

Symulacje PSPICE przetwornicy typu BUCK oparte na modelach uśrednionych

Streszczenie. W artykule przedstawiono przykłady aplikacji modeli uśrednionych w symulacjach PSPICE impulsowych przetwornic napięcia. Zaprezentowano wyniki symulacji stanów przejściowych w przetwornicy typu BUCK oraz jej charakterystyk częstotliwościowych. Porównano wyniki otrzymane po zastosowaniu modelu kompletnego (para przełączników i generator PWM) oraz wielko- i małosygnalowych modeli uśrednionych.

Abstract. The article presents examples of applications of averaged models in PSPICE simulations of power converters. The results of simulation of transients in the BUCK converter and its frequency characteristics are shown. A comparison of the results obtained for the complete model (a pair of switches and PWM generator) and large- and small-signal averaged models has been performed. (PSPICE simulations of BUCK converter, based on average models).

Słowa kluczowe: przekształtniki mocy, przetwornica typu BUCK, modele uśrednione, PSPICE, symulacje stanów przejściowych, charakterystyki częstotliwościowe.

Keywords: power converters, BUCK converter, average models, PSPICE, transient simulations, AC simulations.

Wprowadzenie

Istotnym elementem w procesie projektowania układów impulsowego przetwarzania mocy jest symulacja stanów przejściowych w dziedzinie czasu (ang. *transient*) oraz charakterystyk częstotliwościowych (analiza AC). Są to procesy wieloiteracyjne, polegające na eksperymentalnym doborze parametrów: w pierwszej kolejności bloku głównego, a następnie pętli sterowania. Opisy wymienionych bloków można realizować na wiele sposobów, w zależności od planowanego rodzaju sterowania (analogowego lub cyfrowego). Najdokładniejsze przebiegi czasowe uzyskuje się poprzez zastosowanie pełnych modeli bloków głównych zawierających przełączniki i układy sterowania. Ze względu na występowanie w tych modelach elementów pracujących z relatywnie wysokimi częstotliwościami (do kilku MHz), symulacje o nie oparte są czasochłonne i przeprowadza się je raczej na krótkich odcinkach czasu, dla niezbyt rozbudowanych systemów. Znaczące skrócenie czasu trwania symulacji można uzyskać dzięki wykorzystaniu nieliniowych, bądź zlinearyzowanych (małosygnalowych) uśrednionych modeli bloków głównych przetwornic [1, 2, 3].

Programami standardowo wykorzystywanymi do symulacji przekształtników mocy są MATLAB i PSPICE. Do analizy stanów przejściowych użytkownik MATLABa może wykorzystać narzędzie SIMULINK [4, 5], bezpośrednio umożliwiające symulację wyłącznie liniowych systemów o znanych transmitancjach, lub opracować własne procedury numeryczne, pozwalające na dużą swobodę w doborze modeli elementów, ale wymagające opisanie badanego obiektu rozbudowanym układem równań różniczkowych liniowych bądź nieliniowych. Do wyznaczania charakterystyk amplitudowych i fazowych w oparciu o współczynniki transmitancji służy polecenie *bodeplot*. Liczne przykłady charakterystyk AC wyznaczonych w programie MATLAB można znaleźć w [6]. Transmitancja układu głównego idealnego przekształtnika jest łatwa do wyznaczenia, ale uwzględnienie efektów pasożytniczych znacząco komplikuje jej postać [7], otrzymuje się model nawet trzeciego rzędu. W przypadku wyboru programu PSPICE użytkownik ma do dyspozycji wygodny interfejs *Schematics*, umożliwiający implementację schematów obwodów elektrycznych i łatwą realizację symulacji stanów przejściowych i analizy AC. Specyfikę symulacji PSPICE z zaimplementowanymi pełnymi modelami przetwornic wraz z układami sterującymi szczegółowo omówiono i poparto licznymi przykładami w [8, 9]. Symulacje oparte o pełne

modele układów głównych przekształtników z otwartą pętlą można znaleźć w [10, 11].

