

## Wpływ postaci modelu termicznego na dokładność obliczania charakterystyk statycznych modułu IGBT

**Streszczenie.** W pracy przeanalizowano wpływ postaci modelu termicznego modułu IGBT na dokładność obliczeń jego charakterystyk statycznych. Moduł taki zawiera we wspólnej obudowie kilka struktur półprzewodnikowych. W rozważanym module zachodzi zjawisko samonagrzewanie w każdej strukturze półprzewodnikowej oraz wzajemne sprzężenia cieplne między każdą parą tych struktur. Rozważania przeprowadzono dla modułu zawierającego 2 tranzystory IGBT i dwie diody połączone w jedną gałąź falownika oraz termistor. Badania przeprowadzono przy wykorzystaniu programu SPICE uwzględniając 4 rodzaje modeli termicznych modułu. Pierwszy z nich nie uwzględnia ani samonagrzewania, ani wzajemnych sprzężeń cieplnych. Drugi uwzględnia jedynie samonagrzewanie w poszczególnych strukturach półprzewodnikowych. Trzeci model uwzględnia oba zjawiska cieplne charakteryzowane przez rezystancje termiczne o ustalonej wartości. Czwarty model uwzględnia oba zjawiska cieplne oraz zależność rezystancji termicznej od mocy traconej w poszczególnych strukturach półprzewodnikowych. Wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów uzyskanych dla trzech różnych warunków chłodzenia. Przedyskutowano zakres zastosowań poszczególnych modeli.

**Abstract.** This paper analyzes the influence of the form of the thermal model of the IGBT module on the accuracy of computations of their DC characteristics. Such a module contains several semiconductor dies in a common case. In such a module, the phenomenon of self-heating occurs in each semiconductor die and mutual thermal couplings between each pair of these dies. Considerations are made for the module containing 2 IGBTs and two diodes connected into one branch of the inverter and a thermistor. The investigations are carried out with the use of SPICE software, taking into account 4 types of thermal models of this module. The first one does not take into account either self-heating or mutual thermal couplings. The second takes into account only self-heating in individual semiconductor dies. The third model takes into account both thermal phenomena characterized by thermal resistances of a fixed value. The fourth model takes into account both thermal phenomena and the dependence of the thermal resistance on the power lost in individual semiconductor dies. The calculation results are compared with the measurement results obtained for three different cooling conditions. The range of application of individual models is discussed. (Influence of the form of the thermal model on accuracy of computing DC characteristics of IGBT module)

**Słowa kluczowe:** moduł IGBT, model termiczny, samonagrzewanie, wzajemne sprzężenia termiczne, analiza elektrotermiczna, SPICE.

**Keywords:** IGBT module, thermal model, self-heating, mutual thermal couplings, electrothermal analysis, SPICE

### Wprowadzenie

W układach impulsowego przekształcania energii elektrycznej powszechnie są wykorzystywane moduły mocy [1, 2]. Typowo zawierają one we wspólnej obudowie różne struktury półprzewodnikowe realizujące funkcje tranzystorów i diod. Jednym z powszechnie wykorzystywanych modułów mocy są moduły IGBT zawierające tranzystory IGBT i diody [3, 4].

W czasie pracy modułów IGBT zachodzą w nich zjawiska cieplne, tzn. samonagrzewanie w każdej strukturze półprzewodnikowej oraz wzajemne sprzężenia cieplne między każdą parą tych struktur [5]. Zjawiska te powodują wzrost wartości temperatury wnętrza poszczególnych elementów wchodzących w skład modułu IGBT. Ten wzrost temperatury powoduje zarówno skrócenie czasu życia modułu [6], jak i zmianę przebiegu charakterystyk rozważanego modułu [7, 8].

