

Zastosowanie algorytmu genetycznego w procesie estymacji parametrów modeli przyrządów półprzewodnikowych

Streszczenie. Praca dotyczy zastosowania algorytmu genetycznego w procesie estymacji wartości parametrów arbitralnie wybranego modelu tranzystora MOS. Przedstawiono budowę oraz zasadę działania algorytmu genetycznego. Pokazano wpływ wybranych parametrów sterujących działaniem algorytmu na obliczone wartości funkcji celu. Zaproponowano modyfikację operatora krzyżowania wpływającą na uzyskiwanie wyników obliczeń z większą dokładnością.

Abstract. The paper concerns the application of the genetic algorithm in the process of parameter estimation of an arbitrarily selected MOSFET model. The structure and the principle of operation of the genetic algorithm have been presented. The influence of selected parameters controlling the algorithm operation on the calculated values of the objective function has been shown. A modification of the crossing operator providing calculation results of greater accuracy has been proposed. (Application of the genetic algorithm in the estimation process of models parameters of semiconductor devices).

Słowa kluczowe: algorytm genetyczny, optymalizacja, modelowanie, MOSFET.

Keywords: genetic algorithm, optimization, modelling, MOSFET

Wstęp

Istotnym czynnikiem w procesie modelowania charakterystyk przyrządów półprzewodnikowych jest zastosowanie modeli tych przyrządów charakteryzujących się możliwie dużą dokładnością, dla których używa się wiarygodnych zestawów wartości parametrów uzyskanych z wykorzystaniem odpowiednich metod estymacyjnych. Zastosowanie w obliczeniach wartości parametrów wyznaczonych w nieprawidłowy sposób uniemożliwia rzetelne przeprowadzenie oceny dokładności modelu [1].

W ogólności, proces wyznaczania wartości parametrów modeli elementów elektronicznych jest związany z zagadnieniami optymalizacji funkcji celu, natomiast uzyskanie poprawnego zestawu wartości parametrów dotyczy poszukiwania wartości minimalnej tej funkcji.

W technologii elektronicznej od wielu lat stosowane są metody estymacyjne różnego typu [2, 3], a niektóre z nich zostały z powodzeniem zaimplementowane w popularnych programach komputerowych. Na przykład pakiet oprogramowania SPICE oferuje narzędzie MODEL EDITOR umożliwiające wyznaczanie wartości parametrów niektórych modeli wbudowanych w tym programie [4]. Niestety, korzystanie z wymienionego wyżej narzędzia wymaga wiedzy użytkownika, dotyczącej doboru punktów na charakterystykach zmierzonych, stanowiących dane wejściowe, a nieumiejętny dobór tych punktów może prowadzić do dużych błędów estymacji [5].

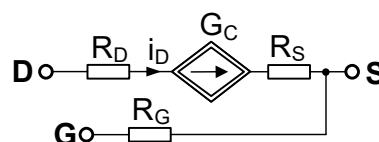
W latach 70. ubiegłego stulecia opracowano koncepcję optymalizacji funkcji celu z wykorzystaniem algorytmu genetycznego, którego działanie oparte jest na procesach adaptacyjnych obserwowanych w przyrodzie takich, jak dobór naturalny oraz dziedziczność [6, 7]. Do chwili obecnej koncepcja ta jest nieustannie rozwijana, a sam algorytm genetyczny jest z powodzeniem stosowany do realizacji zagadnień optymalizacji w wielu dziedzinach nauki, w tym również w elektronice [8, 9].

W niniejszej pracy omówiono zastosowanie algorytmu genetycznego w procesie estymacji wartości parametrów wybranego modelu tranzystora MOS. Zaprezentowano budowę i zasadę działania algorytmu genetycznego wraz ze sposobem jego implementacji do metody estymacyjnej. Pokazano wpływ wybranych parametrów sterujących działaniem algorytmu na obliczone wartości funkcji celu. Zaproponowano modyfikację algorytmu pozwalającą na uzyskiwanie wyników obliczeń z większą dokładnością.

