

## Badanie właściwości wybranych modeli tranzystorów bipolarnych z izolowaną bramką

**Streszczenie.** W pracy przeanalizowano właściwości wybranych literaturowych modeli tranzystora bipolarnego z izolowaną bramką. Przedstawiono postać modelu tego elementu wbudowanego w programie SPICE oraz modelu zaproponowanego na stronie internetowej firmy International Rectifier. Za pomocą rozważanych modeli wyznaczono charakterystyki wybranego typu tranzystora IGBT pracującego przy różnych wartościach temperatury, a uzyskane wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów badanych tranzystorów wykonanymi przez Autorów. W oparciu o uzyskane wyniki badań, przedyskutowano zakres przydatności obu rozważanych modeli.

**Abstract.** On the paper proprieties of selected literature models of the insulated gate bipolar transistor (IGBT) are analysed. The forms of the model of this element built-in in the SPICE software and the model proposed on web-side of International Rectifier are presented. By means of the considered models some characteristics of the selected type of the IGBT operating at different values of the temperature are calculated. Obtained results of calculations are compared with results of measurements of the investigated devices performed by the Authors. Basing on obtained results of investigations, the range of the usefulness of both the considered models are discussed. (**Investigations of properties of selected IGBTs models**).

**Słowa kluczowe:** IGBT, SPICE, modelowanie, półprzewodnikowe przyrządy mocy.

**Keywords:** IGBT, SPICE, modeling, power semiconductor devices.

### Wprowadzenie

Półprzewodnikowe przyrządy mocy są powszechnie używane w impulsowych układach przetwarzania energii elektrycznej oraz w analogowych układach elektronicznych pracujących w trybie ciągłym [1, 2]. W zakresie wysokich napięć i prądów stosowane są często tranzystory bipolarnie z izolowaną bramką (IGBT – ang. Insulated Gate Bipolar Transistor) [1]. Elementy te zawierają wejściową strukturę MOS oraz wyjściowy tranzystor bipolarny.

Na etapie projektowania układów elektronicznych stosuje się symulację komputerową w celu zweryfikowania poprawności projektu. Wiarygodność uzyskanych wyników obliczeń zależy od dokładności zastosowanych modeli [3, 4, 5, 6]. Najwyższą dokładnością charakteryzują się modele mikroskopowe uwzględniające czasowe i przestrzenne rozkłady wielkości charakteryzujących właściwości tych elementów, ale wysoki stopień złożoności czyni praktycznie niemożliwym zastosowanie tych modeli do analizy układów zawierającą dużą liczbę przyrządów półprzewodnikowych [3, 7]. W związku z tym, w analizach układów elektronicznych, typowo stosowane są modele skupione przyrządów półprzewodnikowych opisujące zależności pomiędzy zaciskowymi napięciami i prądami przyrządu [3, 5, 6, 8].

Jak powszechnie wiadomo, charakterystyki i parametry elementów półprzewodnikowych silnie zależą także od temperatury [3, 4]. Jednym z powszechnie stosowanych programów do analizy układów elektronicznych jest program SPICE. W bibliotekach tego programu można znaleźć liczne modele, różnych elementów elektronicznych, m. in. IGBT. W celu zastosowania takiego modelu dla konkretnego elementu elektronicznego, należy uprzednio przeprowadzić estymację wartości jego parametrów, np. w programie Model Editor, który jest częścią pakietu SPICE.

Oprócz modeli zawartych w bibliotekach programu SPICE również na stronach internetowych producentów elementów półprzewodnikowych można odnaleźć inne formy modeli rozważanych elementów. Niestety, modele te typowo mają stosunkowo prostą strukturę, nieuwzględniającą licznych zjawisk zachodzących w elemencie, co negatywnie wpływa na ich dokładność [3, 8].

