

Zastosowanie metod optymalizacji globalnej w elektronice

Leszek J. Opalski

Instytut Podstaw Elektroniki

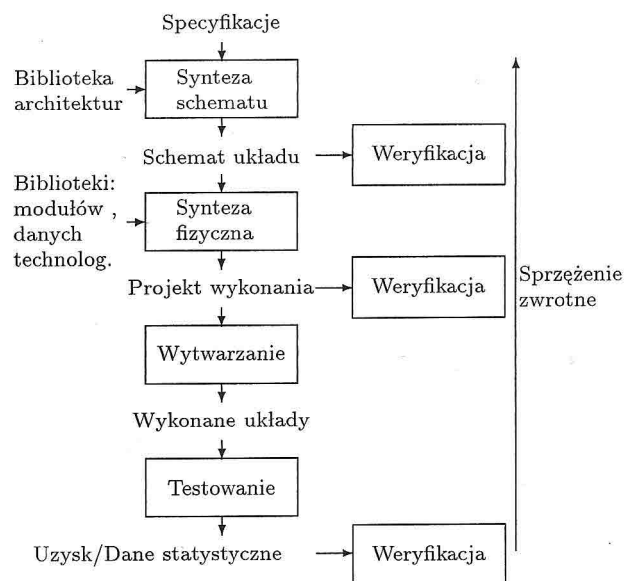
Politechnika Warszawska

Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, Poland
fax: (48-22)-252300, e-mail: opalski@ipe.pw.edu.pl

Celem wykładu jest przedstawienie matematycznych sformułowań wybranych zadań projektowania układów elektronicznych oraz wskazanie potencjalnych i realnych zastosowań algorytmów optymalizacji globalnej do rozwiązywania tych zadań. Niniejszy tekst zawiera materiał prezentowany w czasie wykładu, oraz krótką bibliografię ułatwiającą odnalezienie szczegółowych opisów omawianych sformułowań i metod rozwiązywania.

1 Metodologie projektowania układów

Projektowanie jest procesem prowadzącym od specyfikacji zachowania projektowanego układu/systemu do specyfikacji procesu wytwórczego, który jest w stanie zrealizować fizyczne układy o zadanych własnościach (rys. 1). Konkurencja gospodarki rynkowej wy-



Rys. 1: Ogólny schemat projektowania układów (scalonych).

musza na projektancie optymalizację projektu ze względu na: własności funkcjonalne,

koszt jednostkowy układu, czas cyklu projektowania itp. Dobrze byłoby móc uzyskiwać optimum globalne (najlepsze możliwe).

Ze względu na ogromną złożoność współczesnych układów/systemów (miliony tranzystorów w jednym układzie scalonym) już tylko znalezienie nominalnych własności funkcjonalnych całego układu poprzez komputerową symulację nie jest zawsze możliwe - nie mówiąc o (iteracyjnej) optymalizacji czy też optymalizacji globalnej. Dlatego projektowany układ/system reprezentuje się i projektuje hierarchicznie; optymalizacja zaś (również globalna) dotyczy przede wszystkim bloków składowych systemu.

Projektowanie hierarchiczne sprowadza projekt dużego systemu do wielu powiązanych ze sobą projektów podsystemów; umożliwia zmniejszenie złożoności obliczeniowej całego zadania (i/lub zadań składowych), ale praktycznie zawsze kosztem utraty optymalności rozwiązania.

Dokładne przewidywanie własności projektowanego układu przed rozpoczęciem produkcji wymaga również rozwiązania pomocniczych zadań, takich jak zadań konstrukcji modeli: elementów składowych układu, połączeń, kosztów. Te zadania projektowe pociągają za sobą także konieczność rozwiązania pewnych zadań optymalizacji.

2 Modelowanie dla projektowania układów

W procesie projektowania występują następujące typy zagadnień modelowania/identyfikacji parametrycznej modeli.

1. Identyfikacja struktury deterministycznego modelu elementu/bloku układu.
2. Wyznaczanie wartości parametrów zadanego modelu dla uzyskania najlepszego przybliżenia obserwowanych charakterystyk elementu/bloku (identyfikacja parametryczna modelu deterministycznego).
3. Identyfikacja struktury statystycznego modelu elementu/bloku.
4. Identyfikacja parametryczna statystycznego modelu rozrzutów parametrów modelu elementu/bloku.

Poniżej omówiono jedynie dwa pierwsze zagadnienia¹.

2.1 Identyfikacja strukturalna modelu deterministycznego

Celem identyfikacji strukturalnej modelu jest znalezienie *postaci funkcji* modelu $y_i(x, \Theta)$, gdzie $i = 1, \dots, m$, które *zadowalająco dobrze* opisują wybrane charakterystyki złożonych obiektów *danego typu* przy zadanej *klasie sytacji/danych*.

Powyższe zadanie jest niedookreślone; potrzeba bowiem doprecyzować kryterium jakości, klasę modelowanych obiektów, klasę sytuacji/zakres warunków w których model ma być dokładny. Typowe zastosowania identyfikacji strukturalnej to:

- I1 - dokładne odtwarzanie zachowania konkretnego obiektu (interpolacja/aproksymacja);
- I2 - odtwarzanie głównych cech zachowania konkretnego obiektu/obiektów (filtracja, generalizacja);
- I3 - przewidywanie zachowania konkretnego obiektu lub klasy obiektów w warunkach innych od użytych do konstrukcji modelu (predykcja).

¹Informację dotyczącą praktyki konstrukcji modeli statystycznych dla projektowania układów można znaleźć np. w [13, 14, 16, 19, 22, 26, 27, 36, 46, 59, 61, 70, 76, 84].

Optymalizacyjna identyfikacja strukturalna

Niech $\mathcal{F}$ oznacza zbiór wszystkich możliwych do wykorzystania modeli: $y = f(x, \Theta)$, zaś $\hat{x}_{\mathcal{T}}$ oznacza najlepszy wektor s parametrów modelu f który najlepiej przybliża ten model dla danych $\{\mathcal{T}, \mathcal{Y}_{\mathcal{T}}\}$. $\hat{x}_{\mathcal{T}}$ można go uzyskać np. przez regresję nieliniową [3, 5]:

$$\hat{x}_{\mathcal{T}} = \arg \min_x \|\mathcal{Y}_{\mathcal{T}} - f(x, \mathcal{T})\|$$

Ocena jakości modelu dokonywana jest typowo w oparciu o zbiór danych testujących $\{\mathcal{E}, \mathcal{Y}_{\mathcal{E}}\}$ ². Dla zadania I1 jest to ten sam zbiór, który używano do wyznaczenia wektora $\hat{x}_{\mathcal{T}}$. Niech CR oznacza (tzw. zewnętrzne) kryterium jakości modelu f uczonego na danych $\{\mathcal{T}, \mathcal{Y}_{\mathcal{T}}\}$ i weryfikowanego na danych $\{\mathcal{E}, \mathcal{Y}_{\mathcal{E}}\}$ [4, 9, 10, 23, 24]:

$$CR = CR(\mathcal{Y}_{\mathcal{E}}^f, \mathcal{Y}_{\mathcal{E}}), \text{ gdzie } \mathcal{Y}_{\mathcal{E}}^f = f(\hat{x}_{\mathcal{T}}, \mathcal{E})$$

Zadanie identyfikacji strukturalnej można przedstawić w postaci następującego zadania optymalizacji:

$$f^* = \arg \min_{f \in \mathcal{F}} CR(\mathcal{Y}_{\mathcal{E}}^f, \mathcal{Y}_{\mathcal{E}}) \quad (1)$$

Są dwie grupy metod rozwiązywania zadania (1).

Metody sortujące zakładają, że postać zbioru $\mathcal{F}$ jest znana przed rozpoczęciem optymalizacji. Sama optymalizacja wykorzystuje typowo następujące techniki:

1. Sortowanie wszystkich możliwych rozwiązań.
2. Wieloetapowa regresja (nie)liniowa (ang. *step-wise regression*) [2, 7].
3. Regresja nieparametryczna [12];
4. Sztuczne sieci "neuronowe" (ang. *Cellural Nonlinear Networks*) o predefiniowanej strukturze [4, 22];
5. Programowanie dyskretne.

