

порядку треба ітераційним методом, часто із застосуванням регуляризації [3]. Для відомих струмів в площині стику треба знайти напруженість електричного поля в об'ємних елементах середовища (1). Таким способом виявляємо вплив поля в об'ємі (2) на розподіл електричного поля в об'ємі (1).

Розглянутий вище алгоритм вжито для дослідження розподілу густини електромагнітної потужності в біологічному середовищі, розташованому у хвилеводі аплікатора. Доведено можливість керування цим розподілом в об'ємі середовища. Частина біологічного об'єкта, що не підлягає нагріванню, розташовано у допоміжному граничному хвилеводі. Аналіз поля, випромінюваного магнітними поверхневими струмами в площі стику хвилеводів, виявив слабкий вплив допоміжного хвилеводу на розподіл напруженості електричного поля в об'ємі нагрівання біологічного середовища.

1. Collin R.E. *Field theory of guided waves*. New York-Toronto, 1960. 2. Harrington R.F. *Time harmonic electromagnetic fields*. New York-London, 1961. 3. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. *Интегральные уравнения*. К., 1986. 4. Захарія Й.А., Патрило Ю.М. *Моделювання розподілу об'ємної густини потужності електромагнітного поля у біологічному середовищі // Вісн. ДУ "Львівська політехніка"*. 2000. № 387. С.13-16. 5. Машковцев Б.М., Цибизов Л.Н., Емелін Б.Ф. *Теория волноводов*. М., 1966.

УДК 621.382.33:681

І. Казимира

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювань

ВИКОРИСТАННЯ СПРОЩЕНИХ МОДЕЛЕЙ ІС ПРИ РОЗВ'ЯЗАННІ ЗАДАЧ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

© Казимира І., 2001

Проаналізовано основні проблеми розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації ІС. Обґрунтовано, що на етапі пошуку оптимально компромісних розв'язків такої задачі тільки використання ефективних апроксимаційних макромоделей може забезпечити прийнятні часові витрати. Розроблено підхід до практичного розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації ІС, який базується на побудові спрощених моделей ІС, тобто аналітичних моделей, що апроксимують вихідні параметри і характеристики схеми в задачах аналізу та частковій критерії оптимальності і функції обмежень у оптимізаційних моделях задач параметричної оптимізації. Розглянуто практичні аспекти використання спрощених моделей для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації генератора імпульсів.

1. Мотивація розробки спрощених моделей ІС для забезпечення ефективного розв'язання оптимізаційних задач

Для забезпечення ефективності проектування необхідно враховувати такі особливості задач оптимального проектування ІС: а) багатокритеріальний характер задачі; б) висока складність моделі об'єкта оптимізації, що виключає можливість аналітичного опису, і пов'язаний з цим великий час аналізу моделі числовими методами.

1.1. Формулювання задачі практичної багатокритеріальної оптимізації ІС

Досвід проектувальників ІС [1–4] свідчить, що в процедурах оптимального проектування здебільшого доводиться розв'язувати задачу багатокритеріальної оптимізації. Практичне формулювання задачі багатокритеріальної оптимізації відрізняється від класичного хіба що відсутністю систем обмежень типу рівності [5]. Проектувальники намагаються уникати обмежень типу рівності, бо в такому разі область пошуку оптимальних рішень може перетворитись у порожню множину: $R_{opt}=0$. Як правило, на обмеження типу рівності накладають деякі “поступки”, що перетворює їх в обмеження типу нерівності. Запишемо задачу практичної багатокритеріальної оптимізації так

Знайти

$$x^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*\}^T, \quad (1)$$

що забезпечує

$$\min_{x \in R_{opt}} Q(x) = \{q_1(x), q_2(x), \dots, q_M(x)\} = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)\} \quad (2)$$

за умов працездатності

$$G_{\phi_i}(x) = (y_i^{max} - y_i(x))(y_i(x) - y_i^{min}) \geq 0, \quad i = \overline{1, K}, \quad (3)$$

$$G_{X_i}(x) = (x_i^{max} - x_i)(x_i - x_i^{min}) \geq 0, \quad i = \overline{1, N}, \quad (4)$$

де x^* – N -вимірний вектор оптимальних значень змінних параметрів оптимізації (параметрів елементів схеми), тобто розв'язок задачі; x – N -вимірний вектор змінних параметрів оптимізації, тобто множина змінних оптимізації, утворена зі змінних множини внутрішніх параметрів елементів схеми; $Q(x)$ – M -вимірний вектор критеріїв оптимальності, в якому $q_i(x) = f_i(x)$ – i -й частковий критерій оптимальності; R_{opt} – область пошуку оптимальних рішень, яка в практичних задачах складається з перетину двох областей: $R_{opt} = R_\partial \cap R_\phi$.

Область допустимих рішень $R_\partial = \left\{ x \mid \bigcap_{i=1}^N G_{X_i}(x) \geq 0 \right\}$ утворюється системою так званих

обмежень “на існування”, накладених на параметри елементів схеми. Область можливих рішень $R_\phi = \left\{ x \mid \bigcap_{i=1}^K G_{\phi_i}(x) \geq 0 \right\}$ формується системою функціональних обмежень, які

накладаються на ряд вихідних параметрів і характеристик схеми згідно з технічним завданням. Такі параметри і характеристики не обов'язково підлягають мінімізації чи максимізації, але для них необхідно забезпечити невихід за допустимі границі. Серед множини цих обмежень можуть бути і критеріальні обмеження, які накладаються на часткові критерії оптимальності; x_i^{min}, x_i^{max} – границі існування i -го змінного параметра оптимізації (параметра елемента схеми), що належить множині параметрів технічного завдання, в якій задано границі зміни внутрішніх параметрів схеми, які, як правило, визначаються можливостями інтегральної технології виготовлення ІС; $y_i(x)$ – i -й вихідний функціональний параметр, що належить множині вихідних параметрів і не оптимізується; y_i^{min}, y_i^{max} – задані обмеження на i -й вихідний функціональний параметр, що належить множині параметрів технічного завдання і визначає допустимі границі зміни тих вихідних параметрів і характеристик схеми, що не підлягають оптимізації.

1.2. Особливості задачі багатокритеріальної оптимізації.

