

Wpływ złożoności biblioteki termicznej tranzystora IGBT w programie PLECS na dokładność wyznaczania temperatury jego wnętrza

Streszczenie. W pracy przedstawiono wpływ złożoności biblioteki termicznej tranzystora IGBT w programie PLECS na dokładność wyznaczania temperatury jego wnętrza. Przedstawiono sposób modelowania tranzystora IGBT w programie PLECS, a także sprawdzono jak należy opisywać jego właściwości statyczne by uzyskać dobrą dokładność obliczania temperatury wnętrza tego tranzystora. Wykonano obliczenia i określono wartości błędów względnego wyznaczania przyrostu temperatury wnętrza dla różnych sposobów odwzorowania jego charakterystyki wyjściowej.

Abstract. In the paper, an influence of complexity of a thermal library of IGBT in PLECS on the accuracy of computing its junction temperature is presented. The modeling method of IGBT in PLECS is presented, and it is also showed how to describe the static properties of the IGBT to obtain good accuracy of computing junction temperature of the transistor. Appropriate analyses were carried out in PLECS and the relative error values of determining the IGBT junction temperature increase are determined for various manners of mapping its output characteristics. (*Influence of IGBT thermal library complexity in PLECS on the accuracy of its junction temperature computations*)

Słowa kluczowe: IGBT, PLECS, analiza elektrotermiczna, przekształtniki DC-DC, temperatura wnętrza, zjawiska cieplne
Keywords: IGBT, PLECS, electrothermal simulations, DC-DC converters, junction temperature, thermal phenomena.

Wstęp

W ostatnich latach szczególnie dużą uwagę poświęca się zjawiskom cieplnym występującym w komponentach przekształtników energoelektronicznych [1-5]. Zjawiska te – samonagrzewanie i wzajemne sprzężenia cieplne między komponentami przekształtnika prowadzą do wzrostu temperatur tych komponentów, a w konsekwencji do skrócenia czasu ich życia [6-8].

Przy projektowaniu przekształtników energoelektronicznych, bardzo ważną rolę pełnią symulacje komputerowe [9-12]. Pozwalają one na sprawdzenie poprawności projektu przekształtnika oraz optymalizację warunków jego pracy przed skonstruowaniem tego układu.

Na rynku dostępnych jest wiele programów do symulacji układów elektronicznych i energoelektronicznych, ale w ostatnim czasie szczególnie popularny w zastosowaniach energoelektronicznych staje się program PLECS (Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation) [13-15]. Do jego szczególnych zalet w porównaniu do stosowanego od lat programu SPICE (Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis) [9-10] należą: uproszczenie analiz stanów przejściowych pozwalające na nawet tysiąckrotne skrócenie czasu trwania analizy oraz możliwość wykonania w krótkim czasie analiz elektrotermicznych [1,16]. Czas potrzebny na wykonanie takich analiz dla prostego przekształtnika, np. typu boost, w programie SPICE typowo wynosi około jednego dnia, a nierzadko kończy się niepowodzeniem ze względu na problemy ze zbieżnością.

Współczesne konstrukcje przekształtników energoelektronicznych wymagają elementów przełączających. Jednym z najpopularniejszych spośród nich jest tranzystor IGBT, który jest w pełni sterowalny napięciowo i pozwala na kluczowanie napięć do 10 kV i prądów rzędu kilku kiloamperów [17-18].

Właściwości cieplne tranzystora IGBT w programie PLECS są charakteryzowane przez bibliotekę termiczną, do której użytkownik wprowadza dane w postaci współrzędnych punktów z charakterystyki wyjściowej w różnych temperaturach pracy tranzystora oraz zależności strat energii w procesach włączania i wyłączania tranzystora od: przełączonego napięcia, przełączonego prądu oraz temperatury wnętrza tranzystora. Dane te są dostępne w kartach katalogowych tranzystorów IGBT,

jednak zarówno producenci oprogramowania jak i elementów nie podają liczby punktów, których współrzędne należy wprowadzić, żeby zapewnić dobrą dokładność obliczeń. Na podstawie współrzędnych wprowadzonych punktów wyliczane są straty mocy w elemencie, które stanowią daną wejściową do modelu termicznego. Do biblioteki termicznej należy również wprowadzić parametry modelu termicznego w postaci sieci Cauera lub sieci Fostera [6].

