

Ocena przydatności wybranych modeli łącznika diodowo-tranzystorowego do wyznaczania charakterystyk przetwornicy SEPIC

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki analiz komputerowych przetwornicy SEPIC przy wykorzystaniu uśrednionych modeli łącznika diodowo-tranzystorowego dla programu SPICE. Opisano postać zastosowanych modeli oraz sposób wykonywania obliczeń przy ich wykorzystaniu. Porównano czasy trwania obliczeń realizowanych przy zastosowaniu poszczególnych modeli, a uzyskane wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów.

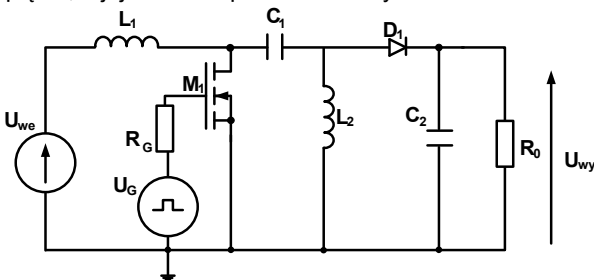
Abstract: The paper presents the results of computer analyzes of the SEPIC converter obtained using the average models of the diode-transistor switch dedicated for the SPICE program. The form of used models and procedure of calculations using this models are described. The time duration of calculations performed using described models were compared, and the obtained results of calculations were compared with the results of measurements. (Evaluation of the usefulness of selected models of the diode-transistor switch to calculate the characteristics of the SEPIC converter)

Słowa kluczowe: przetwornice dc-dc, modele uśrednione, SPICE, symulacje komputerowe

Keywords: dc-dc converters, average models, SPICE, computer simulations

Wprowadzenie

W układach impulsowego przekształcania energii elektrycznej wykorzystuje się różne konfiguracje przetwornic dc-dc. Wśród przetwornic dwudławikowych bardzo popularna jest przetwornica SEPIC [1]. Przetwornica ta umożliwia zarówno podwyższanie, jak i obniżanie napięcia, a jej schemat pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Schemat badanej przetwornicy SEPIC

Rozważana przetwornica zawiera tranzystor unipolarny M_1 sterowany ze źródła sygnału prostokątnego U_G przez rezystor R_G , diodę D_1 , dwa dławiki L_1 i L_2 oraz kondensatory C_1 i C_2 . Wejście układu stanowi źródło napięciowe U_{we} a jego obciążeniem jest rezystor R_0 .

Jak wynika z literatury [1, 2, 3, 4], na właściwości układów elektronicznych, w tym przetwornic dc-dc silnie wpływają parametry zastosowanych komponentów oraz temperatura wnętrza T_j elementów składowych takiego układu stanowiąca sumę temperatury otoczenia T_a oraz przyrostu tej temperatury spowodowanego przez zjawisko samonagrzewania. Aby właściwie zaprojektować układy elektroniczne stosuje się odpowiednie programy komputerowe do analizy tych układów, np. program SPICE.

Dokładność symulacji komputerowych zależy od dokładności zastosowanych modeli elementów elektronicznych. Z drugiej strony, wysoki stopień złożoności modeli powoduje nieuzasadniony wzrost czasu trwania obliczeń lub nawet może uniemożliwić uzyskanie zbieżności tych obliczeń [5].

W przypadku analizy przetwornic dc-dc często wykorzystuje się tzw. modele uśrednione umożliwiające wyznaczenie charakterystyk rozważanych układów w stanie ustalonym przy wykorzystaniu analizy stałoprądowej [1, 2,

4, 6]. W latach 90-tych XX wieku zostały sformułowane uśrednione modele łącznika diodowo-tranzystorowego dedykowane do zastosowania w analizie przetwornic dc-dc za pomocą programu SPICE [1, 2]. Autorzy niniejszej pracy sformułowali elektrotermiczny model takiego łącznika [4, 7] i zweryfikowali jego przydatność do wyznaczania charakterystyk przetwornic jednodławikowych.