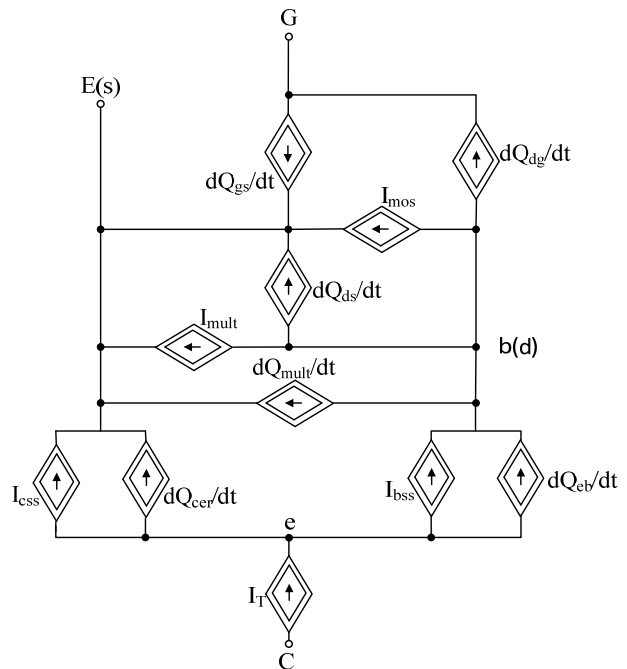
Celem pracy jest ocena przydatności wybranych modeli literaturowych do opisu charakterystyk IGBT w szerokim zakresie zmian temperatury. W kolejnych rozdziałach przedstawiono rozważane modele, opisano procedurę estymacji ich parametrów oraz porównano wyniki obliczeń uzyskane za pomocą rozważanych modeli z wynikami

miarów dla wybranego tranzystora typu IRG4PC40UD wyprodukowanego przez firmę International Rectifier, dla szerokiego zakresu zmian temperatury.

### Opis rozważanych modeli

W niniejszej pracy rozważane są dwa modele IGBT: model Hefnera [9, 10], wbudowany w programie SPICE oraz model tego elementu uzyskany ze strony firmy International Rectifier [11].

W programie SPICE został wbudowany model tranzystora bipolarnego z izolowaną bramką, opisany w pracy [9], a jego reprezentację obwodową pokazano na rys.1. Rozważany model bazuje na połączeniu wejściowego tranzystora typu MOS i wyjściowego tranzystora bipolarnego. Tranzystor MOS, będący częścią rozważanego modelu jest opisany równaniami Shichmana-Hodgesa [12], a tranzystor bipolarny - modelem ładunkowym.

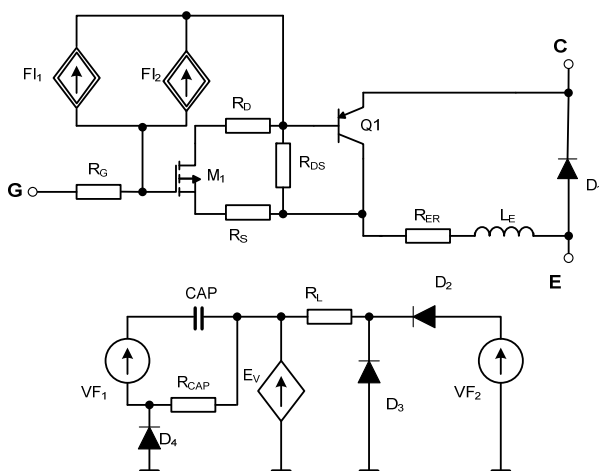


Rys. 1. Reprezentacja obwodowa modelu Hefnera [9]

Model ten składa się z pięciu sterowanych źródeł prądowych opisujących składowe stałe prądów tego elementu oraz sześciu sterowanych źródeł prądowych

opisujących nieliniowe pojemności znajdujące się w strukturze IGBT. Źródło  $I_{MOS}$  modeluje prąd kanału tranzystora MOS, źródło  $I_{mult}$  opisuje zjawisko powielania lawinowego, źródła  $I_{CSS}$  i  $I_{BSS}$  modelują odpowiednio prąd kolektora i prąd bazy tranzystora bipolarnego przy zerowej polaryzacji, a źródło  $I_T$  modeluje składową stałą prądu kolektora IGBT. Pozostałe źródła prądowe opisują prądy płynące przez nieliniowe pojemności, odpowiednio: bramka-źródło (źródło  $dQ_{gs}/dt$ ), dren-bramka (źródło  $dQ_{mult}/dt$ ), dren-źródło (źródło  $dQ_{ds}/dt$ ), baza-emiter (źródło  $dQ_{eb}/dt$ ) i pojemności złącza kolektor-emiter (źródło  $dQ_{cer}/dt$ ). Szczegółowy opis tego modelu można znaleźć w pracach [9, 10]. Wadą przedstawianego modelu jest występowanie w nim parametrów technologicznych, takich jak np.: koncentracja domieszek w bazie czy czas życia nośników mniejszościowych.

