

Modelowanie stałoprądowych charakterystyk tranzystorów SiC-MOS mocy w programie SPICE

Streszczenie. Artykuł dotyczy problematyki komputerowego modelowania charakterystyk oraz parametrów tranzystorów MOS mocy wykonanych z węgliku krzemu (SiC). W ramach realizacji pracy sformułowano oraz zaimplementowano w programie PSPICE autorski model rozważanego tranzystora, który bazuje na zmodyfikowanym modelu Shichmana-Hodgesa krzemowego tranzystora MOS. Opracowany model, w porównaniu do innych istniejących modeli tranzystora MOS wbudowanych w popularnych programach komputerowych, modeli firmowych, a także modeli opisanych w literaturze, cechuje się dużą dokładnością. Ponadto, zaproponowany model charakteryzuje się stosunkowo nieskomplikowaną budową, tzn. w zależnościach analitycznych opisujących ten model występuje zaledwie kilkanaście parametrów, których wartości można wyznaczyć korzystając z informacji zawartych w kartach katalogowych konkretnych typów tranzystorów albo na podstawie wyników pomiarów.

Abstract. The paper deals with the problem of computer modelling of characteristics and parameters of power MOSFETs made of silicon carbide (SiC). An original model of the considered transistor was formulated and implemented in the PSPICE program, which is based on the Shichman-Hodges model of the silicon MOS transistor modified by the authors. In comparison to other existing MOS transistor models embedded in popular computer programs as well as models described in literature, the developed model exhibits high accuracy. Furthermore, the proposed model features a relatively simple structure, meaning that it includes only a few parameters in its analytical description. The values of these parameters can be determined based on the information provided in the datasheets of specific transistor types or through measurement results. (*Modelling of DC characteristics of power SiC-MOSFETs in SPICE*).

Słowa kluczowe: modelowanie, MOSFET, węglik krzemu.

Keywords: modelling, MOSFET, silicon carbide.

Wstęp

Tranzystory polowe MOS (ang. Metal-Oxide-Semiconductor) od dawna zajmują ważne miejsce w technologii elektronicznej i są stosowane głównie w układach przełączających oraz wzmacniających, zarówno jako elementy dyskretne, jak i elementy składowe układów scalonych [1, 2].

Od wielu lat rozważane tranzystory są wykonywane z krzemu (Si), jednakże w ciągu ostatnich kilkunastu lat do konstrukcji tych tranzystorów stosowane są również nowoczesne materiały półprzewodnikowe takie, jak np. węglik krzemu (SiC). Technologia SiC jest nieustannie rozwijana, a w chwili obecnej rynek oferuje kilkadziesiąt typów tranzystorów SiC-MOS, których ceny rozpoczynają się już od kilkunastu złotych za sztukę.

Obecnie, w procesie projektowania oraz analizy nowoczesnych układów elektronicznych niezbędne jest zastosowanie wspomaganie komputerowego. Rynek oferuje wiele różnych programów komputerowych przeznaczonych do tego celu. Popularną grupę stanowią programy z rodziny SPICE, a wśród nich dystrybucja PSPICE oferowana przez firmę OrCad [3]. W wymienionym programie komputerowym (w wersji 17.4) zostało wbudowanych w sumie 8 modeli tranzystora MOS. Niestety w dalszym ciągu producenci programu SPICE nie uwzględniają nowoczesnych trendów technologicznych i oferują modele tranzystora MOS dedykowane wyłącznie dla elementów wykonanych z krzemu. Jak wynika z literatury [2], stosowanie takich modeli do wyznaczenia charakterystyk tranzystorów wykonanych np. z węgliku krzemu może prowadzić do dużych niedokładności.

Obok modeli wbudowanych, ważną grupę stanowią modele oferowane przez producentów tranzystorów SiC-MOS (tzw. modele firmowe). Wcześniejsze badania [4] przeprowadzone przez autorów wykazały, że niektóre modele firmowe charakteryzują się dużą dokładnością modelowania wyłącznie podstawowych charakterystyk tranzystora MOS, tzn. wyjściowych i przejściowych, ale jednocześnie stosunkowo małą dokładnością modelowania charakterystyk tranzystora na przykład w zakresie inwersyjnym. Modele firmowe są na ogół konstruowane z

wykorzystaniem dużej liczby elementów składowych, w tym: modeli wbudowanych, źródeł sterowanych oraz elementów biernych, co może być niekorzystne w przypadku symulacji rozbudowanych układów elektronicznych zawierających wiele tranzystorów MOS i niekiedy prowadzić do nieakceptowalnie długiego czasu trwania obliczeń [5].

