

Uśredniony elektrotermiczny model przetwornicy boost uwzględniający nieliniowość dławika

Streszczenie. W pracy zaproponowano nową postać uśrednionego elektrotermicznego modelu przetwornicy boost dedykowanego do zastosowania w programie SPICE. Do opisu właściwości rozważanej przetwornicy zastosowano opracowany uprzednio przez autora elektrotermiczny uśredniony model klucza diodowo-tranzystorowego oraz nowy uśredniony nieliniowy elektrotermiczny model dławika. Zaprezentowano postać nowego modelu dławika oraz przedstawiono wyniki obliczeń nieizotermicznych charakterystyk rozważanej przetwornicy uzyskanych za pomocą nowego modelu dławika oraz modeli uśrednionych tej przetwornicy znanych z literatury.

Abstract. In the paper the new form of the average electrothermal model of the boost converter dedicated for SPICE is proposed. To the description of the properties of considered converter the previously elaborated by the author the electrothermal average model of the diode-transistor switch and new average non-linear electrothermal model of the choking-coil are applied. The form of the new model of the choking-coil is presented and some results of calculations of non-isothermal characteristics of considered converter obtained by means of the new model of choking-coil and average models of this converter well-known from the literature, are presented. (The average electrothermal model of the boost converter taking into account the nonlinearity of the choking-coil)

Słowa kluczowe: modele uśrednione, przetwornica boost, dławik, samonagrzewanie, SPICE

Keywords: average models, boost converter, choking-coil, self-heating, SPICE

Wprowadzenie

Dławikowa przetwornica boost należy do najczęściej wykorzystywanych podukładów impulsowych układów zasilających urządzenia elektroniczne [1, 2]. Istotnym składnikiem tej przetwornicy jest dławik z rdzeniem ferromagnetycznym [3]. Właściwości tego układu analizowano w licznych pracach [4, 5, 6, 7], ale skupiono uwagę na właściwościach elementów półprzewodnikowych, natomiast pominięto właściwości elementów indukcyjnych. W pracach [8, 9, 10] wykazano, że nieliniowość zależności $L(i)$ dławika istotnie wpływa na przebieg charakterystyk rozważanej przetwornicy.

W cytowanych powyżej pracach do wyznaczania charakterystyk przetwornic dc-dc wykorzystywano klasyczną metodę analizy stanów przejściowych [5], która jest czasochłonna i często występują w niej problemy z uzyskaniem zbieżności obliczeń [11]. W pracach wielu autorów, np. [1, 6, 12, 13] zaproponowano tzw. uśrednione modele przetwornic dc-dc, w których pomija się nieliniowości i inercję elementów półprzewodnikowych. W szczególności, w pracach [1, 6, 14, 15] opisano uśrednione modele klucza diodowo-tranzystorowego dla programu SPICE.

W czasie pracy przetwornic dc-dc temperatury wnętrza ich elementów składowych wzrastają na skutek zjawiska samonagrzewania. Uwzględnienia tego w analizach komputerowych wymaga zastosowania specjalnych modeli elektrotermicznych [16, 17]. W pracy [18] zaproponowano elektrotermiczny uśredniony model klucza diodowo-tranzystorowego dla programu SPICE.

W niniejszej pracy zaproponowano uśredniony elektrotermiczny model dławika dedykowany do elektrotermicznej analizy przetwornic dc-dc. Model ten uwzględnia zjawiska magnetyczne i ciepłe w dławiku oraz dodatkowo straty mocy w rdzeniu i w uzwojeniu. Opracowany model zastosowano do obliczenia nieizotermicznych charakterystyk przetwornicy boost i porównano uzyskane wyniki z wynikami obliczeń uzyskanych za pomocą uśrednionych modeli klucza diodowo-tranzystorowego i liniowego modelu dławika.