Model Shichmana-Hodgesa tranzystora MOS

W badaniach wykorzystano model Shichmana-Hodgesa tranzystora MOS, który jest wbudowany w programie SPICE na poziomie modelowania (LEVEL=1). Reprezentacja obwodowa oraz postać wszystkich zależności analitycznych tego modelu jest szczegółowo opisana w literaturze [4, 10].

W przypadku rozważanego modelu wbudowanego, za kształt charakterystyk stałoprądowych odpowiada pojedyncze źródło sterowane modelujące prąd kanału tranzystora. Okazuje się, że na potrzeby analizy takich charakterystyk postać modelu można uprościć, usuwając na przykład elementy odpowiedzialne za modelowanie pojemności wewnętrznych tranzystora, które w takim przypadku są nieaktywne. Postać uproszczonego stałoprądowego modelu Shichmana-Hodgesa tranzystora MOS użytego w badaniach zilustrowano na rysunku 1.



Rys.1. Postać uproszczonego modelu Shichmana-Hodgesa

Elementy R_D i R_S z rysunku 1 modelują pasożytnicze rezystancje szeregowo obszarów odpowiednio drenu i źródła tranzystora MOS, rezystor R_G reprezentuje rezystancję izolacji bramki oraz umożliwia poprawne zadawanie napięcia sterującego bramka-źródło, natomiast sterowane źródło prądowe G_C jest odpowiedzialne za modelowanie prądu kanału tranzystora. Wydajność tego źródła w zakresie odcięcia wynosi zero, natomiast w zakresie pracy liniowym oraz nasycenia jego wydajność opisana jest wzorami odpowiednio [4, 10]:

$$(1) \quad i_D = \frac{W}{L} \cdot B(T) \cdot u_{DS} \cdot \left(u_{DS} - V_{TH} - \frac{u_{DS}}{2} \right) \cdot (1 + \lambda \cdot u_{DS})$$

$$(2) \quad i_D = \frac{W}{L} \cdot \frac{B(T)}{2} \cdot (u_{GS} - V_{TH})^2 \cdot (1 + \lambda \cdot u_{DS})$$

gdzie: u_{DS} , u_{GS} – napięcie dren-źródło i bramka-źródło, W – szerokość kanału tranzystora, L – efektywna długość kanału, V_{TH} – napięcie progowe, λ – współczynnik modulacji długości kanału, natomiast temperaturowa zależność

parametru transkonduktancji $B(T)$ jest wyrażona wzorem [4, 10]:

$$(3) \quad B(T) = B_{T_0} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\frac{3}{2}}$$

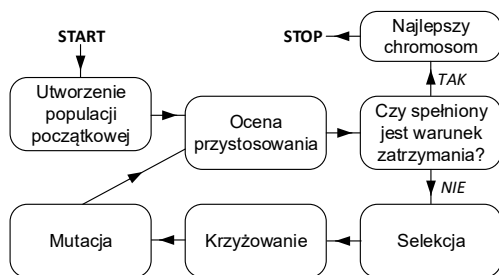
przy czym B_{T_0} oznacza parametr transkonduktancji w temperaturze odniesienia T_0 .

Jak widać, w opisie analitycznym rozważanego modelu występuje w sumie 6 parametrów, tzn.: B_{T_0} , W , L , V_{TH} , λ oraz sumaryczna wartość rezystancji szeregowych $R_S + R_D$ traktowana jako pojedynczy parametr.

Budowa i działanie algorytmu genetycznego

Zadaniem algorytmu genetycznego w omawianym procesie estymacji jest wyznaczenie takich wartości parametrów modelu Shichmana-Hodgesa, dla których różnice pomiędzy wynikami symulacji i pomiarów charakterystyk wyjściowych tranzystora są jak najmniejsze.

Algorytm genetyczny realizuje obliczenia na narzuconej z góry populacji chromosomów. Chromosom stanowi pojedyncze rozwiązanie problemu optymalizacyjnego i zawiera binarnie zakodowaną informację nt. wartości poszczególnych parametrów modelu. Rozmiar bitowy chromosomu jest uzależniony od iloczynu liczby parametrów modelu oraz liczby bitów (XBIT) przeznaczonych do zakodowania pojedynczego parametru. W zastosowaniach praktycznych do odwzorowania wartości parametru z dokładnością do kilku miejsc znaczących wystarczająca jest wartość parametru XBIT wynosząca 16 bitów [7]. Zasadę działania algorytmu genetycznego zaprezentowano na rysunku 2 [6, 7].