У задачі багатокритеріальної оптимізації (1)–(4) кожній точці $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}^T$, що належить N -вимірній області пошуку оптимальних рішень R_{opt} ($x \in R_{opt}$), можна поставити у відповідність точку $Q = \{q_1(x), q_2(x), \dots, q_M(x)\}$, що належить M -вимірній області критеріїв R_Q ($Q \in R_Q$). У класичних задачах математичного програмування область критеріїв R_Q складається з двох областей: $R_Q = R_{Q_{згд}} \cup R_{Q_P}$ – області згоди $R_{Q_{згд}}$ та області компромісів R_{Q_P} , яку ще називають областю Парето. В області згоди часткові критерії оптимальності не конфліктують між собою і при переході в просторі вхідних параметрів R_{opt} з будь-якої k -ої точки $x^{(k)}$ у l -ту точку $x^{(l)}$ області в просторі вихідних параметрів оптимізаційної моделі всі часткові критерії зменшуються (чи збільшуються), принаймні не погіршуються, а один обов'язково покращується $q_i(x^{(l)}) \leq q_i(x^{(k)})$, $q_j(x^{(l)}) < q_j(x^{(k)})$, $j \neq i$, $i = \overline{1, M}$. Класичним прикладом області критеріїв, що складається виключно з області згоди $R_Q = R_{Q_{згд}}$, є випадок, коли всі часткові критерії оптимальності набирають мінімальне значення в одній точці x^* . У практичних задачах багатокритеріальної оптимізації існує область компромісів, де критерії є суперечливими, тобто при переході в області вхідних параметрів з точки $x^{(k)}$ в точку $x^{(l)}$ в області критеріїв деякі критерії покращуються, а деякі (принаймні один обов'язково) погіршуються. Власне точки області пошуку оптимальних рішень, що відповідають точкам області компромісів у просторі критеріїв, називаються ефективними точками і утворюють множину Парето. Оптимальний розв'язок задачі необхідно шукати у множині цих точок.

Оптимальний розв'язок $x^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*\}^T$ задачі багатокритеріальної оптимізації (1)–(4), не будучи оптимальним для жодного з часткових критеріїв $q_i(x)$ (якщо виконати однокритеріальну оптимізацію критерію $q_i(x)$), повинен бути компромісним для векторного критерію $Q(x)$ загалом. Таке оптимально-компромісне рішення належить області ефективних точок або області рішень, оптимальних за Парето. Оптимальність за Парето означає, що не можна далі зменшувати значення одного з часткових критеріїв, не збільшуючи хоча б одного з решти. Це призводить до необхідності компромісу між частковими критеріями оптимальності, і оптимально-компромісним розв'язанням задачі багатокритеріальної оптимізації є одна з ефективних точок, що належить області Парето. Це точка, якій проектувальник віддав перевагу над іншими оптимальними за Парето рішеннями. Множина Парето є узагальненим поняттям компромісної кривої: для двох критеріїв ці поняття збігаються (в області критеріїв множина Парето розміщена на границі області). На рис. 1 графічно наведено відображення області змінних параметрів оптимізації в область критеріїв у задачі багатокритеріальної оптимізації.

Таке визначення оптимально-компромісного рішення дає змогу розділити розв'язання задачі векторної оптимізації на два етапи: 1) визначення ефективних точок задачі багатокритеріальної оптимізації; 2) вибір з множини ефективних точок оптимально-компромісного рішення, якому надана найбільша перевага особою, що приймає рішення. У задачах параметричної оптимізації ІС проектувальник здебільшого має справу принаймні з двома суперечливими критеріями (смуга пропускання – коефіцієнт підсилення, точність – технологічність тощо). Отже, шукати оптимальні рішення необхідно в області ефективних точок.

1.3. Аналіз способів розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації ІС

Найпростіший спосіб розв'язання задачі (1)–(4) полягає у визначенні множини Парето і організації пошуку оптимальних рішень у ній. Множину Парето можна виділити, побудувавши скінченну точкову підмножину $R_{QP}^{(\varepsilon)}$ множини Парето R_{QP} (скінченна ε -сітка точок множини Парето), що покриває її із заданою точністю [6].

У багатьох випадках виділення $R_{QP}^{(\varepsilon)}$ – це грандіозна за обсягом обчислень задача [6–7].

Адже доводиться будувати ε -сітку для множини розмірністю $M-1$, а для отримання кожної точки сітки треба розв'язати оптимізаційну задачу того ж порядку складності, що і (1)–(4), тільки із згорнутим векторним критерієм [6]. Якщо кількість критеріїв $M=5\div 10$ і великі вимоги до точності покриття, кількість точок ε -сітки, і, відповідно, кількість розв'язань оптимізаційних задач, стають надто великими. Тому необхідно використовувати інші методи, що не вимагають розрахунку $Q(x)$ у кожній точці ε -сітки. У реалізації таких методів основні труднощі виникають через те, що множина Парето є складною гіперповерхнею з не відомою наперед геометрією. Для виходу на неї необхідно організувати згортку векторного критерію $Q(x)$ і розв'язати задачу однокритеріальної оптимізації. Точка Парето, яка буде отримана в результаті розв'язку, не відома наперед. Для реалізації такого підходу використовують параметризацію множини Парето [1, 6, 8, 9], яка полягає у згортанні векторного критерію $Q(x)$ до скалярного $Q(w, Q(x))$, що залежить від векторного параметра $w=(w_1, w_1, \dots, w_m)$. Вибираючи чергове значення $w^{(o)}$ і розв'язуючи задачу мінімізації $Q(w^{(o)}, Q(x))$, визначають чергову точку Парето $x^{(e)}(w^{(o)})$.

Парадигма розв'язання задачі багатокритеріальної багатопараметричної нелінійної оптимізації ІС (1)-(4) містить зведення задачі векторної оптимізації до скалярної згорткою векторного критерію (2) до скалярного за допомогою адитивної узагальненої функції мети. Таку оптимізаційну модель у загальному випадку можна записати так.