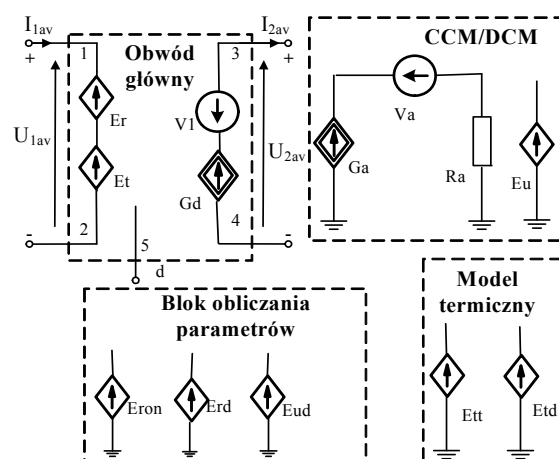
W rozdziale drugim przedstawiono postać uśrednionego modelu klucza diodowo-tranzystorowego. W rozdziale trzecim opisano uśredniony elektrotermiczny model dławika. Rozdział czwarty zawiera wyniki obliczeń

charakterystyk przetwornicy boost uzyskane przy wykorzystaniu prezentowanego modelu oraz modeli zaczerpniętych z literatury.

Uśredniony elektrotermiczny model klucza diodowo-tranzystorowego

W pracach [1, 6] przedstawiono uśrednione modele klucza diodowo-tranzystorowego dla programu SPICE, charakteryzujące się zróżnicowaną dokładnością. Jeden z tych modeli umożliwia zastosowanie go do analizy przetwornic dc-dc pracujących zarówno w trybie CCM, jak DCM, ale pomija straty w elementach półprzewodnikowych.

W pracy [18] zaproponowano elektrotermiczny uśredniony model klucza diodowo-tranzystorowego uwzględniający straty energii na włączonych elementach półprzewodnikowych i zjawisko samonagrzewania, a jednocześnie umożliwiającą wyznaczanie charakterystyk przetwornic dc-dc pracujących zarówno w trybie CCM, jak i DCM. Reprezentację obwodową tego modelu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Struktura obwodowa liniowego uśrednionego elektrotermicznego modelu klucza diodowo-tranzystorowego

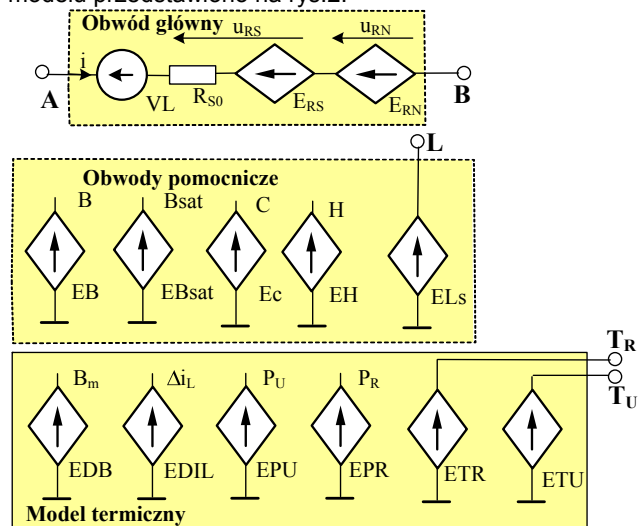
Na rysunku tym szeregowo połączone sterowane źródła napięciowe E_t oraz E_r reprezentują tranzystor unipolarny lub bipolarny, którego zaciski wyjściowe podłączone są do wyprowadzeń 1 i 2, a zacisk sterujący jest podłączony do wyprowadzenia 5, natomiast dioda (włączona między

wyprowadzenia 3 i 4) – przez sterowane źródło prądowe Gd. Niezależne źródło napięciowe V1 o zerowej wydajności służy do monitorowania wartości średniej prądu diody, zaś elementy Ga, Ra, Va, Eu stanowią obwód pomocniczy, którego zadaniem jest określenie, czy przetwornica zawierająca rozważany klucz pracuje w trybie CCM, czy też DCM. Sterowane źródła napięciowe Eron, Erd, Eud modelują temperaturowe zmiany odpowiednio rezystancji włączenia tranzystora R_{ON} , rezystancji szeregowej diody R_D oraz napięcia U_D na spolaryzowanym w kierunku przewodzenia złączu p-n. Wartości temperatury wnętrza diody i tranzystora są obliczane za pomocą źródeł napięciowych Etd oraz Ett. Szczegółowy opis wydajności źródeł sterowanych zawartych w rozważanym modelu przedstawiono w pracy [18].

Zastosowanie przedstawionego modelu umożliwia wyznaczenie nieizotermicznych charakterystyk przetwornic dławikowych przy wykorzystaniu stałoprądowej analizy w programie SPICE.