Rys. 2. Zasada działania algorytmu genetycznego

W pierwszym kroku działania algorytmu tworzona jest w sposób losowy początkowa populacja chromosomów, która następnie poddawana jest ocenie przystosowania. Taka ocena jest realizowana dla każdego chromosomu indywidualnie poprzez wyznaczenie wartości funkcji celu $FC(x)$ o postaci:

$$(4) \quad FC(x) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |x_{n,m}^{pmr} - x_{n,m}^{obl}|$$

gdzie: N – liczba charakterystyk tranzystora, M – liczba punktów pomiarowych na charakterystyce, $x_{n,m}^{pmr}$, $x_{n,m}^{obl}$ – zmierzona oraz obliczona wartość prądu tranzystora w punkcie pracy określonym parametrami n i m . Generalnie, im niższa wartość funkcji celu, tym wyższa jest ocena przystosowania chromosomu.

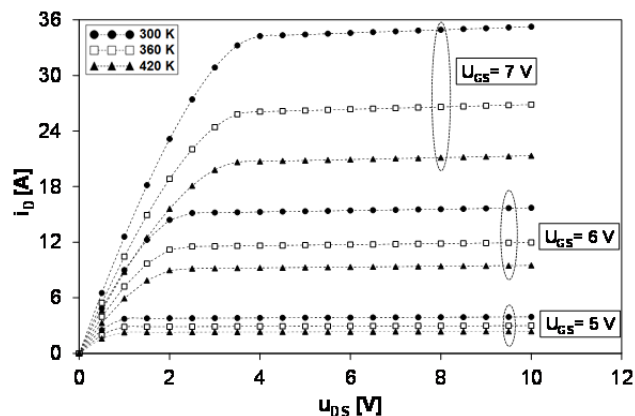
W kolejnym kroku sprawdzane jest spełnienie warunku zatrzymania się algorytmu, którym może być na przykład uzyskanie niższej niż założona wartość funkcji celu albo realizacja założonej z góry liczby pokoleń (tzn. iteracji). W przypadku spełnienia warunku zatrzymania rozwiązaniem algorytmu jest najlepiej przystosowany chromosom w bieżącej populacji. Natomiast w przeciwnym przypadku następuje proces tworzenia nowego pokolenia

chromosomów składający się z operatorów selekcji oraz krzyżowania chromosomów-rodziców, a także operatora mutacji nowoutworzonych chromosomów-potomków [6, 7]. W implementacji rozważanego w pracy algorytmu zastosowano metodę selekcji koła ruletki oraz metodę krzyżowania jednopunktowego [7], natomiast prawdopodobieństwo mutacji pojedynczego bitu w chromosomie (tzw. współczynnik mutacji) w pierwszym i ostatnim pokoleniu wynosi odpowiednio 10% oraz 1%, przy czym wartość tego parametru zmienia się liniowo w funkcji liczby pokoleń. Rozważany algorytm został zrealizowany w środowisku MATLAB [11].

Ocena działania algorytmu genetycznego

Z punktu widzenia realizacji procedury estymacji parametrów danymi wejściowymi dla algorytmu genetycznego są: 1. postać zależności analitycznych opisujących model, 2. wyniki pomiarów charakterystyk zaciskowych tranzystora na podstawie których realizowany jest proces estymacji parametrów, 3. wartości parametrów sterujących działaniem algorytmu genetycznego takich, jak np.: rozmiar populacji, liczba pokoleń, itd.