Niezależnie od zastosowanego środowiska symulacyjnego istotnym zagadnieniem jest znalezienie kompromisu pomiędzy liczbą wprowadzonych danych a dokładnością obliczeń. Nadmiar wprowadzonych danych wejściowych może powodować wydłużenie procedury estymacji oraz czasu trwania obliczeń, a nierzadko też problemy ze zbieżnością.

W niniejszej pracy przeanalizowano wpływ ilości wprowadzonych danych do biblioteki termicznej tranzystora IGBT w programie PLECS na dokładność obliczania temperatury jego wnętrza przy pracy tego elementu w układzie przełącznika.

Modelowanie tranzystorów IGBT w programie PLECS

Model tranzystora IGBT w programie PLECS jest modelem elektrotermicznym, co oznacza, że składają się na niego modele elektryczny i termiczny [2]. Właściwości elektryczne tranzystora IGBT modelowane są bez uwzględnienia zjawisk dynamicznych, a w zakresie właściwości statycznych uwzględniona została jedynie charakterystyka przy silnymysterowaniu tranzystora. Modelowana jest ona przy użyciu modelu odcinkami liniowego o dwóch parametrach: napięciu przewodzenia i rezystancji szeregowej. To podejście jest znane z literatury i jest wykorzystywane m. in. w modelach uśrednionych wykorzystywanych do analiz przekształtników DC-DC [19].

Z kolei, właściwości termiczne tranzystora mogą być modelowane przy wykorzystaniu sieci Cauera albo sieci Fostera. Daną wejściową do tych modeli jest przebieg czasowy mocy traconej w rozważanym elemencie. W programie PLECS przebieg ten wyznaczany jest z wykorzystaniem danych o stratach zarówno w trakcie przewodzenia jak i w trakcie przełączania tranzystora zawartych w jego bibliotece termicznej, uprzednio

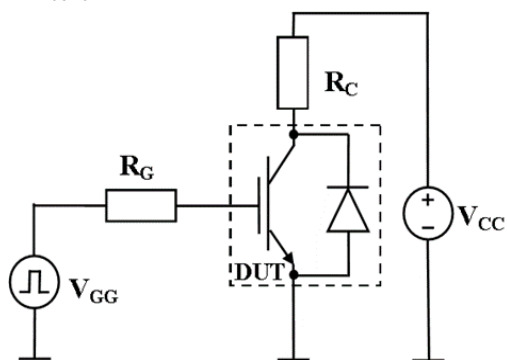
utworzonej w tym programie. Straty w trakcie przewodzenia są wyznaczane przy wykorzystaniu funkcji interpolującej wprowadzone przez użytkownika punkty z charakterystyki wyjściowej tranzystora IGBT zmierzonej w zakresie silnego sterowania. Straty związane z przełączaniem są wyznaczane przy wykorzystaniu funkcji interpolującej wprowadzone przez użytkownika punkty z zależności energii traconej w trakcie włączania i wyłączenia w funkcji przewodzonego prądu, przełączonego napięcia oraz temperatury wnętrza tranzystora. Możliwe jest poszerzenie biblioteki o inne, potrzebne w obliczeniach zależności np. zależność energii traconej w trakcie włączania lub wyłączenia tranzystora od rezystancji dołączonej w obwodzie bramki. Wszystkie potrzebne dane wejściowe do biblioteki termicznej użytkownik może znaleźć w danych katalogowych modelowanego elementu.

Istotną różnicą pomiędzy elektrotermicznymi modelami tranzystora IGBT w programach PLECS i SPICE jest brak pełnego sprzężenia między modelem elektrycznym i termicznym w programie PLECS. Wartość mocy traconej w tranzystorze obliczona w modelu termicznym może bardzo istotnie różnić się od mocy wyznaczonej przy użyciu modelu elektrycznego. Takie podejście jest dopuszczalne z inżynierskiego punktu widzenia, ponieważ w typowych zastosowaniach energoelektronicznych wpływ spadku napięcia na tranzystorze jest pomijalny z punktu widzenia charakterystyk elektrycznych przekształtnika. Z kolei, dokładność obliczeń strat mocy w tranzystorze w kluczowy sposób wpływa na dokładność obliczeń temperatury wnętrza tranzystora IGBT. Z tego powodu dokładność obliczeń strat mocy w tranzystorze IGBT występującym w przekształtniku energoelektronicznym musi być znacznie wyższa do obliczeń temperatury wnętrza tranzystora niż do analizy właściwości elektrycznych całego przekształtnika.

