

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:

- ◆ приймати оптимальні рішення щодо вдосконалення принципової схеми шляхом синтезу термокомпенсаційних ланок для зменшення впливу локальних температур на вихідні характеристики схеми [4];

- ◆ формувати добре обґрунтовані вимоги до рівномірності розподілу температурного поля в майбутній конструкції ІС [4];

- ◆ під час теплоелектричного аналізу [14] ставити та розв'язувати оптимізаційну задачу пошуку таких локальних температур на елементах схеми, що забезпечать мінімальний (чи заданий) температурний дрейф вихідних параметрів і характеристик [1,15];

- ◆ на етапі фізико-топологічного проектування уникнути методики “спроб і помилок” (перепроєктування) внаслідок того, що проєктувальник зможе передбачити чутливість схеми до нерівномірності температурного поля конструкції і, як результат, зможе прогнозувати температурні дрейфи вихідних параметрів і характеристик, які не дають змоги забезпечити задані у технічному завданні жорсткі температурні допуски [4,15].

Добре відомо, що на етапі схемотехнічного проектування проєктувальники обов'язково аналізують вплив температури зовнішнього середовища на функціонування схеми, наприклад, розрахунок температурної нестабільності статичного режиму чи аналіз схеми в частотній та часовій областях при зміні температури середовища [1, 7]. Такі аналізи проводяться програмами схемотехнічного моделювання, у моделях елементів схеми яких обов'язково враховуються залежності внутрішніх параметрів елементів від температури. На жаль, такий аналіз дає лише оцінку стабільності (чи нестабільності) схеми при зміні температури середовища, але не вказує на вразливість схеми до зміни температур на окремих елементах.

Очевидно, ми можемо також оцінити вплив на функціонування схеми зміни локальних температур на окремо взятих елементах. У цьому випадку основною вимогою до програми схемотехнічного моделювання буде можливість задання різних температур на окремих елементах [7]. Такий підхід вимагає багатоваріантного аналізу схеми (можна сказати “дуже” багатоваріантного), адже необхідно оцінити вплив різних комбінацій локальних температур (довільної нерівномірності температурного поля), і, як правило, є неефективним. Навіть якщо вдасться з великими часовими витратами провести такий аналіз схеми, то постає ряд питань: як інтерпретувати отримані результати і як їх використовувати; за яким кількісним показником можна вважати, що схема вразлива до нерівномірності температурного поля; як ефективно використати одержані кількісні результати на наступних стадіях проектування. Отримані точкові оцінки дрейфу вихідного параметра під впливом різниці температур на елементах не дають відповіді на такі запитання.

Можливо, практичний досвід та інтуїція висококваліфікованого схемотехніка дадуть змогу оцінити вразливість схеми до локальних температур. На нашу ж думку, така специфічна внутрішня властивість схеми, як вразливість до локальних температур, настільки прихована (“річ в собі”), що недоступна навіть для досвідченого схемотехніка.

Отже, існує необхідність розроблення чи використання підходу, який дав би змогу отримати ефективну модель ІС, яка якісно і кількісно відобразить ступінь впливу локальних температур елементів на вихідні характеристики схеми, що проєктується. Така модель повинна функціонально визначати причинно-наслідковий зв'язок між температурним дрейфом вихідних параметрів схеми та локальними температурами на елементах. У даній роботі ми пропонуємо методику синтезу такої моделі схеми. Пропонований підхід базується на використанні методики багатфакторних машинних експериментів на точних моделях схеми для побудови спрощених моделей у вигляді “чорних скриньок” [2].

1. Синтез моделі вразливості схеми до локальних температур

1.1. Синтез спрощених моделей ІС.

Пропонований підхід до оцінки впливу локальних температур на функціонування ІС передбачає синтез спрощеної моделі ІС на основі постановки машинного багатofакторного експерименту (БФЕ). Методика синтезу спрощених моделей ІС на основі теорії БФЕ успішно застосовується нами при розв'язанні задач багатокритеріальної оптимізації ІС [2, 3, 5, 6]. Для забезпечення ефективності розв'язання задачі багатокритеріальної багатопараметричної оптимізації ІС ми синтезуємо спрощені моделі схем, апроксимуючи ортогональними поліномами залежність вихідних параметрів схеми y від параметрів елементів x [9,11]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i \neq j \neq g} b_{ijg} x_i x_j x_g + \dots + b_{ijq \dots k} x_i x_j x_q \dots x_k. \quad (1)$$

