

# Wpływ zjawisk cieplnych na parametry dynamiczne tranzystora IGBT

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych ilustrujących wpływ zjawisk cieplnych na parametry dynamiczne tranzystora IGBT. Zaprezentowano zastosowany układ pomiarowy oraz przedstawiono wyniki pomiarów charakterystyk i parametrów dynamicznych wybranego tranzystora IGBT typu STGF14NC60KD wyprodukowanego przez firmę ST Microelectronics pracującego w różnych warunkach. Przeanalizowano wpływ temperatury otoczenia oraz zjawiska samonagrzewania na przebieg charakterystyk dynamicznych tego tranzystora.

**Abstract.** The paper concerns the study on an influence of thermal phenomena on selected parameters of the IGBT. In the paper, the used measurement set-up and the measured waveforms of waveforms of the investigated transistor obtained under different operating conditions are presented. Particularly, the influence of the ambient temperature and the self-heating phenomenon on the shape of these waveforms is discussed. (Influence of thermal phenomena on the selected parameters of the IGBT)

**Słowa kluczowe:** IGBT; samonagrzewanie; charakterystyki dynamiczne; parametry dynamiczne; przełączanie; pomiary.

**Keywords:** IGBT; self-heating; waveforms; dynamic parameters; switching; measurements.

## Wprowadzenie

Półprzewodnikowe przyrządy mocy są powszechnie stosowane w impulsowych układach zasilających oraz analogowych układach elektronicznych o działaniu ciągłym [1, 2, 3]. W zakresie wysokich napięć i prądów, powszechnie stosowane są tranzystory IGBT [2]. W literaturze można znaleźć informacje o wielu typach tranzystorów IGBT takich jak np. punch-through (PT), non-punch-through (NPT), field-stop IGBT. Opis tych technologii można znaleźć m. in. w pracy [4]. Na rynku są też dostępne typy tranzystorów, które są oznaczane wyłącznie numerem generacji np. IGBT4 [5].

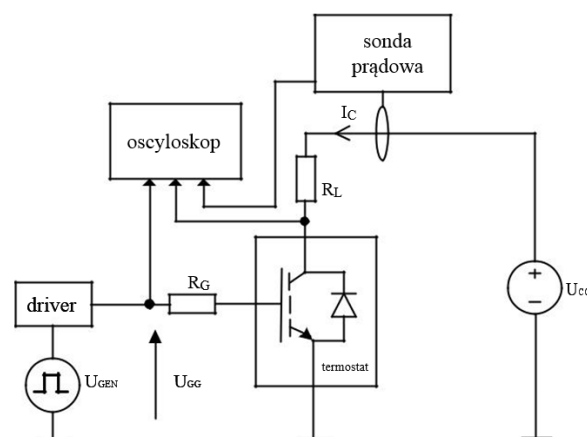
Z inżynierskiego punktu widzenia, oprócz parametrów granicznych opisujących dopuszczalne wartości prądu kolektora oraz napięcia kolektor-emiter, istotne znaczenie mają parametry dynamiczne. Najistotniejszymi spośród nich są czasy włączania i wyłączania tranzystora. To one decydują o wartościach energii strat włączania i wyłączania, które w typowych warunkach pracy tranzystora mają istotny wpływ na wartość całkowitych strat energii w jednym okresie pracy tego tranzystora stosowanego w układach impulsowych. Energia tracona w tranzystorze wydziela się na nim w postaci ciepła, a jej nadmiar może skutkować uszkodzeniem elementu w wyniku przekroczenia dopuszczalnej temperatury wnętrza [6, 7, 8].

Jak powszechnie wiadomo, parametry i charakterystyki przyrządów półprzewodnikowych silnie zależą od temperatury. Na skutek zjawisk termicznych, między innymi zjawiska samonagrzewania, temperatura wnętrza przyrządu półprzewodnikowego  $T_j$  przekracza, czasem znacząco, wartość temperatury otoczenia  $T_a$ . Parametrem opisującym związek między temperaturą wnętrza elementu półprzewodnikowego a wydzielaną w nim mocą jest rezystancja termiczna [9].

