Włodzimierz JANKE

Wydział Elektroniki i Informatyki, Politechnika Koszalińska

doi:10.15199/48.2018.08.08

Czynniki ograniczające dokładność wyznaczania transmitancji impulsowych przekształtników napięcia

Streszczenie. *W projektowaniu bloków sterowania w impulsowych przekształtnikach napiecia stałego wykorzystuje się opisy bloku głównego przekształtnika w formie transmitancji małosygnałowych. Jakość projektu bloku sterowania zależy miedzy innymi od dokładności z jaką znane są te transmitancje. W pracy przedyskutowano czynniki, które powodują, że transmitancje bloku głównego przekształtnika mogą być znane z ograniczoną dokładnością, a otrzymywany na ich podstawie projekt bloku sterujacego powinien być traktowany jedynie jako wstępne przybliżenie.*

Abstract. *In the design of the control circuits for switch-mode power converters, the formulas for small-signal converter transmittances are utilized. The quality of the control circuit design depends on the accuracy in the determination of the power stage transmittances. In the paper, four groups of the small-signal transmittances inaccuracy are pointed out and discussed. They are connected to the errors in the description of the parasitic effects in the converter components; errors introduced in the derivation of the converter averaged models; errors resulting from the small-signal approximation of the nonlinear dependencies and the errors in the measurements used for the verification of the theoretical models* ***(Limitations of the accuracy in the pulse power converter transmittance derivation)***

Słowa kluczowe: Impulsowe przekształtniki napięcia, Transmitancje małosygnałowe, Modele uśrednione
Keywords: Switch-mode power converters; Small-signal transmittances; Averaged models

Wstęp

Impulsowe przekształtniki napięcia stałego są bardzo szeroko stosowane i systematycznie udoskonalane. Poprawę właściwości przekształtników osiąga się dzięki postępom w technologii wytwarzania elementów i w metodach projektowania. Głównym zadaniem impulsowego przekształtnika napięcia jest utrzymywanie stałej wartości napięcia na obciążeniu pomimo występowania czynników zakłócających, którymi mogą być składowe zmienne napięcia wejściowego oraz prądu obciążenia. Typowy, impulsowy przekształtnik napięcia stałego składa się z bloku głównego i bloku sterującego. W opisie bloku głównego przekształtnika stosuje się często transmitancje małosygnałowe. Posługiwanie się transmitancjami małosygnałowymi jest wygodne na etapie projektowania przekształtnika. W wielu pozycjach literaturowych (np. [1] – [4]) dyskutuje się sposoby projektowania bloku sterującego przekształtnika oparte na wykorzystaniu znajomości jego transmitancji małosygnałowych. Jakość zaprojektowanego przekształtnika zależy miedzy innymi od tego, z jaką dokładnością są znane jego transmitancje. Dokładność ta jest ograniczona z powodu czynników omawianych w niniejszej pracy. Przedstawione rozważania odnoszą się do przekształtników pracujących z wykorzystaniem modulacji szerokości impulsów (PWM).

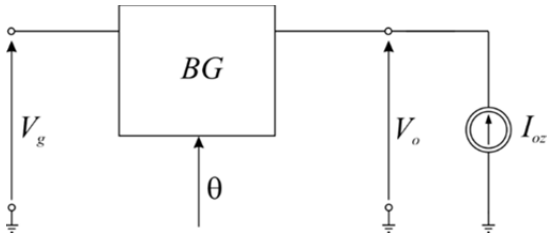
Określenia, wyznaczanie i zastosowanie transmitancji małosygnałowych

Najczęściej stosowane małosygnałowe transmitancje przekształtników określa się w literaturze anglojęzycznej jako „input-to-output" lub „audio susceptibility" *Hg* oraz „control-to-output" *Hd* [1], [3], [4]. Inną, często stosowaną transmitancją jest impedancja wyjściowa Z_o. Rzadziej używaną jest admitancja (lub impedancja) wejściowa bloku głównego przekształtnika. Definicje wymienionych transmitancji, można, w oparciu o rysunek 1, wyrazić wzorami:

(1) $$H_g(s) = \left.\frac{V_o}{V_g}\right|_{\theta=0}$$

(2) $$H_d(s) = \left.\frac{V_o}{\theta}\right|_{V_g=0}$$

(3) $$Z_o = \left.\frac{V_o}{I_{oz}}\right|_{V_g=0;\theta=0}$$



Rys. 1. Wielkości małosygnałowe w opisie bloku głównego impulsowego przekształtnika napięcia stałego

Wielkości na rys 1 i we wzorach oznaczają reprezentacje małych składowych zmiennych odpowiednio napięcia wejściowego i wyjściowego, prądu obciążenia oraz współczynnika wypełnienia przebiegu sterującego w dziedzinie operatora *s*.