Drugą istotną różnicą pomiędzy elektrotermicznymi modelami tranzystora IGBT w programach PLECS i SPICE, jest pominięcie w programie PLECS innych zakresów pracy tranzystora IGBT niż zakres nasycenia. Pozwala to na znaczne uproszczenie modelu, jednak z tego powodu program PLECS nadaje się do analizy wyłącznie układów impulsowych.

Rozważany układ

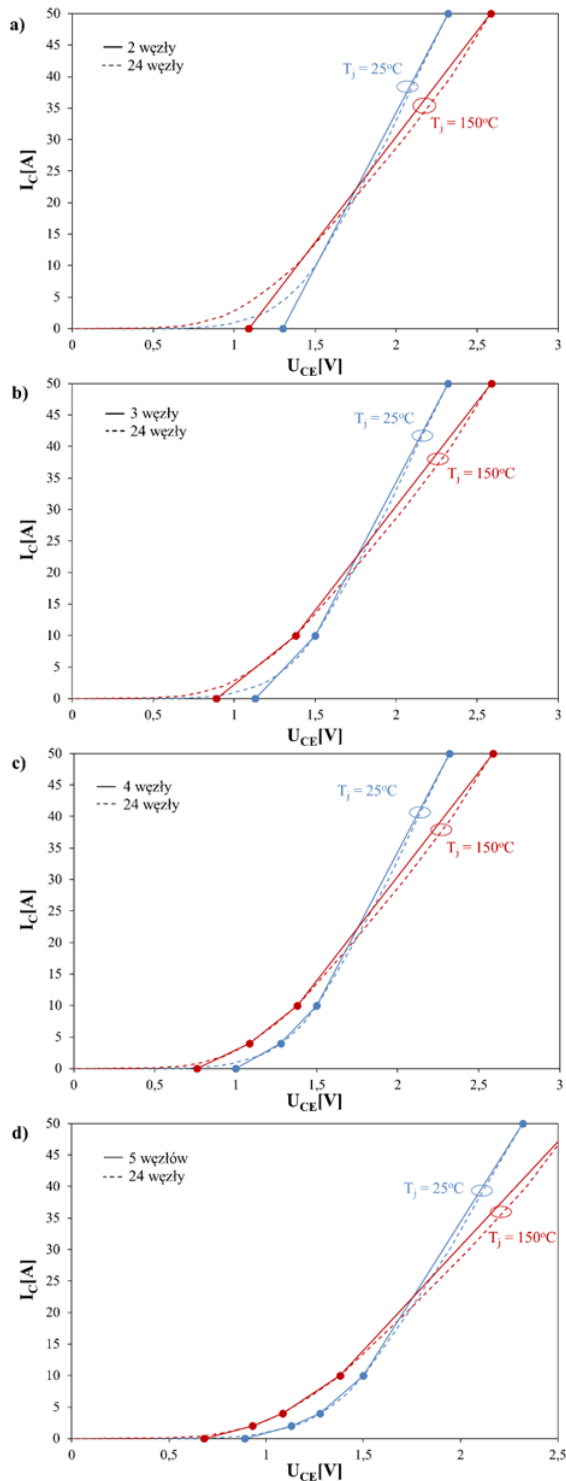
Aby zweryfikować wpływ liczby węzłów funkcji interpolującej charakterystykę wyjściową tranzystora IGBT na dokładność obliczeń temperatury wnętrza tego elementu przeprowadzono symulacje przełącznika z obciążeniem rezystancyjnym.