Z kolei, model dostępny na stronie internetowej firmy International Rectifier [11] ma postać obwodową przedstawioną na rys. 2.



Rys. 2. Reprezentacja obwodowa modelu IGBT przedstawionego w pracy [11]

W rozważanym modelu wykorzystano wbudowane w programie SPICE modele elementów nieliniowych: tranzystora MOS  $M_1$  (model Shichmana-Hodgesa), tranzystora bipolarnego  $Q_1$  (model ładunkowy), oraz diod  $D_1$ - $D_4$ . Niektóre parametry tych modeli mają wartości różne od domyślnych, m. in. parametry opisujące pojemności rozważanych elementów, dzięki czemu modele te uwzględniają inercję elektryczną.

Wprowadzenia modelu są oznaczone jako: G – bramka, C – kolektor oraz E – emiter i odpowiadają końcówkom rzeczywistego elementu. Ponadto, w opisywanym modelu rezystancje szeregowo bramki, źródła i drenu wejściowego tranzystora MOS są zamodelowane przez rezystory  $R_G$ ,  $R_S$  i  $R_D$ , a pasożytnicza rezystancja upływu kanału struktury MOS przez rezystor  $R_{DS}$ , natomiast szeregowo rezystancja emitera przez rezystor  $R_{ER}$ . W modelu występuje także dioda antyrównoległa  $D_1$ .

Pozostałe elementy widoczne na rys. 2. służą do zamodelowania inercji elektrycznej IGBT. Szczególnie istotna dla właściwości dynamicznych tranzystora IGBT jest pojemność między bramką a drenem wejściowej struktury MOS, którą modelują sterowane źródła prądowe  $F_1$  oraz  $F_2$  sterowane prądami płynącymi przez źródła napięciowe  $VF_1$  oraz  $VF_2$  zawartymi w widocznym na rys. 2 obwodzie pomocniczym.

### Wyznaczanie parametrów rozważanych modeli

Wartości parametrów występujących w modelu prezentowanym na stronie internetowej [11], są podane dla każdego typu tranzystora IGBT oferowanego przez firmę International Rectifier. Z kolei, wartości parametrów modelu

Hefnera mogą być wyznaczone przy zastosowaniu programu Model Editor będącego częścią pakietu SPICE. W programie tym jako dane wejściowe należy wprowadzić wartości wybranych parametrów katalogowych rozważanego tranzystora: czas opadania (TFALL), napięcie przebicia (BV), maksymalny ciągły prąd kolektora (ICMAX), a także współrzędne punktów leżących na charakterystykach przejściowej i wyjściowej. Arbitralnie zdecydowano, że wartości parametrów będą wyznaczone dla tranzystora IRG4PC40U. Po wprowadzeniu tych danych wejściowych program wyznaczył zestaw wartości parametrów modelu, które zebrano w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry modelu Hefnera wyznaczone przez program Model Editor dla tranzystora IRG4PC40UD

TAU [ns]	KP [ $A/V^2$ ]	AREA [ $mm^2$ ]	AGD [ $mm^2$ ]	VT [V]
0,9481	10,524	20	8	5,9627
CGS [ $nF/cm^2$ ]	COXD [ $nF/cm^2$ ]	VTD [V]	KF [-]	
17,694	47,139	-5	0,5005	

Pozostałe osiem parametrów tego modelu tj.: BVF, BVN, JSNE, MUN, MUP, NB, THETA, WB nie są wyliczane w programie Model Editor i przyjmują wartości domyślne [9]. Model wraz z przedstawionymi w Tabeli 1, wartościami parametrów został użyty do symulacji badanego tranzystora. Wyniki tych symulacji zostały przedstawione w kolejnym rozdziale.