Niekiedy spotyka się opisy symulacji PSPICE wykorzystujących modele uśrednione, przykładowo w [12, 13] można znaleźć symulacje przetwornicy BOOST, jednak zastosowano tam, według określenia autorów „*switched inductor assembly*”, co nie ma odpowiednika w usystematyzowanym opisie z prac [1, 2, 3]. W pracy [14] przedstawiono symulacje PSPICE przetwornicy typu BUCK, dla której układ sterowania zaprojektowano z wykorzystaniem uśrednionego modelu bloku głównego, ale jedynie w wersji małosygnalowej. W pracach, w których wykorzystywane są uporządkowane, wielkosygnalowe modele uśrednione, omawiane są symulacje przetwornicy BOOST [15, 16, 17]. Trudno jednak byłoby znaleźć prace oparte na zastosowaniu uśrednionego, wielkosygnalowego modelu bloku głównego przetwornicy typu BUCK – w połączeniu z modelem bloku sterującego o zadanej transmitancji w dziedzinie s.

Niniejsza praca jest poświęcona symulacji impulsowych przetwornic typu BUCK, za pomocą programu PSPICE, w oparciu o modele uśrednione zarówno w wersji nieliniowej, jak i zlinearyzowanej. Przedstawiono porównanie wyników symulacji pełnych przebiegów czasowych z wynikami otrzymanymi w oparciu o mało- i wielkosygnalowe modele uśrednione.

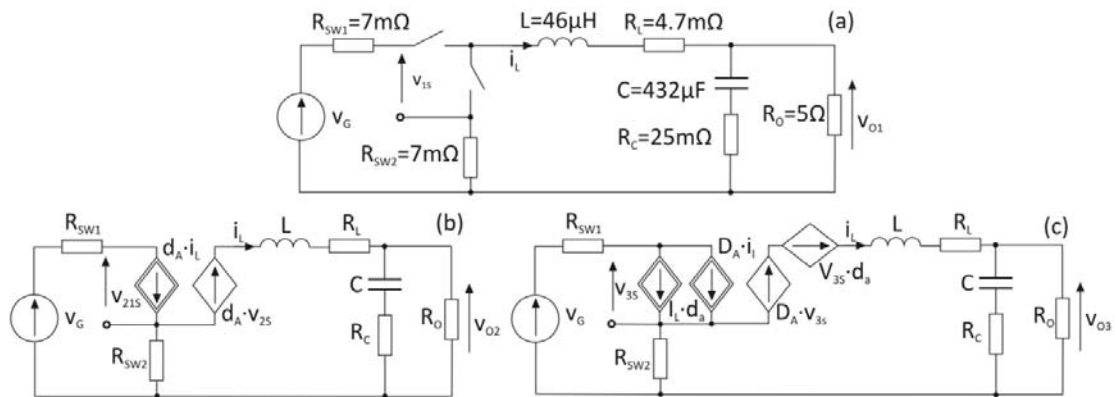
Porównanie uśrednionych modeli bloku głównego przetwornicy z modelem pełnym

W niniejszym rozdziale porównano wyniki symulacji stanów przejściowych oraz AC wykonanych w oparciu o mało- i wielkosygnalowe modele uśrednione układu głównego przetwornicy typu BUCK z wynikami otrzymanymi po zastosowaniu pełnego modelu, składającego się z elementów inercyjnych, pary przełączników oraz generatora sygnału PWM.