Metody iteracyjne (samoorganizujące się) tworzą zbiór $\mathcal{F}$ w trakcie optymalizacji. Są to:

1. Metoda *Group Method of Data Handling* [9, 4, 23] i jej pochodne [1, 25, 26].
2. Metoda aproksymacji funkcji za pomocą sztucznych "sieci neuronowych" o dynamicznej strukturze [8, 27].

Kryteria jakości dla identyfikacji strukturalnej muszą uwzględniać sprzeczne oczekiwania, np. małej złożoności modelu i dużej dokładności. Model jest konstruowany na podstawie skończonego zestawu danych uczących. Występuje więc również konflikt pomiędzy powiększaniem dokładności odtwarzania danych uczących przez model, a dokładnością modelu dla niezależnych danych testujących. W rezultacie zadanie identyfikacji struktury staje się wielokryterialne.

Oznaczmy: $RSS_{\mathcal{D}}(s) = \|\mathcal{Y}_{\mathcal{D}}^f - \mathcal{Y}_{\mathcal{D}}\|^2$, $N_{\mathcal{T}} = \text{card}(\mathcal{T})$, $N_{\mathcal{E}} = \text{card}(\mathcal{E})$, $N = N_{\mathcal{T}} + N_{\mathcal{E}}$, $\mathcal{D} = \mathcal{T} \cup \mathcal{E}$. Do oceny jakości (struktur) modeli używane mogą być następujące cząstkowe kryteria jakości:

1. Końcowy błąd predykcji (ang. *final prediction error*): $FPE(s) = \frac{N+s}{N-s} RSS_{\mathcal{D}}(s)$
2. Statystyka C_p Mallowsa (dla wariancji błędu modelu $\hat{\sigma}^2$): $C_p(s) = \frac{RSS_{\mathcal{D}}(s)}{\hat{\sigma}^2} + 2s - N$

²Można również wykorzystywać charakterystyki danych testowych (np. momenty statystyczne)[4].

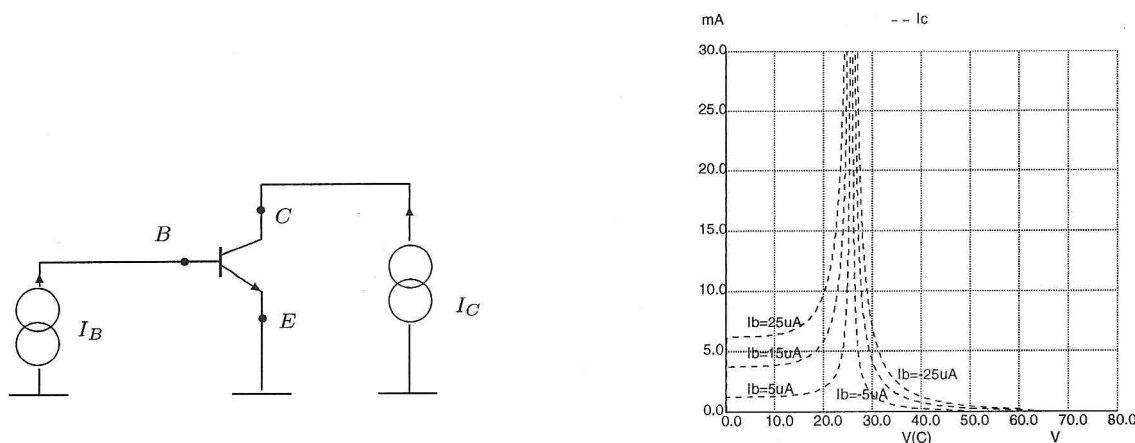
3. Przewidywany błąd Barrona (ang. *predicted square error*): $PSE(s) = \frac{RSS_{\mathcal{D}}(s) + 2s\hat{\sigma}^2}{N}$
4. Kryterium regularności: $\Delta_E(s) = \|Y_{\mathcal{E}}^f - f(x_{\mathcal{T}}, \mathcal{E})\|^2$
5. Kryterium obciążenia: $B^2(s) = \|f(x_{\mathcal{D}}, \mathcal{T}) - f(x_{\mathcal{D}}, \mathcal{E})\|^2$

Zadanie optymalizacji jest dyskretne, ze względu na naturę zbioru $\mathcal{F}$, i ma dużą złożoność. Dotychczas najbardziej obiecujące w projektowaniu układów wydają się metody wykorzystujące: regresję nieparametryczną [12, 15], GMDH [1, 19, 25], oraz technikę sieci neuronowych [8, 27].

2.2 Identyfikacja parametryczna modelu deterministycznego

Celem identyfikacji parametrycznej jest określenie wartości parametrów danego modelu, dla których błąd odtwarzania założonych charakterystyk obiektu modelowanego jest jak najmniejszy.

Przykład. Załóżmy że interesujące jest dobre odtworzenie dwóch charakterystyk tranzystora bipolarnego mierzonego w układzie jak na rys. 2a: $U_{BE}(I_B, I_C)$, oraz $U_{CE}(I_B, I_C)$ (tę charakterystykę przedstawiono na rys. 2b). Tranzystor modelowany jest za pomocą



Rys. 2: a) Układ pomiarowy i b) charakterystyka wyjściowa tranzystora bipolarnego.

nieliniowej sieci elektrycznej jak na rys. 3 [18]. Wprowadźmy oznaczenia:

$\bar{y}_{i,n} = \bar{y}_i(\Theta_{i,n}) \in R^{m_i}$ - punkty pomiarowe i -ej charakterystyki, $i = 1, \dots, M$;

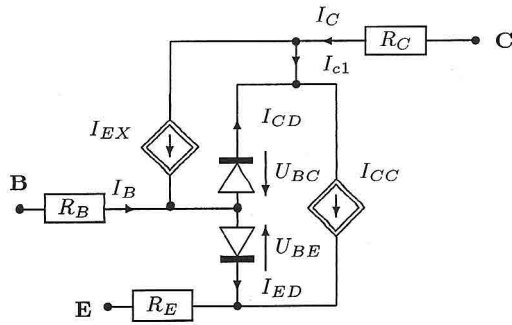
$\Theta_{i,n} \in R^{p_i}$, $n = 1, \dots, N_i$ - wartości zmiennych niezależnych, określających warunki pomiaru; $y_i = f_i(x, \Theta)$ - model matematyczny i -ej charakterystyki.

W przykładzie mamy:

$M = 2$, $x = [I_S, \beta_N, \beta_I, N_E, N_C, U_{BR}, N_A, R_B, R_E, R_C]^T$, $\Theta = [I_B, I_C]^T$, $y = [U_{BE}, U_{CE}]^T$. Wartości $f(x, \Theta)$ są zadane niejawnie, jako rozwiązanie nieliniowego układu równań sieci elektrycznej obejmującej układ pomiarowy i model (rys. 2a, 3).