### Wyniki weryfikacji modeli

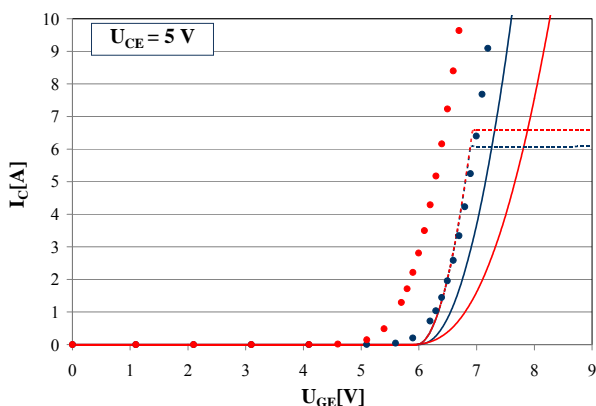
W celu zweryfikowania praktycznej przydatności opisanych wcześniej modeli, obliczono charakterystyki rozważanego tranzystora za pomocą tych modeli, a uzyskane wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów i przedstawiono na wykresach (rys. 3 – rys.8). Badania przeprowadzono dla kilku wartości temperatury z zakresu od 22 do 106°C, natomiast w niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań jedynie dla dwóch skrajnych wartości temperatury. Wyniki odpowiadające temperaturze 22°C oznaczone kolorem niebieskim, a wyniki odpowiadające temperaturze 106°C – kolorem czerwonym. Na wszystkich wykresach punkty oznaczają wyniki pomiarów, linie kreskowe – wyniki obliczeń za pomocą modelu udostępnionego przez producenta [11], a linie ciągłe – wyniki obliczeń za pomocą modelu wbudowanego w programie SPICE wraz z wartościami parametrów wyznaczonymi w programie Model Editor [9].

Charakterystyki rozważanego tranzystora zmierzono przy zastosowaniu źródła mierzącego Keithley 2602a, a badany tranzystor umieszczono w komorze badań cieplnych Wamed KBC-65G o pojemności 65 l. Charakterystyki zmierzono metoda impulsową. Impulsy pomiarowe miały okres równy 50 ms i współczynnik wypełnienia wynoszący 1 %. Takie warunki pomiaru umożliwiły pominięcie zjawiska samonagrzewania i wyznaczenie charakterystyk badanego tranzystora przy temperaturze jego wnętrza równej temperaturze otoczenia.

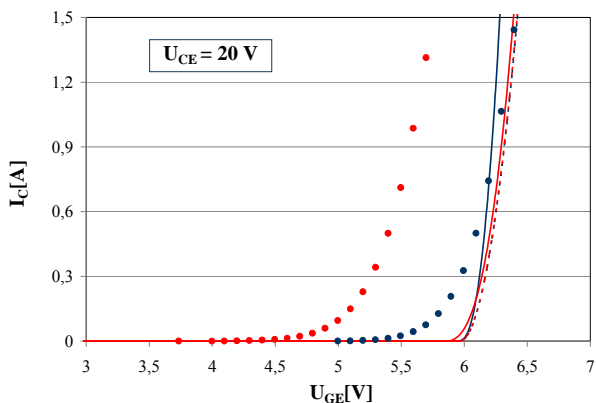
Na rys. 3 przedstawiono charakterystyki przejściowe badanego tranzystora, przy niskim napięciu wyjściowym równym 5 V. Uzyskano jakościową zgodność charakterystyk zmierzonych i obliczonych za pomocą obu rozważanych modeli. Widać, że model wbudowany w programie SPICE nie uwzględnia wpływu temperatury na rozważane charakterystyki, a dodatkowo widoczne jest ograniczenie maksymalnej wartości prądu kolektora, które nie ma odzwierciedlenia na charakterystykach zmierzonych. Z kolei, za pomocą modelu z pracy [11] uzyskano dodatni

współczynnik temperaturowych zmian napięcia  $U_{GE}$ , a z pomiarów uzyskano ujemną wartość tego współczynnika. Świadczy to o niepoprawnym modelowaniu wpływu temperatury na rozważane charakterystyki. Obliczone za pomocą tego modelu napięcie  $U_{GE}$ , przy ustalonej wartości prądu kolektora  $I_C$ , jest większe od wartości zmierzonej nawet o 25%.