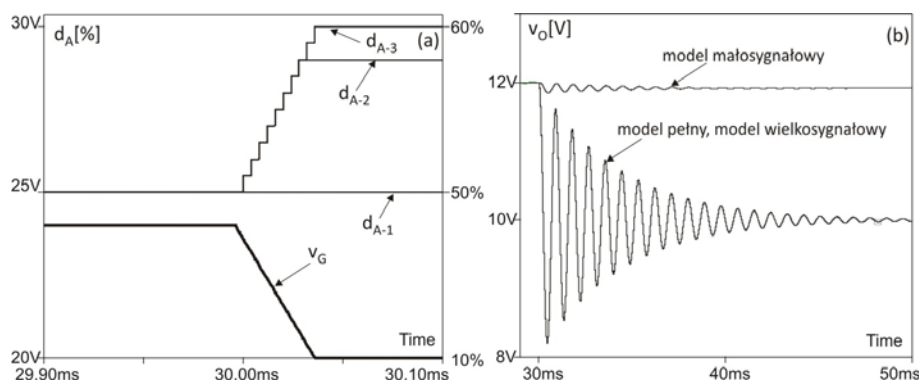
Rozpatrywano zarówno przetwornicę z rezystancjami pasożytniczymi – nieidealną (rys. 1), jak i układ idealny (wyzierowano wartości R_{SW1} , R_{SW2} , R_L , R_C). Przyjęte parametry odpowiadają laboratoryjnemu modelowi skonstruowanej przetwornicy typu BUCK. Na schemacie z rysunku 1, a także w dalszej części tekstu, wartości chwilowe oznaczono małą literą z wielkim indeksem, składowe stałe – wielką literą z wielkim indeksem, a składowe małosygnalowe – małą literą z małym indeksem. Przykładowe symulacje, których wyniki pokazano na rysunkach 2 – 5(a) przeprowadzono dla następujących

warunków: dla $t = 29,996$ ms, wymuszony został skok napięcia wejściowego v_G (rys. 2(a)) od wartości 24 V do 20 V, czas trwania zmiany wynosił 0,04 ms, co odpowiada dziesięciu okresom przełączania ($f_s = 250$ kHz). Założono trzy przebiegi zmian współczynnika wypełnienia (rys. 2(a)) – d_{A-1} (50%, brak zmian), d_{A-2} (od 50% do 58%), d_{A-3} (od 50% do 60%). Zmianę d_A opóźniono o jeden okres przełączania względem zmiany v_G . W symulacjach opartych o modele

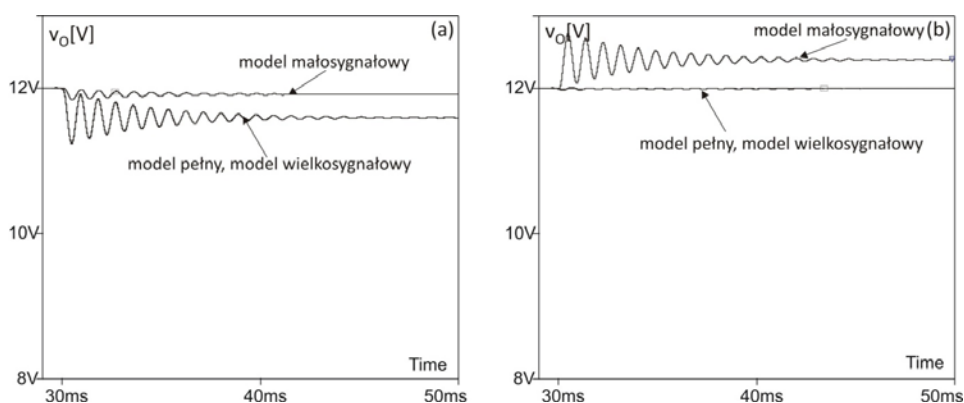
uśrednione, wymuszone zmiany d_A są bardzo proste do uwzględnienia. W symulacjach pełnych przebiegów konieczna jest rozbudowa modelu układu o szeregową sekwencję źródeł PWM generujących sygnały o wymaganych wartościach współczynnika wypełnienia. Obserwowano przebiegi napięcia wyjściowego v_O przetwornicy.