Celem pracy jest zbadanie wpływu temperatury otoczenia oraz zjawiska samonagrzewania na parametry dynamiczne wybranego tranzystora IGBT. Zaprezentowano zmierzone przebiegi czasowe napięcia kolektor-emiter, prądu kolektora oraz mocy wydzielanej w tranzystorze w trakcie procesu włączania i wyłączania tego elementu oraz wyznaczono podstawowe parametry dynamiczne opisujące ten proces. Przedstawiono także wpływ częstotliwości przełączania tranzystora na temperaturę obudowy tego elementu.

## Metoda pomiaru

W celu zmierzenia parametrów dynamicznych tranzystora zastosowano układ pomiarowy przedstawiony na rys. 1.



Rys.1. Schemat układu do pomiaru charakterystyk dynamicznych tranzystora IGBT

W zaprezentowany układzie pomiarowym, źródło  $U_{CC}$  służy do zasilania obwodu kolektora. Sygnał przełączający jest generowany przez generator funkcyjny, który jest dołączony przez driver MCP1305 [10] i rezystor  $R_G$  do bramki badanego tranzystora. Rezystor  $R_C$  ogranicza prąd w obwodzie kolektora, a rezystor  $R_L$  – maksymalny prąd bramki tranzystora. Ponadto, w układzie pomiarowym zastosowano oscyloskop Rigol DS1052E, sondę prądową Tektronix TCPA 300, zasilacz NDN DF1760SL10A i generator NDN JC5603P. Temperatura obudowy badanego tranzystora była mierzona pirometrem Optex PT-3S. Pasma zastosowanego oscyloskopu wynosi 50 MHz, a sondy prądowej – 100 MHz. Driver MCP1305 charakteryzuje się dopuszczalnym prądem wyjściowym wynoszącym 4,5 A oraz maksymalnym napięciem wyjściowym równym 18 V.

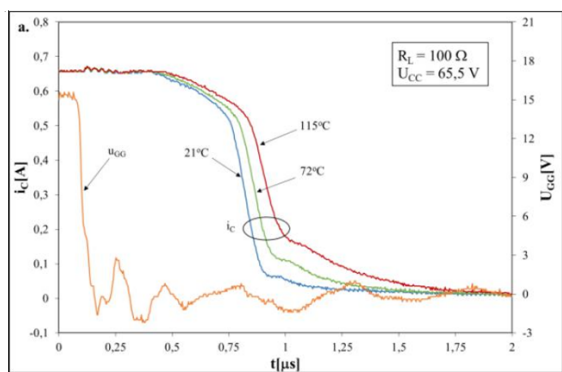
Do badań wybrano arbitralnie tranzystor IGBT wyprodukowany przez firmę ST Microelectronics, oznaczony przez producenta symbolem STGF14NC60KD [11]. Element ten charakteryzuje się dopuszczalną wartością napięcia kolektor-emiter równą 600 V oraz dopuszczalnym prądem kolektora wynoszącym 14 A. Badany egzemplarz został zamknięty w obudowie TO220FP. W trakcie pomiarów tranzystor umieszczony był w termostacie KBC – 65G.

W dalszej części pracy zostały przedstawione wyniki pomiarów przebiegów czasowych, które zostały zmierzone w warunkach: izotermicznych (temperatura wnętrza tranzystora była równa temperaturze otoczenia) i w stanie termicznie ustalonym. Aby wykonać pomiar w warunkach izotermicznych ustawiano wyzwalanie oscyloskopu w tryb single, a następnie włączano w układ pomiarowy źródło  $U_{CC}$ , co pozwalało zarejestrować pierwszy okres prądu kolektora i napięcia na bramce badanego tranzystora. W obu przypadkach mierzonymi wielkościami było napięcie  $u_{GG}$  oraz prąd  $i_C$ . Wielkości te zaznaczono na rys. 1.