Przy projektowaniu układów elektronicznych powszechnie wykorzystuje się programy komputerowe dedykowane do analizy takich układów [9]. Dokładność obliczeń wykonywanych za pomocą tych programów zależy od dokładności modeli elementów zawartych w analizowanych układach. W przypadku wyznaczania charakterystyk przy uwzględnieniu zjawisk cieplnych niezbędne są modele elektrotermiczne tych elementów [10]. Modele elektrotermiczne składają się z dwóch komponentów: modelu elektrycznego oraz modelu termicznego [11, 12]. Model elektryczny opisuje zależności między prądami i napięciami modelowanego elementu przy uwzględnieniu wpływu temperatury jego wnętrza  $T_j$ . Z kolei, model termiczny opisuje zależność temperatury  $T_j$  od mocy traconej w modelowanym elemencie oraz w innych elementach sprzężonych z nim termicznie przez wspólne podłoże [7, 11].

W celu wyznaczenia nieizotermicznych charakterystyk modułu IGBT niezbędne jest przeprowadzenie analiz elektrotermicznych. W literaturze można znaleźć liczne przykłady modeli elektrotermicznych przyrządów

półprzewodnikowych uwzględniających zjawisko samonagrzewania [11-14]. Z kolei, sposób uwzględniania wzajemnych sprzężeń termicznych między elementami umieszczonymi na wspólnym podłożu opisano m.in. w pracach [7, 15, 16]. W modelu modułu IGBT opisanym w pracy [7] uwzględniono samonagrzewanie i wzajemne sprzężenia cieplne, ale pominięto nieliniowość zjawisk cieplnych. Nieliniowy model termiczny tranzystora IGBT umieszczonego we wspólnej obudowie z diodą zaproponowano w pracy [11]. Uwzględnienie nowych zjawisk pozwala oczywiście na uzyskanie lepszej dokładności modelowania charakterystyk rozważanych elementów. Jednocześnie wzrost złożoności modelu powoduje wydłużenie czasu trwania obliczeń.

Celem pracy jest porównanie dokładności obliczeń uzyskiwanych za pomocą różnych modeli oraz czasu trwania tych obliczeń. W rozdziale drugim opisano postać zastosowanych modeli termicznych, a w rozdziale trzecim zaprezentowano wybrane wyniki obliczeń i pomiarów wykonanych dla modułu IGBT typu PSI25/06 firmy Power Sem [17] pracującego przy różnych warunkach chłodzenia. Przedyskutowano uzyskane wyniki badań.

### Rozważane modele

Model elektrotermiczny rozważanego modułu zawiera model elektryczny opisany w pracy [7] oraz model termiczny opisujący zależność temperatury wnętrza każdego z komponentów modułu od mocy wydzielanej w poszczególnych jego komponentach. W badaniach, których wyniki przedstawiono w niniejszej pracy rozważane są 4 formy tego modelu termicznego nazywane kolejno modelem A, modelem B, modelem C oraz modelem D.

W modelu A przyjmuje się, że temperatura wnętrza  $T_j$  każdego komponentu modułu jest identyczna i równa temperaturze otoczenia  $T_a$ .

Model B uwzględnia wpływ samonagrzewania w każdym elemencie. W modelu tym temperatura wnętrza każdego komponentu modułu opisana jest wzorem

$$(1) \quad T_j = T_a + R_{th} \cdot p$$

gdzie  $R_{th}$  oznacza rezystancję termiczną elementu, zaś  $p$  – moc traconą w tym elemencie.