Знайти

$$x^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*\}^T, \quad (5)$$

що забезпечує

$$\min_{x \in R_{opt}} Q(x) = \left[\sum_{k=1}^M (w_k q_k(x))^\alpha \right]^{1/\alpha}, \quad \alpha \geq 1, \quad \sum_{k=1}^M w_k = 1, \quad w_k \geq 0, \quad k = \overline{1, M} \quad (6)$$

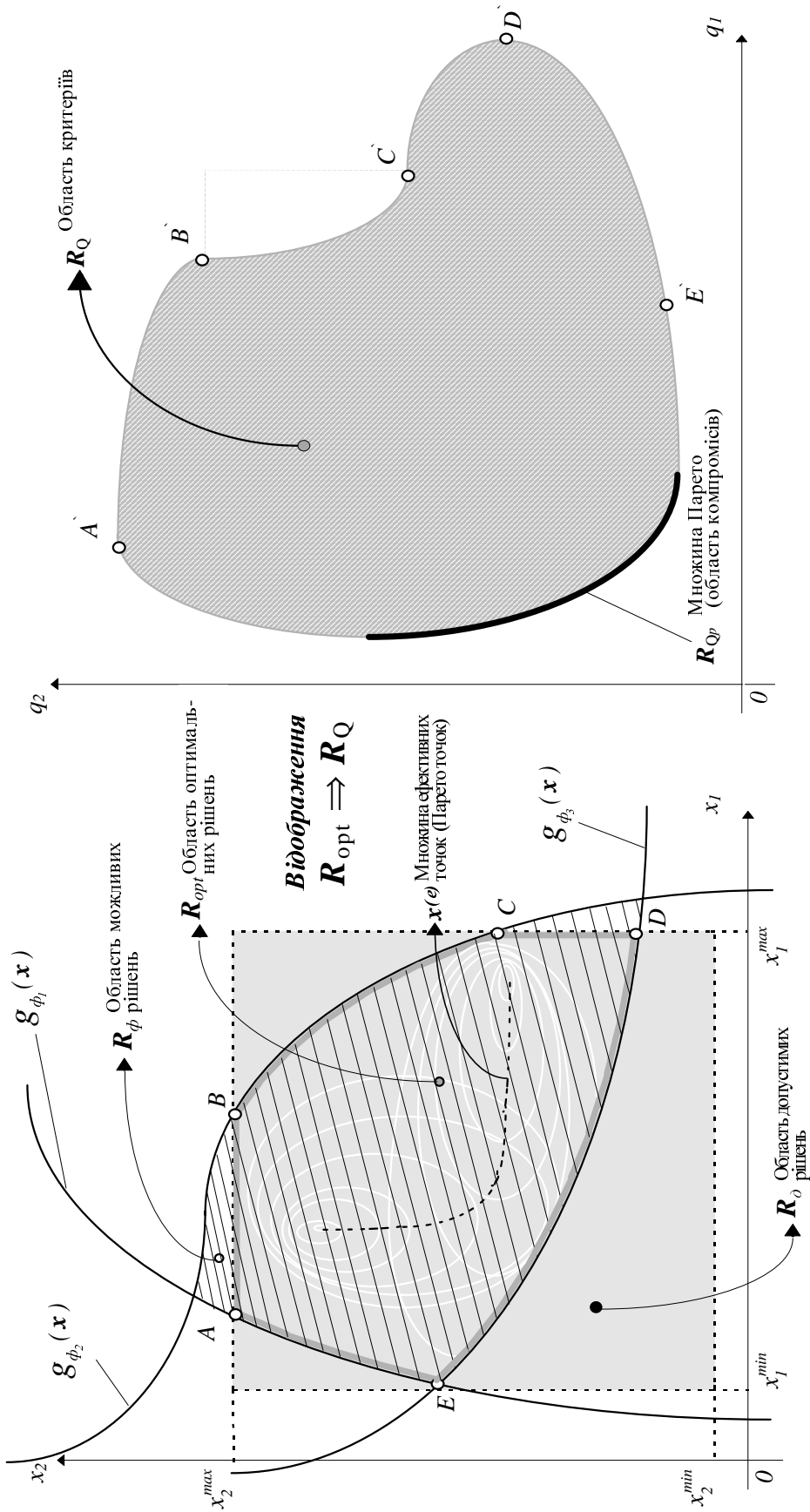
за умов працездатності

$$G_{\Phi_i}(x) = (y_i^{max} - y_i(x))(y_i(x) - y_i^{min}) \geq 0, \quad i = \overline{1, K}, \quad (7)$$

$$G_{X_i}(x) = (x_i^{max} - x_i)(x_i - x_i^{min}) \geq 0, \quad i = \overline{1, N}, \quad (8)$$

де $Q(x)$ – узагальнена адитивна функція цілі; w_i – i -й ваговий коефіцієнт, що визначає стратегію оптимізації за вагою (значимістю) i -го часткового критерію оптимальності.

Хоча постановка (5)-(8) і є найпоширенішою, однак застосування її в задачах оптимального проектування ІС має свої особливості, що викликає ряд проблем. По-перше, кожен коефіцієнт w_i повинен враховувати відносну важливість мінімізації $q_i(x)$, а отже і відносні величини чи масштаби відповідних q_i , що мають різні одиниці вимірювання (оми, вольти, мікросекунди тощо) [2]. Тому призначити “справжнє” значення w_i досить важко,



N -вимірний область R_x вхідних параметрів
оптимізаційної моделі ($N=2$)

M -вимірний область R_Q вхідних параметрів
(критеріїв) оптимізаційної моделі ($M=2$)

Рис.1. Графічна ілюстрація відображення області змінних параметрів оптимізації в область багатокритеріальної оптимізації

особливо, якщо часткові критерії доволі різнотипні. По-друге, на початкових стадіях розробки принципової схеми ще не визначені найкращі можливості ІС і ті вихідні параметри і характеристики, від яких найбільше залежить точність і якість її функціонування, що робить неможливим правильне призначення відносних ваг кожної цільової функції. По-третє, у практичних задачах “важливість” окремих критеріїв залежить від значень, які ці критерії набирають, тобто у різних частинах області компромісів розумно було б вказувати різні значення w_i .

Перераховані особливості вказують на те, що розв’язання задачі обов’язково повинне бути інтерактивним або необхідно ускладнювати задачу, оцінюючи оптимальні розв’язки при змінних значеннях w_i [7].

Наведений приклад одного з найпоширеніших підходів до розв’язання задачі багатокритеріальної оптимізації та зазначені проблеми, що виникають під час реалізації цього підходу, свідчать про принципову можливість отримання розв’язку. Проблеми пошуку найкращого розв’язку задачі багатокритеріальної оптимізації зі змінним успіхом вирішуються при розв’язанні стандартних задач математичного програмування. У задачах оптимального проектування ІС можливість оцінки різних оптимально-компромісних розв’язків стає проблематичною, практично неможливою. Справа в тому, що у стандартних задачах математичного програмування критеріальні функції $q(x)$ і функції обмежень $g(x)$ явно залежать від x . У задачах проектування ІС залежність цих функцій від параметрів елементів схеми виражається неявно через рівняння електричних кіл, що здебільшого дає змогу з великими часовими витратами отримати одиничну оцінку оптимально-компромісного розв’язку, не кажучи вже про порівняльний аналіз таких оцінок.