Transmitancje małosygnałowe stanowią jedną z form uśrednionego opisu bloku głównego przekształtnika. Modele uśrednione opisują związki między wartościami prądów i napięć w przekształtniku uśrednionymi na okres przełączania. Proces uśredniania prowadzi najpierw do uśrednionego modelu wielkosygnałowego, który jest nieliniowy. Następnym etapem jest linearyzacja modelu wielkosygnałowego, czyli wyznaczenie modelu uśrednionego małosygnałowego w formie układu równań lub schematu zastępczego. Z tego modelu, na podstawie podanych, definicji wyznacza się transmitancje. Etap tworzenia uśrednionego modelu wielkosygnałowego można uznać za niejednoznaczny, gdyż w literaturze opisano kilka technik jego realizacji, które w pewnych przypadkach mogą prowadzić do różnych wyników.

Najważniejszym zastosowaniem transmitancji „control-to-output" H_d jest projektowanie bloku sterowania, który powinien minimalizować skutki istnienia czynników zakłócających pracę przekształtnika. Traktując blok sterowania jako podukład włączony pomiędzy wyjście bloku głównego a jego wejście sterujące określamy transmitancję bloku sterowania H_s jako:

(4) $$H_s(s) = \frac{\theta(s)}{V_o(s)}$$

Blok główny wraz z blokiem sterującym stanowią system ze sprzężeniem zwrotnym, o którego właściwościach decyduje transmitancja pętli H_p:

(5) $$K_p = H_d \cdot H_s$$

Podstawą projektu bloku sterującego przekształtnika jest wyznaczenie jego transmitancji H_s. Ogólne wymagania na projekt bloku sterującego wynikają z wymagań na transmitancję pętli H_p. Jej moduł powinien być dostatecznie duży w szerokim zakresie częstotliwości obejmującym widmo sygnałów zakłócających, co zapewni odpowiednie tłumienie skutków tych sygnałów, zaś przy częstotliwości odcięcia (gdzie $|H_p| = 1$) powinien być zabezpieczony odpowiedni margines fazy (typowo 40 – 60°, a dokładniejsze wartości są ustalane na podstawie szczegółowych wymagań stawianych przekształtnikowi). Prawidłowy projekt bloku sterującego, czyli odpowiednie wyznaczenie transmitancji H_s, wymaga zatem dokładnej znajomości transmitancji H_d. W ocenie właściwości opracowywanych wersji projektu niezbędne jest także dysponowanie dokładnymi wyrażeniami opisującymi pozostałe transmitancje bloku głównego.

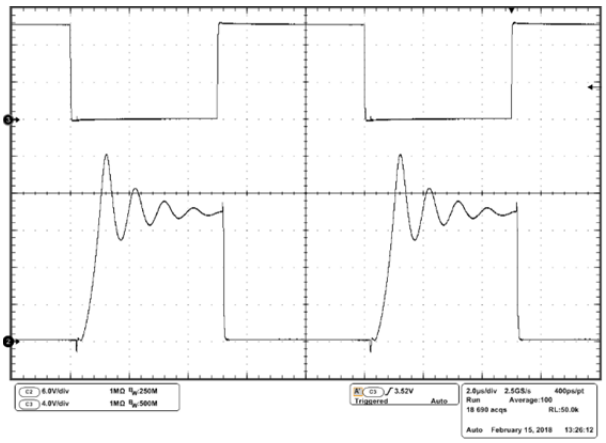
Źródła i skutki niedokładności określania transmitancji

Są cztery główne źródła niedokładności wyznaczania małosygnałowych transmitancji bloku głównego przekształtnika: a) niedokładny opis elementów przekształtnika; b) sposób tworzenia modeli uśrednionych; c) linearyzacja modelu wielkosygnałowego; d) błędy pomiarowe.

Wiele analiz (np. [1], [3], [4]) pracy układów przekształtników, w tym opisy projektowania bloku sterującego opiera się na założeniu, że poszczególne elementy bloku głównego są idealne. W niektórych pracach, nieidealność elementów przekształtnika jest uwzględniona częściowo, a więc na przykład uwzględnia się pasożytnicze rezystancje szeregowe tylko niektórych elementów. Jako opis dokładny traktuje się w części prac przedstawienie każdego elementu przekształtnika jako szeregowego połączenia elementu idealnego i rezystancji szeregowej [5], [6], [7]. Nie jest to jednak opis ścisły, co można stwierdzić nie tylko analizując szczegółowo zjawiska w poszczególnych elementach przekształtnika, ale także przeprowadzając pomiary rezystancji pasożytniczych. Jak pokazano w [8], próby pomiaru zastępczych rezystancji szeregowych cewek i kondensatorów stosowanych w popularnych przekształtnikach dają wartości zależne od częstotliwości.

Niedokładna znajomość parametrów elementów przekształtnika powoduje, że wzory teoretyczne opisujące transmitancje przekształtnika są niedokładne lub współczynniki w tych wzorach nie są dokładnie znane. Podobne znaczenie ma niedokładna znajomość współczynnika wypełnienia przebiegu przełączającego, który powoduje kolejne przechodzenie przekształtnika miedzy stanami ON i OFF. Zasygnalizowany problem zilustrowano na rysunku 2, który przedstawia przykładowe przebiegi napięcia doprowadzanego do bramki tranzystora MOSFET, służącego jako przełącznik sterowany w przekształtniku Flyback oraz napięcia między drenem i źródłem tego tranzystora [9]. Wartości współczynnika wypełnienia oceniane na podstawie tych dwóch przebiegów różnią się z powodu inercji tranzystora.