Jeśli dla oceny punktowej dokładności modelu użyć błędu bezwzględnego:

$$e_{i,n}(x, \Theta_{i,n}) = f_i(x, \Theta_{i,n}) - \bar{y}_{i,n}$$



$$\begin{aligned}
 I_{ED} &= \frac{I_S}{\beta_N} \left(\exp \frac{U_{BE}}{N_E U_T} - 1 \right) \\
 I_{CD} &= \frac{I_S}{\beta_I} \left(\exp \frac{U_{BC}}{N_C U_T} - 1 \right) \\
 I_{EX} &= I_C \left(\frac{\max(-U_{BC}, 0)}{U_{BR}} \right)^{N_A} \\
 I_{CC} &= \beta_N I_{ED} - \beta_I I_{CD}
 \end{aligned}$$

Rys. 3: Model tranzystora bipolarnego z przebicciem lawinowym.

to kryterium jakości odwzorowania i -tej charakterystyki przez model może być funkcją o postaci:

$$F_i(x) = \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} w_{i,n} (e_{i,n}(x, \Theta_{i,n}))^p, \quad p \geq 1$$

Identyfikację parametryczną modelu $y(x, \Theta)$ można więc przedstawić jako wielokryterialne zadanie optymalizacji:

$$\min_{x \in X} F_i(x), \quad i = 1, \dots, M \quad (2)$$

Własności zadania identyfikacji:

- Wielokryterialność.
- Wielomodalność funkcji celu $F_i(x)$ (czy ich skalaryzacji, np. $\Phi(x) = \sum_{i=1}^M \alpha_i F_i(x)$).
- Postać funkcji celu (np. p , wagi $w_{i,n}$ w (2)) zależy od własności błędów pomiaru i błędu numerycznego rozwiązania modelu (w przykładzie: błędu rozwikłania równań nieliniowych) [5].
- Typowo, każda charakterystyka (a więc i funkcja jakości $F_i(x)$) jest być silnie zależna jedynie od podzbioru kilku składowych wektora x [18]. Własność ta umożliwia zgrubne graficzne oszacowanie wartości głównych parametrów.
- Koszt obliczeń modelu - znaczny dla charakterystyk dynamicznych, znikomy dla charakterystyk statycznych (zwłaszcza dla modeli zadanych jawnymi formułami).
- Potrzebne jest oszacowanie dokładności modelu i wpływu na tą dokładność błędów "danych pomiarowych";
- Wrażliwości funkcji celu są zwykle łatwo dostępne jedynie dla modeli symbolicznych i modeli reprezentowanych za pomocą liniowych sieci elektrycznych.

Używane techniki optymalizacji

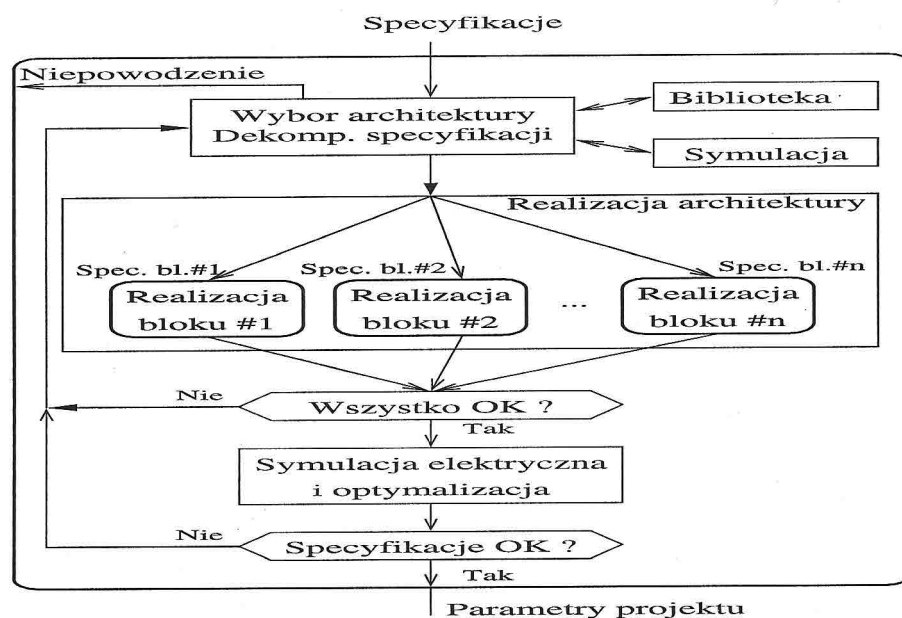
Spśród problemów omawianych w tym wykładzie identyfikacja parametryczna posiada metody rozwiązujące najbardziej zbliżone do potrzeb użytkownika. Należą do nich:

- Wielostartowa optymalizacja lokalna (np. metoda Nelder-Meada i jej modyfikacje [103, 20]).
- Metoda *Simulated Annealing*, czy metoda *Fast Simulated Diffusion* uzupełnione szybką metodą zbieżną lokalnie [21].
- Specjalizowane metody optymalizacji globalnej [6, 11, 20].

3 Projektowanie schematu elektrycznego

3.1 Wybór struktury i dekompozycja specyfikacji

Kluczową operacją projektowania hierarchicznego jest wybór struktury (architektury) układu/systemu. Automatyzacja tej operacji jest bardzo trudna, szczególnie dla układów analogowych, stąd popularne stwierdzenie: "projektowanie układów elektronicznych jest sztuką" (a nie czynnością rutynową). Trudność zadania wyboru struktury układu nie jest zaskoczeniem, jeśli zauważyć, że problemy wyboru struktury układu/systemu i wyboru struktury modelu służącego do interpolacji danych uczących są właściwie podobne. W obydwóch przypadkach chodzi o połączenie pewnej liczby bloków przetwarzających (na ogół nieliniowo i dynamicznie) sygnały wejściowe na sygnały wyjściowe, jakkolwiek zestaw bloków elementarnych może być różny. Nic również dziwnego, że istniejące metody automatyzacji wyboru struktury zawierają elementy metod omawianych w p. 2.1.



Rys. 4: Projektowanie schematu układu.

Używane techniki wyboru struktury układu:

- System ekspertowy naśladowujący zachowania projektanta. Metoda jest ogólna i skuteczna, o ile można skonstruować odpowiednią bazę wiedzy [86, 90, 88].
- Wybór i dołączanie do systemu całych podsystemów układu za pośrednictwem zmiennych binarnych w zadaniu programowania całkowitoliczbowego opisującego własności elektryczne wszystkich możliwych połączeń bloków składowych. Niezbędne jest wszakże wprowadzanie ograniczeń - eliminujących bezsensowne połączenia. Dla dużej ilości dopuszczalnych kombinacji wariantów podsystemów uzyskuje się bardzo duże nieliniowe zadanie optymalizacji [93].
- Metody statystyczne (np. algorytmy genetyczne) [91], których można użyć do wyboru kombinacji i połączeń bloków składowych. Ograniczenia realizacyjne trzeba uwzględniać w pod-algorytmach generacji nowego kandydata na strukturę układu.

Drugą krytyczną operacją projektowania hierarchicznego jest określenie specyfikacji dla bloków składowych na podstawie specyfikacji całego układu/systemu. W praktyce inżynierskiej ciągle dominuje dekompozycja heurystyczna, oparta na intuicji projektantów, chociaż prowadzone są już prace naukowe nad automatyzacją tej czynności [84, 85, 101, 113].

3.2 Optymalizacja parametrów schematu elektrycznego

Terminologia

Mierzalne cechy układu decydujące o jego jakości np. wzmocnienie, pasmo, zużycie mocy, są nazywane *parametrami wyjściowymi* (funkcjonalnymi) układu i oznaczane y_i ($i = 1, \dots, m$). Parametry wyjściowe mogą być skalarami bądź charakterystykami, czyli funkcjami wektorów zmiennych niezależnych $\omega_i \in \Omega_i$, $i = 1, \dots, m$ (np. zależnościami wzmocnienia małosygnałowego układu od częstotliwości), gdzie Ω_i jest dziedziną parametru ω_i .

Przy projektowaniu celowym (ang. *on-target design*) dla każdego parametru wyjściowego określa się *wartość/funkcję docelową* (ang. *target value*) $S_i^T(\omega_i)$. Parametry układu, które mogą być celowo zmieniane dla poprawy jakości projektu układu, to *parametry projektowe* układu (ang. *control parameters*), ozn. x . Zbiór dopuszczalnych zmian tych parametrów X to zazwyczaj "kostka":

$$X = \{x \in R^n | \underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i, i = 1, \dots, n\}$$

Niekontrolowane parametry procesu produkcyjnego oraz środowiska pracy układu (temperatura, zasilanie, parametry sygnałów wejściowych i obciążenia), powodujące niepożądaną zmienność własności funkcjonalnych układu, to *parametry zakłócające* (ang. *noise parameters*), ozn. θ [106, 111]. Niekontrolowana zmienność tych parametrów powoduje, że projekt, który bez rozrzutów spełnia idealnie specyfikacje - przy uwzględnieniu *rozrzutów wewnętrznych* (procesu produkcyjnego) czy *rozrzutów zewnętrznych* (środowiska eksploatacji) może być praktycznie nieużyteczny, jeśli zmienność parametrów wyjściowych jest zbyt duża.

Dopuszczalne odstępstwo od parametrów układu idealnego definiuje się wprowadzając ograniczenia projektowe S_i^L , S_i^U :

$$S_i^L(\omega_i) \leq y_i(x, \theta, \omega_i) \leq S_i^U(\omega_i), \forall \theta \in \Theta, \omega_i \in \Omega_i, i = 1, \dots, m$$

Niech $e = [x^T, \theta^T]^T$ oznacza zbiór zmiennych parametrów układu. Obszar sprawności można więc zdefiniować następująco:

$$R_e = \{e \in R^{n_e} | S_i^L(\omega_i) \leq y_i(e, \omega_i) \leq S_i^U(\omega_i), \forall \omega_i \in \Omega_i, i = 1, \dots, m\}$$

Zadania związane z projektowaniem schematu elektrycznego:

1. DEKOMPOZYCJA SPECYFIKACJI układu/bloków na specyfikacje (pod)bloków [84, 85].
2. ODRZUCANIE ZMIENNYCH NIEISTOTNYCH. Tworzone są, możliwie oszczędnie, przybliżone modele funkcji $y_i(e)$ - zawierające jak najmniej zmiennych spośród x_j , θ_k (podobieństwo do zadania I2 modelowania strukturalnego). Eliminacja nieistotnych zmiennych poprawia sprawność analizy statystycznej i optymalizacji. Problemy: wybór kryteriów eliminacji i koszty obliczeń [7, 14, 13, 47, 28].

3. PROJEKTOWANIE NOMINALNE. Polega na takim doborze parametrów projektowych, aby nominalne parametry funkcjonalne były możliwie bliskie wartościom docelowym. Parametry zakłócające przyjmują tu wartości nominalne $\bar{\theta}$ (często 0).

$$\min_{x \in X} \{F_i(x) = \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} w_{i,n} (y_i[x^T, \bar{\theta}_i^T]^T, \omega_{i,n}) - S_{i,n}^T)^p\} \quad p \geq 1, \quad i = 1, \dots, M \quad (3)$$

Zadanie to jest analogiczne do zadania parametrycznej identyfikacji (2). Należy podkreślić, że typowe dla projektowania nominalnego jest użycie złożonych symulatorów układu do wyznaczania odpowiedzi $y_i([x^T, \bar{\theta}_i^T]^T, \omega_{i,n})$ modelu układu. Chociaż własności zadań (2) i (3) są jakościowo takie same, to dla (3) większym problemem jest czas pojedynczej symulacji modelu, jak również skończona dokładność takiej symulacji. Metody rozwiązywania są w zasadzie wspólne.

4. PROJEKTOWANIE NA NAJGORSZY PRZYPADEK. Zakłada się tu, że wszystkie wytworzone układy mają być sprawne, tzn. $[x^T, \theta^T]^T \in R_e, \forall \theta \in \Theta(x, t)$, gdzie np. obszar tolerancji, to: $\Theta(x, t) = \{\theta \in R^n | \theta_i = x_i(1 + \xi_i t_i), i = 1, \dots, n, \xi \in \Xi\}$, $\Xi = \{\xi \in R^n | -1 \leq \xi_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, n\}$. Zadanie optymalizacji realizujące dobór parametrów projektowych x , oraz tolerancji rozrzutów t (o ile są one kontrolowalne):

$$\min_{x \in X, t \in T} \{C(x, t) | e(x, \theta(x, t, \xi)) \in R_e, \forall \xi \in \Xi\}$$

ma sformułowanie równoważne:

$$\min_{x \in X, t \in T} \{C(x, t) | \Psi(x, t) \leq 0\} \quad (4)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \Psi(x, t) &= \max_{\xi \in \Xi} \psi(x, t, \xi) \\ \psi(x, t, \xi) &= \max_i \max(\psi_i^L(x, t, \xi), \psi_i^U(x, t, \xi)) \\ \psi_i^L(x, t, \xi) &= SL_i - y_i(e(x, \theta(x, t, \xi))) \\ \psi_i^U(x, t, \xi) &= y_i(e(x, \theta(x, t, \xi))) - SU_i \end{aligned}$$

gdzie $C = C(x, t)$ oznacza funkcję kosztu realizacji układu.

Własności zadania

- Nieskończona liczba ograniczeń (*semi-infinite programming* (SIP)) [39, 40, 58, 61, 66];
- Zwykle niewypukły obszar sprawności, trudny do badania i aproksymacji [48, 52, 61, 68];
- Inne własności tego zadania - takie jak dla projektowania nominalnego.

Metody rozwiązujące problem (4) wymagają optymalizacji na dwóch poziomach. Algorytm górnego poziomu dobiera parametry projektowe x i tolerancje t dla uzyskania dopuszczalnego projektu o najmniejszym koszcie $C(x, t)$. Sprawdzenie dopuszczalności par (x, t) generowanych w trakcie optymalizacji wymaga obliczenia wartości funkcji Ψ , co z kolei wiąże się z rozwiązaniem pomocniczego zadania optymalizacji globalnej.

Algorytmy rozwiązujące

- Algorytmy górnego poziomu:

- Algorytm zewnętrznej aproksymacji (lub t.p.), który konstruuje iteracyjnie przybliżenie funkcji $\Psi(x, t)$:

$$\tilde{\Psi}(x, t) = \max_{\xi \in \tilde{\Xi}} \psi(x, t, \xi)$$

gdzie $\tilde{\Xi}$ jest dyskretnym zbiorem punktów krytycznych.

- Algorytm optymalizacji z niegładką skalarną funkcją ograniczeń.
- Algorytm optymalizacji gładkiej z gładką funkcją $\tilde{\Psi}(x, t)$ aproksymującą funkcję maksymalnego przekroczenia specyfikacji: $\Psi(x, t)$.

- Algorytmy dolnego poziomu:

- Algorytm optymalizacji globalnej funkcji $\Psi(x, t)$.
- Algorytm optymalizacji lokalnej dla przybliżonego obszaru sprawności R_e , np. gdy funkcje wyznaczające brzeg R_e przybliżone są formami kwadratowymi wektora e [30, 52, 58, 68].

5. PROJEKTOWANIE STATYSTYCZNE. Polega na doborze parametrów projektowych x (i ew. tolerancji t), tak by zminimalizować rozrzuty parametrów wyjściowych y , wywołane rozrzutami parametrów zakłócających θ .

Statystyczne kryteria jakości

- Odrzuty projektowe - prawdopodobieństwo niespełnienia specyfikacji projektowych:

$$\begin{aligned} Y_F(x, t) &= 1 - \underbrace{\int_{R_e} f_\theta(x, t) d\theta}_{\text{uzysk projektowy: } Y(x, t)} = \\ &= 1 - \int_{R^{dim(\theta)}} \chi_{R_e}(e(x, \theta)) f_\theta(x, t) d\theta \end{aligned}$$

gdzie *funkcja charakterystyczna* obszaru sprawności R_e :

$$\chi_{R_e}(e) = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli } e \in R_e \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases}$$

- Miara Taguchiego - średniokwadratowe odchylenie parametrów wyjściowych od wartości docelowych:

$$M_{T,i}(x, t) = \int_{R^{dim(\theta)}} (y_i(e(x, \theta)) - S_i^T)^2 f_\theta(x, t) d\theta$$

- Obciążenie B_i - czyli średnie odchylenie parametrów wyjściowych od wartości docelowych:

$$B_i(x, t) = \int_{R^{dim(\theta)}} (y_i(e(x, \theta)) - S_i^T) f_\theta(x, t) d\theta$$

- Wariancja parametrów wyjściowych:

$$V_i(x, t) = \int_{R^{dim(\theta)}} (y_i(e(x, \theta)) - B_i(x, t))^2 f_\theta(x, t) d\theta$$

Własności statystycznych kryteriów jakości

- Nieuchronna jest duża niedokładność obliczeń statystycznych miar jakości, spowodowana koniecznością wielowymiarowego całkowania. W przypadku użycia metody Monte Carlo błąd ma charakter losowy. Typowe są duże nakłady obliczeniowe [56, 60, 51].
- Numeryczne realizacje statystycznych miar jakości są często funkcjami odcinkowo-stałymi lub wielomodalnymi, nawet jeśli dokładnie liczone funkcje są gładkie i jedno-modalne. Dla przykładu, realizacja Monte Carlo funkcji odrzutów $Y_F(x, t)$ prowadzi do funkcji o postaci:

$$\hat{Y}_F(x, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - \xi_{Re}(e(x, \theta^i))) \frac{f_\theta(x, t)}{g_\theta(t)}$$

gdzie θ^i pochodzą z rozkładu o funkcji gęstości prawdopodobieństwa $g_\theta(t)$. Ze względu na użycie skończonej liczby N próbek funkcja $\hat{Y}_F(x, t)$ zmienia się skokowo.

- Można wyznaczyć pochodne miar statystycznych jeśli funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozrzutów $f_\theta(x, t)$ jest znana i różniczkowalna, albo są dostępne pochodne $\partial y_i(e) \partial e_j$ [38, 44, 51, 60, 63].

Typowe sformułowania zadań

- Optymalizacja uzysk/koszt [36, 52, 58, 61]:

$$\min_{x \in X, t \in T} C(x, t), Y(x, t) \geq Y_{min} \quad (5)$$

$$\max_{x \in X, t \in T} Y(x, t), C(x, t) \leq C_{max} \quad (6)$$

- Bardziej ogólnym od (5,6) sformułowaniem jest wielokryterialna optymalizacja statystycznych miar rozrzutów jakości ($S \in \{M_T, B, V\}$) [54, 96]:

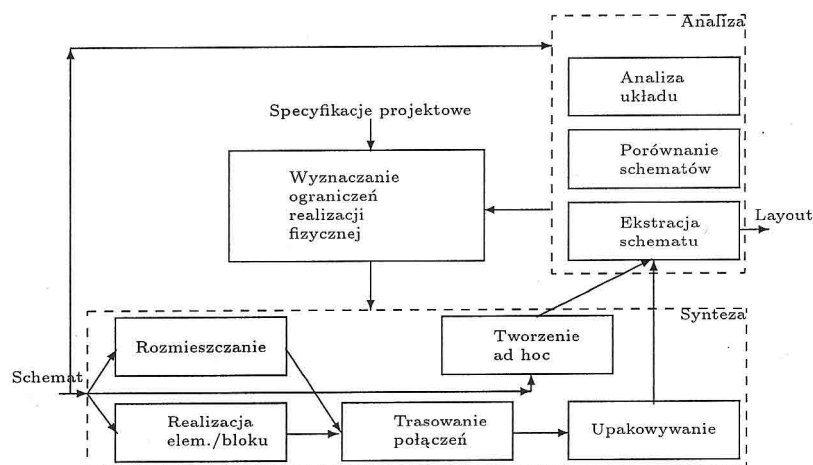
$$\min_{x \in X, t \in T} S_j(x, t), j = 1, \dots, J \quad (7)$$

Metody rozwiązywania zadań projektowania statystycznego:

- Metoda stochastycznej aproksymacji z niedokładnym (typowo 1-punktowym) estymatorem gradientu.
- Odporna na szумы metoda optymalizacji deterministycznej z ("dokładną") estymacją miar statystycznych za pomocą metody Monte Carlo [38, 62, 63].
- Metoda optymalizacji deterministycznej; kryteria jakości przybliżone deterministycznie [44, 51].
- Metody typu Taguchiego, polegające na konstrukcji ortogonalnych planów doświadczeń czynnikowych, tworzeniu modeli powierzchni odpowiedzi, i optymalizacji tak powstałej aproksymacji funkcji celu [65, 70, 106, 111, 112].

4 Projektowanie fizycznego układu

Synteza fizyczna układu prowadzi od schematu układu (uzyskanego przez projektowanie i optymalizację schematu) do projektu wykonawczego układu. Ze względu na złożoność obliczeniową zadanie projektowania fizycznych układów dekomponowane jest typowo na etapy (rys. 5): rozmieszczenie wstępne elementów/bloków (*floorplaning*), optymalne rozmieszczenie elementów/bloków (*placing*), trasowanie połączeń (*routing*), oraz upakowywanie (*spacing*). W tym wykładzie zostaną zarysowane jedynie podstawowe problemy zadań



Rys. 5: Projektowanie realizacji fizycznej układu.

projektowania fizycznego. Więcej informacji można znaleźć np. w [71]-[83].

Własności zadań projektowania fizycznego

- Przestrzeń rozwiązań jest dyskretna (wielowarstwowa siatka 2-wym.).
- Algorytmy rozwiązujące są NP-zupełne.
- Ponieważ trzeba poprowadzić wiele ścieżek, z których każda łączy co najmniej dwa kontakty elementów układu, powstaje problem kolejności trasowania ścieżek. Jakość praktycznie uzyskiwanych rozwiązań zależy od kolejności trasowania połączeń - stąd konieczność (heurystycznego) określania priorytetów ścieżek.
- Występują liczne ograniczenia realizacyjne, np.:
 - Łączone obiekty mogą mieć połączenia z różnych stron (konieczne przepusty).
 - Niektóre obiekty pozwalają na przeprowadzanie połączeń "nad/pod sobą".
 - Rezystancja (szerokość) ścieżek zależy od dopuszczalnego prądu.
 - Dla układów różnicowych - konieczne są symetryczne połączenia.
 - Trzeba oddalić od siebie lub ekranować niektóre połączenia, dla usunięcia przesłuchów lub szkodliwych sprzężeń.
 - Trzeba zminimalizować wielkości pasożytniczych parametrów tych połączeń, które istotnie pogarszają własności elektryczne układu.
- Dokładność realizacji ograniczeń i funkcji jakości wzrasta wraz z przechodzeniem do bardziej szczegółowej reprezentacji projektu (w kolejnym etapie projektowania).

Kryteria jakości

- Powierzchnia zajęta przez układ (koszt materiału podłoża). We wczesnych etapach projektowania konstruowana jest estymata powierzchni realizacji, która nie uwzględnia (w każdym razie dokładnie) powierzchni zajętej przez połączenia.
- Łączna długość połączeń, czas propagacji sygnału w krytycznych ścieżkach. We wczesnych etapach projektowania (np. rozmieszczanie wstępne) estymuje się zgrubnie długość połączeń, gdyż będą one znane dokładnie po wykonaniu ostatniego etapu - upakowywania.
- Złożone miary jakości. Np. przy trasowaniu połączeń, dla każdego odcinka połączenia z o długości $L(z)$ konstruowana jest cząstkowa miara jakości [77]:

$$F(z) = L(z) \cdot \left(1 + \frac{A_c(z)}{C_0^{A_c}} + \sum_{p \in \mathcal{P}} w_p \frac{p}{C_0^{(p)}} \right)$$

gdzie $\mathcal{P}$, to zbiór el. pasożytniczych związanych z odcinkiem z ; $A_c(z)$ - heurystyczna miara gęstości połączeń wokół z ; w_p - adaptacyjnie dobierane wagi; $C_0^{A_c}$, $C_0^{(p)}$ - stałe skalujące. Właściwą miarę jakości uzyskuje się przez zsumowanie wszystkich miar cząstkowych - uwzględniając wszystkie połączenia.

- Liczba przepustów pomiędzy warstwami połączeń.

Ze względu na ciągle rosnące rozmiary projektowanych układów automatyzacja rozwiązywania ogólnych zadań projektowania fizycznego, pomimo postępu, jest ciągle niezadowalająca. Dlatego w praktyce ogranicza się rozmiar przestrzeni rozwiązań przez wprowadzenie stylów projektowania (np. *stacks* w projektowaniu analogowym [78, 83], czy kanałów połączeń), wykorzystanie interakcji programu z projektantem przy podejmowaniu strategicznych decyzji, używanie technik eksperckich. Ze względu na liczne ograniczenia realizacyjne praktycznie użyteczne metody rozwiązania muszą być specjalizowane, chociaż można w nich znaleźć elementy znanych ogólnych metod globalnej optymalizacji, takich jak:

- algorytm A^* [77, 79];
- algorytm typu *Simulated Annealing*;
- algorytm typu *Simulated Evolution* [74, 80];
- algorytm genetyczny [91].

Warto jeszcze zwrócić uwagę na to, że w projektowaniu współczesnych scalonych układów analogowych wykorzystuje się struktury różnicowe, a ponadto, że realizacja scalona zapewnia względnie małe rozrzuty proporcji wartości elementów, pomimo dość dużych rozrzutów wartości bezwzględnych tych parametrów. Stąd o jakości układów decyduje wpływ rozrzutów wartości parametrów elementów nominalnie identycznych (ang. *mismatch*). Rozrzuty te zależą nie tylko od rozmiarów tych elementów, ale również od ich wzajemnego usytuowania, czy szczegółów realizacji fizycznej ³[16, 76]. Dlatego też przy projektowaniu układów analogowych o wysokiej jakości nie jest korzystne rozdzielanie procesu projektowania na projektowanie elektryczne i fizyczne, chyba że model elektryczny układu poprawnie uwzględnia korelacje rozrzutów elementów podobnych.

³Element układu, np. tranzystor, można zrealizować przez odpowiednie połączenie mniejszych elementów. Każdy z elementów składowych może być inaczej zorientowany na podłożu układu - dzięki czemu można np. zmniejszyć wpływ trendów rozrzutów, mających wyraźny kierunkowy charakter.

5 Konkluzje

Postęp automatyzacji projektowania układów jest niewątpliwie związany z postępowaniem metod rozwiązywania zadań programowania matematycznego, dzięki temu, że (jak pokazano w wykładzie) zadania projektowania inżynierskiego dają się przedstawić w postaci zadań wielokryterialnej optymalizacji. Rzeczywisty postęp wymaga jednak lepszego dostosowania algorytmów numerycznych do specyfiki rozwiązywanych zadań. Ze względu na złożoność obliczeniową realnych problemów trzeba wykorzystywać zarówno doświadczenie projektantów - ekspertów jak i projektanta - użytkownika interakcyjnego narzędzia projektowania. Stąd rodzą się następne problemy oczekujące na lepsze rozwiązania: reprezentacji ludzkiej wiedzy w algorytmie i jej adaptacji, interakcyjnej wizualizacji danych o projekcie itd. itp.

Optymalizacja globalna jest dla projektowania układów bardzo pożądana, ale trzeba zdawać sobie sprawę, że dla części z omówionych problemów nie może być praktycznie użyta ze względu na koszty. Typowo, najważniejszym kosztem jest czas obliczeń pojedynczej symulacji własności projektowanego układu. Wydaje się więc, że zakres stosowalności technik optymalizacji globalnej w projektowaniu układów zależy istotnie od rozwoju technik symulacji.

Literatura

Modelowanie

- [1] R.M. Biernacki, M.A. Styblinski, *Efficient performance function interpolation scheme and its application to statistical circuit design*, Int. J. of Circ. Th. and Appl., vol. 19, 1991, 403-422.
- [2] G.E. Box, N.R. Draper, *Empirical model-building and response surfaces*, Wiley, 1987.
- [3] N.R. Draper, H. Smith, *Analiza regresji stosowana*, PWN, 1973.
- [4] S.J. Farlow, *Self-organizing methods in modeling. GMDH type algorithms*, Marcel Dekker, Inc., N. York and Basel, 1984.
- [5] R. Gonin, A.H. Money, *Nonlinear L_p -norm estimation*, M. Dekker Inc., 1989
- [6] Yu Hen Hu, Shao Wei Pan, *SaPOSM: an optimization method applied to parameter extraction of MOSFET models*, IEEE Trans. on CAD, vol. 12, No. 10, Oct. 1993, 1481-1487.
- [7] R.R. Hocking, *The analysis and selection of variables in linear regression*, Biometrics, vol. 32, March 1976, 1-49.
- [8] K. Hornik, M. Stinchcombe, H. White, *Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives using multilayer feedforward networks*, Neural Networks, vol. 3, 1990, 551-560.
- [9] A.G. Ivakhnenko, *The group method of data-handling - a competitor of the method of stochastic approximation*, Avtomatyka (Sov. Auto. Control), No. 3, 1968, 58-72.
- [10] A.G. Ivakhnenko, W.S. Stepaško, *Pomiechoustoičivost' modelirovania*, Naukova Dumka, Kijów, 1985.
- [11] Yun-Cheng Ju, V.B. Rao, R.A. Saleh, *Consistency checking and optimization of macromodels*, IEEE Trans. on CAD, vol. 10, No. 8, Aug. 1991, 957-967.
- [12] V.Ya. Katkovnik, *Nieparametričeskaja identifikacija i sglaživanie dannyh*, Nauka, Moskwa, 1985.
- [13] J.P.C. Kleijnen, *Statistical tools for simulation practitioners*, M. Dekker Inc.

- [14] K.-K. Low, S.W. Director *A methodology for the design centering of IC fabric. processes*, IEEE Trans. CAD, vol. 10, no. 7, July 1991, 895-903.
- [15] J.-Q. Lu, K. Ogawa, T. Adachi, A.J. Strojwas, *Stochastic interpolation model scheme for statistical circuit design*, Proc. ISCAS'94, London, 1994, 125-128.
- [16] C. Michael, M. Ismail, *Statistical modeling for computer-aided design of MOS VLSI circuits*, Kluwer Acad. Publ., 1993.
- [17] K. Opalska, L. Opalski, *Decomposition-based model parameter extraction*, Proc. IEEE ISCAS'97, 1404-1407.
- [18] K. Opalska, L. Opalski, *A model of the BJT avalanche breakdown for circuit simulation*, Proc. ECCTD'97, Budapest, Hungary, Sept. 1997.
- [19] M. Qu M.A. Stybliński, *An adaptive approach to statistical macromodeling of analog integrated circuits*, Proc. IEEE ISCAS'95, 1596-1599.
- [20] M. Qu M.A. Stybliński, *An Efficient approach to device parameter extraction for statistical IC modeling*, Proc. CICC'96, 329-332.
- [21] T. Sakurai, A.R. Newton, *Fast Simulated Diffusion: An optimization algorithm for multimimum problems and its application to MOSFET model parameter extraction*, IEEE Trans. on CAD, vol. 11, No. 2, Feb. 1992, 228-34.
- [22] Y. Shen, R.M.M. Chen, *Application of genetic algorithm for response surface modeling in optimal statistical design*, IEEE ISCAS'95, 2152-2155.
- [23] V.S. Stepashko, *Methods and criteria for solving structural identification problems*, J. Sov. Autom. Int. Sci., No. 5, 1985, 27-35.
- [24] V.S. Stepashko, *GMDH algorithms as a basis for automatic the process of modeling from empirical data*, Sov. J. Autom. Int. Sci., No. 4, 1988, 42-52.
- [25] M.A. Styblinski, S. Aftab, *Combination of interpolation and self organization approximation techniques - a new approach to circuit performance modeling*, IEEE Trans. on CAD of ICs and Syst., vol. 12, No. 11, Nov. 1993, 1775-1785.
- [26] M.A. Stybliński, M. Qu, *Comparison of symbolic analysis, approximation and macromodeling techniques for statistical design for quality of analog integrated circuits*, Proc. IEEE ISCAS'95, 2221-4.
- [27] A.H. Zaabab, Qi-Ju Zhang, M. Nakhla, *A Neural network modeling approach to circuit optimization and statistical design*, IEEE Trans. on Microwave Th. and Tech., vol. 43, No. 6, June 1995.