Rys. 1. (a) Schemat przetwornicy typu BUCK z przełącznikami, (b) model uśredniony wielkosygnalowy, (c) model uśredniony małosygnalowy



Rys. 2. (a) Napięcie wejściowe v_G oraz współczynnik wypełnienia d_A (trzy przypadki), (b) przebiegi napięcia wyjściowego w przetwornicy idealnej otrzymane w oparciu o różne modele dla d_{A-1}



Rys. 3. Przebiegi napięcia wyjściowego w przetwornicy idealnej otrzymane w oparciu o różne modele dla: (a) d_{A-2} , (b) d_{A-3}

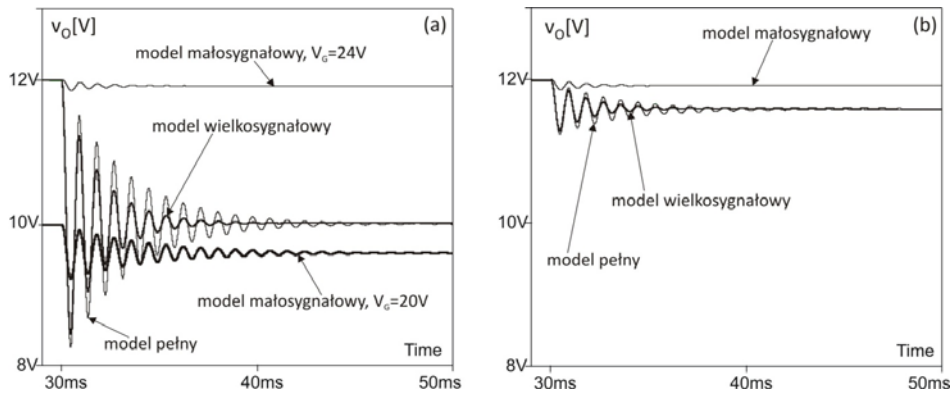
Na podstawie symulacji pełnych przebiegów czasowych obserwuje się, że przy zadanym skoku v_G (rys. 2(a)) zmiana współczynnika wypełnienia z 50% do 58% (d_{A-2}), rys. 3(a), 4(b) jest niewystarczająca do skompensowania napięcia na obciążeniu, zaś zmiana z 50% do 60% (d_{A-3}), rys. 3(b), 5(a) powoduje zadowalającą kompensację.

Obserwuje się bardzo dobrą zgodność wyników

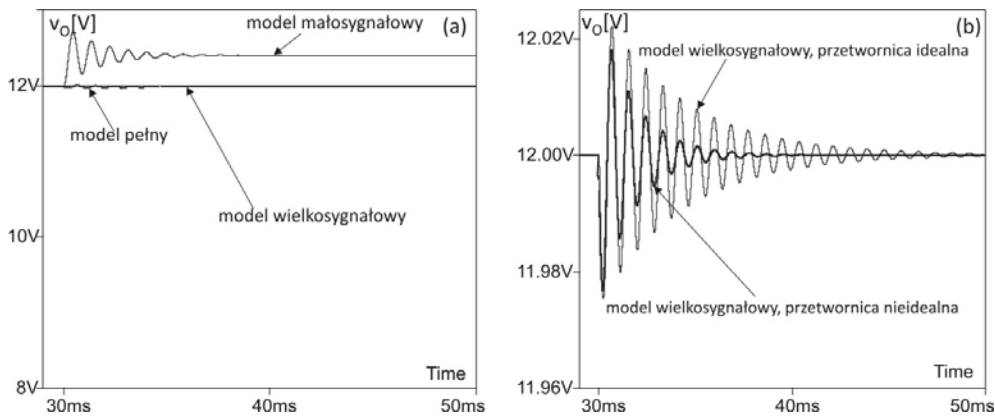
otrzymanych w oparciu o uśredniony model wielkosygnalowy i o model pełny. W przypadku symulacji z wykorzystaniem modelu małosygnalowego, wyniki znacząco odbiegają od pozostałych. Można wyróżnić dwie podstawowe przyczyny niedokładności modelu małosygnalowego. Pierwsza z nich, ogólnie znana, wynika z linearyzacji. Druga – powiązana jest z „niewłaściwie”