Така поліноміальна модель будується на основі повного чи дробового факторних експериментів. Об'єктом експерименту є повна модель схеми (моделювання схеми на рівні елементів програмою схемотехнічного аналізу), або, іншими словами, ми називаємо її точною моделлю схеми [5]. Синтез спрощеної моделі повністю автоматичний. Розробляючи таку модель в автоматичному режимі, вирішують задачі теорії планування експерименту [1, 2, 5]:

- ◆ селекція множини факторів x_ϕ з множини параметрів елементів (вектор x), на основі результатів розрахунку параметричної чутливості схеми;
- ◆ визначення області експерименту та кодування факторів;
- ◆ проведення повного чи дробового дворівневого або тривірневого факторних експериментів, обчислення b -коефіцієнтів поліноміальної моделі;
- ◆ оцінка статистичної значущості b -коефіцієнтів та оцінка адекватності отриманої спрощеної моделі.

Ми використовуємо описану вище методику для автоматичного синтезу спрощених моделей ІС, котрі відображають вплив локальних температур елементів на функціонування схеми [1]. Роль факторів у машинному експерименті відіграють локальні температури на елементах ІС. На рис. 1 показано точну модель ІС як об'єкт машинного БФЕ під час синтезу спрощеної моделі впливу локальних температур.

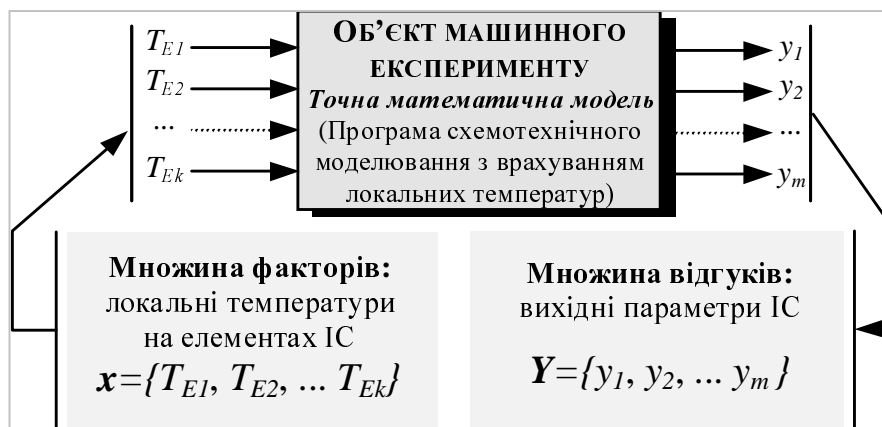


Рис. 1. Точна модель ІС як об'єкт машинного експерименту

У результаті повного чи дробового факторного експерименту отримуємо білінійні поліноміальні моделі, що відображають залежності вихідних параметрів схеми від локальних температур на елементах:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \tilde{t}_{E_i} + \sum_{i \neq j} b_{ij} \tilde{t}_{E_i} \tilde{t}_{E_j} + \sum_{i \neq j \neq g} b_{ijg} \tilde{t}_{E_i} \tilde{t}_{E_j} \tilde{t}_{E_g} + \dots + b_{ijq\dots k} \tilde{t}_{E_i} \tilde{t}_{E_j} \tilde{t}_{E_q} \dots \tilde{t}_{E_k}, \quad (2)$$

де \tilde{t}_{E_i} – кодоване значення локальної температури на i -му елементі схеми, котре визначається як: $\tilde{t}_{E_i} = (T_{E_i} - T_{E_i}^{(0)}) / h_{E_i}$, $i = \overline{1, K}$, де T_{E_i} – локальна температура на i -му елементі; $T_{E_i}^{(0)}$ – основний рівень i -го фактора; h_{E_i} – інтервал зміни i -го фактора, $h_{E_i} = (T_{E_i}^{(U)} - T_{E_i}^{(L)}) / 2$, $i = \overline{1, K}$, де: $T_{E_i}^{(U)}$ і $T_{E_i}^{(L)}$ – нижня та верхня границі i -го фактора, тобто граничні значення локальної температури на i -му елементі.

