

Wpływ wyboru parametru termoczułego na zmierzone wartości rezystancji termicznej tranzystora IGBT

Streszczenie. W pracy przeanalizowano problem doboru parametru termoczułego na wynik pomiaru rezystancji termicznej tranzystora IGBT. Przedstawiono metody wykonywania pomiaru rezystancji termicznej tego tranzystora przy wykorzystaniu w charakterze parametru termoczułego napięcia między bramką a emiterym lub napięcia na spolaryzowanej w kierunku przewodzenia diodzie antyrównoległej. Przedyskutowano czynniki wpływające na dokładność pomiaru realizowanego przy wykorzystaniu tych metod. Przedstawiono i przedyskutowano wyniki pomiarów rozważanych parametrów uzyskanych przy wykorzystaniu omawianych metod dla różnych warunków chłodzenia badanego tranzystora. Oceniono uzyskane rozbieżności między tymi wynikami pomiarów.

Abstract. In this paper the problem of the selection of the thermo-sensitive parameter on the result of the measurement of thermal resistance of the IGBT is analysed. Methods of the measurements of thermal resistance of this transistor using the voltage between the gate and the emitter or voltage on forward biased antiparallel diode as the thermo-sensitive parameters are presented. Factors influencing measuring error of the considered measurement methods are discussed. Measurement results of thermal resistance obtained with the use of considered methods for different cooling conditions of the tested transistor are presented and discussed. Obtained differences between these results of measurements are evaluated. (**Influence of used thermo-sensitive parameter on measured values of thermal resistance of the IGBT.**)

Słowa kluczowe: tranzystor IGBT, pomiary, parametry termoczułe, rezystancja termiczna.

Keywords: IGBTs, measurements, thermo-sensitive parameters, thermal resistance.

Wprowadzenie

Tranzystory IGBT wchodzą w skład wielu urządzeń elektronicznych i energoelektronicznych [1, 2, 3]. Na ich właściwości silnie wpływa temperatura [4, 5]. Temperatura wnętrza T_j rozważanego tranzystora przekracza temperaturę otoczenia T_a na skutek zjawiska samonagrzewania [4, 6, 7]. Zjawisko to powoduje m.in. skrócenie czasu życia przyrządów półprzewodnikowych oraz wpływa na zmianę wartości ich parametrów eksploatacyjnych [8, 9].

W celu wyznaczenia temperatury wnętrza przyrządu półprzewodnikowego przy wydzielaniu w tym elemencie mocy o ustalonej wartości wykorzystuje się parametry cieplne. Parametrami tymi są przejściowa impedancja termiczna $Z_{th}(t)$ oraz rezystancja termiczna R_{th} . Parametry te charakteryzują skuteczność odprowadzania ciepła generowanego w badanym przyrządzie półprzewodnikowym do otoczenia, a ich wartości zależą od warunków chłodzenia tego przyrządu [10, 11]. Wiarygodne wyznaczenie tych parametrów wymaga wykonania odpowiednich pomiarów.

Rozważane parametry cieplne są mierzone przy zastosowaniu odpowiednich wzorów definicyjnych. Rezystancja termiczna opisana jest zależnością o postaci [12, 13]

$$(1) \quad R_{th} = \frac{T_j - T_a}{P}$$

gdzie T_j oznacza temperaturę wnętrza rozważanego przyrządu półprzewodnikowego, T_a – temperaturę otoczenia, a P – moc wydzielaną w tym przyrządzie.

Wartości temperatury T_a oraz mocy P są łatwo mierzalne, natomiast wartość temperatury T_j nie jest mierzalna bezpośrednio. Wartość tej temperatury jest wyznaczana pośrednio przy wykorzystaniu metod optycznych lub elektrycznych [13, 14]. Metody optyczne pozwalają na pomiar temperatury struktury półprzewodnikowej jedynie w przypadku laboratoryjnych przyrządów pozbawionych obudowy, natomiast dla przyrządów w obudowach fabrycznych metody optyczne pozwalają jedynie na pomiar temperatury obudowy T_c [15].