W niniejszej pracy przedstawiono sposób zastosowania uśrednionych modeli łącznika diodowo-tranzystorowego do wyznaczania charakterystyk przetwornicy SEPIC oraz wyniki obliczeń uzyskanych za pomocą tych modeli o zróżnicowanej dokładności. Poprawność uzyskanych wyników obliczeń zweryfikowano przez ich porównanie z wynikami pomiarów. Rozdział drugi zawiera opis zastosowanych modeli, a rozdział trzeci – wyniki obliczeń i pomiarów.

Modele uśrednione łącznika diodowo-tranzystorowego

We wszystkich układach jednotranzystorowych przetwornic dc-dc występuje przełącznik diodowo-tranzystorowy. W przełączniku tym tranzystor i dioda przewodzą prąd naprzemiennie, a o czasie włączenia tranzystora decyduje sygnał sterujący podawany na wejście rozważanego przełącznika. Przy przyjęciu modeli tych elementów w postaci idealnych łączników, przebiegi napięć i prądów na ich zaciskach mają kształt ciągu impulsów prostokątnych o wypełnieniu zależnym od współczynnika wypełnienia impulsów sterujących d [1, 2].

W literaturze zawarte są opisy uśrednionych modeli łącznika diodowo-tranzystorowego o różnej dokładności i uwzględniających różne nieidealności tranzystora i diody. Model taki jest reprezentowany w programie SPICE jako podukład, którego wyprowadzeniami są zaciski wyjściowe tranzystora i zaciski diody. Wartości średnie prądów i napięć w tym układzie zależą od wartości napięcia na wejściu sterującym równego współczynnikowi wypełnienia sygnału sterującego d . W strukturze rozważanych modeli występują sterowane źródła napięciowe i sterowane źródła prądowe. W najprostszym z tych modeli, opisanym między innymi w pracy [1] przyjęto, że tranzystor i dioda są idealnymi przełącznikami, tzn. spadek napięcia na włączonych przełącznikach wynosi zero, a prąd wyłączonych przełączników wynosi zero. Model ten będzie

dalej nazywanym modelem MU1 i jest dedykowany do pracy w trybie CCM.

W pracach [1, 2] opisano model uśredniony rozważanego przełącznika, w którym uwzględniono niezerową rezystancję włączenia tranzystora R_{ON} oraz niezerowe wartości napięcia przewodzenia diody U_D i jej rezystancji szeregowej R_D . Model ten przeznaczony jest do analizy przetwornic dc-dc pracujących w trybie CCM i będzie dalej nazywany modelem MU2.

W pracy [1] zaproponowano też bezstratny model przełącznika diodowo – tranzystorowego dedykowanego do analizy przetwornic dc-dc pracujących zarówno w trybie CCM jak i DCM. Model ten nazywany dalej będzie modelem MU3. W pracy [4] zaproponowano elektrotermiczny model przełącznika diodowo-tranzystorowego dedykowanego do elektrotermicznej analizy przetwornic dc-dc pracujących w trybie CCM lub DCM. W modelu tym nazywanym dalej MU4 uwzględniono zjawisko samonagrzewania w diodzie i w tranzystorze oraz liniową zależność od temperatury rezystancji R_{ON} i R_D oraz napięcia U_D . Odpowiednie współczynniki temperaturowe zmian rozważanych wielkości oznaczono symbolami α_{ON} , α_{RD} oraz α_{UD} . Rezystancja termiczna diody oznaczona jest symbolem R_{thD} , a rezystancja termiczna tranzystora R_{thT} .