Uśredniony elektrotermiczny model dławika

Uśredniony elektrotermiczny model dławika został sformułowany na bazie elektrotermicznego modelu tego elementu prezentowanego m.in. w pracach [9, 10]. W odróżnieniu od cytowanych prac, model uśredniony odnosi się do wartości średnich napięć i prądów w układzie, a nie do ich wartości chwilowych. Reprezentację obwodową tego modelu przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Reprezentacja obwodowa elektrotermicznego uśrednionego modelu dławika

W modelu tym występują 3 bloki: obwód główny, obwody pomocnicze oraz model termiczny. Zaciski A oraz B obwodu głównego są zaciskami dławika. Dodatkowo, na zacisku L udostępniane jest napięcie odpowiadające indukcyjności dławika, na zacisku T_U – temperatura uzwojenia dławika, na zacisku T_R – temperatura rdzenia dławika.

W obwodzie głównym źródło napięciowe VL o zerowej wydajności monitoruje prąd dławika, rezystor R_{S0} reprezentuje rezystancję uzwojenia dla prądu stałego w temperaturze odniesienia T_0 , a sterowane źródło napięciowe E_{RS} opisuje wpływ temperatury oraz strat w rdzeniu na rezystancję szeregową dławika. Napięcie na źródle E_{RS} opisane jest wzorem

$$(1) \quad E_{RS} = u_{RS0} \cdot \alpha_\rho \cdot (T_U - T_0) + \frac{P_R}{i}$$

gdzie i oznacza średni prąd dławika, α_ρ temperaturowy współczynnik zmian rezystywności miedzi, T_U - temperaturę

uzwojenia, P_R – moc strat w rdzeniu, a u_{RS0} – napięcie na rezystorze R_{S0} .

Z kolei, sterowane źródło napięciowe E_{RN} modeluje zjawisko naskórkowości za pomocą zależności

$$(2) \quad E_{RN} = \frac{l}{d_D} \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \rho \cdot f \cdot (1 + \alpha_p \cdot (T_U - T_0))} \cdot \frac{\Delta i_L}{2}$$

gdzie d_D oznacza średnicę drutu nawojowego, ρ – rezystywność miedzi, l – długość uzwojenia, μ_0 – przenikalność magnetyczną próżni, zaś Δi_L – wartość międzyszczytowa prądu dławika.

W bloku obwodów pomocniczych sterowane źródła napięciowe służą do wyliczania wartości natężenia pola magnetycznego H, indukcji pola magnetycznego B, indukcji nasycenia B_{sat} oraz wielkości pomocniczej C. Opis wydajności tych źródeł podano w pracy [9].

Sterowane źródło napięciowe E_{LS} modeluje zależność indukcyjności dławika L od prądu, częstotliwości i temperatury. Napięcie na źródle E_{LS} opisane jest wzorem

$$(3) \quad E_{LS} = \frac{w_s}{1 + f/f_g} \cdot \frac{z^2 \cdot S_{Fe} \cdot B_{sat} \cdot A}{l_{Fe} \cdot (|H| + A)^2 + A \cdot B_{sat} \cdot l_p / \mu_0}$$

gdzie z oznacza liczbę zwojów w uzwojeniu dławika, S_{Fe} – zastępcze pole przekroju rdzenia, l_{Fe} – długość drogi magnetycznej w rdzeniu, A – parametr pola opisujący nachylenie krzywej pierwotnego magnesowania, l_p – długość szczeliny powietrznej, w_s – współczynnik sprzężenia, f – częstotliwość prądu dławika, f_g – częstotliwość graniczną rdzenia, przy której jego przenikalność magnetyczna maleje dwukrotnie.

Model termiczny umożliwia obliczenie temperatury rdzenia T_R oraz uzwojenia T_U . Do wyznaczania tych nadwyżek wykorzystuje się skupiony model termiczny, w którym sterowane źródła napięciowe ETU oraz ETR służą do obliczania wartości wymienionych temperatur przy uwzględnieniu zjawiska samonagrzewania w rdzeniu i w uzwojeniu oraz wzajemnych sprzężeń termicznych między rdzeniem a uzwojeniem. Wartości mocy wydzielanej w rdzeniu P_R i w uzwojeniu P_U , występujące w opisie wydajności źródeł ETU oraz ETR są wyznaczane za pomocą sterowanych źródeł napięciowych EPU oraz EPR. Moce te opisane są wzorami

$$(4) \quad P_U = u_{RS} \cdot i + u_{RN} \cdot \frac{\Delta i_L}{2}$$

$$(5) \quad P_R = V_e \cdot P_{V0} \cdot f^\alpha B_m^\beta \cdot (2 \cdot \pi)^\alpha \cdot (0,6336 - 0,1892 \cdot \ln(\alpha))$$