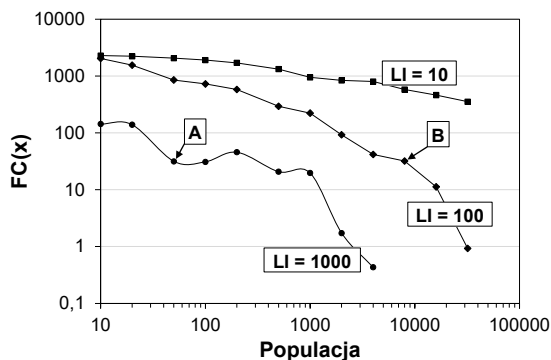
W celu oceny wpływu parametrów sterujących działaniem algorytmu genetycznego na obliczone wartości funkcji celu przeprowadzono eksperyment numeryczny polegający na zastosowaniu w obliczeniach charakterystyk uzyskanych z symulacji w programie SPICE dla arbitralnie dobranych (nominalnych) wartości parametrów modelu Shichmana-Hodgesa, spełniających funkcję wyników pomiarów. Tym sposobem możliwe było przeprowadzenie oceny działania algorytmu poprzez porównanie wartości parametrów modelu uzyskanych z obliczeń z wartościami nominalnymi. Zastosowane w obliczeniach programem SPICE wartości nominalne parametrów modelu są następujące: $B_{T_0} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ A/V}^2$, $W = 0,3 \text{ m}$, $L = 2 \mu\text{m}$, $V_{TH} = 4 \text{ V}$, $\lambda = 0,005 \text{ V}^{-1}$, $R_D + R_S = 10 \text{ m}\Omega$. Współrzędne punktów na charakterystykach wyjściowych tranzystora stanowiących dane wejściowe w omawianym eksperymencie przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Charakterystyki wyjściowe użyte w eksperymencie

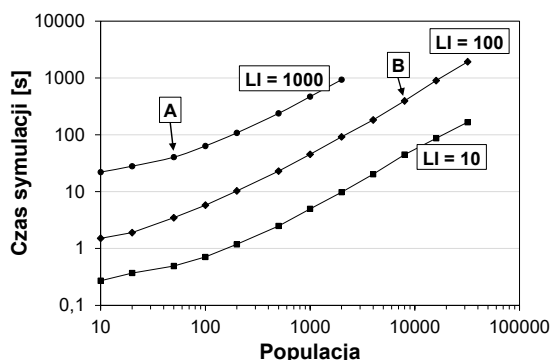
Przeprowadzono wielokrotne obliczenia wartości parametrów modelu Shichmana-Hodgesa oraz określono wpływ wybranych parametrów sterujących działaniem algorytmu genetycznego na obliczone wzorem (4) wartości funkcji celu. Cechą charakterystyczną algorytmu genetycznego jest stosunkowo niewielka powtarzalność uzyskiwanych wyników obliczeń [6, 7]. Wynika to z faktu, że potencjalne rozwiązania problemu optymalizacyjnego są odnajdywane w kolejnych próbach w bliskim otoczeniu minimum funkcji celu. Z tego względu wartości tej funkcji na wszystkich kolejnych rysunkach dotyczą wartości średniej obliczonej z 25 zrealizowanych prób.

Na rysunku 4 zaprezentowano wpływ rozmiaru populacji (POP) na wartości funkcji celu dla różnej liczby iteracji (LI). Jak widać, uzyskiwane wartości funkcji celu maleją zarówno ze wzrostem populacji, jak i liczby iteracji. Należy zauważyć, że zgodnie ze wzorem (4) uzyskanie w ramach obliczeń wartości funkcji celu na przykład na poziomie około 30 (punkt A na rysunku 4) oznacza, że różnice pomiędzy wartościami prądu drenu obliczonymi w ramach algorytmu oraz wartościami nominalnymi z rys. 3 nie przekraczają sumarycznie 30 A, co jednocześnie odpowiada uzyskaniu wartości średniego błędu kwadratowego na poziomie około 4,5%.



Rys. 4. Wpływ rozmiaru populacji na wartości funkcji celu

Na rysunku 5 pokazano wartości czasu trwania symulacji odpowiadające poszczególnym wariantom obliczeniowym z rysunku 4. Jak widać, czas trwania symulacji rośnie w przybliżeniu liniowo wraz ze wzrostem rozmiaru populacji.