W pracy [6] przeanalizowano możliwość implementacji w programie PSPICE wybranych literaturowych modeli tranzystora SiC-MOS w celu przeprowadzenia oceny ich dokładności. Szczególną uwagę zwrócono na modele zamieszczone w kilkudziesięciu artykułach naukowych opublikowanych w latach 2010-2022 oraz udostępnionych w bazie IEEE Explore [7]. Wykazano, że w wielu przypadkach implementacja literaturowego modelu tranzystora do programu PSPICE może być problematyczna, a niekiedy nawet nie jest możliwa, ze względu na brak podstawowych informacji niezbędnych do poprawnej implementacji modelu takich, jak np. topologia modelu oraz postać zależności analitycznych opisujących wszystkie jego elementy [6].

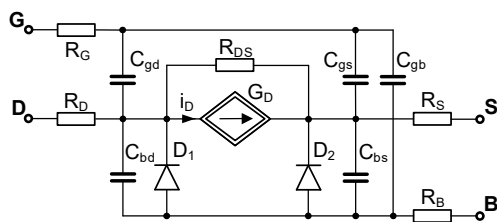
W przypadku projektowania i analizy układów elektronicznych zawierających w swojej strukturze wiele tranzystorów MOS wskazane wydaje się zastosowanie modeli wbudowanych, głównie ze względu na krótszy czas trwania obliczeń oraz mniejsze ryzyko występowania błędów związanych z brakiem zbieżności obliczeń. Jednocześnie, w obliczeniach można stosować modele autorskie sformułowane na podstawie postaci modeli wbudowanych i zawierające modyfikacje oryginalnych zależności analitycznych, zwiększające ich dokładność w wybranych zakresach pracy tranzystora przy zachowaniu rozsądnej liczby nowych (dodatkowych) parametrów modelu.

W niniejszej pracy oceniono przydatność wbudowanego w programie PSPICE modelu Shichmana-Hodgesa do wyznaczania charakterystyk i parametrów tranzystorów MOS wykonanych z węgliku krzemu. Z uwagi na zaobserwowane istotne rozbieżności pomiędzy wynikami symulacji i pomiarów, zaproponowano kilka modyfikacji tego modelu powodujących zwiększenie jego dokładności w odniesieniu do wyników obliczeń charakterystyk

tranzystorów SiC-MOS. Na tej podstawie sformułowano postać autorskiego modelu rozważanej klasy tranzystorów i zaprezentowano wyniki jego weryfikacji eksperymentalnej.

Model Shichmana-Hodgesa tranzystora MOS

Model Shichmana-Hodgesa (S-H) jest wbudowany w programie PSPICE na poziomie 1 (LEVEL=1) i jest stosowany do wyznaczania charakterystyk zarówno krzemowych tranzystorów MOS, jak i JFET [2, 3]. Na rysunku 1 przedstawiono topologię omawianego modelu, który jest elementem 4-końcówkowym i oprócz standardowych zacisków bramki (G), drenu (D) i źródła (S) posiada dodatkowe wyprowadzenie podłoża (B). W przypadku używania modelu S-H w odniesieniu do klasycznych dyskretnych tranzystorów MOS, a szczególnie tranzystorów MOS mocy wyprowadzenie podłoża należy zewrzeć ze źródłem [2].