Z kolei, pośrednie metody elektryczne pozwalają na wyznaczenie temperatury wnętrza przyrządu w oparciu o pomiar wartości wybranego parametru elektrycznego jednoznacznie uzależnionego od temperatury – parametru termoczułego [10, 11, 16, 17, 18, 19]. W literaturze [16, 17, 18, 19] rozważane są możliwości zastosowania różnych parametrów termoczułych do pomiaru temperatury wnętrza różnych przyrządów półprzewodnikowych. W przypadku tranzystorów IGBT wykorzystuje się napięcie między bramką a emiterym przy pracy tranzystora w zakresie aktywnym, napięcie między kolektorem a emiterym na włączonym tranzystorze lub napięcie na spolaryzowanej w kierunku przewodzenia diodzie zwrotnej [18].

W pracy [19] przeanalizowano różnice między wartościami temperatury wnętrza tranzystora MOS mocy uzyskiwane przy wykorzystaniu pośrednich metod elektrycznych, w których parametrem termoczułym było napięcie na przewodzącym złączu p-n lub napięcie progowe tranzystora. Wskazano na problem nieliniowości charakterystyki termometrycznej $u_{GE}(T)$ przy wykorzystywaniu napięcia progowego w charakterze parametru termoczułego. W oparciu o symulacje komputerowe wykazano, że różnice temperatury na kwadratowej strukturze półprzewodnikowej o boku długości 7 mm mogą dochodzić do 50 K. Z kolei, z pomiaru metodą elektryczną uzyskano różnice wartości temperatury wnętrza tranzystora zmierzonej przy wykorzystaniu obu parametrów termoczułych w zakresie od 4 do 11 K.

W pracy [16] przeanalizowano przydatność wybranych parametrów termoczułych do wyznaczania temperatury wnętrza półprzewodnikowych przyrządów mocy. Wskazano, że najbardziej uniwersalnym spośród rozważanych parametrów termoczułych jest napięcie na złączu p-n spolaryzowanym w kierunku przewodzenia prądem o małej wartości.

W pracy [17] zaproponowano nowe parametry termoczułe dla tranzystora IGBT, które mogą być wykorzystane do monitorowania temperatury jego wnętrza w czasie pracy w układzie przetwornicy impulsowej. Wyniki pomiarów uzyskanych przy wykorzystaniu tych parametrów nieznacznie odbiegają od wartości maksymalnych temperatury elementu uzyskanych za pomocą pomiarów optycznych.

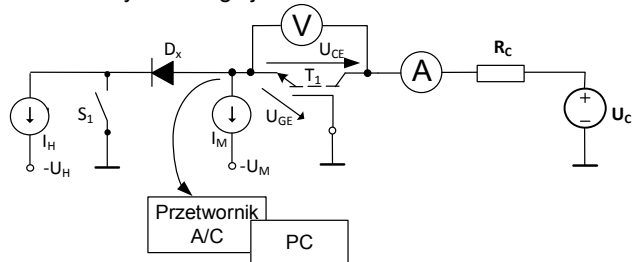
W pracach [18, 19] przeanalizowano właściwości układów pomiarowych wykorzystujących wymienione parametry termoczułe. Jednak nie brano pod uwagę faktu, że dioda i tranzystor są umieszczone we wspólnej obudowie, ale stanowią osobne struktury półprzewodnikowe [20].

W niniejszej pracy zbadano wpływ wyboru parametru termoczułego na wynik pomiaru rezystancji termicznej tranzystora IGBT. Przeanalizowano układy pomiarowe umożliwiające wykonanie pomiarów tego parametru przy wykorzystaniu dwóch parametrów termoczułych. Przedyskutowano wpływ wyboru tych parametrów na błąd pomiaru. Porównano także wyniki pomiarów wykonanych przy wykorzystaniu rozważanych parametrów termoczułych dla wybranego tranzystora IGBT pracującego przy różnych warunkach chłodzenia.

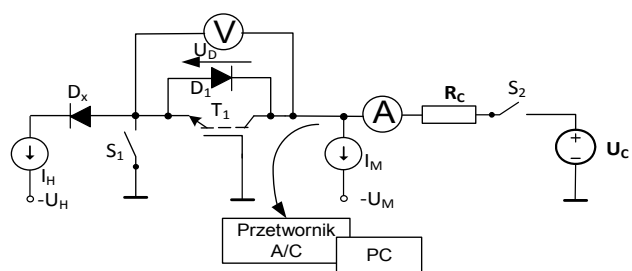
Metody pomiarowe

Rozważane w pracy parametry termiczne charakteryzują zdolność przyrządu półprzewodnikowego do odprowadzania wydzielanego w nim ciepła zarówno w warunkach dynamicznych ($Z_{th}(t)$), jak i w warunkach statycznych (R_{th}). W celu uproszczenia rozważań, w dalszej części pracy uwzględniono jedynie właściwości statyczne i skupiono się na pomiarach rezystancji termicznej.