Тому у схемотехнічному моделюванні ІС необхідно розвивати запропоновані підходи до побудови аналітичних макромоделей на основі теорії багатofакторних машинних експериментів [5, 10, 11, 12] і використовувати їх при розв’язанні задач параметричної оптимізації як один з можливих шляхів ефективного пошуку оптимально-компромісних розв’язків задачі багатокритеріальної оптимізації.

Основним завданням побудови аналітичних макромоделей, в такому випадку, є:

1. Спрощення повної моделі схеми, що виражається системою алгебро-диференціальних рівнянь $Y=F(x)$, апроксимацією функціональної залежності F вихідних параметрів і характеристик схеми Y від внутрішніх параметрів x :

$$y_j = \varphi_{анр_j}(x), \quad j = \overline{1, M}. \quad (9)$$

2. Спрощення оптимізаційної моделі апроксимацією часткових критеріальних функцій $q_i(x) = f_i(x)$, $i = \overline{1, M_{opt}}$ та функціональних обмежень $g_{\Phi_j}(x)$, $j = \overline{1, K_{\Phi}}$:

$$q_i = \psi_{анр_i}(x), \quad i = \overline{1, M_{opt}}, \quad (10)$$

$$g_{\Phi_j} = \psi_{анр_j}(x), \quad j = \overline{1, K_{\Phi}}, \quad (11)$$

де $\psi_{анр_i}$ – аналітична апроксимаційна функція, що апроксимує залежність критеріїв оптимальності і функціональних обмежень від змінних параметрів оптимізації x_{opt} .

2. Практичне використання апроксимаційних моделей у задачах багатокритеріальної параметричної оптимізації ІС.

Проаналізовано методики планування багатofакторних машинних експериментів, що використовують спеціальні плани, щодо застосування їх для автоматичної побудови

спрощених моделей ІС для покращання ефективності проектування. На основі цього для синтезу спрощених моделей запропоновано [5, 10–13] використовувати дворівневі повні та дробові факторні експерименти, що дають змогу отримати білінійні і лінійні аналітичні макромоделі. Побудовані аналітичні макромоделі використовуються для ефективного пошуку оптимально-компромісних розв'язків задачі багатокритеріальної оптимізації ІС.

Як приклад використання спрощених моделей, синтезованих на основі машинного експерименту, розглянемо ІС генератора імпульсів спеціальної форми. Початкове схемотехнічне рішення генератора показано на рис. 2.

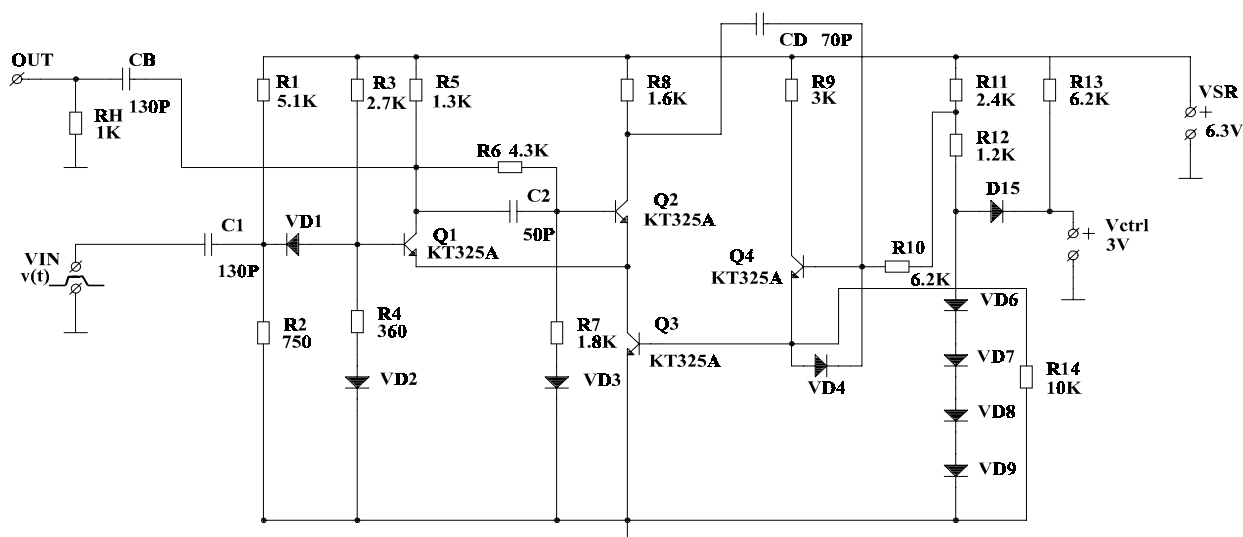


Рис. 2. Принципова схема генератора імпульсів спеціальної форми

Генератор імпульсів спеціальної форми є схемою середнього ступеня інтеграції, зі складною внутрішньою функцією. Основна функція схеми – генерація вихідного імпульсу заданої форми (амплітуди, тривалості, часу затримки тощо) під час надходження на вхід схеми трапецієвидного імпульсу. Генератор спрацьовує по задньому фронту вхідного імпульсу. Схема не проста з погляду аналізу в часовій області підсистемами схемотехнічного