dobraną wartością składowej stałej V_G napięcia wejściowego, występującej pośrednio w modelu z rysunku 1(c) (od V_G zależą wartości V_{3S} , I_L). Na rysunku 4(a) pokazano wyniki symulacji dla dwóch wartości V_G przyjętych w modelu małosygnalowym: 24 V i 20 V. Pierwsza z tych wartości odpowiada składowej stałej napięcia wejściowego przed zmianą i zazwyczaj taka wartość jest zakładana w symulacjach. Druga – jest to wartość V_G po zmianie. Wyniki symulacji opartych o model

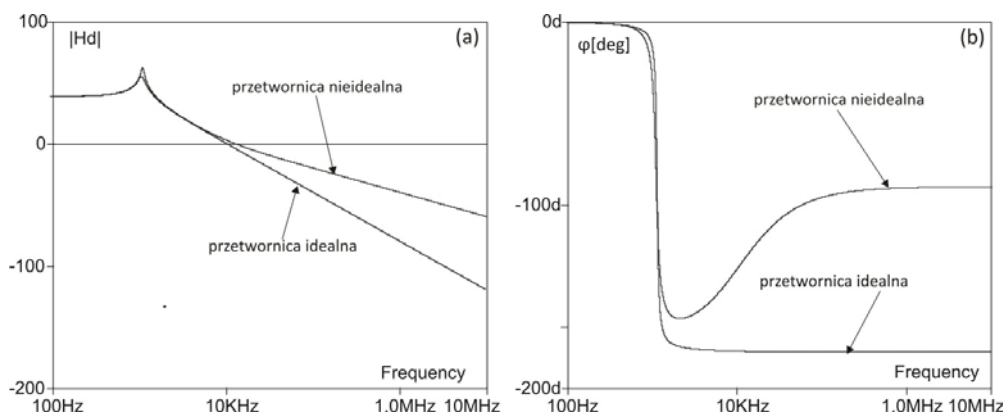
małosygnalowy, otrzymane dla $V_G = 20$ V są zbliżone do wyników dla modelu pełnego, a niedokładność w tym przypadku powiązana jest z wyłącznie z liniowym charakterem modelu małosygnalowego. W rzeczywistości nie jest na ogół możliwe przewidywanie odpowiedniej wartości parametru V_G , gdyż wahania napięcia wejściowego mogą mieć charakter przypadkowy.



Rys. 4. Przebiegi napięcia wyjściowego w przetwornicy nieidealnej dla: (a) d_{A-1} , (b) d_{A-2}



Rys. 5. (a) Przebiegi napięcia wyjściowego w przetwornicy nieidealnej dla d_{A-3} , (b) porównanie przebiegów napięcia wyjściowego obliczonych w oparciu o uśredniony model wielkosygnalowy w przetwornicach: idealnej i nieidealnej, dla d_{A-3}



Rys. 6. Charakterystyki częstotliwościowe control-to-output przetwornicy typu BUCK: (a) amplitudowa, (b) fazowa

W świetle powyższych spostrzeżeń można uznać, że zastosowanie typowych podejść opisywanych w literaturze, opartych o małosygnalowe modele uśrednione bloku głównego, może prowadzić do istotnych błędów obliczeniowych.

Ważną zaletą symulacji opartych o modele uśrednione jest bardzo krótki, w porównaniu do symulacji pełnych przebiegów czasowych, czas trwania obliczeń. Program PSPICE optymalizuje chwilową wartość kroku dyskretyzacji odpowiednio dla konkretnego układu. Dla omawianych

przypadków średnia wartość tego kroku była rzędu nanosekund dla układu z modelem pełnym i rzędu milisekund dla układów z modelami uśrednionymi.