W przypadku pomiaru realizowanego przy wykorzystaniu pośrednich metod elektrycznych niezbędne są specjalne układy pomiarowe. Na rys. 1 pokazano schemat układu do pomiaru rezystancji termicznej przy wykorzystaniu w charakterze parametru termoczułego napięcia bramka-emiter U_{GE} , a na rys. 2 – napięcia na diodzie antyrównoległej U_D .



Rys. 1. Układ do pomiaru rezystancji termicznej tranzystora IGBT przy wykorzystaniu napięcia bramka-emiter w charakterze parametru termoczułego



Rys. 2. Układ do pomiaru rezystancji termicznej tranzystora IGBT przy wykorzystaniu napięcia na diodzie antyrównoległej

W obu rozważanych układach pomiarowych rezystancja termiczna wyznaczana jest w trzech etapach. Pierwszym z nich jest kalibracja charakterystyki termometrycznej, realizowana przy zamkniętych przełącznikach S_1 oraz rozwartych przełączniku S_2 . W tym przypadku przez badany przyrząd płynie prąd o małej wartości ustalony przez źródło prądowe I_M . W czasie kalibracji temperatura tranzystora jest regulowana za pomocą termostatu, w którym umieszczony jest ten tranzystor. Z charakterystyki tej wyznaczane jest nachylenie charakterystyki α_{PT} .

W drugim etapie pomiaru badany tranzystor pracuje w zakresie aktywnym, a jego temperatura wnętrza rośnie na skutek zjawiska samonagrzewania. W tym etapie przełączniki S_1 są rozwarte, a przełącznik S_2 jest zwarty. Przez tranzystor płynie prąd I_H . Etap ten kończy się po uzyskaniu stanu termicznie ustalonego.

Etap trzeci zaczyna się po zmianie stanu przełączników i obejmuje pomiar wartości napięcia termoczułego natychmiast po tym przełączeniu. Wówczas przez badany tranzystor płynie prąd o takiej samej wartości jak w czasie kalibracji. Wartość parametru termoczułego PT_H jest mierzona za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego i zapisywana jest w komputerze.

Przy wykorzystaniu charakterystyki termometrycznej $PT(T)$ zmierzonej w czasie kalibracji oraz wartości parametru termoczułego zmierzonej w etapie trzecim wyznaczana jest wartość rezystancji termicznej ze wzoru

$$(2) \quad R_{th} = \frac{PT_H - PT_K}{\alpha_{PT} \cdot I_H \cdot U_{CE}}$$

gdzie PT_K oznacza wartość parametru termoczułego wyznaczoną w czasie kalibracji dla temperatury otoczenia, zaś U_{CE} – napięcie między kolektorem a emiterską mierzone na końcu drugiego etapu pomiaru.

Ocena błędów pomiaru

O praktycznej użyteczności metod pomiarowych decyduje m.in. błąd pomiaru związany z tymi metodami. Ten błąd może być wyznaczony metodą różniczki zupełnej w odniesieniu do wzoru (1). Zgodnie z rozważaniami przeprowadzonymi w pracy [21] błąd względny pomiaru rezystancji termicznej można opisać wzorem o postaci

$$(3) \quad \delta_{R_{th}} = \frac{\Delta T_j}{T_j - T_a} + \frac{\Delta T_a}{T_j - T_a} + \frac{\Delta P}{P}$$

gdzie ΔT_j , ΔT_a , ΔP oznaczają błędy bezwzględne pomiaru temperatur T_j , T_a oraz mocy P .