Występujące we wzorze (4) napięcia u_{RS} oraz u_{RN} zaznaczone na rys.2. Wartość międzyszczytowa prądu Δi_L oraz amplituda indukcji B_m odpowiadają wartościom napięcia na zaciskach sterowanych źródeł napięciowych EDB oraz EDIL. Wartości tych wielkości dane są następującymi wzorami

$$(6) \quad \Delta i_L = \frac{u_{we} - V_{on}}{L \cdot f} \cdot i_L \cdot d$$

$$(7) \quad B_m = \frac{L}{z \cdot S_{Fe}} \cdot \frac{\Delta i_L}{l_p}$$

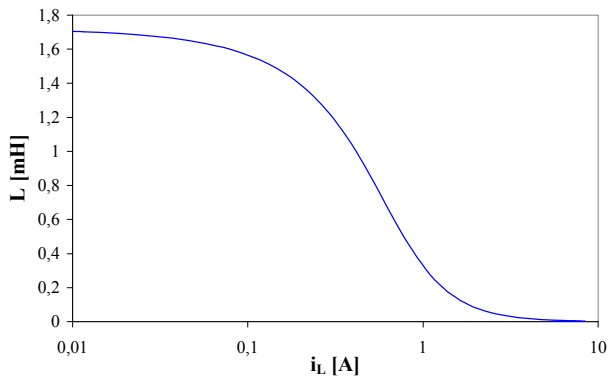
gdzie u_{we} oznacza napięcie zasilania przetwornicy, V_{on} – napięcie na włączonym tranzystorze zawartym w przetwornicy (napięcie na źródle Et z rys.1), d – współczynnik wypełnienia sygnału sterującego przetwornicę.

Wyniki obliczeń

Przedstawiony w poprzednim rozdziale uśredniony model dławika zastosowano do wyznaczenia charakterystyk przetwornicy boost zawierającej tranzystor MOSFET typu IRF540, diodę Schottky'ego 1N5822, kondensator wyjściowy o pojemności $C_O = 47 \mu F$ oraz dławik

zawierający 20 zwojów drutu miedzianego w emalii o średnicy 0,8 mm nawiniętego na toroidalnym rdzeniu ferrytowym. Badany układ zasilany jest napięciem stałym o wartości 12 V, a częstotliwość sygnału sterującego wynosi $f = 100$ kHz.

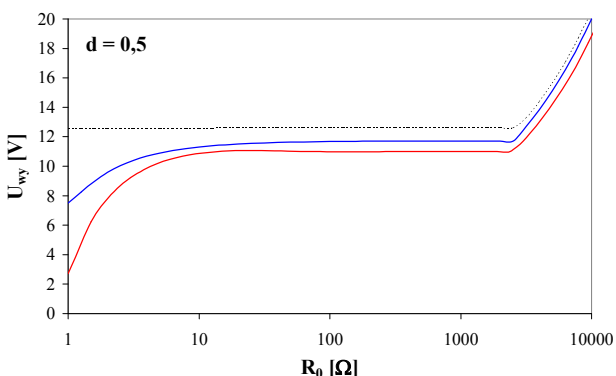
Na rys. 3 przedstawiono obliczoną zależność indukcyjności rozważanego dławika od prądu. Jak można zauważyć, rozważana zależność jest funkcją silnie malejącą, a zakres zmian indukcyjności obejmuje przedział od kilku μH do 1,7 mH przy prądzie z zakresu od 0 do 10 A.



Rys.3. Obliczona zależność indukcyjności dławika od składowej stałej prądu

Wyniki obliczeń rozważanego układu przedstawiono na rys. 4 – 6.

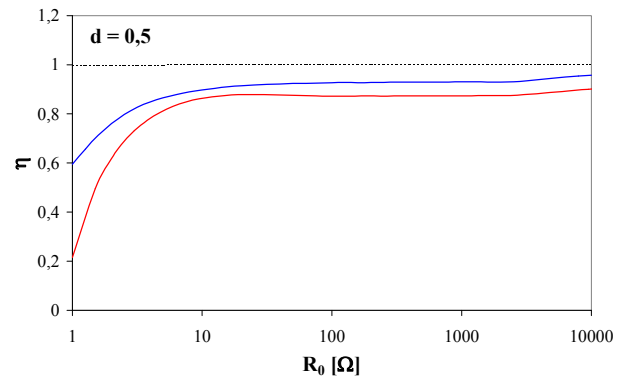
Na rys. 4 i 5 pokazano zależności napięcia wyjściowego U_{wy} (rys.4) oraz sprawności η (rys.5) rozważanej przetwornicy od rezystancji obciążenia R_0 uzyskane przy współczynniku wypełnienia sygnału sterującego $d = 0,5$. Na rysunkach tych czerwoną linią ciągłą oznaczono wyniki obliczeń uzyskane przy wykorzystaniu uśrednionego modelu dławika opisanego w poprzednim rozdziale i uśrednionego elektrotermicznego modelu klucza diodowo-tranzystorowego z pracy [18], niebieską linią ciągłą - wyniki uzyskane przy wykorzystaniu liniowego modelu dławika i uśrednionego elektrotermicznego modelu klucza diodowo-tranzystorowego z pracy [18], a czarną linią kreskową - wyniki uzyskane przy wykorzystaniu liniowego modelu dławika i uśrednionego modelu klucza diodowo-tranzystorowego z pracy [1]. W obliczeniach z wykorzystaniem liniowego modelu dławika przyjęto wartość indukcyjności dławika $L = 1,7$ mH odpowiadającą zerowej wartości prądu.



Rys.4. Obliczona zależność napięcia wyjściowego badanej przetwornicy od rezystancji obciążenia

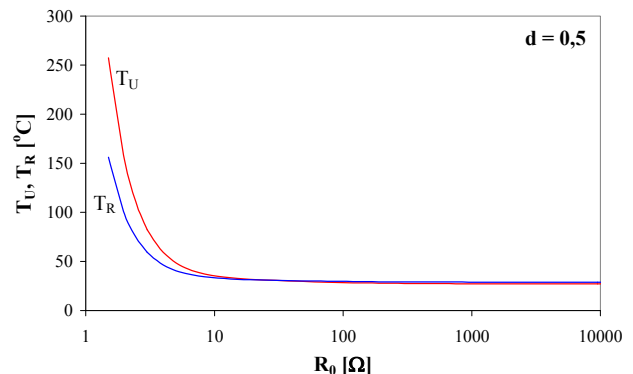
Łatwo można zauważyć, że w rozważanym zakresie zmian rezystancji obciążenia badana przetwornica pracuje zarówno w trybie CCM, jak i DCM. Uwzględnienie nieliniowości zależności $L(i)$ powoduje przesunięcie granicy między trybem CCM a DCM ku większym wartościom

rezystancji R_0 . Z kolei, w zakresie małych wartości R_0 widać, że za pomocą klasycznego bezstratnego modelu z pracy [1] uzyskano stałą wartość napięcia U_{wy} oraz sprawności. Z obu rozważanych modeli elektrotermicznych uzyskano rosnące zależności $U_{wy}(R_0)$ oraz $\eta(R_0)$, przy czym uwzględnienie nieliniowości modelu dławika powoduje obniżenie wartości napięcia wyjściowego oraz sprawności przetwornicy. Warto zauważyć, że uwzględnienie nieliniowości dławika oraz strat w dławiku powoduje zmniejszenie napięcia wyjściowego nawet o 50%, a sprawność - nawet o 60%.



Rys.5. Obliczona zależność sprawności energetycznej badanej przetwornicy od rezystancji obciążenia

Na rys.6 przedstawiono obliczone zależności temperatury uzwojenia T_U oraz rdzenia T_R dławika od rezystancji obciążenia. Jak widać, rozważane zależności są funkcjami malejącymi. W zakresie dużych rezystancji R_0 temperatura rdzenia jest wyższa od temperatury uzwojenia, a w zakresie małych wartości R_0 - większe wartości przyjmuje temperatura uzwojenia.



Rys.6. Obliczona zależność temperatury rdzenia i uzwojenia dławika od rezystancji obciążenia

Podsumowanie

W pracy zaproponowano elektrotermiczny uśredniony model dławika dedykowany do wyznaczania nieizotermicznych charakterystyk przetwornic dc-dc za pomocą programu SPICE. Zaproponowany model uwzględnia zależność indukcyjności i rezystancji szeregowej dławika od prądu, częstotliwości, temperatury oraz parametrów konstrukcyjnych dławika i parametrów rdzenia, na którym ten dławik nawinięto.