Власне вектор \mathbf{b} -коефіцієнтів $\mathbf{b} = \{b_0, b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_k, b_{12}, b_{13}, \dots, b_{ij}, \dots, b_{ijq}, \dots, b_{ijq\dots k}\}$ поліноміальної моделі (2) і містить інформацію про вразливість схеми до локальних температур. Коефіцієнт b_0 як вільний член полінома визначає значення вихідного параметра схеми \hat{y} у центрі області експеримента, тобто коли всі локальні температури на тепловиділяючих елементах ІС дорівнюють $T_{E_i}^{(0)}$ – температурі середовища. Лінійні коефіцієнти $b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_k$ – це коефіцієнти чутливості схеми до зміни локальної температури на елементах $E_1, E_2, \dots, E_i, \dots, E_k$ в інтервалі зміни факторів (інтервалі зміни локальної температури на елементі під час експерименту $T_{E_i}^{(L)} \div T_{E_i}^{(U)}$). Іншими словами, ці коефіцієнти характеризують схемну вразливість до зміни температури на окремому елементі в межах заданої максимальної нерівномірності розподілу температурного поля. Коефіцієнти $b_{12}, b_{13}, \dots, b_{ij}, \dots, b_{qk}, \dots$ є коефіцієнтами при взаємодіях першого порядку і характеризують вразливість схеми до парної зміни локальних температур на E_i і E_j елементах. Коефіцієнт b_{ijq} вказує ступінь впливу різниць температур на E_i, E_j і E_q елементах схеми на вихідний параметр.

Саме кількісний порівняльний аналіз величин \mathbf{b} -коефіцієнтів дає змогу визначити ступінь вразливості схеми до локальних температур на елементах або передбачити вразливість топології ІС до нерівномірності розподілу температурного поля.

1.2. Методика планування машинного експерименту для синтезу моделі вразливості схеми до локальних температур

Автоматичний синтез спрощених моделей для аналізу впливу локальних температур має свої особливості і складається з таких частин [1]: 1) Селекція факторів з множини параметрів елементів ІС: всі тепловиділяючі елементи виступають у ролі факторів. Селекція факторів на основі аналізу параметричної чутливості $S_{x_i}^{y_m} = \left(\frac{\partial y_m}{\partial x_i} \frac{x_i}{y_m} \right)$, $m=1,2,\dots,M$, $i=1,2,\dots,K$, не

гарантує нам відбір найчутливіших чинників, тому в цьому випадку слід проводити

селекцію на основі аналізу температурної чутливості $S_{T_{E_i}}^{y_m} = \left(\frac{\partial y_m(T_E)}{\partial T_{E_i}} \bigg|_{T_{E_i}=T^+} \frac{T_{E_i}}{y_m} \right)$,

$m=1,2,\dots,M$, $i=1,2,\dots,K$. 2) Визначення області експерименту та кодування: задане у технічному завданні максимальне значення температури довкільля визначає основний рівень зміни факторів $T_{E_i}^{(0)} = T^+$, $i = \overline{1, K}$; інтервал зміни факторів є однаковим для всіх елементів і

не перевищує 30% величини основного рівня зміни факторів, тобто $h_{Ei} \leq 0.3 \cdot T^+$. 3) Проведення дворівневого повного чи дробового БФЕ пов'язане зі значними обсягами обчислень, тобто багаторазовим аналізом точної моделі схеми. Ефективність такого підходу забезпечується тим, що немає потреби проводити повний факторний експеримент для аналізу впливу локальних температур. Практика проведення експериментів свідчить, що при моделюванні впливу локальних температур з невеликими інтервалами зміни факторів коефіцієнти при взаємодіях вищих порядків є статистично незначущими. Нами запропоновано методика штучної оцінки похибки відтворюваності експерименту [2,3,6], яка дає змогу оцінювати статистичну значущість **b**-коефіцієнтів у синтезованих поліноміальних моделях, тобто обґрунтовано нехтувати статистично незначущими коефіцієнтами. Це дає змогу проводити дробові факторні експерименти, де ми використовуємо тільки взаємодії першого, і, рідше, другого порядків. Для цього вводимо додаткові фактори, що змінюються за законами взаємодій основних факторів вищих порядків, коефіцієнти при яких є статистично незначущими. Це дає змогу суттєво скоротити кількість передбачених планом експериментів порівняно з повним факторним експериментом.