Na rys. 4 przedstawiono charakterystyki przejściowe badanego tranzystora przy napięciu  $U_{CE} = 20$  V. Widać, że charakterystyki obliczone za pomocą obu modeli są dobrze dopasowane do charakterystyki zmierzonej w temperaturze pokojowej przy prądzie  $I_C$  przekraczającym 0,5 A. Za rozbieżności między wynikami obliczeń i pomiarów w zakresie mniejszych prądów odpowiada prawdopodobnie pominięcie w modelu efektu podprogowego. Wyraźnie widać, że żaden z rozważanych modeli nie opisuje poprawnie zmian rozważanej charakterystyki przy wyższej wartości temperatury, a obserwowane różnice między obliczonymi i zmierzonymi wartościami napięcia  $U_{GE}$  przy stałym prądzie kolektora, są największe dla małych wartości prądu kolektora i przekraczają nawet 20%.



Rys. 3. Charakterystyki przejściowe badanego tranzystora przy napięciu  $U_{CE} = 5$  V

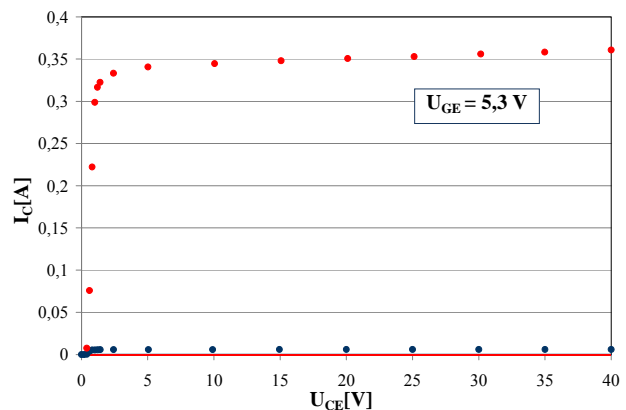


Rys. 4. Charakterystyka przejściowa badanego tranzystora zmierzona przy napięciu  $U_{CE} = 20$  V

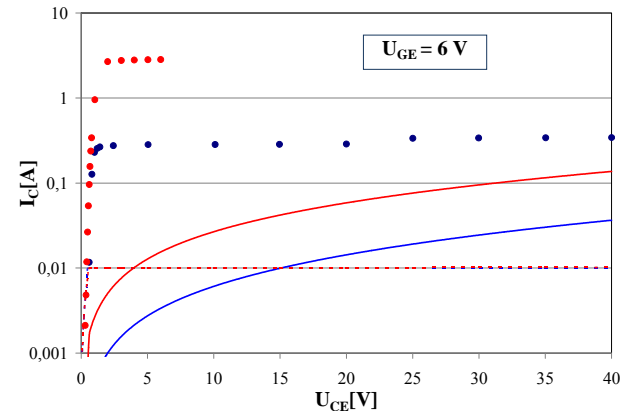
Na rys. 5 przedstawiona została charakterystyka wyjściowa badanego tranzystora pracującego w zakresie podprogowym przy napięciu  $U_{GE} = 5,3$  V (znacznie mniejszym od napięcia progowego  $V_{th} = 6$  V). Widać, że żaden z badanych modeli nie uwzględnia efektu podprogowego. Dlatego obliczone za pomocą obu rozważanych modeli wartości prądu kolektora  $I_C$  są bliskie zero (wynoszą dziesiątki nanoamperów). Tymczasem zmierzone wartości prądu  $I_C$  dochodzą do 370 mA. Oznacza to rozbieżność między wynikami obliczeń i pomiarów nawet na poziomie 6 rzędów wielkości. Warto też zauważyć, że na zmierzone wartości prądu kolektora bardzo silnie wpływa temperatura. Zmiana wartości tego

prądu przy zmianach temperatury w zakresie od 22 do 106°C jest nawet 35-krotna.

Na rys. 6 przedstawiono charakterystkę wyjściową badanego tranzystora wyznaczoną przy napięciu sterującym  $U_{GE} = 6$  V równym katalogowej wartości napięcia progowego. Również w tym zakresie widać dużą rozbieżność między wynikami obliczeń i pomiarów. Różnica ta ma charakter zarówno ilościowy, jak i jakościowy. Porównując wyniki obliczeń wykonanych przy wykorzystaniu modelu Hefnera i uzyskane wyniki pomiarów widać, że różnica między nimi jest nawet dwustukrotna. Dodatkowo widać, że model ten nie uwzględnia wpływu temperatury na rozważane charakterystyki. Z kolei, model ze strony producenta [11] charakteryzuje się znacznie lepszą dokładnością i w badanym zakresie prąd kolektora jest funkcją rosnącą napięcia  $U_{CE}$ . Jednak obliczone wartości prądu kolektora są ponad dwudziestokrotnie mniejsze od wartości zmierzonych.