Rys. 1. Topologia modelu Shichmana-Hodgesa

Widoczne na rys. 1 elementy: R_D , R_S , R_G oraz R_B reprezentują rezystancje szeregowe obszarów: drenu, źródła, bramki i podłoża tranzystora. Diody D_1 i D_2 modelują prądy płynące przez złącza odpowiednio podłoże-dren oraz podłoże-źródło. Głównym elementem modelu jest źródło prądowe G_D , którego wydajność w zakresie odcięcia jest równa zero, natomiast w zakresie pracy liniowym oraz nasycenia jest opisana wzorami odpowiednio [3]:

$$(1) \quad \text{dla } u_{DS} < u_{GS} - V_{T0} \text{ (zakres liniowy)} \\ i_D = \frac{W}{L} \cdot B(T) \cdot u_{DS} \cdot \left(u_{DS} - V_{T0} - \frac{u_{DS}}{2} \right) \cdot (1 + \lambda \cdot u_{DS})$$

dla $0 < u_{GS} - V_{T0} \leq u_{DS}$ (zakres nasycenia)

$$(2) \quad i_D = \frac{W}{L} \cdot \frac{B(T)}{2} \cdot (u_{GS} - V_{T0})^2 \cdot (1 + \lambda \cdot u_{DS})$$

gdzie: W – szerokość kanału, L – efektywna długość kanału, V_{T0} – napięcie progowe, $B(T)$ – temperaturowa zależność parametru transkonduktancji, λ – współczynnik modulacji długości kanału, u_{GS} – napięcie bramka-źródło, u_{DS} – napięcie dren-źródło.

Temperaturową zależność parametru transkonduktancji wyrażono wzorem [3]:

$$(3) \quad B(T) = B_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\frac{3}{2}}$$

przy czym B_0 jest parametrem transkonduktancji w temperaturze odniesienia T_0 .

Przeznaczenie oraz opis analityczny pozostałych elementów modelu jest dostępny w literaturze, w tym również w instrukcji programu PSPICE [3].

Ocena dokładności modelu Shichmana-Hodgesa

Przeprowadzono ocenę dokładności modelu S-H poprzez porównanie charakterystyk uzyskanych z symulacji z charakterystykami katalogowymi na przykładzie wykonanego z węgla krzemu tranzystora MOS o symbolu CMF20120D firmy Wolfspeed [8]. Według danych udostępnionych przez producenta [9], badany tranzystor charakteryzuje się dopuszczalną wartością napięcia dren-

źródła równą 1200 V oraz dopuszczalną wartością prądu drenu wynoszącą 42 A (prąd ciągły).

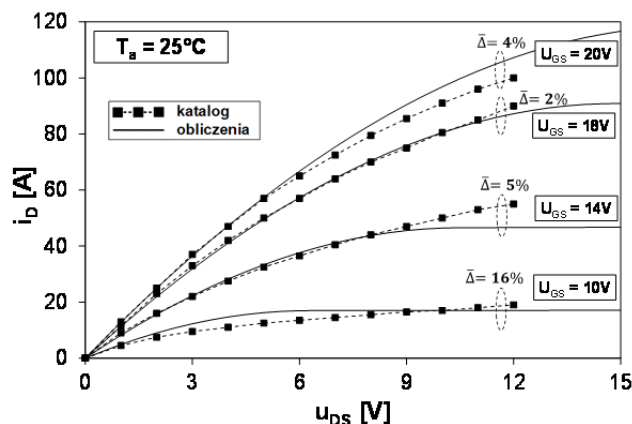
W obliczeniach charakterystyk tranzystora zastosowano wartości parametrów modelu S-H, które uzyskano z wykorzystaniem znanej z literatury [10] metody estymacyjnej bazującej na algorytmie genetycznym. Jako dane wejściowe do procedury estymacyjnej posłużyły charakterystyki katalogowe rozważanego tranzystora. Uzyskano następujące wartości parametrów modelu: $W = 9,4 \cdot 10^{-4}$ m, $L = 2 \cdot 10^{-6}$ m, $V_{T0} = 3,88$ V, $B_0 = 1,89$ A/V², $\lambda = 8 \cdot 10^{-4}$ m⁻¹, $R_D = 1 \cdot 10^{-3}$ Ω, $R_S = 6,3 \cdot 10^{-3}$ Ω.

Na rysunku 2 oraz 3 przedstawiono obliczone modelem S-H oraz katalogowe charakterystyki wyjściowe badanego tranzystora w temperaturach otoczenia 25°C oraz 135°C dla różnych wartości napięcia bramka-źródło.