Model C uwzględnia samonagrzewanie w każdym elemencie i wzajemne sprzężenia termiczne między każdą parą elementów. W modelu tym temperatura wnętrza  $i$ -tego elementu  $T_{ji}$  dana jest wzorem

$$(2) \quad T_{ji} = T_a + \sum_{j=1}^N R_{thij} \cdot p_j$$

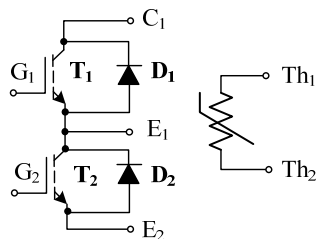
gdzie  $p_j$  oznacza moc traconą w elemencie  $j$ -tym, a  $R_{thij}$  oznacza wzajemną rezystancję termiczną między elementem  $i$ -tym a  $j$ -tym. W przypadku, gdy  $i = j$  występuje własna rezystancja termiczna  $R_{thii}$  charakteryzująca wpływ samonagrzewania w elemencie  $i$ -tym na jego temperaturę wnętrza. W modelu C własne i wzajemne rezystancje termiczne mają ustalone wartości, co oznacza, że model ten, podobnie jak model B, należy do grupy liniowych modeli termicznych.

W modelu D temperatura wnętrza elementu  $i$ -tego jest opisana wzorem (2), ale własne i wzajemne rezystancje termiczne są funkcjami mocy wydzielanej w elementach modułu. Są one opisane wzorem o postaci

$$(3) \quad R_{thij} = R_{thij0} \cdot \left[ 1 + a_{ij} \cdot \exp\left(-p_j/b_{ij}\right) \right]$$

gdzie  $R_{thij0}$  oznacza minimalną wartość rezystancji termicznej  $R_{thij}$ , natomiast parametry  $a_{ij}$  oraz  $b_{ij}$  opisują wpływ mocy wydzielanej w elemencie  $j$ -tym na wartość  $R_{thij}$ .

Badania przeprowadzono na przykładzie modułu PSI25/06 firmy Power Sem. Moduł ten zawiera 2 tranzystory IGBT, 2 diody i termistor umieszczone we wspólnej obudowie. Wartości parametrów granicznych i charakterystycznych tych elementów podano w karcie katalogowej modułu [17]. Rezystancja termiczna między strukturą tranzystora a obudową wynosi 1,52 K/W, a między strukturą diody a obudową – 3 K/W [17]. Połączenia między poszczególnymi elementami modułu pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Połączenia poszczególnych elementów modułu IGBT do wyprowadzeń tego modułu

Jak widać na rys. 1, diody i tranzystory połączone są w gałąź falownika. Termistor nie jest połączony elektrycznie z pozostałymi elementami modułu IGBT.

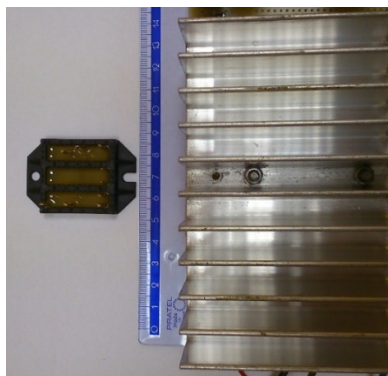
Badania przeprowadzono dla modułu pracującego bez radiatora oraz modułu umieszczonego na radiatorze. Obudowę badanego modułu oraz zastosowany radiator pokazano na rys. 2. Radiator ten ma wymiary 60 x 140 mm i zawiera 11 finów o wysokości 30 mm.

Wartości parametrów charakteryzujących model D dla modułu pracującego bez radiatora oraz umieszczonego na opisanym radiatorze zebrano w Tabeli 1. Przyjęto następującą numerację elementów składowych badanego modułu: 1 – tranzystor  $T_1$ , 2 – tranzystor  $T_2$ , 3 – dioda  $D_1$ , 4 – dioda  $D_2$ , 5 – termistor.

Wartości parametrów modelu C zebrano w Tabeli 2, a wartości rezystancji termicznych w modelu B przyjmując podane w Tabeli 2 wartości równe  $R_{th11}$  dla obu tranzystorów oraz  $R_{th33}$  dla obu diod.

