та комплексного – це й буде оптимальна модель конструкції. Звичайно майже на значення кожного із параметрів реальної конструкції (розміри, форму, механічні характеристики матеріалів, температури ЕРЕ та ФВ й т.п.) накладені обмеження, тому параметрична оптимізація майже завжди повинна бути умовною (на відміну від безумовної, коли обмежень немає). Алгоритми та програми умовної оптимізації вже при відносно невеликій кількості змінюваних параметрів (десятках) вимагають швидкодіючих ЕОМ та значного часу проектування [9].

Висновки

Конструкція РЕЗ – це складна система взаємопов'язаних деталей, ФВ, ЕРЕ. Математична модель у вигляді комплексного критерію відображає ці

зв'язки, й тому, при оптимізаційній зміні будь-якого параметру, змінюються майже всі частинні критерії. Якщо намагатися покращити якусь одну властивість конструкції, вважаючи її важливою, можна погіршити іншу. Тому й виникає проблема багатоцільової оптимізації – визначення оптимального вибору параметрів для досягнення максимуму комплексного показника [6]. Для параметричної оптимізації необхідно створити системи рівнянь, що визначають, в залежності від координат функціональних вузлів, частоти власних коливань РЕЗ, температури у корпусі, параметри електромагнітної сумісності й т.п. (побудова такої математичної моделі – достатньо складна задача). Структура корпусу РЕЗ – це компромісні компонувальні рішення, які повинні вдовольнити визначені вимоги, а оптимальний варіант може бути знайдений за допомогою оптимізації ЦФ.

Література

1. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества: Учеб. пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
2. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1972. 440 с.
3. Денбиг К. Термодинамика стационарных необратимых процессов: Пер. с англ. М.: ИЛ, 1954. – 120 с.
4. Хоменюк В.В. Элементы теории многоцелевой оптимизации. М.: Наука, 1983. 124с.
5. 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.
6. Бадалов А.Л., Михайлов А.С. Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС: Справочник. М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.
7. Прищепа М.М., Погребняк В.П. Мікроелектроніка. В 3 ч. Навч. посіб. / За ред. М.М. Прищепи. К.: Вища школа, 2004.
8. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. К.: Наукова думка, 1982. 550 с.
9. Оптимальное схемотехническое проектирование в машиностроении: Учебное пособие / А.И. Петренко, В.В. Ладогубец, В.В. Чкалов. К., УМК ВО, 1989. 164 с.

Ключові слова: конструювання радіоелектронної апаратури, радіоелектронна апаратура, оптимальне конструювання	
Уваров Б.М.	Uvarov S.M.
Принципы проектирования конструкций радиоэлектронных аппаратов с оптимальными показателями качества	Principles of designing of designs of radio-electronic devices with optimum parameters of quality
Рассмотрены проблемы, возникающие при проектировании конструкций радиоэлектронной аппаратуры, а также методы создания целевой функции устройства, обеспечивающие наивысшие показатели качества объекта проектирования	The problems arising at designing of optimum designs of radioelectronic modules the equipment, and also methods of creation of criterion function of the device ensuring best parameters of quality of object of designing are considered