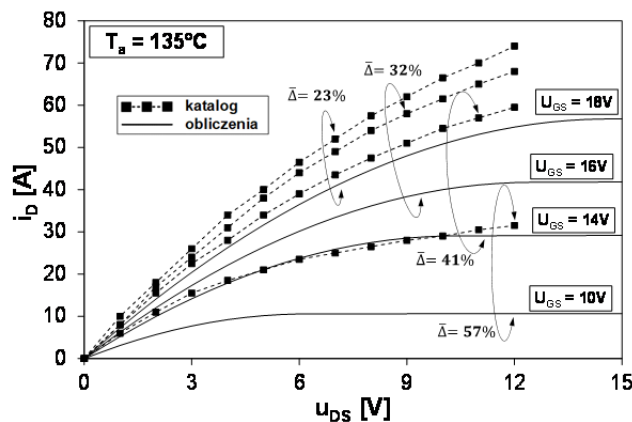
W celu uzyskania informacji liczbowej nt. rozbieżności pomiędzy charakterystykami obliczonymi a katalogowymi zastosowano kryterium jakości w postaci średniego błędu kwadratowego, co wyrażono wzorem [11]:

$$(4) \quad \bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\sqrt{(x_{s,i} - x_{p,i})^2}}{x_{p,i}} \cdot 100\% \right]$$

gdzie: $x_{s,i}$, $x_{p,i}$ – obliczona oraz katalogowa wartość prądu drenu w i -tym punkcie pracy tranzystora, n – liczba punktów pomiarowych. Obliczone wartości błęd $\bar{\Delta}$ dla poszczególnych charakterystyk tranzystora zostały naniesione na rys. 2 i 3.



Rys. 2. Charakterystyki wyjściowe w temperaturze 25°C



Rys. 3. Charakterystyki wyjściowe w temperaturze 135°C

Jak widać (rys. 2), w temperaturze 25°C uzyskano dobrą zgodność charakterystyk obliczonych i katalogowych, przy czym maksymalne wartości średniego błędu kwadratowego nie przekraczają w przybliżeniu 16% (dla

charakterystyki przy $U_{GS}=10\text{ V}$). Z kolei, w podwyższonej temperaturze otoczenia (rys. 3) widać istotne różnice pomiędzy obliczonymi oraz katalogowymi charakterystykami badanego tranzystora. Wartości średniego błęd wynoszą od około 23% przy $U_{GS}=18\text{ V}$ do nawet 57% przy $U_{GS}=10\text{ V}$.

Wpływ temperatury na charakterystyki tranzystora jest uwzględniony w modelu S-H wyłącznie poprzez zaimplementowaną przez twórców programu PSPICE temperaturową zależność parametru transkonduktancji (wzór 3), w której wartość wykładnika $-3/2$ jest narzucona z góry. A zatem, użytkownik programu nie ma możliwości zmiany kształtu charakterystyk tranzystora obliczonych w podwyższonej temperaturze otoczenia, poprzez na przykład modyfikację wartości wspomnianego wykładnika temperaturowego.

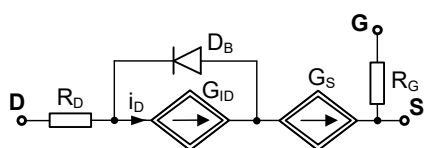
Autorski model tranzystora SiC-MOS

Z uwagi na zauważone wady modelu S-H zaproponowano autorskie modyfikacje tego modelu zwiększające jego dokładność w przypadku modelowania elementów wykonanych z węgla krzemu. W tym celu wykonano reimplementację oryginalnego modelu S-H do programu PSPICE z wykorzystaniem odpowiednio opisanych źródeł sterowanych (opcja ABM – ang. Analog Behavioral Modeling), a następnie przeprowadzono szereg eksperymentów numerycznych polegających na zastosowaniu w opisie analitycznym modelu różnych kombinacji funkcji matematycznych. Szczegółowy opis całej procedury badawczej został opisany w literaturze [6].

Ostatecznie wybrano modyfikacje, które w najistotniejszy sposób wpłynęły na zwiększenie dokładności modelu S-H oraz obejmowały:

- zastosowanie w temperaturowej zależności parametru transkonduktancji $B(T)$ wyrażonej wzorem (3) współczynnika o arbitralnie ustalonej wartości, zamiast współczynnika o stałej wartości równej $-3/2$,
- uwzględnienie wpływu temperatury na wartość napięcia progowego tranzystora,
- uwzględnienie wpływu temperatury na wartości rezystancji szeregowej obszaru źródła tranzystora.