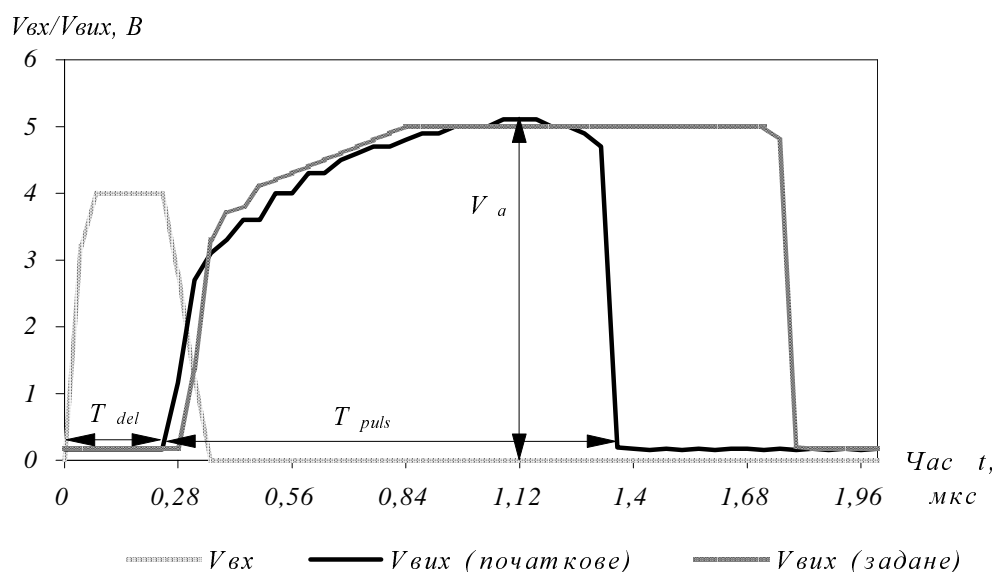


Рис.3. Результати схемотехнічного аналізу генератора імпульсів у часовій області

проектування. Згідно з технічним завданням на проектування основними вихідними параметрами імпульсу, що генерується схемою, є тривалість імпульсу τ_{imn} , час затримки t_{del} та амплітуда V_a , які відповідно до ТЗ повинні дорівнювати: $\tau_{imn}=1.5$ мкс, $t_{del}=0.3$ мкс, $V_a=5.0$ В.

Початкове схемне рішення проаналізовано в середовищі системи схмотехнічного моделювання "Micro-PC". Часові витрати на аналіз генератора програмною системою становлять $T_M=30$ с. Результати схмотехнічного моделювання генератора з використанням точної моделі схеми показано на рис. 3.

Отримані значення вторинних параметрів вихідного імпульсу та їх значення, задані у ТЗ, зведено в табл.1. Як видно з таблиці, є невідповідність заданих і отриманих значень вторинних параметрів вихідного імпульсу. Це змушує проектувальника формалізувати задачу параметричної оптимізації.

Таблиця 1

Вхідні дані для схмотехнічного проектування генератора імпульсів заданої форми

Вторинні параметри вихідного імпульсу	Позначення	Значення, задане у ТЗ	Значення, що дає початковий варіант схеми
Тривалість імпульсу, мкс	T_{puls}	1.5	0.92
Час затримки, мкс	T_{del}	0.3	0.28
Вихідна напруга, В	V_a	5	5.1

Критеріями оптимальності в даному випадку є квадрат різниці невідповідності заданих значень вторинних параметрів вихідного імпульсу та значень, які видає схема, що проектується. Отже, в результаті маємо три критеріальні функції:

$$q_1(x) = (\tau_{imn}^{zad} - \tau_{imn}(x))^2, \quad (12)$$

$$q_2(x) = (t_{del}^{zad} - t_{del}(x))^2, \quad (13)$$

$$q_3(x) = (V_a^{zad} - V_a(x))^2, \quad (14)$$

де $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}^T$ – вектор параметрів елементів схеми, розмірність якого для генератора становить $N=40$.

Таблиця 2

Результати вибору вектора змінних параметрів оптимізації (факторів)

Назва вибраного елемента	Номінальне значення	Коефіцієнти чутливості S_x^F параметрів		
		$S_x^{\tau_{imn}}$	$S_x^{t_{del}}$	$S_x^{V_a}$
R2	750 Ом	-0.0188	0.105	0.0008
R5	1.3 кОм	0.0	0.0131	-0.215
R10	6.2 кОм	0.875	0.0	0.089
R11	2.4 кОм	0.412	0.0	0.0424
R12	1.2 кОм	-0.271	0.0	-0.0276
CD	70 пФ	1.027	0.035	0.094

Для вибору вектора змінних параметрів оптимізації x_{opt} з множини параметрів елементів схеми x використовувалась розроблена методика селекції факторів [5, 14], для цього аналізувалась параметрична чутливість. Результати вибору параметрів оптимізації, які далі будуть виступати як фактори в машинному експерименті, наведено у табл.2.

Вектор змінних параметрів оптимізації можна подати як:

$$x_{opt} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\} = \{R_2, R_5, R_{10}, R_{11}, R_{12}, C_D\}. \quad (15)$$

Тоді задачу параметричної оптимізації генератора імпульсів запишемо так.

Знайти

$$x^* = \{x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*, x_5^*, x_6^*\}^T, \quad (16)$$

що забезпечує :

$$\min_{x \in R_{opt}} Q(x) = \{q_1(x), q_2(x), q_3(x)\} = \left\{ \left(\tau_{imn}^{3ad} - \tau_{imn}(x) \right)^2, \left(t_{del}^{3ad} - t_{del}(x) \right)^2, \left(V_a^{3ad} - V_a(x) \right)^2 \right\} \quad (17)$$

за умови

$$G_{X_i}(x) = (x_i^{max} - x_i)(x_i - x_i^{min}) \geq 0, \quad i = \overline{1,6}, \quad (18)$$

де $G_{X_i}(x) = (x_i^{max} - x_i)(x_i - x_i^{min}) \geq 0, \quad i = \overline{1,6}$ – обмеження на “існування”, накладені на параметри елементів схеми з точки зору можливості відтворення відповідного параметра елемента технологією.

Задача (16)-(18) – це задача векторної оптимізації. Використовуючи адитивну згортку векторного критерію (17) до скалярного, відповідно до (6), отримуємо оптимізаційну модель задачі однокритеріальної оптимізації.

Знайти

$$x^* = \{x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*, x_5^*, x_6^*\}^T, \quad (19)$$

що забезпечує

$$\min_{x \in R_{opt}} Q(x) = \sum_{k=1}^3 (w_k q_k(x)) = \left[w_1 \left(\tau_{imn}^{3ad} - \tau_{imn}(x) \right)^2 + w_2 \left(t_{del}^{3ad} - t_{del}(x) \right)^2 + w_3 \left(V_a^{3ad} - V_a(x) \right)^2 \right] \quad (20)$$

за умови

$$G_{X_i}(x) = (x_i^{max} - x_i)(x_i - x_i^{min}) \geq 0, \quad i = \overline{1,6}, \quad (21)$$

де w_k – вагові коефіцієнти, причому $\sum_{k=1}^3 w_k = 1, \quad w_k \geq 0, \quad k = \overline{1,3}$.