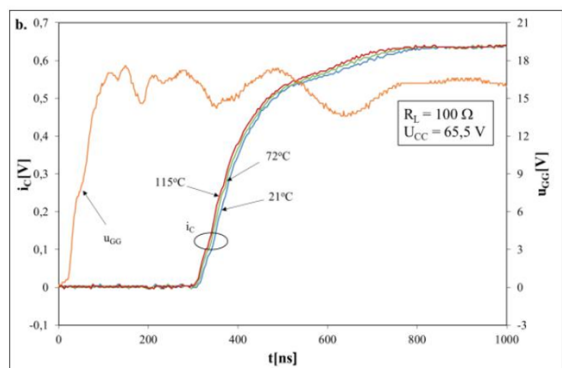
## Wyniki badań

Korzystając z opisanego w poprzednim rozdziale układu pomiarowego zmierzono wybrane charakterystyki dynamiczne badanego tranzystora. Wszystkie przedstawione w tym rozdziale przebiegi napięć i prądów zostały zmierzone przy napięciu zasilania obwodu kolektora  $U_{CC}$  równym 65,5 V oraz częstotliwości sygnału sterującego  $u_{GG}$  równej 5 kHz, amplitudzie tego sygnału równej 15 V, współczynniku wypełnienia równym 0,5 i rezystancji bramki  $R_G = 210 \Omega$ .

a)



b)



Rys.2. Zmierzone przebiegi  $i_C(t)$  i  $u_{GG}(t)$  w trakcie wyłączenia a) i włączenia b) badanego tranzystora.

W niniejszej pracy skorzystano z definicji czasów magazynowania ( $t_s$ ), opadania ( $t_f$ ), opóźnienia przy załączaniu ( $t_d$ ), narastania ( $t_r$ ) włączenia ( $t_{on}$ ) oraz wyłączenia ( $t_{off}$ ) przedstawionymi w pracy [5]. Zgodnie z definicją podaną w cytowanej pracy, czas magazynowania jest to czas, który upływa od osiągnięcia 90% wartości w stanie ustalonym napięcia na bramce do spadku prądu kolektora do 90% jego wartości w stanie ustalonym przed zainicjowaniem procesu wyłączenia, czas opadania to czas, w jakim prąd kolektora maleje od 90% do 10% swojej wartości przed zainicjowaniem procesu wyłączenia. Czas opóźnienia przy załączaniu to czas, który upływa od osiągnięcia 10% wartości w stanie ustalonym napięcia na

bramce do chwili, gdy prąd kolektora wzrośnie do 10% jego wartości po załączeniu. Czas narastania to czas, w jakim prąd kolektora wzrasta od 10% do 90% wartości w stanie ustalonym.

Charakterystyki przedstawione na rys. 2 - 3. zostały zmierzone w warunkach izotermicznych przy trzech wartościach temperatury otoczenia dla rezystancji obciążenia  $R_L = 100 \Omega$ . Na poniższych rys. linią niebieską oznaczono wyniki pomiarów wykonanych przy temperaturze otoczenia równej 21°C, zieloną - 71°C, czerwoną - 114°C. Na wszystkich wykresach linią pomarańczową oznaczono napięcie  $u_{GG}$ .

Rys. 2a. przedstawia zmierzone w warunkach izotermicznych przebiegi czasowe prądu  $i_C$  i napięcia  $u_{GG}$  w czasie wyłączenia, a rys. 2b. - w czasie włączania tranzystora.

Jak widać na rys. 2a, opadanie przebiegu  $i_C(t)$  wykazuje zmienne nachylenie. Widoczny jest spadek nachylenia w zakresie prądów kolektora zbliżonych do zera oraz powolne opadanie przebiegu na początku procesu wyłączenia. Wraz ze wzrostem temperatury wydłuża się istotnie czas magazynowania oraz końcowa faza opadania. Nachylenie przebiegu w zakresie pośrednich wartości napięć nie zależy od temperatury. Ponad przeciętnie długi czas magazynowania wynika z dużej wartości rezystancji  $R_G$ . Rezystancja ta została tak dobrana, aby zminimalizować zniekształcenie przebiegu napięcia  $u_{GG}(t)$ .