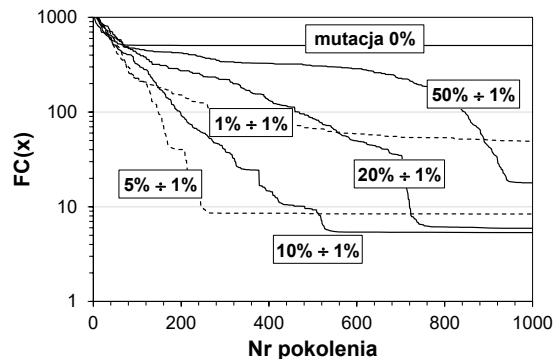
Rys. 5. Czas symulacji dla wariantów obliczeniowych z rys. 4

Zaznaczone na rysunkach 4 i 5 punkty A i B dotyczą dwóch przypadków obliczeniowych zrealizowanych dla zróżnicowanej wartości rozmiaru populacji oraz liczby iteracji, w ramach których uzyskano zbliżone do siebie wartości funkcji celu, przy czym czas trwania symulacji w punktach A i B wynosił odpowiednio: 40 s oraz 395 s. Okazuje się, że z punktu widzenia uzyskiwania porównywalnych wartości funkcji celu przy jednoczesnej minimalizacji czasu trwania obliczeń, korzystniejsze jest powiększanie liczby iteracji przy jednoczesnym zmniejszaniu wielkości populacji.

Z kolei na rysunku 6 zaprezentowano wartości funkcji celu uzyskiwane w poszczególnych pokoleniach przy zastosowaniu w rozważanym algorytmie różnych kombinacji zmian wartości współczynnika mutacji.

Jak widać, najniższe średnie wartości funkcji celu w ostatniej 1000. iteracji uzyskano przy zastosowaniu współczynnika mutacji zmieniającego się w trakcie symulacji liniowo od 10% do 1%. Wyższe początkowe wartości współczynnika mutacji wynoszące 20% oraz 50%

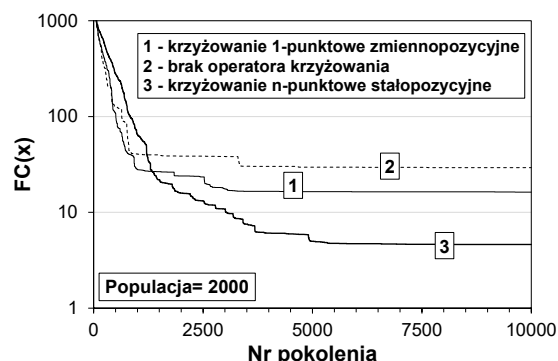
powodują, że w obliczeniach realizowanych w pierwszych pokoleniach następuje zbyt silna modyfikacja genetyczna chromosomów, skutkująca częstym odrzucaniem potencjalnie dobrych rozwiązań. Z drugiej strony przyjęcie zbyt niskiej początkowej wartości współczynnika mutacji (tj. 1% oraz 5%) powoduje zastosowanie w obliczeniach stosunkowo niewielkiej różnorodności genetycznej populacji chromosomów, co prowadzi do poszukiwania najlepszego rozwiązania w bardziej ograniczonej przestrzeni rozwiązań.



Rys. 6. Wpływ współczynnika mutacji na wartości funkcji celu

Warto zaznaczyć, że pominięcie w obliczeniach operatora mutacji (tj. mutacja 0% - rys. 6) prowadzi do bardzo dużej niedokładności obliczeń, tj. wartość $FC(x) > 500$.

Na rysunku 7 zaprezentowano wartości funkcji celu uzyskane w poszczególnych pokoleniach w przypadku zastosowania krzyżowania jednopunktowego (krzywa nr 1), a także z pominięciem tego operatora genetycznego (krzywa nr 2).



Rys. 7. Wpływ metody krzyżowania na wartości funkcji celu

Jak widać, większą skuteczność działania algorytmu genetycznego wyrażoną niższymi wartościami funkcji celu w ostatnim pokoleniu uzyskuje się przy zastosowaniu operatora krzyżowania. Jak podają niektóre źródła literaturowe [6, 7] w pewnych sytuacjach operacja krzyżowania nie jest, w przeciwieństwie do operatora mutacji, elementem krytycznym decydującym o poprawnym działaniu algorytmu genetycznego, co również można zaobserwować na rysunkach 6 i 7 w przypadku wykluczenia z algorytmu wyżej wymienionych operatorów.