Попередньо оцінимо розв’язок оптимізаційної задачі на основі розробленої тестової функції. Час виклику цільової функції (20) $T_{Q(x)}$ прирівнюється до T_M – часу аналізу генератора програмою схемотехнічного моделювання: $T_{Q(x)} \approx T_M = 70$ с. Критеріальна функція (20) задана неявно, тому при виборі методу оптимізації зупиняємось на методах прямого пошуку, тобто таких, що не використовують похідних. Вибираючи конкретний метод з групи методів нульового порядку, враховують значну різницю між абсолютними значеннями змінних параметрів оптимізації (кілооми та пікофаради). Зупиняємо свій вибір на процедурі, що використовує метод Розенброка (метод координат, що обертаються), бо дана процедура не вимагає спеціальних заходів для масштабування змінних параметрів оптимізації. Для пошуку оптимального рішення при шести змінних параметрах оптимізації

кількість викликів цільової тестової функції $K_{Q(x)T}$ у процедурі Розенброка дорівнює $K_{Q(x)T} \approx 1200$ [14]. У результаті оціночні попередні часові витрати на оптимізацію такі: $T_{opt} \approx T_{Q(x)} K_{Q(x)T} \approx 1200 * 70 = 23$ год.

Це попередня оцінка часу, що витрачається на пошук одного компромісного рішення. При потребі оцінити різні розв'язки задачі багатокритеріальної оптимізації, тобто при змінних параметрах w , часові витрати зростають. Отже, доцільно застосувати методику синтезу аналітичних макромоделей, і на синтезованих моделях ставити і вирішувати задачу оптимізації. Для синтезу моделей був використаний план ПФЕ 2⁶. Як фактори виступають змінні параметри оптимізації, тобто:

$$x_F = \{ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 \} = \{ R_2, R_5, R_{10}, R_{11}, R_{12}, C_D \}. \quad (22)$$

Область експерименту Ω , тобто інтервали зміни факторів, визначали з умови функціональної сумісності факторів по всій області експерименту. Це означає, що при будь-якому наборі факторів з області експерименту схема не повинна втрачати своєї функції, а саме генерувати на виході імпульс заданої форми. Інтервали зміни факторів не перевищили 50% від номінального значення (основного рівня).

Результатом проведення експерименту та обробки даних були синтезовані поліноміальні білінійні моделі, що апроксимували залежності вторинних параметрів вихідного імпульсу генератора від параметрів елементів схеми. Відкинувши нульові значення b -коефіцієнтів при взаємодіях вищих порядків та пронормувавши поліноміальні моделі відносно нульового члена b_0 , отримуємо такі залежності:

$$\hat{t}_{i_{mn}} = (100.0 - 1.26r_2 + 0.042r_5 + 41.98r_{10} + 17.279r_{11} - 9.78r_{12} + 49.31c_D - 0.498r_2r_{10} - 0.155r_2r_{11} + 4.37r_{10}r_{11} - 3.58r_{10}r_{12} + 2.17r_{11}r_{12} - 0.123r_2r_{11}r_{12} + 2.75r_{10}r_{11}r_{12} - 0.13r_2r_{10}r_{11}r_{12} - 0.568r_2c_D + 19.427r_{10}c_D - 0.178r_2r_{10}c_D + 6.75r_{11}c_D - 2.89r_{12}c_D + 0.315r_{10}r_{12}c_D + 3.28r_{11}r_{12}c_D - 0.142r_2r_{11}r_{12}c_D + 3.57r_{10}r_{11}r_{12}c_D - 0.142r_2r_{10}r_{11}r_{12}c_D)^2, \quad (23)$$

$$\hat{t}_{del} = (100 + 5.94r_2 + 0.65r_5), \quad (24)$$

$$\hat{V}_a = 100.0 - 12.6r_5 + 5.95r_{10} - 1.51r_{11} + 7.2r_{12} + 1.42r_5r_{10} + 0.6r_5r_{11} - 1.05r_{10}r_{11} - 0.37r_5r_{12} + 0.28r_{10}r_{12} + 0.35r_{11}r_{12} + 1.85r_5c_D - 2.93r_{10}c_D - 0.24r_{10}r_{11}c_D + 0.686r_{12}c_D - 1.13r_{11}c_D - 0.37r_5r_{10}r_{11}c_D + 0.302r_{10}r_{12}c_D - 0.216r_5r_{10}r_{12}c_D), \quad (25)$$

де $r_2, r_5, r_{10}, r_{11}, r_{12}, c_D$ – кодовані змінні-фактори $\tilde{x}_k, k = \overline{1,6}$ (позначення аналогічні до схемних, але малими буквами).

Критерій оптимальності (20) запишемо як:

$$\hat{Q}(\tilde{x}) = \sum_{k=1}^3 (w_k q_k(\tilde{x})) = w_1 (164.533 - (100.0 - 1.26r_2 + 0.042r_5 + 41.98r_{10} + 17.279r_{11} - 9.78r_{12} + 49.31c_D - 0.498r_2r_{10} - 0.155r_2r_{11} + 4.37r_{10}r_{11} - 3.58r_{10}r_{12} + 2.17r_{11}r_{12} - 0.123r_2r_{11}r_{12} + 2.75r_{10}r_{11}r_{12} - 0.13r_2r_{10}r_{11}r_{12} - 0.568r_2c_D + 19.427r_{10}c_D - 0.178r_2r_{10}c_D + 6.75r_{11}c_D - 2.89r_{12}c_D + 0.315r_{10}r_{12}c_D + 3.28r_{11}r_{12}c_D - 0.142r_2r_{11}r_{12}c_D + 3.57r_{10}r_{11}r_{12}c_D - 0.142r_2r_{10}r_{11}r_{12}c_D)^2 + w_2 (105.487 - (100 + 5.94r_2 + 0.65r_5))^2 + w_3 (104.2687 - (100.0 - 12.6r_5 + 5.95r_{10} - 1.51r_{11} + 7.2r_{12} + 1.42r_5r_{10} + 0.6r_5r_{11} - 1.05r_{10}r_{11} - 0.37r_5r_{12} + 0.28r_{10}r_{12} + 0.35r_{11}r_{12} + 1.85r_5c_D - 2.93r_{10}c_D - 0.24r_{10}r_{11}c_D + 0.686r_{12}c_D - 1.13r_{11}c_D - 0.37r_5r_{10}r_{11}c_D + 0.302r_{10}r_{12}c_D - 0.216r_5r_{10}r_{12}c_D))^2. \quad (26)$$

Розв'язання задачі (19)–(21) з критерієм оптимальності (26) не викликає труднощів відносно часових витрат, адже така функція обчислюється мілісекундами.