Z wzoru (3) wynika, że przy ustalonej wartości błędów bezwzględnych pomiaru temperatury i mocy, błąd pomiaru rezystancji termicznej jest malejącą funkcją mocy i różnicy temperatur $T_j - T_a$. W przypadku, gdy rezystancja termiczna jest mierzona za pomocą pośrednich metod elektrycznych opisanych w rozdziale 2, błąd względny pomiaru R_{th} można opisać wzorem

$$(4) \quad \delta_{R_{th}} = 2 \cdot \frac{\Delta PT}{PT_H - PT_K} + \frac{\Delta \alpha_{PT}}{\alpha_{PT}} + \frac{\Delta I_C}{I_C} + \frac{\Delta U_{CE}}{U_{CE}}$$

gdzie ΔPT , $\Delta \alpha_{PT}$, ΔI_C and ΔU_{CE} oznaczają błąd bezwzględny pomiaru parametru termoczułego spowodowaną przez samonagrzewanie $PT_H - PT_K$ oraz malejącą funkcją nachylenia charakterystyki termometrycznej α_{PT} . Dwa ostatnie składniki występujące we wzorze (4) opisują dokładność pomiaru za pomocą użytego woltomierza oraz amperomierza i są pomijalnie małe w relacji do dwóch pierwszych składników.

Jak można wywnioskować z postaci wzoru (4), błąd pomiaru R_{th} jest malejącą funkcją przyrostu wartości parametru termoczułego spowodowaną przez samonagrzewanie $PT_H - PT_K$ oraz malejącą funkcją nachylenia charakterystyki termometrycznej α_{PT} . Dwa ostatnie składniki występujące we wzorze (4) opisują dokładność pomiaru za pomocą użytego woltomierza oraz amperomierza i są pomijalnie małe w relacji do dwóch pierwszych składników.

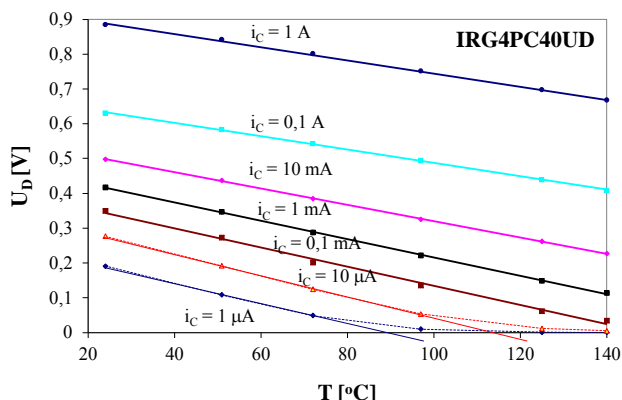
Reasumując, można stwierdzić, że w celu uzyskania wysokiej dokładności pomiaru rezystancji termicznej należy wykonywać pomiar przy wydzielaniu w badanym elemencie mocy o wartości zapewniającej znaczny wzrost wartości temperatury wnętrza tego elementu oraz wykorzystać

parametr termoczuły cechujący się dużym nachyleniem charakterystyki termometrycznej α_{PT} .

Wyniki badań

W celu porównania przydatności obu parametrów termoczułych do pomiaru rezystancji termicznych tranzystora IGBT zmierzono charakterystyki termometryczne wybranego tranzystora IGBT oraz zmierzono jego rezystancję termiczną w funkcji wydzielanej w nim mocy. Badania przeprowadzono dla tranzystora IGBT typu IRG4PC40UD pracującego przy różnych warunkach chłodzenia. Tranzystor ten montowany jest w obudowie TO-247, a jego parametry opisano w pracy [20]. Na wszystkich rysunkach prezentowanych w tym rozdziale punktami oznaczono wyniki pomiarów, a liniami – zależności aproksymujące te wyniki.

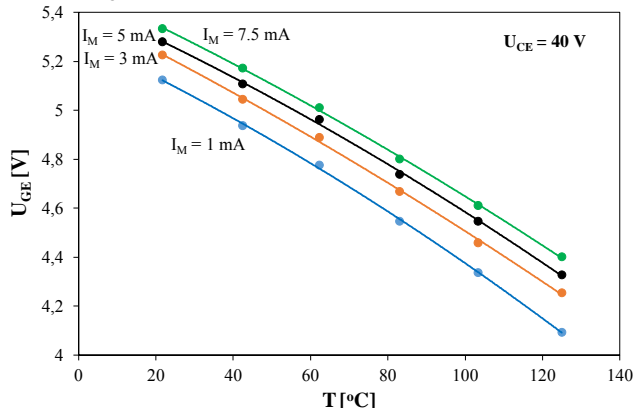
Na rys. 3 przedstawiono charakterystyki termometryczne rozważanego tranzystora przy wykorzystaniu w charakterze parametru termoczułego napięcia na spolaryzowanej w kierunku przewodzenia diodzie antyrównoległej.