Розглянемо формально можливу постановку повного дворівневого факторного експерименту **ПФЕ** 2^K , де K – кількість факторів (у нашому випадку – це кількість всіх тепловиділяючих елементів ІС). Врахуємо необхідну (для зменшення обчислювальної складності процедури синтезу моделі вразливості) постановку дробового факторного експерименту **ДФЕ** 2^{K-P} , де P – кількість додатково введених факторів замість статистично незначущих взаємодій другого, третього і вищих порядків. У такому випадку постає завдання обґрунтованого вибору ($K-P$) основних факторів з множини всіх параметрів тепловиділяючих елементів схеми. Така селекція повинна базуватися на виборі тільки тих елементів, які призводять до значного температурного дрейфу вихідних параметрів схеми. Для відбору основних факторів використовуємо підхід до обґрунтованої селекції змінних параметрів оптимізації, запропонований у [2, 8]. Такий підхід базується на двох системних принципах:

1) *Системний принцип Парето*. Більшість систем працює за принципом Парето [10], відповідно до якого з точки зору характеристик системи суттєвими є лише деякі з множини факторів. Для більшості систем 20 % факторів визначають 80 % властивостей системи, а решта 80 % факторів визначає лише 20 % її властивостей. Використання цього принципу дає змогу встановити верхню границю кількості факторів: $(K-P) \leq 0.2K$.

2) *Принцип домінування фактора* x_i над фактором x_j . Вважається, що параметр x_i є домінуючим відносно параметра x_j , якщо $\left| S_{TE_i}^y \right| \geq 10 \left| S_{TE_j}^y \right|$ [13]. Ми рангуємо тепловиділяючі елементи ІС у послідовності зменшення значення їхнього коефіцієнта температурної чутливості. Згідно з цим принципом елементи, що мають чутливість, на порядок меншу, ніж елемент з максимальною чутливістю, не розглядаються як претенденти на роль факторів у машинному експерименті.

Використання цих двох системних принципів (вважаємо, що ми маємо повне право розглядати ІС як систему) дає змогу обґрунтовано визначити мінімальну кількість основних факторів ($K-P$), що будуть брати участь у експерименті.

У результаті проведення дробового факторного експерименту **ДФЕ** 2^{K-P} отримуємо таку поліноміальну модель:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^K b_i \tilde{t}_{E_i} + \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^{N_{bij}} b_{ij} \tilde{t}_{E_i} \tilde{t}_{E_j} = b_0 + \sum_{i=1}^K b_i \tilde{t}_{E_i} + \sum_{i=1}^{[(K-P)-1]} \sum_{j=i+1}^{(K-P)} b_{ij} \tilde{t}_{E_i} \tilde{t}_{E_j}, \quad (3)$$

де N_{bij} – кількість взаємодій першого порядку (тобто подвійних взаємодій – добутку $\tilde{t}_{E_i} \tilde{t}_{E_j}$ факторів) для $(K-P)$ основних факторів. Величина N_{bij} визначається як $N_{bij} = C_{K-P}^2$.

Наприклад, початкова кількість всіх факторів (всіх джерел тепловиділення) $K=21$, кількість елементів, що вибрані як основні фактори за описаною вище методикою, дорівнює $(K-P)=5$. Отже, можна поставити дробовий факторний експеримент $ДФЕ 2^{(21-16)}$ і отримати таку модель:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^{21} b_i \tilde{t}_{E_i} + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^5 b_{ij} \tilde{t}_{E_i} \tilde{t}_{E_j} = b_0 + \sum_{i=1}^{21} b_i \tilde{t}_{E_i} + b_{12} \tilde{t}_{E_1} \tilde{t}_{E_2} + b_{13} \tilde{t}_{E_1} \tilde{t}_{E_3} + b_{14} \tilde{t}_{E_1} \tilde{t}_{E_4} + b_{15} \tilde{t}_{E_1} \tilde{t}_{E_5} + b_{23} \tilde{t}_{E_2} \tilde{t}_{E_3} + b_{24} \tilde{t}_{E_2} \tilde{t}_{E_4} + b_{25} \tilde{t}_{E_2} \tilde{t}_{E_5} + b_{34} \tilde{t}_{E_3} \tilde{t}_{E_4} + b_{35} \tilde{t}_{E_3} \tilde{t}_{E_5} + b_{45} \tilde{t}_{E_4} \tilde{t}_{E_5}. \quad (4)$$