Odrębne zagadnienie stanowi uwzględnianie efektów pasożytniczych w elementach składowych przekształtników – na rysunku 5(b) pokazano przykładowe porównanie przebiegów napięcia wyjściowego, wyznaczonych w oparciu o wielkosygnałowy model uśredniony dla przetwornicy idealnej oraz nieidealnej. Oscylacje napięcia wyjściowego, pojawiające się po skoku napięcia wejściowego, mają większą amplitudę oraz trwają dłużej w układzie idealnym, niż w układzie z uwzględnionymi stratami mocy.

W oparciu o modele uśrednione implementowane w PSPICE można wygenerować charakterystyki częstotliwościowe. Na rysunku 6 pokazano amplitudową $|H_d|$ i fazową charakterystykę control-to-output układu. Analogicznie, w prosty sposób otrzymuje się charakterystyki input-to-output, impedancję wyjściową oraz admitancję wejściową. Charakterystyki AC wyznaczone w oparciu o modele pełne oraz uśrednione mało- i wielkosygnałowe nie różnią się w istotny sposób.

Symulacje oparte na omawianym w niniejszej pracy podejściu, po pewnych modyfikacjach, mogą okazać się efektywną metodą eksperymentalnego doboru parametrów układów sterowania przetwornic. W projektowaniu przekształtników mocy zamkniętą pętlą punktem wyjścia jest charakterystyka H_d , na podstawie której wyznaczana jest transmitancja bloku sterującego H_s , spełniająca określone kryteria takie jak: zapewnienie tłumienia oscylacji występujących po zmianach zasilania bądź obciążenia oraz zapewnienie odpowiedniego marginesu fazy. Jedną z ciekawszych propozycji projektowania układu kompensacji jest podejście zaprezentowane w [18], gdzie autorzy przyjmują, że transmitancja odpowiadająca iloczynowi $|H_d \cdot H_s|$ posiada jeden biegun i wprost wyznaczają postać transmitancji H_s . Planuje się połączenie takiego rozwiązania z seriami symulacji PSPICE opartych o wielkosygnałowe modele uśrednione układu głównego przetwornicy i zbadanie przydatności powstałej metody do projektowania kompensatorów.

Podsumowanie

Symulator PSPICE, pod pewnymi względami, jest wygodniejszym narzędziem do symulacji impulsowych przetwornic napięcia niż program MATLAB – gdyż zapewnia wygodę implementacji nieliniowych modeli dowolnego typu, bez konieczności znajomości metod numerycznych, a także umożliwia wprowadzanie informacji o symulowanym układzie w formie schematu [19]. Opisywane w literaturze przykłady symulacji przetwornicy typu BUCK za pomocą PSPICE, przy wykorzystaniu modeli uśrednionych, ograniczają się do przypadków zlinearyzowanych. Tymczasem, przy projektowaniu układów sterowania przetwornic mamy do czynienia z co najmniej dwoma sygnałami będącymi wymuszeniami dla układu głównego (v_G , d_A , bardzo często również prąd w obciążeniu), a w takich okolicznościach zależności podlegające symulacjom mają charakter nieliniowy. Dobrą dokładność symulacji systemów nieliniowych zapewnia zastosowanie standardowych modeli elementów i obserwacja pełnych przebiegów czasowych, jednak symulacje takie są czasochłonne, zwłaszcza gdy proces doboru parametrów transmitancji układu sterującego jest wieloiteracyjny.

W świetle stanu literatury oraz badań przedstawionych w niniejszej pracy, można wnioskować, że oparcie symulacji przetwornicy BUCK w programie PSPICE na zastosowaniu wielkosygnałowych modeli uśrednionych

bloków głównych jest metodą efektywną i dokładną. Odpowiednio dobrane serie symulacji tego typu mogą być z powodzeniem wykorzystane w projektowaniu bloków sterowania przetwornic.