Rys. 3. Charakterystyki termometryczne diody antyrównoległej zawartej w badanym tranzystorze

Jak widać, rozważane charakterystyki są liniowe w szerokim zakresie zmian temperatury dla prądu przewodzenia przekraczającego $100 \mu\text{A}$. Dla mniejszych wartości prądu zakres liniowości charakterystyki $U_D(T)$ jest węższy. Warto też zauważyć, że nachylenie rozważanej charakterystyki maleje wraz ze wzrostem wartości prądu. Dla typowo stosowanych wartości prądu diody z zakresu od 1 do 10 mA nachylenie tej charakterystyki zawiera się w zakresie od $-2,6 \text{ mV/K}$ do $-2,4 \text{ mV/K}$.

Na rys. 4 pokazano charakterystyki termometryczne $U_{GE}(T)$ wyznaczone przy wybranych wartościach prądu kolektora i_C .



Rys. 4. Charakterystyki termometryczne $U_{GE}(T)$ badanego tranzystora

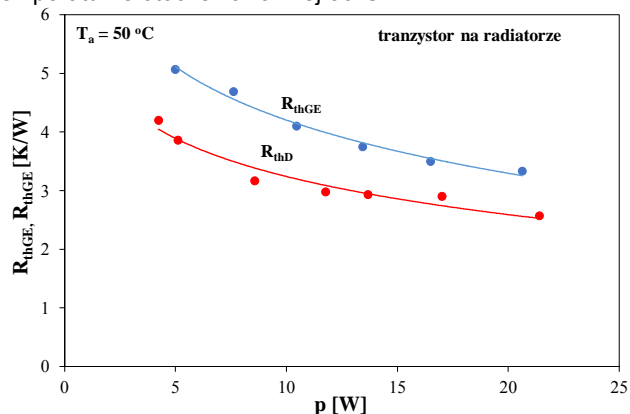
Jak widać, prezentowane charakterystyki nie są liniowe. Można je efektywnie aproksymować funkcją kwadratową. Przykładowo, dla prądu kolektora równego 5 mA ta funkcja ma postać

$$(5) \quad U_{GE} = 5,442 \text{ IV} - 7,1 \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}} \cdot T + 10^{-5} \frac{\text{V}}{(^{\circ}\text{C})^2} \cdot T^2$$

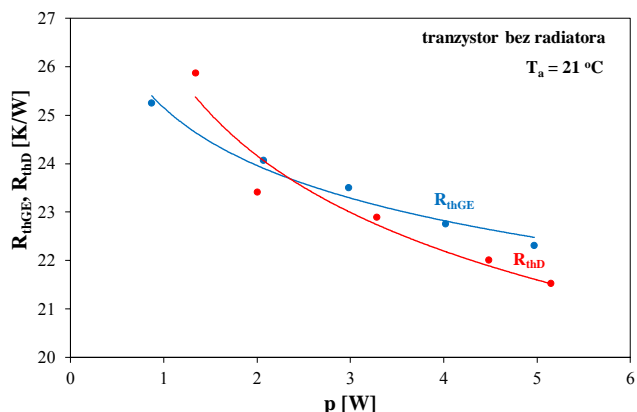
Jak można zauważyć, charakterystyki $U_{GE}(T)$ wykazują znacznie większą (prawie czterokrotnie) czułość napięcia termoczułego na zmiany temperatury niż charakterystyki $U_D(T)$. Oznacza to, że przy takiej samej dokładności pomiaru obu napięć można uzyskać czterokrotnie wyższą rozdzielczość pomiaru temperatury wnętrza wykorzystując napięcie U_{GE} jako parametr termoczuły. Wadą wyboru tego parametru jest konieczność uwzględnienia nieliniowości charakterystyki termometrycznej.