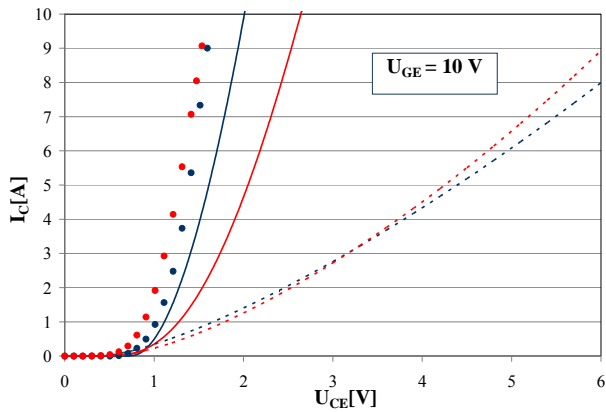


Rys. 5. Charakterystyki wyjściowe badanego tranzystora w zakresie podprogowym ( $U_{GE} = 5,3$  V)



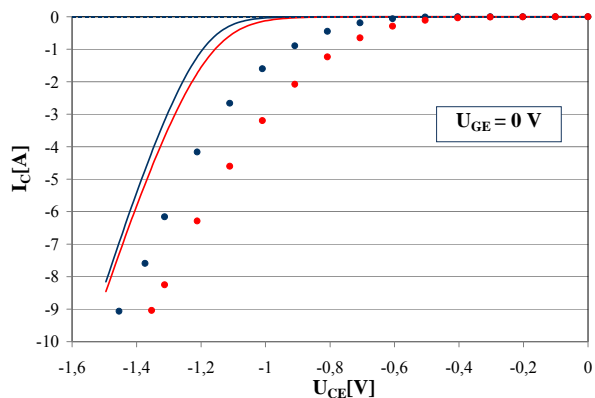
Rys. 6. Charakterystyka wyjściowa badanego tranzystora przy napięciu  $U_{GE} = 6$  V.

Na rys. 7 przedstawiono charakterystyki wyjściowe badanego tranzystora wyznaczone w warunkach silnego sterowania – przy  $U_{GE} = 10$  V. W tym zakresie widać znaczącą poprawę zgodności wyników obliczeń wykonanych za pomocą obu rozważanych modeli, jednak model wbudowany w programie SPICE wykazuje istotnie zawyżone wartości napięcia wyjściowego, które w rozważanym zakresie są nawet trzykrotnie większe od wartości zmierzonych. W przypadku modelu z pracy [11], różnice między obliczonymi i zmierzonymi wartościami napięcia  $U_{CE}$  nie przekraczają 15%. Warto zauważyć, że wzrost temperatury powoduje spadek napięcia  $U_{CE}$ , a na obliczonych charakterystykach obserwuje się przeciwną tendencję.



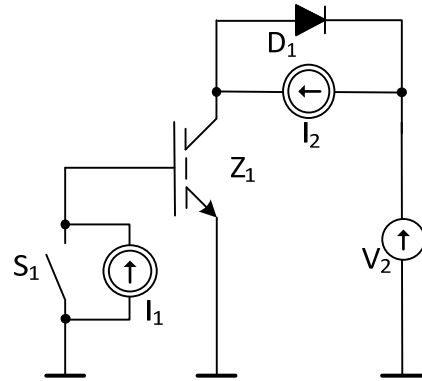
Rys.7 Charakterystyka wyjściowa badanego tranzystora przy silnym sterowaniu ( $U_{GE}=10\text{ V}$ )