Wyniki badań

Wykorzystując układ przedstawiony na rysunku 1 przeprowadzono pomiary i obliczenia charakterystyk rozważanej przetwornicy SEPIC. W rozpatrywanym układzie zastosowano tranzystor MOSFET typu IRF840, diodę Schottky'ego 1N5822 oraz elementy bierne o następujących wartościach: $R_G = 24 \Omega$, $C_1 = 4,7 \mu F$, $C_2 = 4,7 \mu F$, $L_1 = 680 \mu H$, $L_2 = 680 \mu H$. Sygnał sterujący bramkę tranzystora U_G jest uzyskiwany z generatora sygnału prostokątnego. Badania przeprowadzono w funkcji współczynnika wypełnienia d tego sygnału dla dwóch częstotliwości pracy przetwornicy f równych kolejno 50 i 300 kHz. W obliczeniach zastosowano następujące wartości parametrów modeli MU2 i MU4: $R_{ON} = 100 \text{ m}\Omega$, $R_D = 50 \text{ m}\Omega$, $U_D = 0,23 \text{ V}$, $\alpha_{ON} = 0,01 \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{RD} = 0,003 \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{UD} = -2 \text{ mV/K}$, $R_{thT} = 9 \text{ K/W}$, $R_{thD} = 50 \text{ K/W}$. Wartości tych parametrów wyznaczono na podstawie danych katalogowych zastosowanych elementów półprzewodnikowych i odcinkami liniowej aproksymacji charakterystyk tych elementów. W obliczeniach uwzględniono także rezystancję szeregową dławików równą $68 \text{ m}\Omega$ (przy $f = 50 \text{ kHz}$) i $550 \text{ m}\Omega$ (przy $f = 300 \text{ kHz}$) oraz rezystancję amperomierza wyjściowego równą $49 \text{ m}\Omega$.

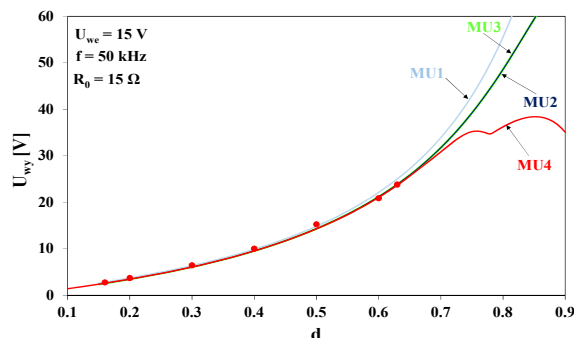
Na rysunkach zawartych w tym rozdziale punkty oznaczają wyniki pomiarów, a linie – wyniki obliczeń wykonanych za pomocą programu SPICE. Kolorem niebieskim oznaczono wyniki uzyskane przy wykorzystaniu modelu MU1, kolorem czarnym oznaczono wyniki uzyskane przy wykorzystaniu modelu MU2, kolorem zielonym – za pomocą modelu MU3, a linią czerwoną – za pomocą modelu MU4.

Na rys. 2 i 3 przedstawiono wyniki obliczeń i pomiarów uzyskane przy częstotliwości pracy przetwornicy $f = 50 \text{ kHz}$, a na rys. 4 i 5 – przy częstotliwości $f = 300 \text{ kHz}$. Badania przeprowadzono przy rezystancji obciążenia $R_o = 15 \Omega$ i napięciu wejściowym $U_{we} = 15 \text{ V}$. Dodatkowo na rysunkach 3b oraz 5b linią ciągłą oznaczono temperaturę wnętrza tranzystora, natomiast linią kreskową temperaturę obudowy tego tranzystora.

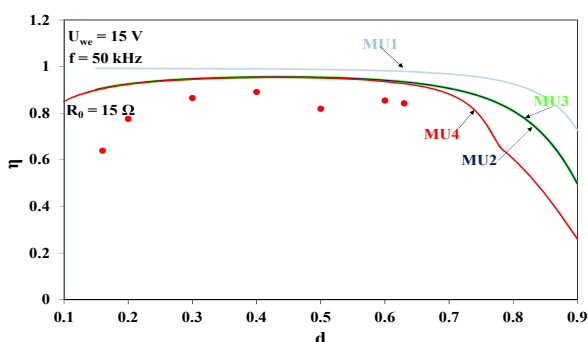
Z przeprowadzonych badań można zauważyć, że zmierzone napięcie wyjściowe (rys. 3a) jest rosnącą funkcją współczynnika wypełnienia, a obliczone zależności $U_{wy}(d)$ pozostają w dobrej zgodności z wynikami pomiarów. Pomiary wykonano dla $d \leq 0,65$, gdyż dalszy wzrost