Tabela 1. Wartości parametrów modelu D dla modułu pracującego bez radiatora i umieszczonego na radiatorze

parametr	Moduł bez radiatora			Moduł na radiatorze		
	$R_{thij0}$ [K/W]	$a_{ij}$	$b_{ij}$ [W]	$R_{thij0}$ [K/W]	$a_{ij}$	$b_{ij}$ [W]
$R_{th11}$ $R_{th22}$	= 11.5	0.522	3.8	2.5	0.88	20
$R_{th33}$ $R_{th44}$	= 12	0.5	3.8	4	0.55	20
$R_{th12}$ $R_{th13}$ $R_{th24}$	= 11.5 8	0.53 0.48	3.8	2.4 2.6	0.56 0.58	15 15
$R_{th34}$ $R_{th14}$ $R_{th23}$	= 8.5 8	0.45 0.48	3.8	3 2.6	0.4 0.55	15 15
$R_{th15}=R_{th25}$ $R_{th35}=R_{th45}$	= 7.5 8.5	0.4 0.353	3.8	1.9 2	0.526 0.5	15 15



Rys. 2. Widok obudowy badanego modułu i zastosowanego radiatora

Tabela 2. Wartości parametrów modelu C dla modułu pracującego bez radiatora i umieszczonego na radiatorze

parametr	Moduł bez radiatora	Moduł na radiatorze
$R_{th11}$ $R_{th22}$	= 17.5 K/W	4.7 K/W
$R_{th33}$ $R_{th44}$	= 18 K/W	6.2 K/W
$R_{th12}$ $R_{th13}$ $R_{th24}$	= 17.5 K/W 11.8 K/W	3.7 K/W 4.1 K/W
$R_{th34}$ $R_{th14}$ $R_{th23}$	= 12.3 K/W 11.8 K/W	4.2 K/W 4 K/W
$R_{th15}=R_{th25}$ $R_{th35}=R_{th45}$	= 10.5 K/W 11.5 K/W	2.9 K/W 3 K/W

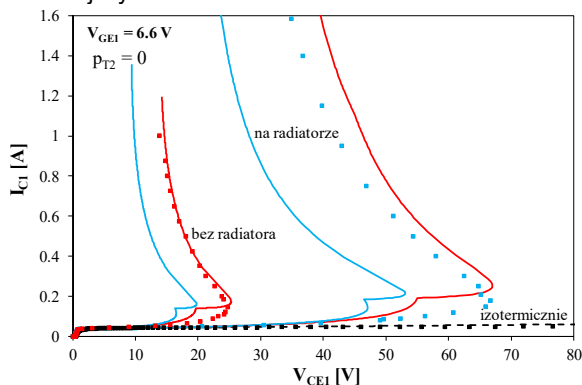
## Wyniki badań

W celu porównania dokładności obliczeń uzyskiwanych przy wykorzystaniu rozważanych modeli termicznych obliczono nieizotermiczne charakterystyki rozważanego modułu IGBT pracującego przy różnych warunkach sterowania i chłodzenia. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 3 – 7 i oznaczono je liniami w kolorze czarnym (model A), niebieskim (model B), zielonym (model C) oraz czerwonym (model D). Na rysunkach tych zaznaczono także wyniki pomiarów za pomocą punktów. Na poszczególnych rysunkach pokazano na wspólnym wykresie charakterystyki uzyskane przy trzech rozważanych warunkach chłodzenia, tzn. dla idealnego chłodzenia (charakterystyki izotermiczne) – czarne punkty, dla modułu pracującego bez radiatora – czerwone punkty oraz modułu umieszczonego na radiatorze – niebieskie punkty. Oczywiście, przy charakterystykach izotermicznych wyniki obliczeń uzyskane za pomocą każdego z rozważanych modeli są takie same.