W trakcie realizacji symulacji zaobserwowano, że w miejsce klasycznego losowego krzyżowania jednopunktowego korzystniejsze jest zastosowanie krzyżowania w arbitralnie wybranym punkcie chromosomu zlokalizowanym w bezpośrednim sąsiedztwie dwóch skrajnych bitów kodujących wartości parametrów modelu. W rozważanym w pracy przykładowym obliczeniowym, obejmującym jednocześnie wyznaczenie wartości 6 parametrów modelu, takich punktów krzyżowania jest

dokładnie 5. Dodatkowo zauważono, że liczba takich punktów krzyżowania w każdej iteracji powinna być wybierana losowo. Wyniki obliczeń wartości funkcji celu przy zastosowaniu wyżej opisanej metody krzyżowania zostały dodatkowo zilustrowane na rysunku 7 (krzywa nr 3). Jak widać, zaproponowane przez autora krzyżowanie wielopunktowe stałopozycyjne zapewnia większą skuteczność działania algorytmu genetycznego w porównaniu do klasycznego krzyżowania jednopunktowego. Obliczone w ostatniej iteracji wartości funkcji celu, przy zastosowaniu rozwiązania autorskiego, są około 10-krotnie niższe niż wartości uzyskane przy użyciu klasycznego krzyżowania jednopunktowego.

Wyniki obliczeń wartości parametrów modelu na przykładzie rzeczywistego tranzystora MOS

Korzystając z informacji dotyczących doboru wartości parametrów sterujących działaniem algorytmu genetycznego omówionych w poprzednim rozdziale przeprowadzono estymację parametrów modelu Shichmana-Hodgesa na podstawie katalogowych charakterystyk wykonanego z węgla krzemu tranzystora MOS typu CMF20120D firmy Wolfspeed.

W obliczeniach zastosowano następujące wartości parametrów sterujących działaniem algorytmu genetycznego: POP= 200, LI= 10000, XBIT= 25, krzyżowanie stałopozycyjne wielopunktowe, współczynnik mutacji zmieniający się liniowo od wartości 10% do 1%.

W tabeli 1 zebrano wyniki obliczeń wartości parametrów modelu zrealizowane w trzech niezależnych próbach. Czas trwania obliczeń pojedynczej próby na komputerze wyposażonym w 12-rdzeniowy procesor AMD Ryzen 9 3900X taktowany częstotliwością 3,8 GHz oraz pamięć o pojemności 32 GB wyniósł około 850 s.

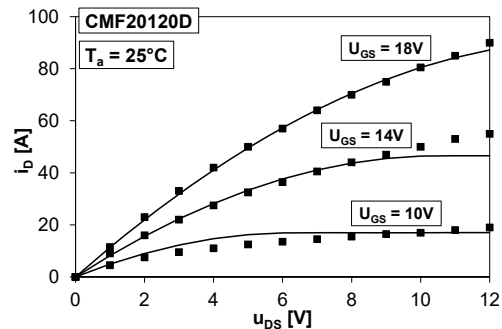
Tabela 1. Obliczone wartości parametrów modelu

Parametr	Wartość		
	Próba 1	Próba 2	Próba 3
FC (x)	50,9921	50,996	50,995
B_{T0}	$8,83 \cdot 10^{-6}$	$4,96 \cdot 10^{-5}$	$3,57 \cdot 10^{-4}$
W	0,235	0,042	0,006
L	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$
V_{TH}	4,602	4,614	4,616
λ	$1,00 \cdot 10^{-5}$	$1,03 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$
$R_S + R_D$ [Ω]	$1,00 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$
$W / L \cdot B(T)$	1,039	1,044	1,045