Zaproponowane modyfikacje zostały uwzględnione w opracowanym przez autorów stałoprądowym modelu tranzystora SiC-MOS, którego topologię zaprezentowano na rys. 4.



Rys. 4. Topologia autorskiego modelu tranzystora SiC-MOS

Głównym elementem modelu jest sterowane źródło G_D , którego zadaniem jest modelowanie prądu kanału w poszczególnych zakresach pracy tranzystora. Wydajność tego źródła jest opisana analogicznie, jak w przypadku oryginalnego modelu S-H (wzory 1 i 2) z tą różnicą, że w miejsce parametru V_{T0} zastosowano temperaturową zależność napięcia progowego $V_{TH}(T)$ o postaci:

$$(5) \quad V_{TH}(T) = V_{TH0} - \alpha_{TH} \cdot (T - T_0)$$

gdzie: V_{TH0} – napięcie progowe w temperaturze odniesienia, α_{TH} – temperaturowy współczynnik zmian napięcia progowego.

Temperaturową zależność parametru transkonduktancji w modelu autorskim wyrażono wzorem:

$$(6) \quad B(T) = B_{T0} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\beta_T}$$

gdzie: B_{T0} – parametr transkonduktancji w temperaturze odniesienia T_0 , natomiast β_T jest parametrem modelu.

Występujący w modelu rezystor R_D (rys. 4) modeluje rezystancję szeregową obszaru drenu tranzystora, natomiast źródło prądowe G_S modeluje prąd płynący przez rezystancję szeregową źródła. W opisie tego źródła zastosowano temperaturową zależność $R_S(T)$ o postaci:

$$(7) \quad R_S(T) = R_{S0} + \alpha_{RS} \cdot (T - T_0)$$

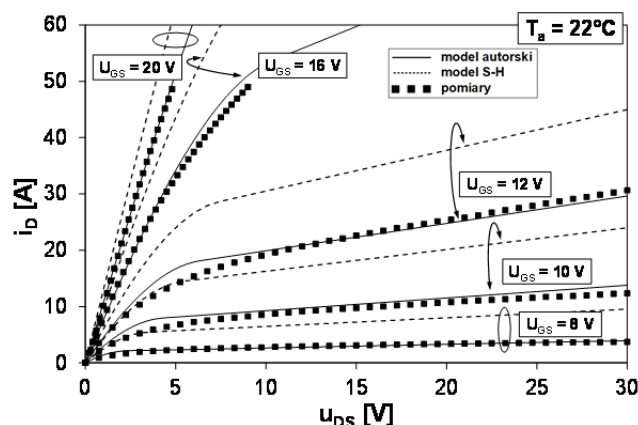
gdzie: R_{S0} – rezystancja szeregową źródła w temperaturze odniesienia, α_{RS} – temperaturowy współczynnik zmian tej rezystancji.

Właściwości diody podłożowej występującej w strukturze tranzystora MOS zostały uwzględnione w omawianym modelu przy pomocy elementu D_B (rys. 4) z użyciem wbudowanego w programie PSPICE modelu diody. Z kolei, rezystor R_G o wartości $1\text{ G}\Omega$ pełni funkcję pomocniczą i umożliwia poprawne zadawanie napięcia sterującego bramka-źródło.