Оптимальний розв'язок задачі (19)–(21) з критерієм оптимальності (26) при значеннях вагових коефіцієнтів $w_1 = w_2 = w_3 = 0.3333$ такий:

- початкова точка та значення цільової функції в цій точці –

$$\mathbf{x}^0 = \{R_2, R_5, R_{10}, R_{11}, R_{12}, C_D\} = \{750 \text{ Ом}, 1.3 \text{ кОм}, 6.2 \text{ кОм}, 2.4 \text{ кОм}, 1.2 \text{ кОм}, 70 \text{ нФ}\}; Q(\mathbf{x}^0) = 1402;$$

- оптимальна точка та значення цільової функції в ній –

$$\mathbf{x}^* = \{R_2, R_5, R_{10}, R_{11}, R_{12}, C_D\} = \{1.1 \text{ кОм}, 1.43 \text{ кОм}, 8.8 \text{ кОм}, 1.9 \text{ кОм}, 1.3 \text{ кОм}, 94 \text{ нФ}\}; Q(\mathbf{x}^*) = 1 \cdot 10^{-10};$$

- оптимальні значення вихідних параметрів генератора –

$$\tau_{imn}^* = 1.52 \text{ мкс}; t_{del}^* = 0.3 \text{ мкс}; V_a^* = 5.043 \text{ В}.$$

Відносна похибка отриманого оптимального розв'язання порівняно з точним розв'язанням дорівнює $\delta Q = 2.8 \%$. Отримана економія часу становить $\Delta T_m \approx 20 \text{ год}$.

Апроксимація критеріальних функцій поліноміальними моделями перетворює оптимізаційну модель (19)–(21) в ефективну і мобільну модель. З допомогою такої моделі можна оцінювати різні оптимальні розв'язки задачі параметричної оптимізації генератора імпульсів при змінних значеннях вагових коефіцієнтів в адитивному критерії оптимальності (20). Модель можна видозмінювати, переводячи ряд часткових критеріїв оптимальності в розряд обмежень та оцінювати оптимальні розв'язки при таких постановках.

Так, наприклад, оптимізаційна модель (19)–(21) була видозмінена переведенням другого часткового критерію оптимальності (забезпечення заданого значення часу затримки імпульсу) в розряд обмежень. Практичне формулювання задачі параметричної оптимізації в цьому випадку виглядає так:

Знайти

$$\tilde{\mathbf{x}} = \{ \tilde{x}_1^*, \tilde{x}_2^*, \tilde{x}_3^*, \tilde{x}_4^*, \tilde{x}_5^*, \tilde{x}_6^* \} = \{ r_2^*, r_5^*, r_{10}^*, r_{11}^*, r_{12}^*, c_D^* \}, \quad (27)$$

що забезпечує

$$\min_{\mathbf{x} \in R_{opt}} Q(\tilde{\mathbf{x}}) = \sum_{k=1}^2 (w_k q_k(\tilde{\mathbf{x}})) = \left[w_1 \left(\tau_{imn}^{zad} - \hat{\tau}_{imn}(\tilde{\mathbf{x}}) \right)^2 + w_2 \left(V_a^{zad} - \hat{V}_a(\tilde{\mathbf{x}}) \right)^2 \right] \quad (28)$$

за умови

$$G_{\Phi_1}(\tilde{\mathbf{x}}) = (\hat{t}_{del}(\tilde{\mathbf{x}}) - t_{del}^{zad}) \geq 0, \quad (29)$$

$$G_{X_i}(\tilde{\mathbf{x}}) = (\tilde{x}_i^+ - \tilde{x}_i)(\tilde{x}_i - \tilde{x}_i^-) \geq 0, \quad i = \overline{1,6}. \quad (30)$$

Оптимальні розв'язки задачі (27)–(30) оцінювались при різних значеннях вагових коефіцієнтів w_1 та w_2 . Результати багаторазового розв'язання задачі наведено у табл.3.

Отримані результати можна інтерпретувати як знаходження оптимальних точок у двовимірній області критеріїв та відповідних їм точок у шестивимірній області змінних параметрів оптимізації (області пошуку оптимальних розв'язків R_{opt}). Це практичне розв'язання задачі відображення області змінних у область критеріїв при багатокритеріальній оптимізації. Отримані розв'язки дають змогу визначити оптимальні значення вагових коефіцієнтів w . Це підкреслює таку особливість розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації зі згорнутим за адитивною функцією векторним критерієм, як те, що в практичних

Результати розв'язання задачі багатокритеріальної параметричної оптимізації генератора імпульсів при змінних значеннях вагових коефіцієнтів

Складові оптимізаційної моделі	Позначення	Розв'язки при змінних значеннях вагових коефіцієнтів								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вагові коефіцієнти	w_1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
	w_2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Точки Q^* в M -вимірній області критеріїв R_Q ($M=2$)	$q_1(\mathbf{x}) = (\tau_{\text{впр}}^{\text{зв}} - \tau_{\text{впр}}(\mathbf{x}))^2$	0	0	0	0.0576	0.1764	0.0049	0.0001	0.0009	0.0016
	$q_2(\mathbf{x}) = (V_a^{\text{зв}} - V_a(\mathbf{x}))^2$	0	0	0	0.1936	0.4761	0.2116	0.0025	0.0121	0.1369
Точки \mathbf{x}^* в N -вимірній області пошуку оптимальних рішень $R_{\text{пр}}$ ($N=6$) (оптимальні значення) параметрів елементів схеми	R_2	1.11	1.06	1.09	1.05	1.12	0.96	0.97	0.82	1.06
	R_5	1.10	1.80	1.37	1.94	0.66	1.95	0.94	0.89	0.65
	R_{10}	6.83	8.85	7.8	7.72	7.17	9.3	8.99	5.66	9.3
	R_{11}	2.98	1.98	3.5	3.6	3.59	3.2	1.2	3.56	1.2
	R_{12}	1.33	1.79	1.6	1.66	1.75	1.3	0.6	1.09	0.74
	C_D	101	101	85	72	68	71.5	86	105	89
	Оптимальні значення параметрів вихідного імпульсу генератора	Тривалість: $\tau_{\text{впр}}$ [мкс]	1.5	1.5	1.5	1.26	1.08	1.43	1.51	1.47
	Амплітуда V_a [В]	5.0	5.0	5.0	4.56	5.69	4.54	5.05	4.89	5.37
	Час затримки $\tau_{\text{дет}}$ [мкс]	0.3	0.3	0.3	0.3	0.29	0.29	0.29	0.28	0.29

задачах “важливість” окремих критеріїв залежить від значень, які ці критерії набирають, тобто в різних частинах області критеріїв необхідно призначати різні значення w_i . Наприклад, найкращі розв’язки отримуємо при значенні вектора вагових коефіцієнтів $w=\{0.9,0.1\}$, $w=\{0.8,0.2\}$, $w=\{0.7,0.3\}$. Встановлення рівноважливості критеріїв $w=\{0.5,0.5\}$ чи інших співвідношень між важливостями часткових критеріїв не приводить до найкращих розв’язків.