Jak widać, we wszystkich zrealizowanych próbach uzyskano niemalże identyczne wartości funkcji celu FC(x). Z drugiej strony, w kolejnych próbach otrzymano zróżnicowane wartości parametru B_{T0} oraz W. Wynika to z faktu, że we wzorach (1) i (2) opisujących model pojawia się wyrażenie $W/L \cdot B(T)$, którego arbitralnie ustaloną wartość można uzyskać dla nieskończonej kombinacji wartości parametrów składowych. W ostatnim wierszu Tabeli 1 umieszczono obliczone wartości tego wyrażenia w poszczególnych próbach, które jak widać są praktycznie identyczne. Tak więc, niekiedy konieczne jest zadawanie w obliczeniach dodatkowych warunków brzegowych, w tym na przykład narzucenie z góry wartości parametrów technologicznych L oraz W związanych z konstrukcją tranzystora, a także realizowanie obliczeń na podstawie charakterystyk tranzystora zmierzonych w kilku temperaturach otoczenia – szczególnie ze względu na występowanie w postaci modelu temperaturowej zależności B(T).

Na rysunku 8 porównano katalogowe (punkty) oraz obliczone modelem Shichmana-Hodgesa (linie ciągłe) charakterystyki wyjściowe rozważanego tranzystora w temperaturze 25°C. W rzeczywistości na rysunku 8 zawarto

wyniki obliczeń charakterystyk tranzystora zrealizowane z wykorzystaniem 3 zestawów wartości parametrów uzyskanych w kolejnych próbach (Tabela 1), przy czym różnice pomiędzy poszczególnymi charakterystykami obliczonymi nie są zauważalne na tym rysunku.



Rys. 8. Charakterystyki tranzystora CMF20120D

Jak widać, uzyskano bardzo dobrą zgodność charakterystyk katalogowych oraz obliczonych przy zastosowaniu wartości parametrów uzyskanych przy pomocy rozważanej w pracy metody estymacyjnej.

Uwagi końcowe

W pracy potwierdzono przydatność algorytmu genetycznego w zastosowaniu do estymacji wartości parametrów wybranego modelu przyrządu półprzewodnikowego, a zastosowana przez autora modyfikacja operatora krzyżowania powoduje uzyskiwanie niższych wartości funkcji celu. Na etapie estymacji wartości parametrów modelu w charakterze przykładu użyto danych katalogowych tranzystora wykonanego z węgla krzemu, co miało na celu zilustrowanie potencjalnych możliwości zastosowania modelu Shichmana-Hodgesa do modelowania charakterystyk tranzystora wykonanego z tego materiału półprzewodnikowego.

Autor: dr inż. Damian Bisewski, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: d.bisewski@we.umg.edu.pl

LITERATURA

- [1] Bargiel K., Bisewski D., Evaluation of accuracy of SiC-JFET macromodel, *ITM Web of Conferences*, 19, 01027 (2018)
- [2] Górecki K., Detka K., The parameter estimation of the electrothermal model of inductors, *Informacje MIDEM*, No. 45 (2015), 29-38
- [3] Chwastek K., Szczygłowski J., Metody estymacji parametrów modelu Jilesa-Athertona - przegląd, *Przegląd Elektrotechniczny*, 84 (2008), n.12, 145-148
- [4] PSPICE A/D Reference Guide Version 15.7, *MicroSim Corporation*, April (2006)
- [5] Zarębski J., Bisewski D. Estymacja parametrów modelu Danga tranzystora MOS, *Elektronika – konstrukcje, technologie, zastosowania*, Nr 6 (2009), 87-90
- [6] Holland J. H., *Adaptation in natural and artificial systems*, *University of Michigan Press*, Ann Arbor, (1975)
- [7] Michalewicz Z., *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*, *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, (1996)
- [8] Bisewski D., Parameters estimation of SPICE Models for Silicon Carbide Devices, *21st European Microelectronics and Packaging Conference and Exhibition EMPC* (2017), 1-5
- [9] Padua B. et al., Hybrid Implementation of Evolutionary Algorithms in FPGA for Automatic Generation of Morphological Image Filters, *Przegląd Elektrotechniczny*, 96 (2020), n.4, 12-16
- [10] Shichman H., Hodges D. A., Modeling and simulation of insulated-gate field-effect transistor switching circuits, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, SC-3 (1968), 285
- [11] www.mathworks.com