Przedstawione w poprzednim rozdziale wyniki obliczeń dowodzą, że uwzględnione w nowym modelu zjawiska w widoczny sposób wpływają na charakterystyki rozważanego układu. W szczególności obserwuje się przesunięcie granicy między trybem CCM a DCM ku wyższym wartościom rezystancji R_0 oraz spadek napięcia wyjściowego i sprawności przetwornicy w zakresie małych wartości R_0 . Oprócz możliwości wyznaczenia

charakterystyk przetwornic dławikowych, nowy model pozwala także na obliczenie wartości temperatury rdzenia i uzwojenia dławika, które umożliwiają określenie zakresu zmian parametrów sygnału sterującego oraz rezystancji obciążenia, w których dopuszczalne wartości temperatury rdzenia oraz uzwojenia dławika nie będą przekroczone.

Jednocześnie czas potrzebny na wyznaczenie nieizotermicznych charakterystyk rozważanej przetwornicy jest znacznie krótszy niż przy zastosowaniu klasycznej analizy stanów przejściowych i elektrotermicznego modelu dławika opisanego m.in. w pracach [9, 10].

Podziękowanie

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/B/ST7/06738.

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] Barlik R., Nowak M.: Energoelektronika – elementy, podzespoły, układy, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2014.
- [4] Górecki K., Zarębski J.: Modeling Nonisothermal Characteristics of Switch-Mode Voltage Regulators, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 4, 2008, pp. 1848 – 1858.
- [5] Górecki K., Zarębski J.: The method of a fast electrothermal transient analysis of single-inductance dc-dc converters, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 9, 2012, pp. 4005-4012.
- [6] Basso C.: Switch-Mode Power Supply SPICE Cookbook, McGraw-Hill, New York 2001.
- [7] Borkowski A.: Zasilanie urządzeń elektronicznych, WKiŁ, Warszawa 1990.
- [8] Górecki K., Stepowicz W.J.: Comparison of Inductor Models Used in Analysis of the Buck and Boost Converters, Informacje MIDEM, Vol. 38, No.1, 2008, pp. 20-25.
- [9] Górecki K., Detka K.: Electrothermal model of choking-coils for the analysis of dc-dc converters, Materials Sciences & Engineering B, Vol. 177, No. 15, 2012, pp. 1248-1253.
- [10] Detka K., Górecki K.: Wpływ samonagrzewania w dławiku na charakterystyki przetwornicy typu boost. Przegląd Elektrotechniczny, R. 90, Nr 9, 2014, s. 19-21.
- [11] Posobkiewicz K.: Modelowanie i analiza wybranej klasy stabilizatorów impulsowych ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk termicznych, Praca doktorska, Wydział Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej, 2005.
- [12] Maksimović D.: Automatem steady-state analysis of switching power converters using a general-purpose simulation tool, IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC, Vol. 2, St. Louis 1997, s. 1352-1358.
- [13] Maksimovic D., Stankovic A.M., Thottuveil V.J., Verghese G.C.: Modeling and simulation of power electronic converters, Proceedings of the IEEE, Vol. 89, No. 6, 2001, s. 898-912.
- [14] Ben-Yaakov S., Gaaton Z.: Generic SPICE compatible model of current feedback in switch mode convertors, Electronics Letters, Vol. 28, No. 14, 1992, s. 1356-1358.
- [15] Ben-Yaakov S., Glozman S., Rabinovici R.: Envelope simulation by SPICE-compatible models of electric circuits driven by modulated signals, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 1, 2000, s. 222-225.
- [16] Zarębski J., Górecki K.: The electrothermal large-signal model of power MOS transistors for SPICE. IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 25, No. 5-6, 2010, pp. 1265 – 1274.
- [17] Mawby P.A., Igic P.M., Towers M.S.: Physically based compact device models for circuit modelling applications, Microelectronics Journal, Vol. 32, 2001, s. 433-447.
- [18] Górecki K.: A New Electrothermal Average Model of the Diode-Transistor Switch. Microelectronics Reliability, Vol. 48, No. 1, 2008, pp. 51-58.

Autor: dr hab. inż. Krzysztof Górecki, prof. nadzw. AMG, Akademia Morska w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia, E-mail: gorecki@am.gdynia.pl.