Rys. 1. Schemat rozważanego układu

Jak wynika z przedstawionych, zarówno w danych katalogowych jak i w pracy [5] charakterystyk tego tranzystora IGBT, jego właściwości silnie zależą od temperatury jego wnętrza, a jej wartość jest zależna od warunków chłodzenia, które mogą być charakteryzowane przez rezystancje i pojemności termiczne [20, 21]. W

obliczeniach rozważono dwa przypadki warunków chłodzenia: tranzystor pracujący bez radiatora oraz tranzystor umieszczony na radiatorze. W obliczeniach przyjęto następujące wartości rezystancji termicznej odpowiadające tym warunkom chłodzenia: 30 K/W dla tranzystora pracującego bez radiatora i 5 K/W dla tranzystora umieszczonego na radiatorze. Ze względu na fakt, że w niniejszej pracy analizowana jest praca układu w stanie termicznie ustalonym, przy przeprowadzaniu obliczeń zastosowano metodę jednej niefizycznej termicznej stałej czasowej [16].



Rys. 2. Obliczone charakterystyki wyjściowe rozważanego tranzystora IGBT dla różnych wartości liczby węzłów interpolacyjnych dla dwóch temperatur jego wnętrza

Wyniki obliczeń

Dla obu rozważanych warunków chłodzenia, przeprowadzono obliczenia temperatury wnętrza, wyznaczając wartość błędu względnego obliczania jej przyrostu, dla równych wartości przewodzonego prądu kolektora, częstotliwości przełączania rozważanego tranzystora, rezystancji w obwodzie bramki oraz temperatury otoczenia. Obliczenia te wykonano kilkakrotnie, za każdym razem zwiększając liczbę węzłów interpolacyjnych, co zostało przedstawione na rys. 2. Położenie węzłów interpolacyjnych na charakterystykach zostało wybrane arbitralnie.

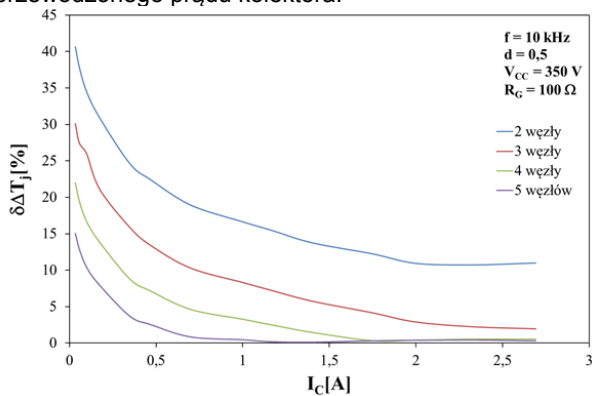
Do obliczeń przedstawionych na każdym z rysunków od 2a do 2d utworzono nową bibliotekę termiczną elementu. Aby ocenić dokładność modelowania charakterystyk tranzystora IGBT przy wykorzystaniu każdej z nich obliczano każdorazowo błąd względny obliczania przyrostu temperatury wnętrza obliczając zgodnie ze wzorem:

$$(1) \quad \delta\Delta T_j = \frac{|T_{jwz} - T_{jobl}|}{T_{jwz} - T_a}$$

gdzie: T_{jwz} jest wartością temperatury wnętrza obliczoną przy użyciu modelu wykorzystującego 24 węzły interpolacyjne w bibliotece termicznej tranzystora, T_{jobl} – obliczona wartość temperatury wnętrza przy użyciu modelu o mniejszej ilości węzłów interpolacyjnych w bibliotece termicznej, a T_a to wartość temperatury otoczenia, dla której wykonano obliczenia.

Wyniki obliczeń przedstawiono poniżej. Na rys. 3-5 przedstawiono wyniki dla tranzystora pracującego bez radiatora, a na rys. 6 – dla tranzystora umieszczonego na radiatorze.

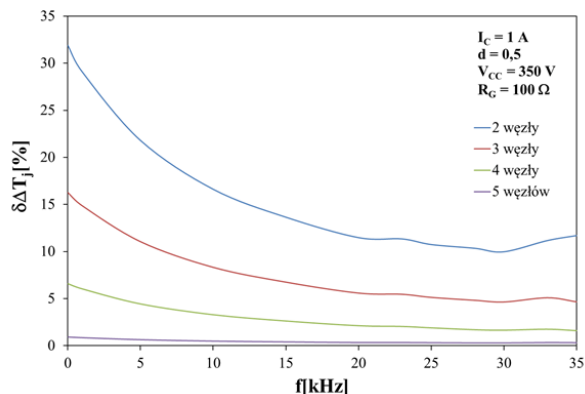
Na rys. 3 przedstawiono obliczone wartości błędu względnego wyznaczania przyrostu temperatury wnętrza tranzystora IGBT pracującego bez radiatora w funkcji przewodzonego prądu kolektora.