Розв’язання задачі (27)–(30) при змінних значеннях вагових коефіцієнтів без використання синтезованих аналітичних макромоделей (тобто, якби для обчислення вихідних параметрів схеми використовувалась точна модель – програма аналізу електронних схем) був би практично неможливим. У такому разі часові витрати оцінювались би сотнями годин (попередня оцінка становить приблизно 200 год). Якщо використовувались спрощені моделі, часові витрати не перевищили однієї години.

3. Висновки

Описано ще один шлях ефективного розв’язання задачі багатокритеріальної оптимізації в процедурах оптимального проектування ІС. У запропонованому підході забезпечення ефективності розв’язання оптимізаційних задач базується на можливості варіації між показниками точності та швидкодії при обчисленні оптимізаційних моделей. Вибір оптимального компромісу між точністю і швидкодією, тобто відповідних процедур чи комбінації процедур, які будуть використовувати різні за точністю і швидкодією моделі, дає змогу забезпечити прийнятний час розв’язання задач багатокритеріальної багатопараметричної нелінійної оптимізації ІС, а отже, дає можливість отримання оптимального схемного рішення. Оптимальність досягається вибором компромісу між точністю і часовими витратами, що дозволяє отримати проектне рішення із заданим рівнем ефективності. Необхідно зазначити, що реалізація такого підходу є максимально формалізована, тобто побудова ефективних спрощених моделей є максимально автоматизованою.

На прикладі розв’язання задачі багатокритеріальної оптимізації генератора імпульсів продемонстровано можливість і корисність застосування у пошуку оптимально-компромисних розв’язків задач багатокритеріальної параметричної оптимізації схем методики синтезу спрощених моделей ІС на основі машинних багатofакторних експериментів.

1. Батищев Д.И. *Методы оптимального проектирования*. М., 1984. 2. Брейтон Р.К., Хечтел Г.Д., Санджованни-Винчентелли А.Л. *Обзор методов оптимального проектирования интегральных схем // ТИИЭР*. 1981. Т.69. № 10. С.180–215. 3. Глориозов Е.Л., Ссорин В.Г., Сыпчук П.П. *Введение в автоматизацию схемотехнического проектирования*. М., 1976. 4. Lightner M.R., Director S.W. *Multiple Criterion Optimization with Yield Maximization // IEEE Transactions Circuits and Systems*. Vol.CAS-28 (8). 1981. P.781-791. 5. Казимира І.Я. *Методи та засоби забезпечення ефективності процедур оптимального проектування ІС на схемотехнічному етапі*. Дис. ... канд. техн. наук. Львів, 1998. 6. *Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании) / А.И. Половинкин, Н.К. Бобков, Г.Я. Буш и др.* М., 1981. 7. Соболев И.М., Статников Р.Б. *Наилучшие решения – где их искать*. М., 1982. 8. Меркурьев В.В., Молдавский М.А. *Семейство сверток векторного критерия для нахождения точек множества Парето // Автоматика и телемеханика*. 1979. № 1. С.110-121. 9. A.M.Geoffrion. *Solving Bicriterion Mathematical Programming // Operational Research*. Vol.15. No.1. 1967. P.39–54. 10. Kazymyra I., Blyzniuk M. *The Use of Computer Experiment Design in Circuit Design: Practical Problems of Application // Proceedings of the 7th International Conference “Mixed Design of Integrated Circuits and Systems” (MIXDES’2000)*.

Gdynia, Poland, 2000. P.209-212. 11. Koval V., Blyzniuk M., Kazymyra I. *Simplified Models of IC's for the Acceleration of Circuit Design // Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*, editors: A.Napieralski et al. – Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 1998. P.149-155. 12. Koval V.A., Blyzniuk M.B., Kazymyra I.Y. *ICs Circuit Design Using Two-Level Simulation Technique // Proc. of the 4th Int. Workshop "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems" (MIXDES'97)*. Poznan, Poland, 1997. P.163-166. 13. Казимира І., Близнюк М. *Практичні аспекти використання методики багатofакторного машинного експерименту в схемотехнічному проектуванні // Вісн. ДУ "Львівська політехніка". 2000. № 387. С.80-89.* 14. Kazymyra I., Blyzniuk M., Lobur M. *Preliminary Estimation of the Efficiency of Optimization Problems Solution in Circuit Design. // Proc. of the 5th Int. Conf. "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems" (MIXDES'98)*. Lodz, Poland, 1998. P.143-146.

УДК 621.382.33:681

І. Казимира, М. Близнюк*, І. Фармага*

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювань,
*кафедра систем автоматизованого проектування

РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ВРАЗЛИВОСТІ ІС ДО ЛОКАЛЬНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПЕРЕГРІВІВ

© Казимира І., Близнюк М., Фармага І., 2001

Розглянуто проблему оцінки вразливості схеми до локальних температур на схемотехнічному етапі проектування. Запропоновано методика автоматичного синтезу моделі вразливості схеми до локальних температурних перегрівів на елементах шляхом постановки машинних багатofакторних експериментів на повній моделі схеми. На прикладі пояснено особливості синтезованих ефективних спрощених моделей, що відображають вразливість схеми до нерівномірності температурного поля майбутньої конструкції ІС.

Вступ

На схемотехнічному етапі проектування під час синтезу початкового схемного рішення (принципової електричної схеми) важливо попередньо оцінити вплив локальних температурних перегрівів на елементах схеми на вихідні параметри та характеристики у майбутній конструкції ІС. Така попередня оцінка особливо важлива для аналогових ІС з високою функціональною складністю, оскільки особливостями таких схем є високі вимоги до точності функціонування в екстремальних умовах експлуатації, що зумовлює задання на вихідні параметри схеми жорстких допусків [2, 4]. Результатом накладання жорстких допусків у технічному завданні є високі вимоги до температурного дрейфу вихідних параметрів і характеристик схеми.

Тому оцінювати вплив локальних температур елементів схеми на дрейф вихідних параметрів і характеристик необхідно на етапі синтезу початкового схемного рішення (на етапі схемотехнічного проектування) перед фізико-топологічним проектуванням. Оцінка ступеня впливу локальних температур на ранніх стадіях проектування дасть змогу проектувальникам: