Bogdan Wilamowski

Politechnika Gdańska
Instytut Technologii Elektronicznej
80-952 Gdańsk
Majakowskiego 11/12

QUASI-DETERMINISTYCZNY ALGORYTM OPTYMALIZACJI PARAMETRÓW KOMPUTEROWYCH MODELI ELEMENTÓW

Przedstawiono wieloparametrowy algorytm optymalizacji modeli elementów i układów elektronicznych łączący w sobie zalety metod losowych i metod gradientowych. Algorytm skutecznie eliminuje ekstrema lokalne i charakteryzuje się dużą efektywnością znajdowania ekstremum globalnego. Jest szczególnie przydatny do znajdowania optimum funkcji wielu zmiennych. Algorytm zaimplementowany został w języku PASCAL na komputerze typu IBM PC.

1. Wprowadzenie

W przypadku zbyt dużej liczby parametrów tradycyjne metody deterministyczne wykorzystujące metodę szukania minimum globalnego jakiejś funkcji celu stają się mało użyteczne. Wynika to przede wszystkim z bardzo długich czasów poszukiwania poszczególnych składników gradientu. Inną trudność stanowi fakt, że przy tak wielu parametrach metody gradientowe często prowadzą do znalezienia minimum lokalnego a nie minimum globalnego. Ponadto wiele parametrów ma ściśle określone granice dopuszczalnych zmian, co dodatkowo utrudnia poszukiwanie minimum globalnego.

Lepsze wyniki uzyskuje się przy wykorzystaniu tak zwanych metod bezgradientowych, które wykorzystują przypadkowo generowane zestawy parametrów i w zależności od uzyskanych dokładności odpowiednio zawęża się obszar zmienności parametrów. Proces taki powtarza się wielokrotnie. W niniejszej pracy przedstawiono algorytm łączący w sobie obydwa mechanizmy działania. Algorytm wykorzystany został przykładowo do automatycznego znajdowania parametrów modeli elementów, tak aby opisane funkcjami zależności jak najdokładniej odpowiadały krzywym pomiarowym. Przy przyjęciu innej funkcji celu może być on również zastosowany do optymalizacji układów elektronicznych.

Temat realizowany w ramach CPBP 02.16

2. Opis algorytmu

W pierwszym etapie określa się funkcją celu i precyzuje się dopuszczalny zakres zmian parametrów. Wykorzystując generatory liczb losowych generuje się kolejne zbiory parametrów i oblicza wartości funkcji celu.

Każdy z zestawu parametrów modelu tranzystora można przedstawić w postaci punktu w wielowymiarowej przestrzeni parametrów. Zbiór tych punktów nazywa się potocznie "chmurą". W praktyce aby móc wykorzystać metody statystyczne liczba tych zestawów musi być co najmnie dwa razy większa niż liczba zmienianych parametrów. W wyniku tego uzyskuje się część rozwiązań dobrych, a część rozwiązań nie spełnia wymagań. Rozwiązania nieprawidłowe odrzuca się, a z rozwiązań dobrych uzyskuje się dwie zasadnicze informacje. Po pierwsze określa się wartości średnie zmienianych parametrów dla rozwiązań dobrych i po drugie określa się zakres zmienności tych parametrów. Mając te dane możliwa jest generacja następnych "przypadkowych" zestawów parametrów, przy czym zakres zmienności parametrów ustala się zwykle tak, żeby liczba poprawnych rozwiązań wynosiła około 50 procent. Taki cykl powtarza się wielokrotnie, aż przy kolejnych etapach nie będą zauważalne zmiany w zestawach parametrów bliskich optymalnemu.

Powyższa metoda bezgradientowej optymalizacji może być modyfikowana w różny sposob. Przykładowo, zamiast decyzji binarnych: projekt dobry lub zły, można wprowadzić wagi poszczególnych przypadków w zależności od stopnia poprawności rozwiązania. Opisana metoda optymalizacji ma jescze tę cechę, że proces optymalizacji faktycznie symuluje też przypadkowe rozrzuty parametrów procesu technologicznego. Znalezienie w ten sposób dobrego rozwiązania niejako automatycznie gwarantuje niewrażliwość modelu na przypadkowe zmiany procesu produkcyjnego. W deterministycznych metodach gradientowych można wyobrazić sobie na przykład przypadek znaleziania rozwiązania bardzo dobrego, ale opisującego tylko jeden mierzony tranzystor.

3. Sposób generacji "przypadkowych" wartości parametrów

Większość języków programowania posiada opcję generowania przypadkowych liczb w przedziale (0,1). Uzyskanie rozkładów gaussowskich o wartości średniej S_o i dyspersji S_d wymaga stworzenia specjalnego algorytmu. W programie optymalizacji dokonuje sie kolejno 8 losowań liczb przypadkowych z przedziału

(0,1), a następnie oblicza się sumę Σ_8 tych 8 przypadkowych liczb. Wartość losową rozkładu gaussowskiego oblicza się z zależności:

$$x = S_o \frac{\alpha - 1 + 0.25 \cdot \Sigma_8}{\alpha} \qquad (1)$$

gdzie:

$$\alpha = 0.6/S_d \qquad (2)$$

Algorytm optymalizacji wykorzystuje zalety metod gradientowych - deterministycznych jak i metod losowych. Pierwsze 4 zestawy parametrów określane są w sposób deterministyczny wykorzystując kierunek gradientu "największego spadku". Następne kilkanaście zestawów jest losowanych przy założeniu rozkładu gaussowskiego o dyspersji nieco wiekszej niż dyspersja poprawnych rozwiązań z poprzedniego cyklu losowań. Kolejne kilka losowań dokonywanych jest w znacznie większym promieniu w celu ominięcia ewentualnych minimów lokalnych. Dla każdej iteracji generowanych jest 20 przypadkowych zestawów parametrów:

zestaw 1 - P_i jest obliczany jako średnia ważona tych przypadkowo wygenerowanych parametrów, dla których uzyskano poprawę w stosunku do do poprzedniego cyklu losowań.

zestaw 2 - jest obliczany po określeniu wektora kierunkowego:

$$K = P_i - P_{i-1} \qquad (3)$$

gdzie:

P_i - jest zestawem parametrów numer 1

P_{i-1} - jest zestawem parametrów numer 1 z poprzedniego cyklu losowań i określany na podstawie zależności:

$$P = P_i + K \qquad (4)$$

zestaw 3 - jest określany z zależności:

$$P = P_i + 2 \cdot K \qquad (5)$$

zestaw 4- jest określany z zależności:

$$P = P_i + \beta \cdot K \qquad (6)$$

gdzie β jest optymalnie dobranym parametrem dla uzyskania maksimum poprawy z zestawach parametrów w kierunku określonym przez. wektor kierunkowy. Wartość parametru β oblicza się wykorzystując wyniki dla zestawów 1,2 i 3 przy założeniu, że funkcja kryterialna na tym kierunku opisana może być wielomianem drugiego stopnia.

zestawy 5 do 15 generowane są przypadkowo wokół najlepszego z uzyskanych dotychczas zestawów. Dyspersje S_d w generowanych rozkładach gaussowskich są w tym przypadku 1.5 razy większe niż obliczone dyspersje w poprzednim cyklu losowań.

zestawy 16 do 20 są również generowane przypadkowo wokół najlepszego z uzyskanych dotychczas zestawów, ale o znacznie większym promieniu. Dyspersje S_d w generowanych rozkładach gaussowskich są w tym przypadku 5 razy większe niż obliczone dyspersje w poprzednim cyklu losowań.