Rys. 3. Obliczone wartości błędu względnego wyznaczania przyrostu temperatury wnętrza tranzystora IGBT w funkcji przewodzonego prądu kolektora

Jak wynika z przedstawionych na rys. 3 wyników obliczeń, błąd względny wyznaczania przyrostu temperatury wnętrza tranzystora IGBT jest malejącą funkcją przewodzonego prądu. Wartość opisywanego błędów maleje wraz ze wzrostem liczby węzłów interpolacyjnych – z 11% dla najniższej rozważanej wartości przewodzonego prądu do zaledwie 0,3% dla 5 węzłów interpolacyjnych przy $I_c = 2,5$ A.

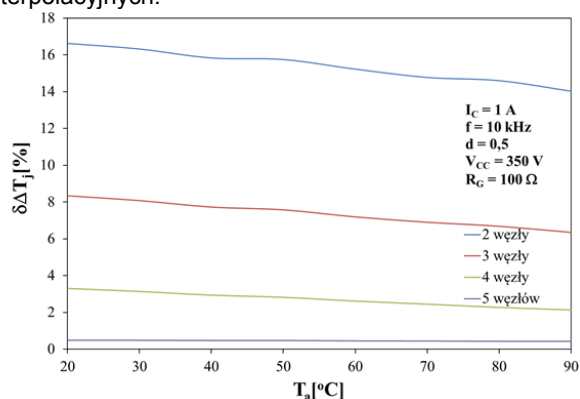
Na rys. 4 przedstawiono obliczone wartości błędu względnego wyznaczania przyrostu temperatury wnętrza tranzystora IGBT pracującego bez radiatora w funkcji częstotliwości jego przełączania.



Rys. 4. Obliczone wartości błędu względnego wyznaczania przyrostu temperatury wnętrza tranzystora IGBT w funkcji częstotliwości jego przełączania

Błąd względny wyznaczania przyrostu temperatury wnętrza tranzystora IGBT jest malejącą funkcją częstotliwości jego przełączania, co wynika z rezultatów obliczeń przedstawionych na rys. 4. Wartość opisywanego błędów maleje wraz ze wzrostem liczby węzłów interpolacyjnych. Przy częstotliwości przełączania równej 35 kHz – z 11,7% dla 2 węzłów interpolacyjnych do zaledwie 0,3% dla 5 węzłów interpolacyjnych.

Zgodnie z rys. 5, błąd względny wyznaczania przyrostu temperatury wnętrza tranzystora IGBT jest malejącą funkcją temperatury otoczenia. Wartość opisywanego błędów maleje wraz ze wzrostem liczby węzłów interpolacyjnych. Przy częstotliwości przełączania równej 10 kHz – z 16,6% dla 2 węzłów interpolacyjnych do zaledwie 0,5% dla 5 węzłów interpolacyjnych.