Rys. 2b przedstawia zmierzone w warunkach izotermicznych przebiegi czasowe prądu  $i_C(t)$  i napięcia  $u_{GG}(t)$  w trakcie włączania tranzystora. Widoczne jest, że przebieg  $i_C(t)$ , podobnie jak w przypadku procesu wyłączenia, charakteryzuje się zmiennym nachyleniem w trakcie przełączania. W zakresie prądów  $i_C$  zbliżonych do wartości w stanie ustalonym widoczny jest gwałtowny spadek nachylenia przebiegu  $i_C(t)$ .

W tabeli 1. przedstawiono zmierzone wartości czasów przełączania badanego tranzystora. Czasy te są wyznaczone zgodnie z definicjami zawartymi w pracy [5].

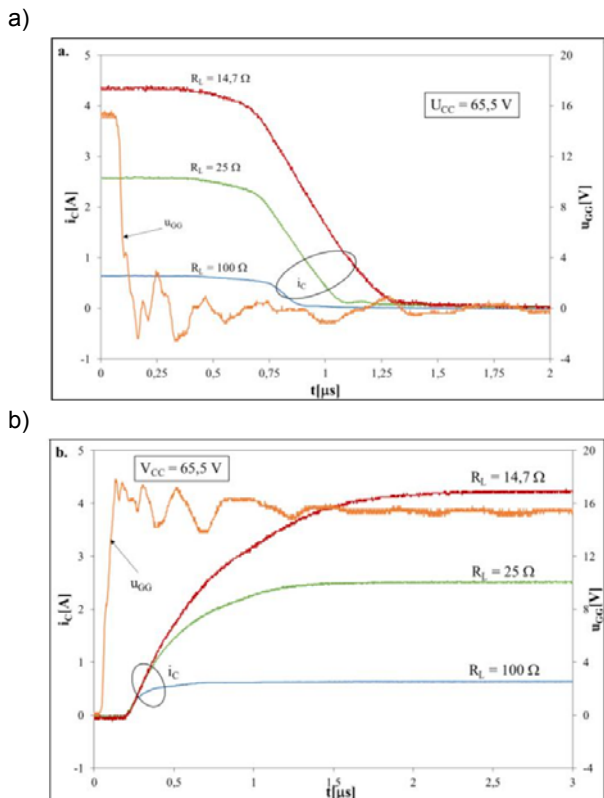
Tabela 1. Zmierzone wartości parametrów dynamicznych badanego tranzystora

$T_a$ [°C]	$t_s$ [ns]	$t_f$ [ns]	$t_{off}$ [ns]	$t_d$ [ns]	$t_r$ [ns]	$t_{on}$ [ns]
21	564	276	840	156	222	520
72	592	456	1048	152	192	476
115	624	648	1272	148	184	456