Щоб одержати поліноміальну модель (4), необхідно провести $2^5=32$ аналізи точної моделі схеми (тобто зробити 32 виклики програми схемотехнічного моделювання, наприклад, *P-Spice* чи *Micro-PC* [7]). Зауважимо, що під час повного факторного експерименту з кількістю факторів, що дорівнює 21, нам слід було б зробити $2^{21}=2097152$ обчислень точної моделі схеми, що практично неприпустимо з огляду на часові витрати. Як вже було зазначено, проведення $ПФЕ 2^K$ не є необхідним, бо коефіцієнти при взаємодіях, вищих від першого порядку, в поліноміальних моделях вразливості схеми до локальних температур є статистично незначущими. Методика обгрунтованої селекції основних $(K-P)$ факторів та врахування незначущості коефіцієнтів при взаємодіях вищих порядків дають змогу ставити $ДФЕ$ з вибором оптимальної репліки, наприклад, $1/2^{16}$ репліки для описаного вище випадку.

Запропонована методика планування машинного експерименту для синтезу моделі вразливості схеми до локальних температур дозволяє ефективно отримати інформативну модель. Як же проводити якісний і кількісний аналіз одержаної моделі, і за яким критерієм можна оцінити стійкість пропонованого схемного рішення до нерівномірності температурного поля в майбутній конструкції?

Ми вважаємо, що власне аналіз абсолютних значень b -коефіцієнтів при взаємодіях першого порядку дасть нам відповідь на такі запитання.

2. Аналіз синтезованих моделей схемної вразливості

Однією з основних особливостей ортогональних поліноміальних моделей, отриманих на основі постановки $ПФЕ 2^K$, є одержання “чистих”, незмішаних оцінок значень b -коефіцієнтів. Така особливість зумовлюється спеціальними властивостями матриці планування, зокрема – нормованості, симетричності та ортогональності [9,11]. На нашу думку, це означає, що b -коефіцієнти моделі є не просто штучними коефіцієнтами апроксимаційного полінома, а мають певний фізичний зміст, відображають якісь приховані властивості об’єкта експерименту. Наприклад, коефіцієнти при лінійних ефектах b_i , як уже відзначалося, є коефіцієнтами чутливості в межах інтервалу зміни фактора. Зупинимось на аналізі абсолютних значень b -коефіцієнтів при взаємодіях першого порядку – b_{ij} . Перед проведенням такого аналізу зауважимо, що ми проводимо не $ПФЕ 2^K$, а $ДФЕ 2^{K-P}$, при якому, як відомо, спостерігається небажаний ефект змішування b -коефіцієнтів, отже, ми можемо отримати нечисті, змішані оцінки. Якщо прийняти припущення (підтверджене практикою постановки експериментів при аналізі впливу локальних

температур), що у ПФЕ 2^k коефіцієнти при взаємодіях вищих порядків статистично незначущі, то можна стверджувати, що ефект змішування буде мінімальний, і розглядати коефіцієнти b_{ij} як незмішані оцінки.

Проаналізуємо абсолютні значення **b**-коефіцієнтів при взаємодіях першого порядку.

Загалом практика постановки натурних експериментів вказує на те, що значущість коефіцієнтів при взаємодіях i -го порядку зменшується при зростанні порядку взаємодії, тобто взаємодії 1 -го порядку менш значущі, ніж лінійні ефекти, 2 -го ніж 1 -го, і т.д., а при кількості факторів $k > 5$ взаємодії порядку $g > 4$ стають статистично незначущими.

У нашому випадку, при синтезі моделей вразливості, вже взаємодії другого порядку є статистично незначущими. Про що ж свідчить статистична значущість чи незначущість **b**-коефіцієнтів при взаємодіях першого порядку? Насамперед статистична значущість коефіцієнтів b_{ij} вказує на нелінійність залежності температурного дрейфу вихідного параметра від локальних температур. Це перший якісний сигнал розробнику про можливу вразливість схеми до різниць локальних температур на елементах. Статистична незначущість цих коефіцієнтів приводить до лінійної залежності температурного дрейфу від різниць температур, що свідчить про невразливість схеми до них.