Na rys. 8 Przedstawiono wyjściowe charakterystyki wsteczne rozważanego tranzystora. O ich przebiegu decydują właściwości diody antyrównoległej znajdującej się w strukturze badanego tranzystora między kolektorem a emiterem. Wspomniana dioda została uwzględniona w modelu opublikowanym na stronie internetowej producenta, natomiast w modelu Hefnera, wbudowanym w programie SPICE diody tej nie uwzględniono. Dlatego uzyskana za pomocą modelu Hefnera wartość prądu kolektora jest praktycznie równa zero (wykres pokrywa się z osią poziomą). Z kolei, model z pracy [11], mimo uwzględnienia diody antyrównoległej, nie pozwala na uzyskanie dobrej zgodności między wynikami obliczeń i pomiarów. W szczególności charakterystyka obliczona cechuje się zawyżoną wartością napięcia przewodzenia oraz zaniżoną wartością rezystancji szeregowej powodującej bardzo stromy przebieg rozważanej charakterystyki. Różnica między obliczonymi i zmierzonymi wartościami napięcia  $U_{CE}$  dla dużych prądów  $I_C$  i w wysokiej temperaturze, przekracza nawet 30%.



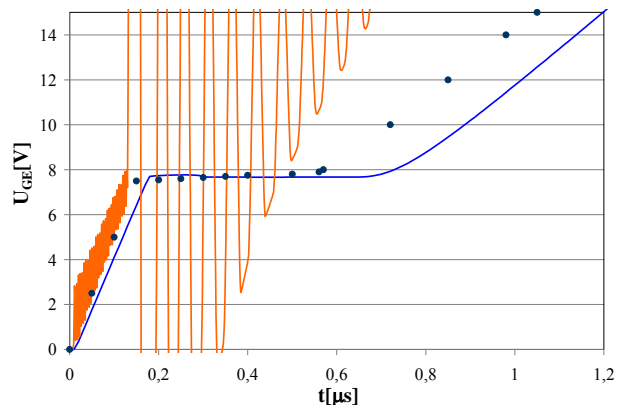
Rys. 8. Wsteczne charakterystyki wyjściowe badanego tranzystora przy zerowym napięciu  $U_{GE}$ .

Uwzględniając fakt, że typowo tranzystory IGBT pracują w układach impulsowych, istotne znaczenie ma poprawne modelowanie właściwości dynamicznych tego elementu. Na rys. 9 przedstawiono układ służący do pomiaru charakterystyki ładowania bramki. Układ ten, opisany szczegółowo w pracy [3], składa się z badanego tranzystora  $Z_1$ , ze źródła prądowego  $I_1$  zapewniającego prąd ładowania bramki, przełącznika  $S_1$  rozwieranego w chwili  $t = 0$ , źródła napięciowego  $V_2$  ustalającego napięcie wyjściowe tranzystora w stanie jego wyłączenia, źródła prądowego  $I_2$  ustalającego prąd kolektora w stanie załączenia tranzystora oraz diody  $D_1$  umożliwiającej przepływ prądu ze źródła  $I_2$  w czasie, gdy tranzystor jest wyłączony.



Rys. 9. Układ do pomiaru krzywej ładowania bramki

Na rys. 10. przedstawiono krzywe ładowania bramki. Model z pracy [9] modeluje charakterystykę poprawnie w zakresie  $t < 0,6\ \mu\text{s}$ . Z kolei, dla charakterystyki obliczonej za pomocą modelu z pracy [11] widoczne są oscylacje numeryczne, a ich amplituda jest szczególnie duża na poziomym odcinku charakterystyki, za który odpowiada pojemność między bramką a kolektorem. Obserwowane oscylacje dyskwalifikują model z pracy [11] w zakresie analiz stanów przejściowych.



Rys.10. Krzywe ładowania bramki

### Podsumowanie

W pracy przeanalizowano właściwości dwóch literaturowych modeli tranzystora IGBT – modelu wbudowanego w programie SPICE i modelu podanego na stronie internetowej producenta. Badania zrealizowano w szerokim zakresie temperatur dla tranzystora typu IRG4PC40UD firmy International Rectifier.