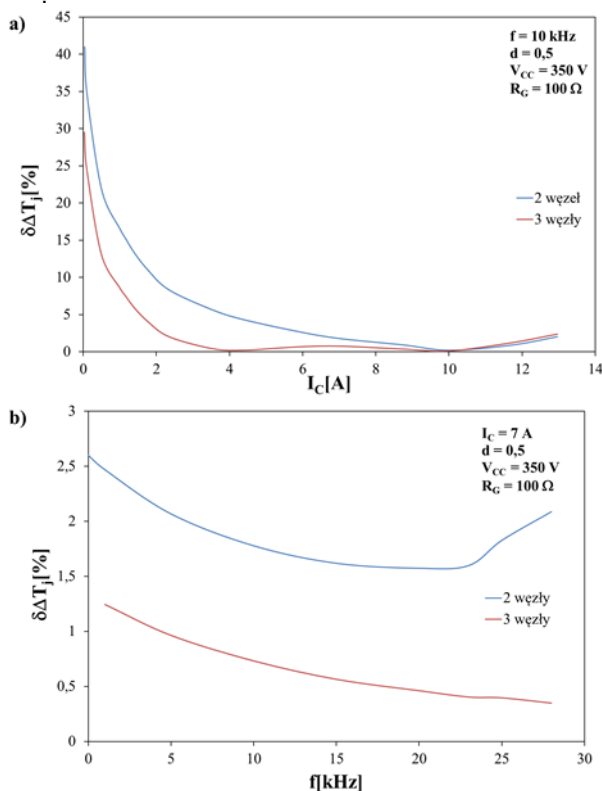


Rys. 5. Obliczone wartości błędu względnego wyznaczania przyrostu temperatury wnętrza tranzystora IGBT w temperatury otoczenia

Jak wynika z charakterystyk przedstawionych na rys. 6, aby uzyskać niską (poniżej 5%) wartość błędów wystarcza zastosować mniejszą liczbę węzłów interpolacyjnych niż w przypadku tranzystora pracującego bez radiatora. Drobne oscylacje widoczne na rys.6a w zakresie prądów powyżej 5 A wynikają z pozycji węzłów interpolacyjnych na charakterystyce wyjściowej tranzystora IGBT

Przedstawione na rys. 3 – 6 wyniki dowodzą, że wykorzystanie funkcji odcinkami linowej złożonej z dwóch odcinków do odwzorowania charakterystyki wyjściowej tranzystora IGBT w jego modelu elektrotermicznym może prowadzić do słabej dokładności obliczeń temperatury jego wnętrza. Jest to szczególnie widoczne dla słabych warunków chłodzenia elementu. Jak wynika z przedstawionych rezultatów, wykorzystanie 5 odcinków w funkcji odcinkami liniowej do modelowania charakterystyki wyjściowej tranzystora IGBT wystarcza, by błąd względny

wyznaczania przyrostu temperatury jego wnętrza w zakresie temperatur powyżej 50°C wynosił mniej niż 2%.



Rys. 6. Obliczone wartości błędu względnego wyznaczania przyrostu temperatury wnętrza tranzystora IGBT umieszczonego na radiatorze w funkcji: przewodzonego prądu kolektora (a) oraz częstotliwości (b)

Podsumowanie

W niniejszej pracy przeanalizowano wpływ formułowania biblioteki termicznej tranzystora IGBT w programie PLECS na dokładność obliczeń temperatury wnętrza tego elementu w tym programie. Uzyskane wyniki dowodzą, że odwzorowanie charakterystyki wyjściowej przy zastosowaniu funkcji odcinkami liniowej wymaga więcej niż dwóch odcinków, a liczba wymaganych odcinków jest ściśle powiązana z warunkami jego chłodzenia. Dlatego przy formułowaniu elektrotermicznego modelu tranzystora IGBT należy mieć na uwadze warunki chłodzenia i możliwą ich zmienność, gdyż niedopatrzania w tym zakresie mogą prowadzić do dużej wartości błędu obliczania przyrostu temperatury wnętrza tego elementu (gdy odcinków jest za mało) albo przemodelowania (gdy odcinków jest zbyt dużo).

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr 2018/31/N/ST7/01818 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