Другою важливою якісною характеристикою є те, що не справджується загальна закономірність меншості абсолютних значень коефіцієнтів при взаємодіях i -го порядку від абсолютних значень коефіцієнтів при взаємодіях $(i-1)$ -го порядку. Тобто, якщо деякі з b_{ij} коефіцієнтів (коефіцієнтів при взаємодіях 1 -го порядку) є більшими, ніж b_i – коефіцієнти при лінійних ефектах, то це свідчить про нестійкість (вразливість) схеми до різниці локальних температур на елементах. Власне кажучи, під час машинних експериментів для різноманітних аналогових ІС ми виявили, що для низки схем така закономірність не справджується. У білінійних моделях для окремих схем взаємодії 1 -го порядку були більшими, ніж лінійні ефекти, а для деяких схем при проведенні ПФЕ взаємодії 2 -го порядку були більшими, ніж 1 -го, а деколи взаємодії 2 -го порядку навіть більші, ніж лінійні ефекти!

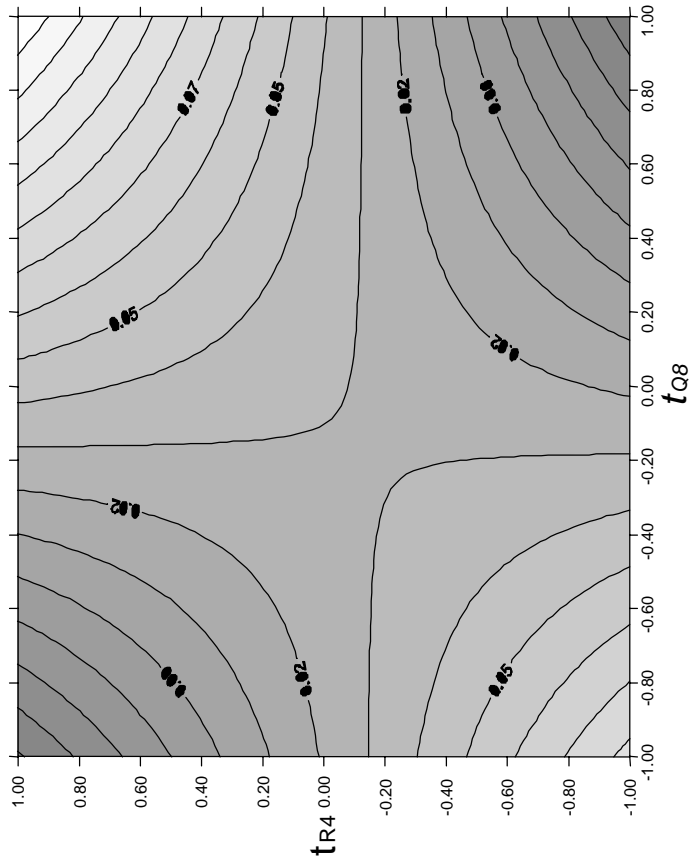
Таке співвідношення абсолютних значень **b**-коефіцієнтів у поліноміальній моделі однозначно вказує на вразливість схеми до різниці локальних температур на елементах. Кількісно вразливість оцінюється за абсолютними значеннями **b**-коефіцієнтів та кількісним аналізом дрейфу вихідного параметра при різних значеннях локальних температур за допомогою отриманої ефективної поліноміальної моделі.

Наприклад, розглянемо поліноміальну модель, що апроксимує залежність вихідної напруги V_{i0} (в момент часу $t=0$) від локальних температур на елементах (резисторі R_4 і транзисторі Q_8) операційного підсилювача ІС 741 [12]:

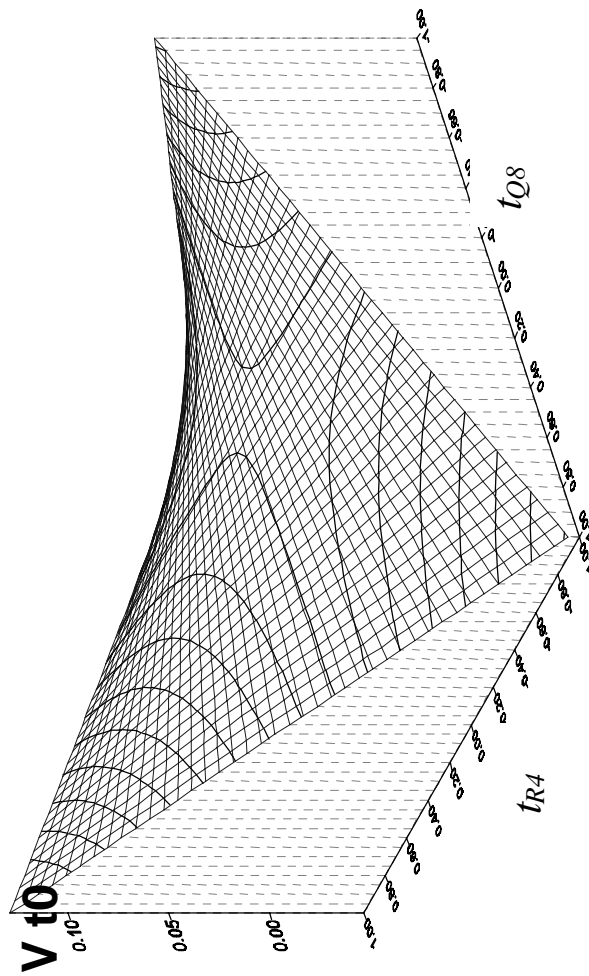
$$V_{i0} = 0.0331 + 0.01 t_{R4} + 0.0127 t_{Q8} + 0.075 t_{R4} t_{Q8}. \quad (5)$$