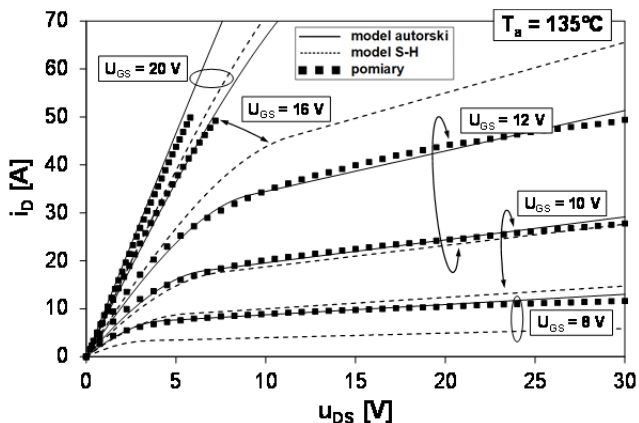
Przeprowadzono weryfikację eksperymentalną autorskiego modelu tranzystora SiC-MOS na przykładzie tranzystora CMF20120D. W tym celu wykonano pomiary charakterystyk statycznych i parametrów tego tranzystora w szerokim zakresie zmian temperatury otoczenia. W oparciu o wyniki pomiarów wyznaczono [10] wartości parametrów badanego modelu tranzystora, tj.: $W=0,134\text{ m}$, $L=2 \cdot 10^{-6}\text{ m}$, $V_{TH0}=5,64\text{ V}$, $\alpha_{TH}=1,5 \cdot 10^{-2}\text{ K}^{-1}$, $B_{T0}=1,14 \cdot 10^{-5}\text{ A/V}^2$, $\beta_T=0,31$, $\lambda=3,2 \cdot 10^{-2}\text{ m}^{-1}$, $R_D=1 \cdot 10^{-3}\text{ }\Omega$, $R_{S0}=2,7 \cdot 10^{-3}\text{ }\Omega$, $\alpha_{RS}=9,8 \cdot 10^{-2}\text{ K}^{-1}$, a także następujące wartości parametrów wbudowanego modelu diody D_B : $IS=1,5 \cdot 10^{-11}\text{ A}$, $N=3,88$, $XTI=1,02$, $ISR=9,6 \cdot 10^{-6}\text{ A}$, $NR=5,5$, $IKF=0,4\text{ A}$, $TIKF=-0,03\text{ K}^{-1}$, $EG=2,5\text{ eV}$, $VJ=3,07\text{ V}$, $M=2,07$.

Na rysunkach 5-7 zaprezentowano wyniki weryfikacji eksperymentalnej autorskiego modelu tranzystora SiC-MOS, przy czym punktami oznaczono wyniki pomiarów, linią ciągłą – wyniki symulacji, natomiast linią przerywaną na wybranych rysunkach oznaczono wyniki symulacji modelem oryginalnym S-H.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono charakterystyki wyjściowe tranzystora dla różnych wartości napięcia bramka-źródło w dwóch temperaturach otoczenia.



Rys. 5. Charakterystyki wyjściowe w temperaturze 22°C



Rys. 6. Charakterystyki wyjściowe w temperaturze 135°C

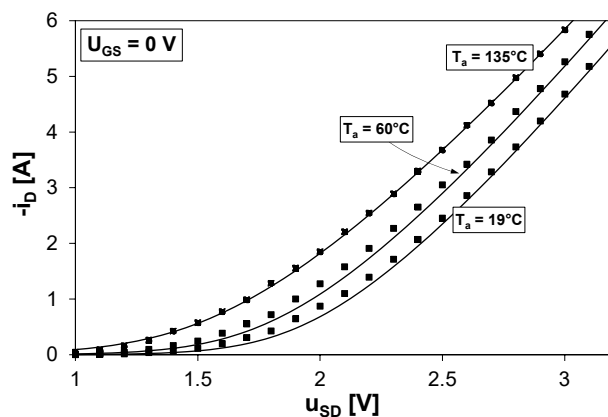
Jak widać, wyniki obliczeń modelem autorskim praktycznie pokrywają się z wynikami pomiarów w obu rozważanych temperaturach otoczenia. Z kolei w przypadku modelu oryginalnego (linia przerywana), widać bardzo duże rozbieżności pomiędzy wynikami symulacji i pomiarów, co potwierdza przydatność zaproponowanego modelu autorskiego. Dla porównania w Tabeli 1 umieszczono wyznaczone zgodnie ze wzorem (4) wartości średniego błędu kwadratowego odnoszące się do obliczonych i zmierzonych w temperaturach 22°C i 135°C charakterystyk tranzystora z rys. 5 i 6, jak również dodatkowych charakterystyk uzyskanych w temperaturze $T_a = 60^\circ\text{C}$, których nie zamieszczono na wymienionych rysunkach.