Autorzy: dr inż. Paweł Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 85, 81-225 Gdynia, E-mail: p.gorecki@we.umg.edu.pl; mgr inż. Agata Bielecka, Katedra Automatyki Okrętowej, Uniwersytet Morski w Gdyni, E-mail: a.bielecka@we.umg.edu.pl; dr hab. inż. Daniel Wojciechowski, Katedra Elektrotechniki, Systemów Sterowania i Informatyki, Politechnika Gdańska, Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: daniel.wojciechowski@pg.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Storti-Gajani G., Brambilla A., Premoli A., Electrothermal dynamics of circuits: Analysis and simulations, *IEEE Trans. on Cir. and Syst. I-Fundamental Theory and App.*, 48 (2001), n. 8, 997-1005
- [2] Bryant A., Parker-Allotey N.A., Hamilton D., Swan I., Mawby P., Ueta T., Nishijima T., Hamada K., A Fast Loss and Temperature Simulation Method for Power Converters, Part I: Electrothermal Modeling and Validation, *IEEE Trans. on Power Electr.*, 27 (2012), n. 1, 248-257
- [3] Azer P., Rodriguez R., Guo J., Gareau J., Bauman J., Ge H., Bilgin B., Emadi A. Time-Efficient Integrated Electrothermal Model for a 60-kW Three-Phase Bidirectional Synchronous DC-DC Converter, *IEEE Trans. on Industry App.*, 56 (2020), n. 1, 654-668
- [4] Detka K., Górecki K., Zarębski J., Modeling Single Inductor DC-DC Converters With Thermal Phenomena in the Inductor Taken Into Account, *IEEE Trans. on Power Electron.*, 32 (2017), n. 9, 7025-7033
- [5] Górecki P., Górecki K., Influence of Thermal Phenomena on dc Characteristics of the IGBT, *Int. Jour. of Electr. and Telecom.*, 64 (2018), n. 1, 71-76
- [6] Górecki K., Zarębski J., Górecki P., Ptak P., Compact Thermal Models of Semiconductor Devices - a Review, *Int. Jour. of Electr. and Telecom.*, 65 (2019), n. 2, 151-158
- [7] Górecki P., Górecki K., Kisiel R., Myśliwiec M., Thermal Parameters of Monocrystalline GaN Schottky Diodes, *IEEE Trans. on Electron Dev.*, 66 (2019), n. 5, 2132-2138
- [8] Castellazzi A., Gerstenmaier Y.C., Wachutka G.K.M., Reliability analysis and modeling of power MOSFETs in the 42-V-PowerNet, *IEEE Trans. on Power Electr.*, 21 (2006), n. 3, 603-612
- [9] Rashid M.H., *Spice for Power Electronics and Electric Power*, CRC press, 2006.
- [10] Wilamowski B.M., Jaeger R.C., *Computerized Circuit Analysis Using SPICE Programs*, New York (NY), USA: McGraw Hill, 1997.
- [11] Mohan N., Robbins W.P., Undeland T.M., Nilssen R., Mo O., Simulation of Power Electronic and Motion Control Systems – An Overview, *Proc. of the IEEE*, 82 (1994), 1287-1302
- [12] Vladimirescu A., Shaping the History of SPICE, *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 3 (2011), n. 2, 36-39
- [13] PLECS. *The simulation platform for power electronic systems*, PLEXIM, 2019
- [14] Liu Y.S., Mantooth H.A., Balda J.C., Farnell C., A Variable Inductor Based LCL Filter for Large-Scale Microgrid Application, *IEEE Trans. on Power Electronics*, 33 (2018), n. 9, 7338-7348
- [15] Górecki P., Wojciechowski D., Accurate computation of IGBT junction temperature in PLECS, *IEEE Trans. on Electron Dev.*, 67 (2020), n. 7, 2865-2871,
- [16] Górecki K., Zarębski J., The Method of a Fast Electrothermal Transient Analysis of Single-Inductance DC-DC Converters, *IEEE Trans. on Power Electr.*, 28 (2012), n. 9, 4005-4022
- [17] Baliga B.J., Adler M.S., Love R.P., Gray P.V., Zommer N.D., The insulated gate transistor - A new 3-terminal MOS-controlled bipolar power device, *IEEE Trans. Electron Devices*, 31 (1984), n. 6, 821-828
- [18] Iwamuro N., Laska T., IGBT History, State-of-the-Art, and Future Prospects, *IEEE Trans. on Electron Devices*, 64 (2017), n. 3, 741-752
- [19] Górecki P., Application of the averaged model of the diode-transistor switch for modelling characteristics of a boost converter with an IGBT, *Int. Jour. of Electr. and Telecom.*, 66 (2020), n. 3, pp. 555-560.
- [20] Janicki M., Sarkany Z., Napieralski A., Impact of nonlinearities on electronic device transient thermal responses, *Microelectronics Journal*, 45(2014), 1721-1725
- [21] Górecki K., Górecki P., Nonlinear compact thermal model of the IGBT dedicated to SPICE, *IEEE Trans. on Power Electr.*, 37(2020), n. 12, 13420 - 13428