Співвідношення (5) показує, що коефіцієнт b_{12} при взаємодії локальних температур $t_{R4} t_{Q8}$ є більшим, ніж коефіцієнти при лінійних ефектах: $b_1 = 0.01$ для температури на R_4 та $b_2 = 0.0127$ температури на Q_8 .

У цій моделі коефіцієнти при лінійних ефектах b_1 і b_2 відображають ступінь впливу конкретного поодинокого фактора (t_{R4} чи t_{Q8}) на дрейф вихідної напруги і за фізичним змістом є подібні до коефіцієнта температурної чутливості. Очевидно, що чим більш значущий фактор (більш температурно-залежний і функціонально важливий елемент схеми), тим більше абсолютне значення його лінійного ефекту b_i .



б



а

Рис. 2. Графічна ілюстрація взаємовпливу факторів (локальних температур на R_4 і Q_8) на відгук (вихідну напругу ОП V_{10}):
а – поверхня відгуку; б – лінії рівня

Як же пояснюється така велика значущість коефіцієнта при взаємодії першого порядку? Насамперед це нелінійна залежність вихідної напруги від зміни локальних температур на цих елементах. Оцінка чутливості фактора, наприклад, локальної температури t_{R4} на резисторі $R4$, вказує на залежність (причому доволі суттєву) коефіцієнта чутливості цього фактора від температури на транзисторі $Q8$:

$$\frac{\partial \hat{V}_{t0}}{\partial t_{R4}} = 0.01 + 0.075 \cdot t_{Q8} \cdot \quad (6)$$

Така інформація дає змогу визначити вразливість схемного рішення до різниці локальних температур. Адже зміна температури тільки на резисторі $R4$ не впливає на відгук, її вплив суттєво залежить від значення локальної температури на транзисторі $Q8$. Рис. 2 (поверхня відгуку і лінії рівня) яскраво ілюструє взаємовплив локальних температур резистора $R4$ і транзистора $Q8$ на вихідну напругу операційного підсилювача.

Наведений приклад показує, що кількісний аналіз поліноміальної моделі, зокрема аналіз значень b -коефіцієнтів при взаємодіях 1-го порядку дає змогу оцінити ступінь вразливості схемного рішення до зміни локальних температур на елементах. Це також стосується і кількісного аналізу коефіцієнтів при взаємодіях 2-го і 3-го порядків, за умови, що ці коефіцієнти статистично значущі.

Крім того, синтезовану аналітичну модель вразливості (3) можна ефективно використовувати під час теплоелектричного аналізу в оптимізаційних задачах при знаходженні такого розподілу температурного поля, що забезпечить мінімальний (чи заданий) температурний дрейф вихідних параметрів і характеристик схеми [1].