Na rys. 3 pokazano obliczone i zmierzone charakterystyki wyjściowe tranzystora zawartego w badanym module przy napięciu sterującym  $V_{GE} = 6,6$  V (zbliżonym do napięcia progowego). Podczas wyznaczania

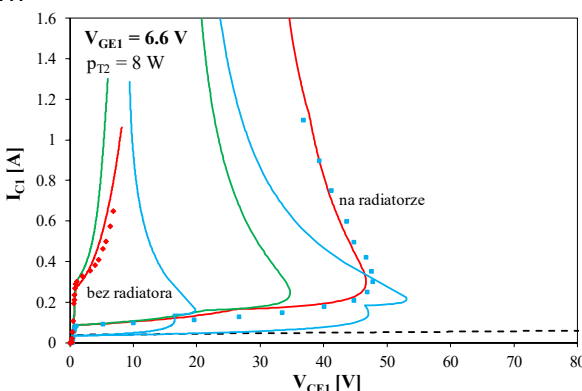
tych charakterystyk moc była wydzielana tylko w badanym tranzystorze. Wyniki uzyskane za pomocą modeli B i C są identyczne.

Jak można zauważyć, warunki chłodzenia modułu istotnie wpływają na przebieg uzyskanych charakterystyk. Pogarszanie się warunków chłodzenia prowadzi do przesuwania się rozważanych charakterystyk w lewo. W szczególności warto zauważyć, że charakterystyki izotermiczne nie wykazują, widocznego na pozostałych charakterystykach, przebiega elektrotermicznego przejawiającego się zmianą znaku nachylenia rozważanych charakterystyk. Zastosowanie modelu D pozwala na uzyskanie zadawalającej zgodności zmierzonych i obliczonych charakterystyk. Zastosowanie modeli B i C pomijających zależność  $R_{th}(p)$  pozwala na uzyskanie dobrej dokładności obliczeń tylko dla niewielkich wartości prądu kolektora, a przy wzroście tego prądu skutkuje przesunięciem obliczonych charakterystyk w lewo. Przesunięcie to dochodzi nawet do 15 V i jest większe przy skuteczniejszym chłodzeniu modułu.



Rys. 3. Obliczone i zmierzone charakterystyki tranzystora przy  $V_{GE} = 6,6$  V i pominięciu wzajemnych sprzężeń termicznych

Na rys. 4 pokazano obliczone i zmierzone charakterystyki wyjściowe tranzystora zawartego w badanym module przy napięciu sterującym  $V_{GE} = 6,6$  V. Podczas wyznaczania tych charakterystyk w drugim tranzystorze była wydzielana moc o ustalonej wartości  $P_{T2} = 8$  W.

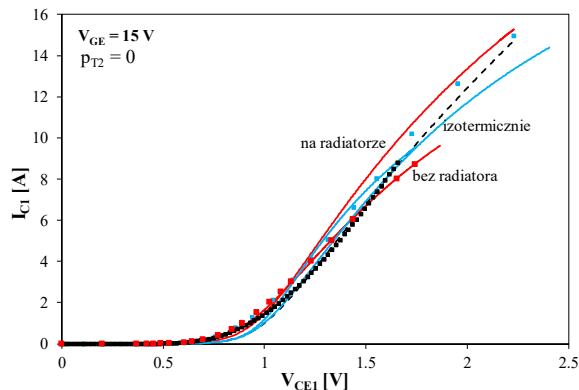


Rys. 4. Obliczone i zmierzone charakterystyki tranzystora przy  $V_{GE} = 6,6$  V oraz wydzielaniu w drugim tranzystorze mocy  $P_{T2} = 8$  W

W rozważanym przypadku, wyniki uzyskane za pomocą modeli A oraz B są identyczne, jak w przypadku rozważanym na rys. 3. Charakterystyki uzyskane za pomocą tych modeli wyraźnie odbiegają od charakterystyk zmierzonych. Model D zapewnia dobrą zgodność wyników obliczeń i pomiarów dla obu rozważanych warunków chłodzenia. Model C poprawnie opisuje charakterystyki tranzystora przy niewielkiej wartości mocy traconej w tranzystorze, a przy większych wartościach tej mocy charakterystyki obliczone za pomocą tego modelu są

przesunięte w lewo w stosunku do wyników pomiarów nawet o 14 V. Dla modułu pracującego bez radiatora widać bardzo silny wpływ wzajemnych sprzężeń termicznych na rozważane charakterystyki. Na skutek tych sprzężeń wartość prądu kolektora wzrasta nawet kilkukrotnie.