Zmierzono zależności rezystancji termicznej od mocy dla badanego tranzystora pracującego przy obu rozważanych warunkach chłodzenia przy wykorzystaniu układów pomiarowych opisanych w rozdziale 2. Wyniki tych pomiarów pokazano na rys. 5-6. Na rysunkach tych opisano symbolem R_{thGE} wyniki pomiarów uzyskanych przy wykorzystaniu napięcia U_{GE} jako parametru termoczułego oraz symbolem R_{thD} - pomiarów, w których parametrem termoczułym było napięcie na diodzie antyrównoległej.

Na rys. 5 pokazano zmierzone zależności rezystancji termicznej rozważanego tranzystora umieszczonego na radiatorze od mocy wydzielanej w tym tranzystorze przy temperaturze otoczenia równej 50°C .



Rys. 5. Zmierzone zależności rezystancji termicznej od mocy dla badanego tranzystora umieszczonego na radiatorze



Rys. 6. Zmierzone zależności rezystancji termicznej od mocy dla badanego tranzystora pracującego bez radiatora

Zależności $R_{th}(p)$ zmierzone przy wykorzystaniu każdego z rozważanych parametrów termoczułych są funkcjami monotonicznie malejącymi. Największe zmiany wartości R_{th} są widoczne dla pomiarów wykonanych przy

zastosowaniu napięcia na diodzie w charakterze parametru termoczułego. Przekraczają one nawet 30%, a drugim przypadku - nie przekraczają 25%. W całym rozważanym zakresie zmian mocy wartość R_{thGE} jest większa od wartości R_{thD} , a różnica między tymi wartościami maleje w funkcji mocy wydzielanej w badanym elemencie od 1 do 0,7 K/W.

Rys. 6 ilustruje zmierzone zależności rezystancji termicznej badanego tranzystora pracującego bez radiatora od wydzielanej w nim mocy.

Za pomocą wszystkich stosowanych metod pomiarowych uzyskano malejące zależności rezystancji termicznej od mocy. Wartości rezystancji termicznej zmierzone za pomocą obu metod elektrycznych nie odbiegają od siebie bardziej niż o 1 K/W. A zmiany wartości rezystancji termicznej w rozważanym zakresie zmian mocy nie przekraczają 15%.

Podsumowanie

W pracy przeanalizowano wpływ wyboru parametru termoczułego na rezystancję termiczną tranzystora IGBT zmierzoną pośrednią metodą elektryczną. Wykorzystano kolejno dwa parametry termoczułe: napięcie bramka-źródło U_{GE} oraz napięcie U_D na przewodząco spolaryzowanej diodzie antyrównoległej.

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że charakterystyki termometryczne U_{GE}(T) są nieliniowe i mogą być z dużą dokładnością aproksymowane funkcją kwadratową. Z kolei, charakterystyki termometryczne U_D(T) są praktycznie liniowe. Nachylenie charakterystyki U_{GE}(T) jest nawet czterokrotnie większe niż nachylenie charakterystyki U_D(T). Oznacza to, że przy zastosowaniu napięcia U_{GE} możliwe jest uzyskanie mniejszej wartości błędu pomiaru rezystancji termicznej niż przy zastosowaniu napięcia U_D.

Pokazano też, że błąd pomiaru rezystancji termicznej wyznaczony metodą różniczkową jest malejącą funkcją przyrostu temperatury wnętrza ponad temperaturę otoczenia. Jeżeli przyrost ten osiąga 100 K błąd pomiaru rezystancji termicznej metodą elektryczną nie przekracza 4%.