1. Blyzniuk M., Kazymyra I., Lobur M. *Simplified Models of ICs for the Analysis of Temperature Influences* // *Int. Workshop "Microtechnology and Thermal Problems in Electronics" (MICROTHERM'98). Proc. of the Seminar Thermic'98. Zakopane, Poland, 1998. P.22-27.*
2. Казимира І.Я. *Методи та засоби забезпечення ефективності процедур оптимального проектування ІС на схемотехнічному етапі. Дис. ... канд. техн. наук. Львів, 1998.*
3. Kazymyra I., Blyzniuk M. *The Use of Computer Experiment Design in Circuit Design: Practical Problems of Application* // *Proc. of the 7th Int. Conf. "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems" (MIXDES'2000). Gdynia, Poland, 2000. P.209-212.*
4. Koval V.A., Fedasyuk D.V., Kazymyra I.Y., Blyzniuk M.B. *Providing of Electro-Thermal Compatibility of Hybrid Microcircuits in CAD Environment* // *Collection of papers presented at the Int. Workshop on Thermal Investigations of ICs and Microstructures (THERMINIC). Cannes, France, 1997. P.67-71.*
5. Koval V., Blyzniuk M., Kazymyra I. *Simplified Models of IC's for the Acceleration of Circuit Design* // *Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, eds.: A.Napieralski et al. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 1998. P.149-155.*
6. Kazymyra I., Blyzniuk M. *Practical Aspects of the Use of the Theory of Computer Experiment Design in Circuit Design* // *Proc. of the Int. Conf. on Modern Problems of Telecommunications, Computer Science and Engineers Training (TCSET'2000). Lviv, Ukraine, 2000. P.24-25.*
7. Kazymyra I., Blyzniuk M., Lobur M. *Circuit Simulation Program for Training Specialists in the Field of Circuit Design Software Development* // *Proc. of the 4th Int. Workshop on Mixed Design Of Integrated Circuits and Systems. Poznan, Poland, 1997. P.673-679.*
8. 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. **9.** Naylor T.H. (ed.) *The Design of Computer Simulation Experiments*. Duke University Press, N.C., 1979. **10.** Shannon R.E. *System Simulation. The Art and Science*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1975. **11.** Breyfogle F.W. *Statistical Methods for Testing, Development and Manufacturing*. John Wiley & Sons, 1992. **12.** Horowitz P., Hill W. *The Art of Electronics*. Cambridge University Press, 1980. **13.** Автоматизация схемотехнического проектирования / В.Н. Ильин, В.Т. Фролкин, А.И. Бутко и др. / Под ред. В.Н.Ильина. М., 1987. **14.** Koval V.A., Farmaga I.V., Strojwas A.J., Director S.W. MONSTR: A Complete Thermal Simulator of Electronic Systems // Proc. of the 31st Design Automation Conference. San Diego, USA, 1994. P.570-575. **15.** Kazymyra I., Blyzniuk M. Model of ICs Schematic Vulnerability to Local Temperatures // Workshop “Microtechnology and Thermal Problems in Electronics” (MICROTHERM’2000). Proc. of the Int. Seminar Thermic’2000. Zakopane, Poland, 2000. P.131-135.

УДК 621.319.12

М. Матвійків, Ю. Івасик

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра конструювання і технології виробництва радіоапаратури

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВНУТРІШНІХ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ НА ПАРАМЕТРИ ІС

© Матвійків М., Івасик Ю., 2001

Запропоновано метод кількісної оцінки впливу внутрішніх механічних напружень на параметри інтегральних пристроїв на основі даних про вплив напружень на складові елементи інтегрального пристрою.

Як відомо [1], параметрична надійність інтегральних пристроїв (ІП) визначається імовірністю знаходження електричних параметрів у межах допусків, визначених технічними умовами, під час періоду експлуатації. Тобто вихід будь-якого параметра за межі допусків буде означати його параметричну відмову.

Аналіз показує, що нині дослідження параметричної надійності найдоцільніше здійснювати для аналогових та лінійних ІП, оскільки в них параметричні відмови переважають над раптовими.

В [2] показано, що однією з вагомих причин зміни параметрів аналогових ІП є внутрішні механічні напруження (ВМН). Вони викликані конструктивними та технологічними особливостями ІП, які полягають у використанні шарів різних за властивостями матеріалів, що тісно контактують, та у великій різниці температур між різними процесами їх формування. ВМН мають різну спрямованість у шарах та знаходяться в межах 10^7 - 10^9 Па. Напруження, котрі перевищують межу міцності матеріалів, призводять до руйнування елементів і відповідно до раптових відмов. Напруження, менші за значенням, що є в межах зони пружності, змінюють параметри елементів шарових структур за рахунок зміни міжатомних відстаней. Параметри елементів можуть змінюватись на 0,1–10 % [3]. Доходимо висновку, що параметри ІП від таких негативних впливів на елементи теж повинні змінюватись. Оскільки, згідно із технічними вимогами, вихідні параметри ІП мають бути у певних межах, то потрібно розрахувати залежність вихідних параметрів ІП від ВМН.