4. Kryterium poprawności doboru parametrów

Jako kryterium doboru parametrów przyjmuje się sumaryczny błąd względny. Kryterium KR jakości doboru parametrów obliczane jest z zależności:

$$KR = -\ln\left\{ \sum_{j=1}^{npp} \left[\ln\left(\frac{WP_j}{WO_j}\right) \right]^2 \right\} \qquad (7)$$

gdzie:

npp - liczba punktów pomiarowych

WP_j - wartosci pomierzone

WO_j - wartości obliczone

Po każdym cyklu losowań następuje obliczanie wartości średniej oraz dyspersji każdego z parametrów. Wartość średnią oblicza się jako:

$$W_k = \frac{\sum_{l=1}^{nl} W_{lk}}{nl} \qquad (l = 1,2...np) \qquad (8)$$

Dyspersję oblicza się jako:

$$D_k = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^{nl} W_{lk}^2 - \frac{1}{nl}\left(\Sigma W_{lk}\right)^2}{nl}} \qquad (l = 1,2...np) \qquad (9)$$

gdzie:

np i nl - liczby parametrów i losowań

W_{lk} - wartości losowanych parametrów

5. Wyniki eksperymentu komputerowego

Algorytm wykorzystywany był do optymalizacji modeli tranzystorów bipolarnych i do optymalizacji niewielkich układów cyfrowych. Poniżej podanie zostany przykład optymalizacji parametrów opisujących pojemność złącza półprzewodnikowego. Zależność pojemności złączowej od napięcia opisana jest przy pomocy 4 parametrów:

$$C_M(u) = \frac{CJ*}{\left(1 - \frac{u}{VJ*}\right)^{MJ*}} + CK \qquad (10)$$

W wyniku obliczeń uzyskuje się wydruk w postaci podanej poniżej. Podane są startowe wartości parametrów oraz wartości średnie i dyspersje po wskazanej liczbie iteracji.

startowe parametry 0.450 0.000 0.700 0.600

CJ* [pF]	dysp.	CK [pF]	dysp.	VJ* [V]	dysp.	MJ*	dysp.	nr iter
0.45522	0.063	0.08364	0.107	0.69800	2.553	0.54917	1.199	10
0.45460	0.079	0.08670	0.014	0.70718	0.178	0.56266	0.188	20
0.39937	1.257	0.14161	0.113	0.76267	1.202	0.72649	0.339	30
0.37612	0.198	0.17064	0.026	1.00000	0.005	1.00000	0.003	40
0.37596	0.004	0.17072	0.001	1.00000	0.002	1.00000	0.001	50
0.37596	0.001	0.17072	0.001	1.00000	0.002	1.00000	0.001	60
0.37596	0.005	0.17072	0.001	1.00000	0.002	1.00000	0.001	70
0.37596	0.001	0.17072	0.002	1.00000	0.002	1.00000	0.001	80
0.37595	0.003	0.17072	0.001	1.00000	0.002	1.00000	0.001	90
0.37595	0.006	0.17072	0.001	1.00000	0.002	1.00000	0.001	100

Optymalizację przeprowadzono dla wszystkich złączy scalonego tranzystora bipolarnego. Obliczone programem optymalizacji parametry zestawione są w poniższej tabeli:

ZŁACZE	B-E	B-K	K-S	
CJ*	410	434	911	fF
VJ*	863	804	567	mV
MJ*	.403	.680	.599	
CK*	58	113	1435	fF

W rezultacie porównania wyników tabelaryzacji funkcji (10) z wynikami pomiarów stwierdzono bardzo dobrą zgodność w przypadku złączy B-E, C-S. W przypadku złącza B-C stwierdzono nieco gorszą zbieżność, której miarą jest maksymalny błąd względny równy 4%. Można jednak stwierdzić, że uzyskana dokładność aproksymacji jest zadowalająca. Dodatkową zaletą użycia programu optymalizacji jest eliminowanie błędu pomiaru pojemności rozproszonych, czego ewidentnym dowodem jest doskonała zbieżność w przypadku pojemności kolektor-podłoże + poprawka.