współczynnika wypełnienia powodował nadmierny wzrost temperatury diody. Warto zaobserwować, że zależność $U_{wy}(d)$ obliczona za pomocą modelu MU4 posiada 3 lokalne ekstrema. Z kolei, sprawność energetyczna rozważanej przetwornicy dla częstotliwości 50 kHz osiąga maksimum równe ok. 85% przy $d = 0,4$.

a)

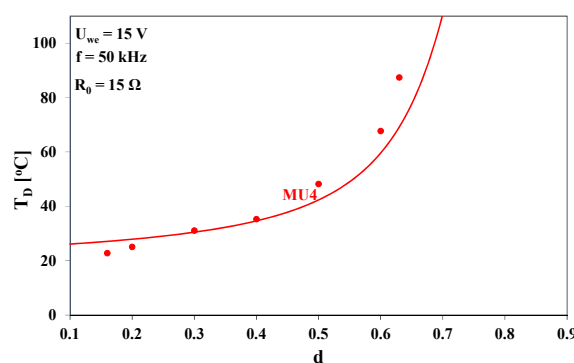


b)

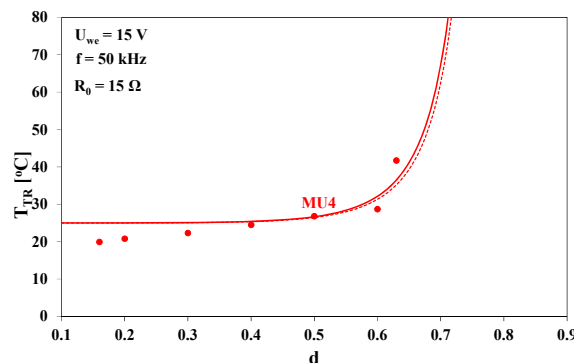


Rys. 2. Obliczone i zmierzone zależności napięcia wyjściowego (a) oraz sprawności energetycznej (b) przetwornicy SEPIC od współczynnika wypełnienia przy częstotliwości $f = 50 \text{ kHz}$

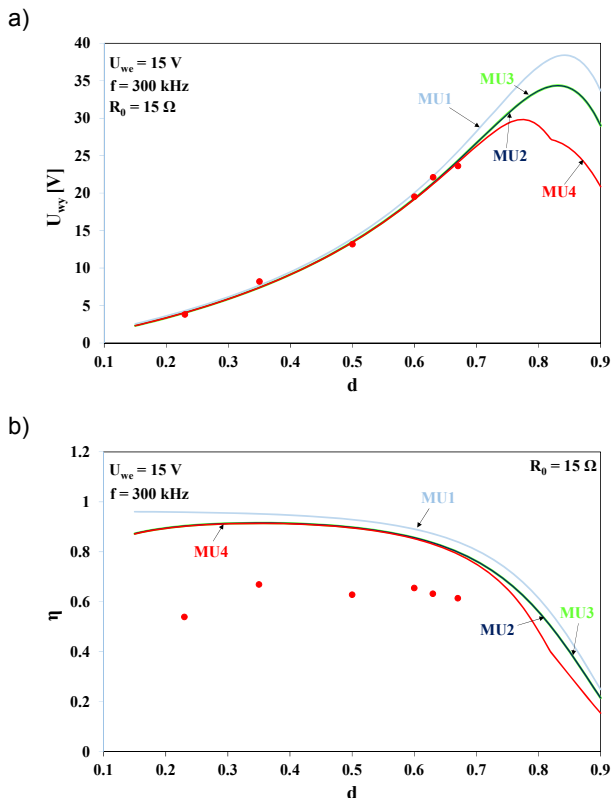
a)