Tabela 1. Wartości średniego błędu kwadratowego

		$\bar{\Delta}$ [%]					
		Model S-H			Model autorski		
U_{GS}	T_a	22°C	60°C	135°C	22°C	60°C	135°C
8 V		142	23	53	6	5	5
10 V		91	13	48	12	4	3
12 V		53	4	45	5	6	3
14 V		36	4	35	6	5	6
16 V		30	3	27	3	5	3
18 V		25	2	19	2	4	2
20 V		26	5	10	3	3	7

Jak widać, znacznie niższe wartości błędu $\bar{\Delta}$ uzyskano przy obliczeniach charakterystyk zrealizowanych modelem autorskim. W szczególności, znaczącą poprawę dokładności modelowania uzyskano w przypadku charakterystyk dla najniższych wartości napięcia bramka-źródło (tj. $U_{GS} = 8\text{ V}$, 10 V oraz 12 V). Okazuje się, że model S-H dość dobrze odwzorowuje charakterystyki dla wyższych wartości napięcia bramka-źródło w temperaturze 60°C , co zdaniem autorów może mieć charakter przypadkowy, gdyż zastosowany algorytm estymacji wartości parametrów wyznaczył wartości parametrów tego modelu na podstawie zmierzonych charakterystyk wyjściowych w trzech temperaturach otoczenia i dążył do uzyskania jak największej dokładności modelowania jednocześnie we wszystkich rozważanych temperaturach.

Z kolei, na rys. 7 pokazano obliczone modelem autorskim oraz zmierzone charakterystyki tranzystora w zakresie inwersyjnym przy $U_{GS} = 0$ w różnych temperaturach otoczenia. Jak widać, uzyskano bardzo dobrą zgodność charakterystyk obliczonych oraz zmierzonych.



Rys. 7. Charakterystyki tranzystora w zakresie inwersyjnym

Wraz ze wzrostem temperatury otoczenia rozważane charakterystyki przesuwają się w kierunku niższych wartości napięcia źródło-dren o około $3\text{ mV}/^\circ\text{C}$.

Uwagi końcowe

Okazuje się, że stosując stosunkowo nieskomplikowane modyfikacje modelu Shichmana-Hodgesa można znacznie zwiększyć dokładność tego modelu w przypadku wyznaczania charakterystyk tranzystora SiC-MOS. W sumie w pracy pokazano trzy przykłady modyfikacji modelu wbudowanego, które polepszyły jego dokładność. Na tej podstawie opracowano postać autorskiego modelu tranzystora SiC-MOS, który jak pokazują wyniki weryfikacji eksperymentalnej – bardzo dobrze odwzorowuje podstawowe charakterystyki tranzystora.

Autorzy: 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;
mgr inż. Emilia Lubicz-Krośnicka, absolwentka Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, e-mail: e.lubicz@interia.pl

LITERATURA

- [1] Górecki K., Detka K., Electrothermal model of choking-coils for the analysis of dc-dc converters, *Materials Science and Engineering:B*, Vol. 177, No. 15, 2012, 1248-1253
- [2] Zarębski J.: Tranzystory MOS mocy. Fundacja Rozwoju Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia, 2007
- [3] PSPICE A/D Reference Guide Version 15.7, *MicroSim Corporation*, April (2006)
- [4] Bisewski D., Lubicz-Krośnicka E., Ocena dokładności firmowych modeli tranzystorów SiC-MOS, *Przegląd Elektrotechniczny*, R97, Nr 12, 2021, pp. 187-190
- [5] Bottaro E., Rizzo S. A., Salerno N., Analysis of topologies used for SiC MOSFET circuit modelling, *2022 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Sorrento, Italy, 2022, pp. 336-341
- [6] Lubicz-Krośnicka E., Modelowanie nowoczesnych tranzystorów MOS mocy w programie PSPICE, Praca magisterska, Uniwersytet Morski w Gdyni, Gdynia, 2020
- [7] <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> - strona internetowa
- [8] <https://www.wolfspeed.com> - strona internetowa firmy Wolfspeed
- [9] Karta katalogowa tranzystora CMF20120D, Wolfspeed
- [10] Bisewski D., Zastosowanie algorytmu genetycznego w procesie estymacji parametrów modeli przyrządów półprzewodnikowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R98, Nr 9, 2022, 103-106
- [11] Kurkiewicz J., Stonawski M., Podstawy statystyki, Oficyna Wydawnicza AFM, Kraków, 2005