Model wbudowany w programie SPICE nie uwzględnia istnienia diody antyrównoległej w strukturze badanego tranzystora, co skutkuje niepoprawnym wyznaczeniem inwersyjnych charakterystyk wyjściowych tego elementu. Z kolei, efekt progowy nie jest uwzględniony w żadnym z rozważanych modeli, co skutkuje uzyskiwaniem zaniżonych (często znacznie) wartości prądu kolektora przy wartościach napięcia sterującego mniejszych od napięcia progowego. W modelu wbudowanym w programie SPICE praktycznie nie uwzględniono wpływu temperatury na charakterystyki badanego tranzystora, a estymowane wartości parametrów powodują, że nawet przy silnym sterowaniu bramki uzyskuje się znacznie zawyżone wartości napięcia  $U_{CE}$ .

Z kolei, model podany na stronie internetowej producenta pozwala na poprawne wyznaczenie charakterystyk statycznych badanego tranzystora pracującego jedynie w temperaturze pokojowej przy silnym

sterowaniu. Jednak niepoprawnie modelowany jest wpływ temperatury na te charakterystyki. Warto też zauważyć, że model ten nie pozwala na poprawne wyznaczenie krzywej ładowania bramki ze względu na oscylacje numeryczne widoczne na obliczonej charakterystyce. Ustawienie wysokiej dokładności obliczeń powoduje z kolei brak zbieżności obliczeń.

Można zatem stwierdzić, że żaden z rozważanych modeli nie zapewnia dobrej dokładności obliczeń w szerokim zakresie temperatur oraz wartości sygnału sterującego. Dlatego celowe jest podjęcie prac nad sformułowaniem modelu tranzystora IGBT, który będzie pozbawiony wymienionych wad. Wstępne wersje takich modeli, uwzględniające efekt podprogowy zostały już opracowane przez Autorów i były prezentowane w pracach [13, 14].

**Autorzy:** mgr inż. Paweł Górecki, prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, prof. dr hab. inż. Janusz Zarębski, Akademia Morska w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia, E-mail: [p.gorecki@we.am.gdynia.pl](mailto:p.gorecki@we.am.gdynia.pl); [k.gorecki@we.am.gdynia.pl](mailto:k.gorecki@we.am.gdynia.pl); [zarebski@am.gdynia.pl](mailto:zarebski@am.gdynia.pl);

#### LITERATURA

- [1] Rashid M.H., Power Electronic Handbook. Academic Press, Elsevier, 2007.
- [2] Kazimierczuk M.K., Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters. John Wiley & Sons, Ltd, 2008
- [3] Zarębski J., Tranzystory MOS mocy, Fundacja Rozwoju Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2007
- [4] Górecki K., Zarębski J., Influence of MOSFET Model Form on Characteristics of the Boost Converter. Informacje MIDEM, Vol. 41, No. 1, 2011, pp. 1-7.
- [5] Maksimovic D., Stankovic A.M., Thottuvelil V.J., Verghese G.C., Modeling and simulation of power electronic converters, Proceedings of the IEEE, Vol. 89, No. 6, 2001, pp. 898-912.
- [6] Mohan N., Robbins W.P., Undeland T.M., Nilssen R., Mo O., Simulation of Power Electronic and Motion Control Systems – An Overview, Proceedings of the IEEE, Vol. 82, 1994, pp. 1287-1302.
- [7] Singh J., Semiconductor Devices. Basic Principles. John Wiley & Sons, 2001.
- [8] Napieralski A., Napieralska M.: Polowe półprzewodnikowe przyrządy dużej mocy. Wydaw. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995.
- [9] PSpice A/D Reference Guide. Product Version 15.7, 2006
- [10] A.R.Hefner, Jr., An Investigation of the Drive Circuit Requirements for the Power Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT), IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 6, No. 2, April 1991, pp. 208-219.
- [11] Spice Models and Saber Models. Web-site of International Rectifier, <http://www.irf.com/product-info/models/saber/>.
- [12] Shichman H., Hodges D. A., Modeling and simulation of insulated-gate field-effect transistor switching circuits, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. SC-3, 1968, pp. 285-289.
- [13] K. Górecki, P. Górecki, Modelling the Influence of Self-heating on Characteristics of IGBTs, Proceedings of the 21st International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES 2014, 2014, 298-302.
- [14] K. Górecki, P. Górecki, Modelling the Influence of Self-heating on Characteristics of IGBTs in the Sub-threshold Region, International Journal of Microelectronics and Computer Science, Vol. 5, No. 4, 2014, pp. 149-154.