Uzyskane wyniki pomiaru rezystancji termicznej rozważanego tranzystora wykazały, że przy wykorzystaniu pośredniej metody elektrycznej obserwowana jest różnica między wartościami rozważanego parametru uzyskiwanymi przy wykorzystaniu napięć U_{GE} oraz U_D w charakterze parametrów termometrycznych. Ze względu na fakt, że dioda stanowi osobną strukturę półprzewodnikową umieszczoną we wspólnej obudowie z tranzystorem a moc wydzielana jest w tranzystorze jej temperatura jest niższa niż temperatura tranzystora IGBT. Wartości rezystancji termicznej uzyskane przy wykorzystaniu tych parametrów termoczułych nie różnią się między sobą bardziej niż o 5%. Ta różnica jest tylko nieznacznie większa od oszacowanego błędu pomiaru. Warto też zauważyć, że zmierzone zależności rezystancji termicznej od mocy są funkcjami malejącymi a spadek wartości tego parametru w rozważanym zakresie zmian mocy dochodzi nawet do 25%.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki; dr inż. Paweł Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia, E-mail: k.gorecki@we.umg.edu.pl; p.gorecki@we.umg.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Rashid M.H., *Power Electronic Handbook*, Academic Press, Elsevier, New York, 2007
- [2] Perret R., *Power electronics semiconductor devices*. John Wiley & Sons, Hoboken, 2009
- [3] Kazimierczuk M.K., *Pulse-width modulated DC-DC power converters*. John Wiley & Sons, Chichester, 2008
- [4] Hefner A.R., Blackburn D.L., An analytical model for the steady state and transient characteristics of the power Insulated Gate Bipolar Transistor, *Solid-State Electronics*, 31 (1988), n. 10, 1513-1532
- [5] Górecki P., Górecki K., Influence of thermal phenomena on dc characteristics of the IGBT. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 64 (2018), n. 1, 71-76
- [6] Górecki P., Investigation of the influence of thermal phenomena on characteristics of IGBTs contained in power modules. 24th Int. Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems Mixdes 2017, Bydgoszcz (2017), 355-359
- [7] Górecki K., Górecki P., Modelling dynamic characteristics of the IGBT with thermal phenomena taken into account, *Microelectronics International*, 34 (2017), n. 3, 160-164
- [8] Castellazzi A., Kraus R., Seliger N., Schmitt-Landsiedel D., Reliability analysis of power MOSFET's with the help of compact models and circuit simulation, *Microelectronics Reliability*, 42 (2002), 1605-1610
- [9] 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*, 21 (2006), n. 3, 603-612
- [10] Bagnoli P.E., Casarosa C., Ciampi M., Dallago E., Thermal resistance analysis by induced transient (TRAIT) method for power electronic devices thermal characterization, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1. *Fundamentals and Theory* 13 (1998), n. 6, 1208-1219
- [11] Górecki K., Górecki P., Zarębski J., Measurements of parameters of the thermal model of the IGBT module, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68 (2019), n. 12, 4864-4875
- [12] Blackburn D.L., "Temperature measurements of semiconductor devices – A review", 20th IEEE Semicon. Thermal Measurement and Management Symposium SEMI-THERM, San Jose, (2004), 70-80
- [13] Oettinger F. F., Blackburn D. L., Semiconductor measurement technology: Thermal resistance measurements, U. S. Department of Commerce, NIST/SP-400/86, (1990)
- [14] Zarębski J., Górecki K., A method of measuring the transient thermal impedance of monolithic bipolar switched regulators, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 30 (2007), n. 4, 627 – 631
- [15] Górecki K., Górecki P., Non-linear compact thermal model of the IGBT dedicated to SPICE, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35 (2020), n. 12, 13420-13428
- [16] Avenas Y., Dupont L., Khatir Z., Temperature measurement of power semiconductor devices by thermo-sensitive electrical parameters – a review, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27 (2012), n. 6, 3081-3092
- [17] Dupont L., Avenas Y., Preliminary evaluation of thermo-sensitive electrical parameters based on the forward voltage for online chip temperature measurements of IGBT devices, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51 (2015), n. 6, 4688-4698
- [18] Dupont L., Avenas Y., Jeannin P.-O., Comparison of junction temperature evaluations in a power IGBT module using an IR camera and three thermosensitive electrical parameter., *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49 (2013), n. 4, 1599-1608
- [19] Zeng G., Cao H., Chen W., Lutz J., Difference in device temperature determination using p-n junction forward voltage and gate threshold voltage, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34 (2019), n. 3, 2781-2793
- [20] IRG4PC40UD, Insulated gate bipolar transistor with ultrafast soft recovery diode, Data sheet, International Rectifier, www.irf.com/product-info/datasheets/data/irg4pc40ud.pdf
- [21] Górecki K., Górecki P., The analysis of accuracy of selected methods of measuring the thermal resistance of IGBTs. *Metrology and Measurement Systems*, 22 (2015), n. 3, 455-464