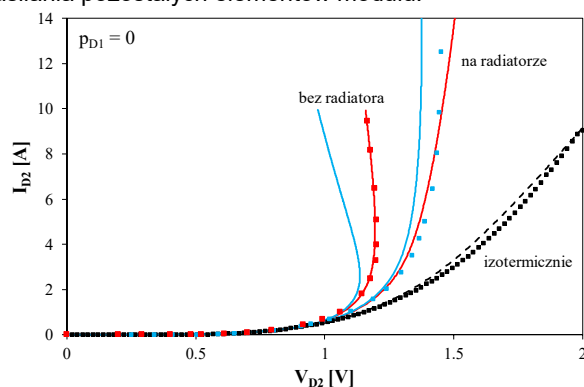
Rys. 5 ilustruje nieizotermiczne charakterystyki wyjściowe tranzystora wyznaczone przy napięciu sterującym  $V_{GE} = 15$  V przy braku zasilania pozostałych elementów modułu.



Rys. 5. Obliczone i zmierzone charakterystyki tranzystora przy  $V_{GE} = 15$  V i wydzielaniu stałej mocy w drugim tranzystorze  $P_{T2} = 8$  W

W rozważanym przypadku, zarówno warunki chłodzenia, jak i postać modelu termicznego w nieznacznym stopniu wpływają na przebieg uzyskanych charakterystyk tranzystora przy wartościach prądu poniżej 8 A. Jedynie w zakresie dużych wartości prądu kolektora widoczne jest przesunięcie w prawo charakterystyk tranzystora pracującego w module bez radiatora. Używając modelu C w zakresie dużych wartości prądu uzyskuje się zawyżone wartości napięcia  $V_{CE1}$  nawet o 10%. Maksymalna wartość prądu kolektora jest ograniczona dopuszczalnym przyrostem temperatury wnętrza tranzystora. Dla modułu bez radiatora maksymalny prąd kolektora wynosi 9 A, a dla modułu pracującego na radiatorze – 15 A.

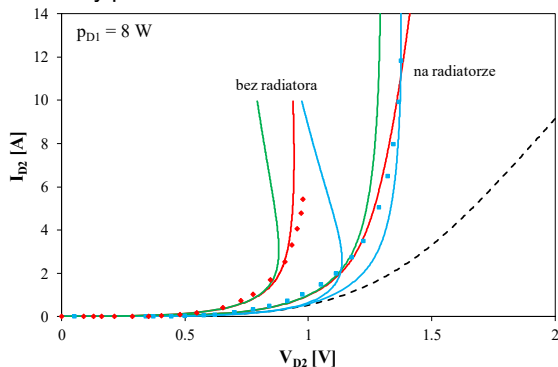
Na rys. 6 pokazano nieizotermiczne charakterystyki diody zawartej w badanym module wyznaczone przy braku zasilania pozostałych elementów modułu.



Rys. 6. Obliczone i zmierzone charakterystyki diody przy braku zasilania pozostałych elementów modułu

Łatwo można dostrzec, że model D zapewnia bardzo dobre dopasowanie charakterystyk obliczonych i zmierzonych dla wszystkich rozważanych warunków chłodzenia, a pozostałe modele – tylko dla charakterystyk izotermicznych. Zastosowanie liniowych modeli termicznych (modele B i C) skutkuje przesunięciem charakterystyk w lewo. Przesunięcie to rośnie wraz ze wzrostem wartości prądu diody. Warto zauważyć, że charakterystyki wyznaczone dla modułu bez radiatora wykazuje ujemne nachylenie dla dużych wartości prądu diody.