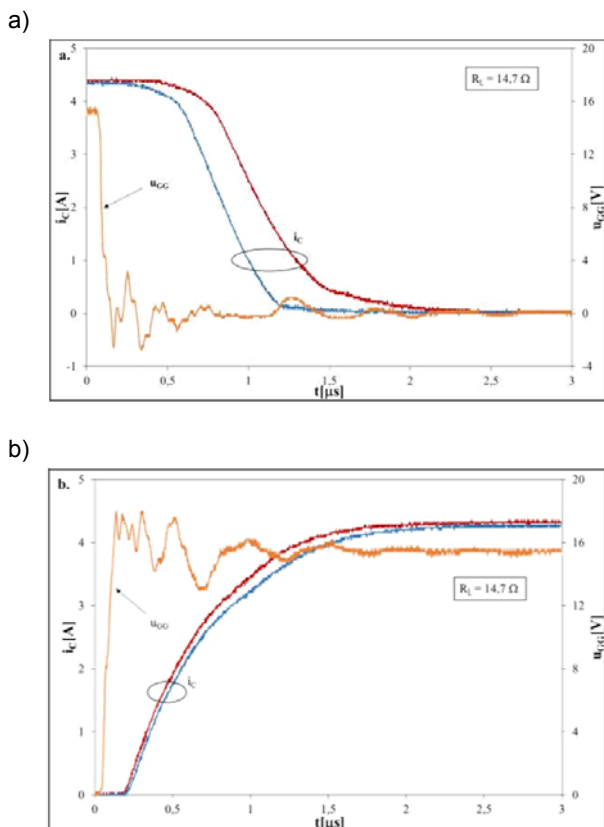
Jak wynika z tabeli 1, obie składowe czasu wyłączenia ( $t_s$  oraz  $t_f$ ) rosną ze wzrostem temperatury, a składowe czasu włączania ( $t_d$  oraz  $t_r$ ) maleją przy wzroście temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury wydłuża się tzw. ogon prądowy [5], który jest przyczyną tego, że czas wyłączenia jest znacznie dłuższy od czasu włączania, a różnica ta rośnie wraz ze wzrostem temperatury.

Rys. 3 przedstawia zmierzone izotermiczne przebiegi prądu  $i_C(t)$  w trakcie procesu wyłączenia (rys 3a) oraz w trakcie włączania badanego tranzystora (rys 3b) przy trzech wartościach rezystancji obciążenia  $R_L$  równych kolejno: 100, 25 i 14,7.

Na rys. 3a i 3b widoczne jest, że wartości czasu wyłączenia i włączania istotnie rosną wraz ze wzrostem przełączanego prądu. W przypadku wyłączenia, w badanym zakresie prądu  $I_C$  wydłuża się on z 810 ns do 1,14 s, a czas wyłączenia rośnie ze wzrostem prądu o 90 ns/A. W przypadku włączania, w badanym zakresie rośnie on wraz ze wzrostem prądu  $I_C$  od 482 ns do 1,36 s, a czas włączania rośnie ze wzrostem prądu o 237 ns/A.



Rys.3. Zmierzone przebiegi  $i_c(t)$  i  $u_{GG}(t)$  w trakcie wyłączania a) i włączania b) badanego tranzystora



Rys.4. Zmierzone przebiegi czasowe prądu kolektora  $i_c$  w trakcie procesu wyłączania a) oraz włączania b) badanego tranzystora

Jak wynika z rys 3, czas wyłączania dla małych prądów jest istotnie większy od czasu włączania, jednak dla dużych prądów relacja ta ulega odwróceniu.

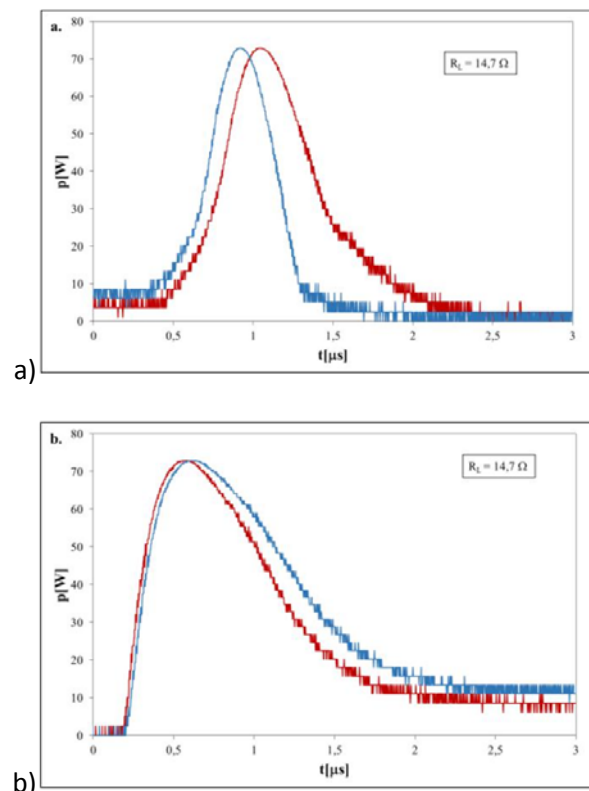
Na rys. 4 i 5 porównano przebiegi czasowe prądów  $i_c(t)$  oraz mocy rozpraszanej w tranzystorze  $p(t)$  badanego tranzystora zmierzone w stanie termicznie ustalonym i w warunkach izotermicznych. Linią niebieską oznaczono wyniki pomiarów izotermicznych a liniją czerwoną wyniki pomiarów w stanie termicznie ustalonym.