Projektowanie schematu elektrycznego

- [28] J. Antoch, *Variable selection in linear model based on trimmed least squares estimator*, w *Statistical data analysis based on the L1-norm and related methods*, Y. Dodge ed., Elsevier Sci. Publ., 1987.
- [29] K.J. Antreich, H.E. Graeb, C.U. Weiser, *Circuit analysis and optimization driven by worst-case distances*, IEEE Trans. on CAD, vol. 13, no. 1, Jan. 1994, 57-71.
- [30] J.W. Bandler, H.L. Abdel-Malek, *Optimal centering, tolerancing and yield determination via approximations and cuts*, IEEE Trans. on Circuits and Syst., vol. VAS-25, 1978, 853-871.
- [31] J.W. Bandler, S.H. Chen, *Circuit optimization: the state of the art*, IEEE Trans. on Microwave Th. Tech., vol. MTT-36, no. 2, Feb. 1988, 424-443.
- [32] M.C. Bernardo i in., *Integrated circuit design optimization using sequential strategy*, IEEE Trans. on CAD, vol. 11, No. 3, March 1992, 361-372.

- [33] R.K. Brayton, R. Spence, *Sensitivity and optimization*, Elsevier Sci. Pub. Co., 1980.
- [34] R.K. Brayton, S.W. Director, G.D. Hachtel, *Yield maximization and worst-case design with arbitrary statistical distributions*, IEEE Trans. on Circ. Syst., vol. CAS-20, no. 9, Sept. 1980, 757-764.
- [35] A. Dharchoudhury, S.M. Kang, *Worst-case analysis and optimization of VLSI circuit performances*, IEEE Trans. on CAD of IC and Syst., vol. 14, no. 4, April 1995, 481-492.
- [36] S.W. Director, W. Maly, A.J. Strojwas, *VLSI design for manufacturing: yield enhancement*, Kluwer Acad. Publ., 1990.
- [37] C.-L. Fang, W.-B. Jone, *Timing optimization by gate resizing and critical path identification*, IEEE Trans. on CAD, vol. 14, no. 2, Feb. 1995, 201-217.
- [38] P. Feldmann, S.W. Director, *Integrated circuit quality optimization using surface integrals*, IEEE Trans. on CAD of ICs and Syst., vol. 12, No. 12, Dec. 1993, 1868-1879.
- [39] A.V. Fiacco, K.O. Kortanek (eds), *Semi-infinite programming and applications* Lecture notes in economics and mathematical systems, 215, Springer-Verlag, 1983.
- [40] R. Hettich, K.O. Kortanek, *Semi-infinite programming: theory, methods, and applications*, SIAM Review, vol. 35, No. 3, Sept. 1993, 380-429.
- [41] L.V. Kolev, V.M. Mladenov, S.S. Vladov, *Interval mathematics algorithms for tolerance analysis*, IEEE Trans. on Circ. and Syst., vol. 35, No. 8, August 1988, 967-974.
- [42] L.V. Kolev, *Approximate solution of a transient tolerance problem for linear circuits*, IEEE Trans. Circ. Syst. - I, vol. 39, 1992, 666-673.
- [43] D.M.W. Leenaerts, *Application of interval analysis for circuit design*, IEEE Trans. on Circ. and Syst., vol. 37, No. 6, June 1990, 803-807.
- [44] L.L. Li, Q.J. Zhang, *A moment method for statistical analysis of high speed VLSI interconnects*, Proc. IEEE CICC, 1994, 305-308.
- [45] M.R. Lightner, S.W. Director, *Multiple criterion optimization fote design of electronic circuits*, IEEE Trans. on Circ. Syst., vol. CAS-28, no. 3, March 1981, 169-179.
- [46] W. Maly, A.J. Strojwas, *Statistical simulation of the IC manufacturing process*, IEEE Trans. on CAD, vol. CAD-1, no. 7, July 1982, 120-131.
- [47] M.D. Morris, *Factorial sampling plans for preliminary computational experiments*, Technometrics, vol. 33, No. 2, May 1991, 161-174.
- [48] J. Ogrodzki, L. Opalski, M.A. Styblinski, *Acceptability regions for a class of linear networks*, Proc. IEEE ISACS, Houston, TX, May 1980.
- [49] L.J. Opalski, M.A. Styblinski, *An outer approximation algorithm for the design centering and tolerancing in nonconvex acceptability regions*, ECCTD'81, The Hague, 1981.
- [50] L.J. Opalski, M.A. Styblinski, *Generalization of yield optimization problem: the maximum income approach*, IEEE Trans. CAD ICs and Syst., vol. 5, No. 2, Apr. 1986, 346-360.
- [51] L.J. Opalski, *Deterministic optimization of stochastic circuit quality measures*, Mat. KKTO-iUE, 1994, 579-584.
- [52] L.J. Opalski, J.M. Wojciechowski, *Application of piecewise ellipsoidal approximation technique to design centering*, Proc. ISCAS'94, May 1994, 137-140.
- [53] L.J. Opalski, *Deterministic on-target performance variability optimization of integrated circuit*, Proc. MixVLSI'95, Kraków, 1995, 247-252.
- [54] L.J. Opalski, *Multiple criterion on-target performance variability optimization*, Proc. ECCTD'95, Istambul, 1995, 347-350.

- [55] S. Osowski, W. Debowski, *Global optimization of electrical networks - a comparative study*, Proc. ECCTD'97, Budapest, 1997.
- [56] R.Y. Rubinstein, *Simulation and the Monte Carlo method*, J. Wiley & Sons, 1981.
- [57] S. Skelboe, *True worst-case analysis of linear electrical circuits by interval arithmetic*, IEEE Trans. Circ. Syst., vol. 26, 1979, 874-879.
- [58] R. Spence, R.S. Sooin, *Tolerance design of electronic circuits*, Addison-Wesley, 1988.
- [59] A.J. Strojwas (ed.) , *Statistical design of integrated circuit*, IEEE Press, 1987.
- [60] M.A. Styblinski, *Estimation of yield and its derivatives by Monte Carlo sampling and numerical integration in orthogonal subspaces*, Proc. ECCTD'80, vol. 2, Warszawa 1980, 474-479.
- [61] M.A. Styblinski, *Metody analizy i optymalizacji tolerancji parametrów układów elektronicznych*, WNT 1981.
- [62] M.A. Styblinski, A. Ruszczyński, *Stochastic approximation approach to statistical circuit design*, El. Letters, 14th April 1983, vol. 19, no. 8, 300-302.
- [63] M.A. Styblinski, L.J. Opalski, *Algorithms and software tools for IC yield optimization based on fundamental fabrication parameters*, IEEE Trans. CAD, vol. 5, No. 1, Jan. 1986, 79-89 .
- [64] M.A. Styblinski, T.-S. Tang, *Experiments in nonconvex optimization: stochastic approximation with function smoothing and simulated annealing*, Neural Networks, vol. 3, 1990, 467-483.
- [65] M.A. Styblinski, *Generalized formulation of yield, variability, minimax and Taguchi circuit optimization problems*, Microelectron. Reliab., vol. 34, no. 1, 1994, 31-37.
- [66] P.T. Thach, *The design centering problem as a D.C. programming problem*, Mathematical Programming 41, 1988, 229-248.
- [67] W. Tian, X.T. Ling, R.W. Liu, *Novel methods for circuit worst-case tolerance analysis*, IEEE Trans. on Circ. and Syst. - I: Fund. Th. and Appl., vol. 43, No. 4, April 1996, 272-278.
- [68] J. Wojciechowski, J. Vlach, L. Opalski, *Design for nonsymmetrical statistical distributions*, IEEE Trans. on Circ. and Syst. - I, vol. 44, no. 1, Jan. 1997, 29-37.
- [69] J. Zabrodzki, *Podstawy metodyczne i teoretyczne projektowania układów elektronicznych z uwzględnieniem rozrzutów wartości parametrów*, Prace Naukowe, Elektronika, Wyd. Politechniki Warszawskiej, 1978.
- [70] J.C. Zhang, M.A. Styblinski, *Yield and variability optimization of integrated circuits*, Kluwer Acad. Publ., 1995.