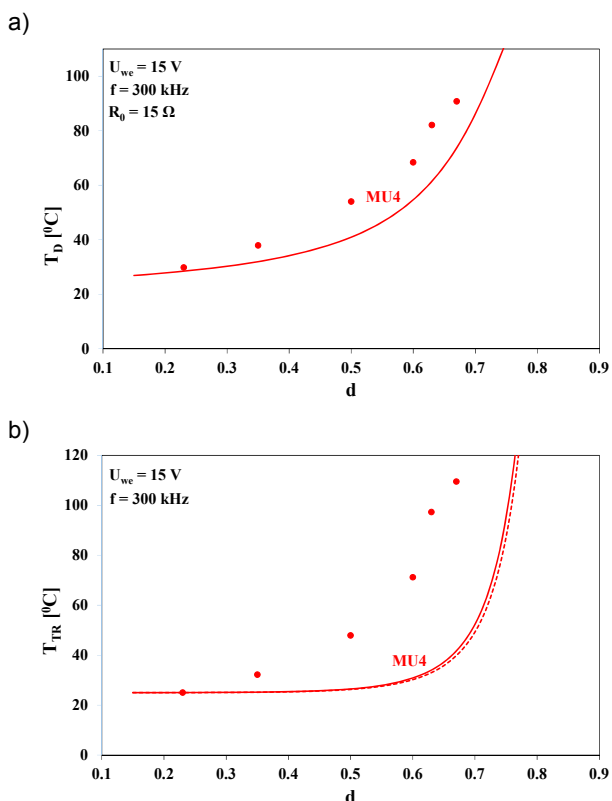
b)



Rys. 3. Obliczone i zmierzone zależności temperatury diody (a) oraz tranzystora (b) od współczynnika wypełnienia przy częstotliwości $f = 50 \text{ kHz}$



Rys. 4. Obliczone i zmierzone zależności napięcia wyjściowego (a) oraz sprawności energetycznej (b) przetwornicy SEPIC od współczynnika wypełnienia dla częstotliwości $f = 300 \text{ kHz}$



Rys. 5. Obliczone i zmierzone zależności temperatury diody (a) oraz tranzystora (b) w funkcji współczynnika wypełnienia dla częstotliwości $f = 300 \text{ kHz}$

Temperatury obudów diody i tranzystora są rosnącymi funkcjami współczynnika wypełnienia, przy czym temperatura obudowy diody przekracza $90 \text{ }^\circ\text{C}$, natomiast

temperatura obudowy tranzystora - ok. 45°C przy najwyższej wartości współczynnika wypełnienia $d = 0,67$. Ograniczenie badań do współczynnika wypełnienia $d \leq 0,67$ wynikało z ograniczenia dopuszczalnej wartości prądu zastosowanej diody.

Na uwagę zasługuje także fakt, że uzyskane wyniki obliczeń przy wykorzystaniu modelu MU4 pozostają w dobrej zgodności z wynikami pomiarów, natomiast pozostałe modele nie uwzględniają zjawisk cieplnych zachodzących w elementach kluczujących nie pozwalając na obliczenie temperatur obudów elementów kluczujących.

Z kolei, w przedstawionych na rysunku 4 zależnościach napięcia wyjściowego i sprawności energetycznej od współczynnika wypełnienia można zauważyć, że mają one podobny kształt do zależności przedstawionych na rys.2. Porównując wyniki uzyskane dla obu rozważanych częstotliwości można stwierdzić, że wzrost częstotliwości sygnału sterującego, powoduje nieznaczne obniżenie wartości napięcia wyjściowego dla współczynnika wypełnienia $d > 0,5$. Jednak różnica ta nie przekracza 1 V , a wyniki pomiarów pozostają w dobrej zgodności z wynikami obliczeń uzyskanych przy zastosowaniu wspomnianych wcześniej modeli. Obserwuje się także istotny spadek sprawności energetycznej rozważanej przetwornicy nawet o 25% przy wzroście częstotliwości z 50 kHz do 300 kHz , którego żaden z rozważanych modeli poprawnie nie opisuje.