Rys. 4a i 4b przedstawiają zmierzone przebiegi czasowe izotermiczne i w stanie termicznie ustalonym przedstawiające proces wyłączania tranzystora przy rezystancji  $R_L = 14,7$ . W trakcie pomiarów w stanie termicznie ustalonym temperatura obudowy wynosiła aż  $147^\circ\text{C}$ .

Na rys. 4a widoczne jest, że czas wyłączania istotnie różni się na skutek zjawiska samonagrzewania występującego w badanym tranzystorze. W przypadku pomiaru izotermicznego czas ten wyniósł  $1,14$  s, a dla pomiaru w stanie termicznie ustalonym  $1,43$  s, czyli aż o  $25\%$  więcej. Na rys. 4b widoczne jest, że czas włączania maleje na skutek zjawiska samonagrzewania występującego w badanym tranzystorze. W przypadku pomiaru izotermicznego czas ten wyniósł  $1,36$  s, a dla pomiaru w stanie termicznie ustalonym  $1,22$  s, czyli o  $10\%$  mniej.

Rys. 5 przedstawia zmierzone przebiegi czasowe mocy traconej w tranzystorze przy rezystancji  $R_L = 14,7$  w trakcie jego wyłączania (Rys. 5a) i włączania (Rys. 5b). W trakcie pomiarów temperatura obudowy badanego tranzystora w stanie ustalonym wynosiła  $149^\circ\text{C}$ . Moc tę wyznaczono korzystając z wyników pomiarów wykonanych za pomocą oscyloskopu i następującego wzoru:

$$(1) \quad P = (V_{CC} - I_{CC} \cdot R_L) \cdot I_C$$



Rys.5. Zmierzone przebiegi strat mocy w tranzystorze w trakcie wyłączania a) i włączania b) badanego tranzystora

W celu oceny ilościowej procesu przełączania tranzystora, wyznaczono energię niezbędną do przełączania tranzystora. W tabeli 2 zebrano obliczone

wartości energii strat w procesie włączania  $E_{on}$  i wyłączenia  $E_{off}$  oraz całkowitą energię strat przełączania  $E_{ts}$  będącą sumą energii strat włączania i wyłączenia. Wartości powyższych parametrów obliczono całkując metodą trapezów czasowe przebiegi mocy przedstawione na rys. 5. Przyjęto następujące zakresy obliczeń: w przypadku wyłączenia jest to całka z mocy po czasie wyłączenia, a w przypadku włączania – ze względu na długi ogon prądowy, całka z mocy w granicach od początku procesu włączania do 5 s od rozpoczęcia tego procesu.