Projektowanie fizyczne

- [71] U. Choudhury, A. Sangiovanni-Vincentelli, *Automatic generation of parasitic constraints for performance-constrained physical design of analog circuits*, IEEE Trans. on CAD, vol. 12, No. 2, February 1993, 208-224.
- [72] J.M. Cohn, D.J. Garrod, R.A. Rutenbar, L.R. Carley, *Analog device-level layout automation*, Kluwer Acad. Publ., 1994.
- [73] A.B. Kahng, G. Robins, *On optimal interconnections for VLSI*, Kluwer Acad. Publ., 1994.
- [74] R.M. King, P. Banerjee, *ESP: placement by simulated evolution*, IEEE Trans. on CAD, vol. 8, No. 3, March 1989, 245-256.
- [75] R.M. Kling, *Empirical and theoretical studies of the simulated evolution method applied to standard cell placement*, IEEE Trans. on CAD, vol. 10, No. 10, October 1991, 1303-1315.

- [76] W. Kuzmicz i in., *Coupling a statistical process-device simulator with a circuit layout extractor for realistic circuit simulation of VLSI circuits*, Proc. 5th Int'l SISDEP Conf., Wien, Sept. 1993.
- [77] E. Malavasi, A. Sangiovanni-Vincentelli, *Area routing for analog layout*, IEEE Trans. on CAD, vol. 12, August 1993, 1186-1194.
- [78] E. Malavasi, D. Pandini, *Optimum CMOS stack generation with analog constraints*, IEEE Trans. on CAD of ICs, vol. 14, no. 1, Jan. 1995, 107-122.
- [79] R. Nevin, *Autorouting with the A* algorithm*, Dr Dobb's Journal, Sept. 1989, 16-23.
- [80] Y.G. Saab, *Combinatorial optimization by stochastic evolution*, IEEE Trans. on CAD, vol. 10, No. 4, April 1991, 525-535.
- [81] N.A. Sherwani, *Algorithms for VLSI physical design*, 2-nd ed., Kluwer Acad. Publ., 1995.
- [82] T. Uehara, W.M. van Cleemput, *Optimal layout of CMOS functional arrays*, IEEE Trans. Comput., vol. C-30, no. 5, May 1981, 305-312.
- [83] S. Wimer, R.Y. Pinter, J.A. Feldman, *Optimal chaining of CMOS transistors in a functional cell*, IEEE Trans. CAD, vol. CAD-6, no. 5, Sep. 1987, 795-801.

Metodologie i systemy projektowania

- [84] D. Alexander, A. Achab, M.A. Styblinski, *IC design for quality and manufacturability using a statistical top-down methodology*, Proc. KKTOiUE, Polana Zgorzelisko, 1995, 707-714.
- [85] H. Chang i in., *A top-down, constraint-driven design methodology for analog integrated circuits*, Kluwer Acad. Publ., 1996.
- [86] F.M. El-Turky, E.E. Perry, *BLADES: an A.I. approach to analog circuit design*, IEEE Trans. CAD, vol. 8, no. 6, June 1989, 680-692.
- [87] G. Gielen i in., *An analogue module generator for mixed analogue/digital ASIC design*, Int. J. of Circ. Th. and Appl., vol. 23, 1995, 269-283.
- [88] R. Harjani, R.A. Rutenbar, L.R. Carley, *OASYS: a framework for analog circuit synthesis*, IEEE Trans. on CAD, vol. 8, no. 12, Dec. 1989, 1247-1266.
- [89] D. Hill, D. Shugard, J. Fishburn, K. Keutzer, *Algorithms and techniques for VLSI layout synthesis*, Kluwer Acad. Publ., 1988.
- [90] H.Y. Koh, C.H. Séquin, P.R. Gray, *OPASYN: a compiler for CMOS operational amplifiers*, IEEE Trans. on CAD, vol. 9, No. 2, Feb. 1990, 113-125.
- [91] W. Kruiskamp, D. Leenaerts, *DARWIN: analogue circuit synthesis based on genetic algorithms*, Int. J. of Circ. Theory and Applications, vol. 23, 1995, 285-296.
- [92] T.A. Ly, J.T. Mowchenko, *Applying simulated evolution to high level synthesis*, IEEE Trans. on CAD of Int. Circ. and Syst., vol. 12, No. 3, March 1993, 389-409.
- [93] P.C. Maulik, L.R. Carley, *Integer programming based topology selection of cell-level analog circuits*, IEEE Trans. on CAD of Int. Circ. and Syst., vol. 14, No. 4, April 1995, 401-412.
- [94] T. Mukherjee, L.R. Carley, R.A. Rutenbar, *Synthesis of manufacturable analog circuits*, Proc. ICCAD'94, 1994, 586-593.
- [95] W.T. Nye, A.L. Tits, *An application-oriented, optimization-based methodology for interactive design of engineering systems*, Int. J. Control, vol. 43, no. 6, 1986, 1693-1721.
- [96] L.J. Opalski, M.A. Styblinski, *GOSSIP - A generic system for statistical circuit design*, EDAC, Hamburg, Sept. 1992, 572-577.
- [97] T.K. Yu, S.M. Kamg, I.N. Haji, T.N. Trick, *iEDISON: an interactive statistical design tool for MOS VLSI circuits*, Proc. ICCAD-88, Santa Clara, CA, 1988.

- [98] F. Archetti, M. Cugiani (eds), *Numerical techniques for stochastic systems*, North-Holland, 1980.
- [99] P.T. Boggs, R.H. Byrd, R.B. Schnabel (eds), Proc. of the SIAM Conf. on Num. Optim., Boulder Colorado, June 12-14, 1984: *Numerical Optimization 1984*, SIAM, Philadelphia 1985.
- [100] L.O. Chua, *Global optimization: a naive approach*, IEEE Trans. Circ. SYst., vol. 37, 1990, 966-969.
- [101] J. De Kleer, G.J. Sussman, *Propagation of constraints applied to circuit synthesis*, Circ. Theory Appl. vol. 8, 1980.
- [102] I.C.W. Dixon, G.P. Szego (eds), *Toward global optimization*, vol. 1 and 2, North-Holland, 1975.
- [103] P.H. Gill, W. Murray, M.H. Wright, *Practical optimization*, Academic Press, 1981.
- [104] I.E. Grossmann, *Global optimization in engineering design*, Kluwer Acad. Publ., 1996.
- [105] E. Hansen, *Global optimization using interval analysis: the mult-dimensional case* Numerische Math., 34, 1990, 247-270.
- [106] R.N. Kacker, *Off-line quality control, parameter design and the Taguchi method*, J. of Quality Technology, vol. 17, no. 10, Oct. 1985, 176-221.
- [107] A. Lewandowski, A.P. Wierzbicki (eds.), *Aspiration based decision support systems*, Lecture notes in economics and mathematical systems, 331, Springer-Verlag, 1989.
- [108] K.K. Morozov (ed.), *Metody razbijenia schiem REA na konstruktivno zakonżennyje časti*, Sovetskoje Radio, Moskwa, 1978.
- [109] R.A. Otten, L.P. van Ginneken, *The annealing algorithm*, Kluwer, 1989.
- [110] P.M. Pardalos, J.B. Rosen, *Constrained global optimization: algorithms and applications*, Lecture notes in comp. sci., vol. 268, Springer-Verlag, 1989.
- [111] M.S. Phadke, *Quality engineering using robust design*, Prentice Hall, 1989.
- [112] P.J. Ross, *Taguchi techniques for quality engineering*, McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [113] G.J. Sussman, R.M. Stallman, *Heuristic techniques in computer-aided circuit analysis*, IEEE Trans. Circ. Syst., vol. CAS-22, Nov. 1975.
- [114] A. Törn, A. Žilinskas, *Global optimization*, Lecture notes in comp. sci., 350, Springer-Verlag 1987.
- [115] A.P. Wierzbicki, *On the completeness and constructiveness of parametric characterization to vector optimization problems*, OR Spectrom, vol. 8, 1986.
- [116] R. Zielinski, *Wybrane zagadnienia optymalizacji statystycznej*, PWN, 1982.
- [117] R. Zielinski, P. Neumann, *Stochastyczne metody poszukiwania minimum funkcji*, WNT, 1986.
- [118] Biblioteka numeryczna NETLIB w Oak Ridge National Laboratory:
<http://www.ornl.gov/index.html>