Autorzy: dr inż. Aneta Hapka, prof. dr hab. inż. Włodzimierz Janke, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, ul. JJ Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, E-mail: aneta.hapka@tu.koszalin.pl, wlodzimierz.janke@tu.koszalin.pl.

LITERATURA

- [1] Ericsson R.W., Maksimovic D., Fundamentals of Power Electronics – Second Edition, Springer Science, 2001
- [2] Janke W., Averaged models of pulse-modulated DC-DC power converters. Part I. Discussion of standard methods, *ARCHIVES OF ELECTRICAL ENGINEERING*, Vol. 61(4), (2012), 609-631
- [3] Janke W., Averaged models of pulse-modulated DC-DC power converters, Part II. Models based on the separation of variables, *ARCHIVES OF ELECTRICAL ENGINEERING* Vol. 61(4), (2012), 633-654
- [4] Chrin P., Bunlaksananusorn C., Large-Signal Average Modelling and Simulation of DC-DC Converters with SIMULINK, Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07, DOI: 10.1109/PCCON.2007.372918.
- [5] Błasiński W., Błasiński H., Large Signal Simulink Models of a Boost Converter in CCM and DCM modes, *Przeгляд Elektrotechniczny* 3/2016, DOI: 10.15199/48.2016.03.03
- [6] Kazimierzczuk M.K., Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters, Wiley 2008
- [7] Janke W., Impulsowe przetwornice napięcia stałego, Politechnika Koszalińska 2014
- [8] Rashid M.H., SPICE for Power Electronics and Electric Power, Third Edition, CRC PRESS 2012
- [9] Basso C.P., Switch-Model Power Supply SPICE Cookbook, McGraw – Hill, 2001
- [10] Kumaar R., Ilyas M., Rathi N., P-SPICE Simulation of Split DC Supply Converter, *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, Vol. 4, (2012), Issue 1, 265-270
- [11] Winter M., Moser S., Schoenewolf S., Taube J., Herzog H.-G., Average model of a synchronous half-bridge DC/DC converter considering losses and dynamics, Proceedings of the 11th International Modelica Conference, 479-484, France 2015, DOI: 10.3384/ecp15118479
- [12] Yaakov S.B., Average simulation of PWM converters by direct implementation of behavioural relationships, *INT. J. Electronics*, (1994), Vol. 77, No. 5, 731-746
- [13] Amran Y., Hulichel F., Yaakov S.B., A Unified SPICE Compatible Average Model of PWM Converters, *IEEE Transactions of Power Electronics*, Vol. 6, No 4, (1991)
- [14] Muhamad N.D., Sahid M.R., Yatim A.H.M., Idris N.R.N., Ayob M.S., Design of Power Stage and Controller for DC-DC Converter Systems Using PSPICE, *IEEE PEDS*, (2015), 903-907
- [15] Biolek D., Biolkova V., Kolka Z., SPICE Modeling of Switched DC-DC Converters via Generalized Model of PWM Switch, *Radioelektronika*, 2007. 17th International Conference, 2007, DOI: 10.1109/RADIOELEK.2007.371416
- [16] Biolek D., Biolkova V., Kolka Z., Averaged modeling of switched DC-DC converters based on Spice models of semiconductor switches, Proceedings of the 7th WSEAS Conference on CIRCUITS, SYSTEMS, ELECTRONICS, CONTROL and SIGNAL PROCESSING, 2008
- [17] Xu J., Yu J., Zeng H., SPICE simulation of switched DC-DC converters, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 1991, doi: 10.1109/ISCAS.1991.176182
- [18] Abe S., Zaitou T., Obata S., Shoyama M., Ninomiya T., Pole-Zero-Cancellation Technique for DC-DC Converter, *Advances in PID Control*, www.intechopen.com
- [19] Janke W., Equivalent circuits for averaged description of DC-DC switch-mode power converters based on separation of variables approach, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, Vol. 61, (2013), nr 3, 711-723