Tabela 2. Zmierzone wartości energii przełączania w warunkach izotermicznych i w stanie termicznie ustalonym przy rezystancji obciążenia  $R_L=14,7$

	izotermiczne	stan termicznie ustalony
$E_{on}$ [J]	65,8	58,2
$E_{off}$ [J]	46,4	60,9
$E_{ts}$ [J]	112,2	119,1

Jak wynika z tabeli 2, zjawisko samonagrzewania powoduje wzrost energii traconej w tranzystorze w procesie przełączania, a w konsekwencji sprawność procesu przełączania ulega obniżeniu. Wzrost całkowitych strat energii procesu przełączania  $E_{ts}$  na skutek zjawiska samonagrzewania wynika przede wszystkim ze wzrostu energii traconej podczas wyłączenia. W badanym przypadku wzrost ten wyniósł aż 31%. W przypadku włączania, energia tracona w tranzystorze maleje o zaledwie 12% na skutek zjawiska samonagrzewania.

Przedstawione w tabelach 1 i 2 wyniki pomiarów istotnie (nawet o setki procent) odbiegają od wartości katalogowych. Wynika to z różnicy w wartościach napięcia zasilania obwodu kolektora, przełączanego prądu kolektora oraz rezystancji  $R_G$  i  $R_L$ . Mimo tych różnic, uzyskane wyniki pozostają wiarygodne i pozwalają na ocenę wpływu zjawiska samonagrzewania na pracę tranzystora IGBT w układzie przełącznika.

## Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów parametrów dynamicznych tranzystora IGBT. Uzyskane wyniki udowadniają, że temperatura otoczenia, zjawisko samonagrzewania oraz wartość prądu  $i_C$  mają silny wpływ na parametry dynamiczne tranzystora takie jak: czas włączania, czas wyłączenia oraz energia strat przełączania.

Zaprezentowane rezultaty pokazują, że wzrost temperatury i zjawisko samonagrzewania niekorzystnie wpływają na proces wyłączenia powodując wydłużenie tego procesu. W przypadku włączania, czas jego trwania ulega skróceniu pod wpływem zjawisk cieplnych. Uzyskane wyniki potwierdzają, że w celu wiarygodnego modelowania właściwości dynamicznych tranzystora IGBT niezbędne jest uwzględnienie wpływu temperatury otoczenia oraz zjawiska samonagrzewania. Zaprezentowane rezultaty posłużą do rozwijania dynamicznego, elektrotermicznego modelu tranzystora IGBT.

**Autorzy:** mgr inż. Paweł Górecki, Akademia Morska w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia.

## LITERATURA

- [1] Ericson R., Maksimovic D.: Fundamentals of Power Electronics, *Norwell*, Kluwer Academic Publisher, (2001)
- [2] Rashid M.H.: Power Electronic Handbook, *Academic Press*, Elsevier, (2007)
- [3] Kazimierczuk M.K.: *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters*, John Wiley & Sons, Ltd, (2008)
- [4] Baliga B. J.: Analytical Modeling of IGBTs: Challenges and Solutions, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 60, No. 2., (2013), 535-543
- [5] Napieralski A., Napieralska M.: *Polowe półprzewodnikowe przyrządy dużej mocy*, Wydaw. Naukowo-Techniczne, Warszawa, (1995)
- [6] Zarębski J., Górecki K.: The electrothermal large-signal model of power MOS transistors for SPICE, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 25, No. 5-6, (2010), 1265 – 1274
- [7] Górecki P., Górecki K.: Influence of Thermal Phenomena on dc Characteristics of the IGBT, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, Vol. 64, No.1, (2018), 71-76
- [8] [A. Castellazzi, Y.C. Gerstenmaier, R. Kraus and G.K.M. Wachutka, Reliability analysis and modeling of power MOSFETs in the 42-V-PowerNet, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 21, (2006), No. 3, 603-612
- [9] Górecki K., Górecki P.: The Analysis of Accuracy of Selected Methods of Measuring the Thermal Resistance of IGBTs, *Metrology and Measurement Systems*, Vol. 22, No. 3, (2015), 455-464
- [10] MCP1405 4.5A Dual High-Speed Power MOSFET Drivers, Datasheet, Microchip, (2007)
- [11] STGF14NC60KD Insulated Gate Bipolar Transistor With Ultrafast Soft Recovery Diode, Datasheet, ST Microelectronics, (2017)