Dodatkowo można zauważyć na rys. 5, że temperatury obudowy diody i tranzystora są rosnącymi funkcjami współczynnika wypełnienia. Uzyskane wyniki obliczeń istotnie odbiegają od uzyskanych wyników pomiarów (nawet o $60 \text{ }^\circ\text{C}$), co może wynikać z nieuwzględnienia wszystkich zjawisk zachodzących w rozważanej przetwornicy w zakresie częstotliwości sygnału sterującego powyżej 50 kHz np. inercji elektrycznej diod i tranzystorów.

Czas trwania obliczeń przy wykorzystaniu wszystkich omówionych w poprzednim rozdziale uśrednionych modeli łącznika diodowo-tranzystorowego jest jednakowy i wynosi $0,02 \text{ s}$.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów i analiz komputerowych przetwornicy SEPIC przy wykorzystaniu 4 różnych modeli łącznika diodowo-tranzystorowego. Badania przeprowadzono w szerokim zakresie zmian współczynnika wypełnienia, dla dwóch wartości częstotliwości sygnału sterującego wynoszących odpowiednio 50 i 300 kHz . Z otrzymanych wyników badań można zauważyć, że dla obu rozważanych wartości częstotliwości sygnału sterującego obliczona zależność napięcia wyjściowego od współczynnika wypełnienia pozostaje w dobrej zgodności z wynikami pomiarów przy zastosowaniu wszystkich rozważanych modeli. Istotne różnice pomiędzy modelami obserwuje się dla wartości współczynnika wypełnienia $d > 0,65$.

Na uwagę zasługuje fakt, że tylko elektrotermiczny model łącznika diodowo-tranzystorowego pozwala na wyznaczenie temperatury obudów takich komponentów przetwornicy jak dioda, czy tranzystor.

Stwierdzono też, że ze wzrostem częstotliwości obserwuje się istotny spadek wartości sprawności energetycznej rozważanej przetwornicy, nawet o ok. 25% czego nie uwzględnia żaden z rozważanych modeli. Może być to efektem nieuwzględnienia wszystkich zjawisk zachodzących w elementach kluczujących i pozostałych komponentach przetwornicy. Fakt ten świadczy o przydatności zaproponowanych modeli w zakresie niższych wartości częstotliwości sygnału sterującego. Wniosek ten

jest zbieżny z wynikami badań przetwornic boost i buck pokazanych w pracy [8].

Autorzy: prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej, Akademia Morska w Gdyni, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, dr inż. Kalina Detka Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej, Akademia Morska w Gdyni, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia

LITERATURA

- [1] Ericson R., Maksimovic D.: Fundamentals of Power Electronics, Norwell, Kluwer Academic Publisher, 2001.
- [2] Basso C.: Switch-Mode Power Supply SPICE Cookbook, McGraw-Hill, New York 2001.
- [3] Kazimierczuk M.: Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters, Wiley 2015
- [4] Górecki K.: A New Electrothermal Average Model of the Diode-Transistor Switch. Microelectronics Reliability, Vol. 48, No. 1, 2008, pp. 51-58.
- [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] Ben-Yaakov S., Glazman 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, pp. 222-225.
- [7] Górecki K., Detka K.: Modelling thermal phenomena in semiconductor devices and magnetic elements of boost converter using averaged models. 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering CPE-POWERENG, Bydgoszcz, 2016, pp. 416-421.
- [8] Górecki K., Zarębski J.: Investigations of the Usefulness of Average Models for Calculations Characteristics of Buck and Boost Converters at the Steady State. International Journal of Numerical Modelling Electronic Networks, Devices and Fields Vol. 23, No. 1, 2010, pp. 20-31.