Rys. 7 prezentuje niezotermiczne charakterystyki diody zawartej w badanym module przy wydzielaniu w drugiej diodzie mocy  $p_{D1} = 8$  W.



Rys. 7. Obliczone i zmierzone charakterystyki diody przy wydzielaniu mocy  $p_{D1} = 8$  W w drugiej diodzie

Widać wyraźnie, że wzajemne sprzężenia cieplne powodują wzrost wartości prądu diody wynikający ze wzrostu temperatury jej wnętrza. Przebiegi rozważanych charakterystyk wyliczonych za pomocą modeli A i B wyraźnie odbiegają od charakterystyk zmierzonych, a obliczone przy ich wykorzystaniu wartości prądu diody są zaniżone. Model C pozwala na poprawne wyznaczenie rozważanych charakterystyk jedynie przy prądzie diody poniżej 2 A. W całym zakresie zmian prądu dobrą zgodność wyników obliczeń i pomiarów zapewnia tylko model D.

#### Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań ilustrujących wpływ zastosowanego modelu termicznego modułu IGBT na dokładność obliczania charakterystyk tranzystora i diody zawartego w tym module. Badania przeprowadzono dla 4 modeli termicznych, a poprawność uzyskanych wyników badań zweryfikowano dla modułu pracującego przy trzech różnych warunkach chłodzenia.

Przeprowadzone badania dowodzą, że zastosowany system chłodzenia modułu w istotny sposób wpływa na przebiegi charakterystyk elementów półprzewodnikowych zawartych w tym module. Istotne znaczenie mają też wzajemne sprzężenia cieplne między tymi elementami. Zgodnie z oczekiwaniami, każdy z rozważanych modeli termicznych pozwala na poprawne obliczenie charakterystyk wyznaczonych w warunkach izotermicznych, czyli przy doskonałym chłodzeniu struktur półprzewodnikowych.

Linijowe modele termiczne pozwalają na poprawne wyznaczenie charakterystyk tranzystora i diody, ale tylko w ograniczonym zakresie zmian prądu głównego tych elementów. Dobre wyniki modelowania za pomocą modelu B uzyskano jedynie w przypadku wydzielania mocy tylko w jednym elemencie. Równoczesne wydzielanie mocy w innym elemencie rozważanego modułu skutkuje istotnym wzrostem temperatury wnętrza modelowanego elementu i wymaga zastosowania modelu termicznego C lub D. Nieliniowy model termiczny D uwzględniający zależność rezystancji termicznej od mocy pozwala na poprawne modelowanie charakterystyk badanego modułu we wszystkich rozważanych warunkach pracy. Warto zwrócić uwagę, że wartości poszczególnych rezystancji termicznych występujących w modelu modułu mogą zmieniać się przy zmianach wartości wydzielanej mocy o ponad 30%.

Zmiany wartości współrzędnych punktów na rozważanych charakterystykach spowodowane nadmiernym uproszczeniem postaci modelu termicznego mogą przekraczać nawet kilkaset procent dla modelu A i modelu B. Dla modelu C zmiany te nie przekraczają 20%.

Silny wpływ zjawisk cieplnych na charakterystyki tranzystora IGBT widoczny jest w zakresie słabego sterowania, tzn. przy napięciu  $V_{GE}$  zbliżonym do napięcia progowego. Z kolei, przy napięciu  $V_{GE}$  znacznie przekraczającym napięcie progowe charakterystyki wyjściowe tego tranzystora nieznacznie zmieniają się pod wpływem zmiany warunków chłodzenia lub wzajemnych sprzężeń cieplnych, ale zjawiska te ograniczają zakres bezpiecznej pracy modułu.

Warto dodać, że czas trwania analiz jest krótki. Obliczenie żadnej z prezentowanych charakterystyk za pomocą programu SPICE przy wykorzystaniu dowolnego z rozważanych modeli nie wymaga czasu dłuższego od 1 s.

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, dr inż. Paweł Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 83, Gdynia, k.gorecki@we.umg.edu.pl, p.gorecki@we.umg.edu.pl

#### LITERATURA

- [1] Perret R.: Power Electronics Semiconductor Devices. John Wiley & Sons, Ltd. 2009.
- [2] Muc A, Iwaszkiewicz J., Mysiak P., Piechowski L.: System zasilania falowników wielopoziomowych wykorzystujący wielopulsowe prostowniki z dławikami sprzężonymi magnetycznie. Przegląd Elektrotechniczny, R. 97, nr 2, 2021, s. 72-76.
- [3] Dbeiss M., Avenas Y., Zara H.: Comparison of the electro-thermal constraints on SiC MOSFET and Si IGBT power modules in photovoltaic DC/AC inverters. Microelectronics Reliability, Vol. 78, 2017, pp. 65-71.
- [4] An N., Du M., Hu Z., Wie K.: A High-Precision Adaptive Thermal Network Model for Monitoring of Temperature Variations in Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Modules. Energies, Vol. 11, No. 3, 2018, 595.
- [5] Bahman A., Ma K., Blaabjerg F.: A Lumped Thermal Model Including Thermal Coupling and Thermal Boundary Conditions for High-Power IGBT Modules. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 3, 2018, pp. 2518-2530.
- [6] Castellazzi A., Gerstenmaier Y.C., Kraus R., Wachutka G.K.M.: Reliability analysis and modeling of power MOSFETs in the 42-V-PowerNet, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, No. 3, 2006, pp.603-612
- [7] P. Górecki, K. Górecki: Modelling dc characteristics of the IGBT module with thermal phenomena taken into account. 13th Int. Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/CPE.2019.8862319.
- [8] R. Wu, H. Wang, K. B. Pedersen, K. Ma, P. Ghimire, F. Iannuzzo, F. Blaabjerg: A temperature-dependent thermal model of IGBT modules suitable for circuit-level simulations. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 52, No. 4, 2016, pp. 3306 – 3314.
- [9] Rashid M.H., Rashid H.M.: Spice for power electronics and electric power, 2006, CRC press.
- [10] Górecki P., Górecki K.: Methods of Fast Analysis of DC-DC Converters – A Review. Electronics, Vol. 10, No. 23, 2021, 2920.
- [11] Górecki P., Górecki K., Zarębski J.: Accurate circuit-level modelling of IGBTs with thermal phenomena taken into account. Energies, Vol. 14, No. 9. 2021, 2372.
- [12] Górecki K., Detka K.: Application of Average Electrothermal Models in the SPICE-Aided Analysis of Boost Converters, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 4, 2019, pp. 2746-2755.
- [13] Mawby PA, Igc PM, Towers MS: Physically based compact device models for circuit modelling applications, Microelectronics Journal, Vol. 32, No. 5-6, 2001, pp. 433-447.
- [14] Starzak Ł., Zubert M., Janicki M., Torzewicz T., Napieralska M., Jabłoński G., Napieralski A., Behavioral approach to SiC MPS diode electrothermal model generation. IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 60, No. 2, 2013, pp. 630-638.
- [15] K. Górecki, J. Zarębski, P. Górecki, P. Ptak: Compact thermal models of semiconductor devices – a review. Int. Journal of Electronics and Telecom., Vol. 65, No. 2, 2019, pp. 151-158.
- [16] Schweitzer, D.; Ender, F.; Hantos, G.; Szabo, P.G. Thermal transient characterization of semiconductor devices with multiple heat-sources—Fundamentals for a new thermal standard. Microelectronics J., Vol. 46, 2015, pp. 174–182.
- [17] PSI 25/06 Power module, Data sheet, PowerSem, 2002.