Przyjęcie uśrednionego modelu bloku głównego przetwornicy, czyli zastąpienie rzeczywistych przebiegów prądów i napięć w trakcie przełączania wartościami średnimi w pojedynczym okresie jest oczywiście przybliżeniem. Dodatkowe źródła niedokładności mogą wiązać się z konkretną technika tworzenia modelu uśrednionego. W literaturze są szeroko opisywane dwie techniki wyznaczania modeli uśrednionych prostych przekształtników oparte na metodzie uśredniania równań stanu („state space averaging”) oraz na utworzeniu uśrednionego modelu pary przełączników („switch averaging”) [1], [10], [3], [11], [12]. Techniki te są nieraz przedstawiane jako równoważne, ale prowadzą one do identycznych modeli tylko w szczególnych przypadkach, mianowicie dla przetwornic idealnych pracujących w trybie ciągłego przewodzenia (CCM). W pracy [5] zwrócono uwagę na nieformalności popełniane przez autorów prac prezentujących zastosowanie techniki „switch averaging” do wyznaczania modeli uśrednionych. Nieformalności te w niektórych przypadkach mogą prowadzić do błędów. W pracach [13], [14] pokazano także że transmitancje małosygnałowe przekształtników w których opisie uwzględniono rezystancje szeregowe elementów, otrzymane przy wykorzystaniu różnych technik uśredniania różnią się nieznacznie. O różnicach między uśrednionymi modelami najprostszych przetwornic w trybie nieciągłego przewodzenia (DCM) wyznaczanych metodą „state space averaging” i „switch averaging” sygnalizowano już dawno [12],[15]. Można pokazać, że dla prostych, idealnych przetwornic Buck (obniżająca napięcie) i Boost (podwyższająca napięcie), model uśredniony dla trybu DCM, wyprowadzany na zasadzie uśredniania równań stanu prowadzi do jednobiegunowych transmitancji H_d i H_g, podczas gdy modele oparte na technice „switch averaging”, według prac [1], [12], [15], [16] prowadzą do transmitancji dwubiegunowych. Zwolennicy techniki „switch averaging” sugerowali, że technika „state space averaging” prowadzi w tym wypadku do błędów [12], [15], [16], ale w żadnej z wymienionych prac nie wykazali tego w sposób formalny natomiast powoływali się na niektóre wyniki pomiarów, co zostanie skomentowane w dalszej części pracy. Stosowana znacznie rzadziej technika uśredniania oparta na separacji zmiennych [6], [7], prowadzi w przypadku idealnych przetwornic w trybie DCM do transmitancji jednobiegunowych, podobnie jak technika uśredniania równań stanu.



Rys. 2 Przebiegi napięcia na bramce i na drenie tranzystora w przekształtniku Flyback [9]

Kolejnym źródłem niedokładności przy wyznaczaniu transmitancji małosygnałowych jest proces linearyzacji nieliniowego modelu uśrednionego. Liniowe przybliżenie zależności nieliniowej może być uznane za dokładne tylko w przypadku granicznym, gdy wielkość rozpatrywanego przyrostu zmierza do zera. Problem błędów powodowanych przez użycie modelu liniowego dla opisu związków miedzy sygnałami (wielkościami przyrostowymi) o skończonych

amplitudach jest powiązany z problemem dokładności pomiarów używanych do weryfikacji modelu.

Małosygnałowe transmitancje przekształtników napięcia wyznaczane teoretycznie mogą być weryfikowane doświadczalnie, co powinno pozwolić na skorygowanie niedokładności opisów teoretycznych i ewentualnie na rozstrzygniecie, który z modeli teoretycznych jest poprawny. Wymaga to zapewnienia bardzo dobrej dokładności pomiarów transmitancji małosygnałowych i bardzo dobrej dokładności pomiarów parametrów elementów przekształtnika. Krytyczne w tego typu pomiarach jest zapewnienie odpowiednio dużego parametru SNR (signal/noise ratio) w obecności dużych zakłóceń związanych z procesami przełączania wynikającymi z zasadą działania przekształtnika impulsowego. Jest to szczególnie trudne w zakresie powyżej częstotliwości podstawowego bieguna transmitancji. Zwiększanie amplitudy sygnałów używanych w pomiarach transmitancji poprawia parametr SNR ale zwiększa błędy wynikające z zastąpienia modelu wielkosygnałowego małosygnałowym.

O trudnościach z wykorzystaniem wyników pomiarów transmitancji przekształtników do oceny poprawności wybranych modeli teoretycznych może świadczyć wzmianka w pracy [12], według której mierzony przebieg modułu jednej z transmitancji przekształtnika w trybie DCM wskazuje na jednobiegunowy charakter transmitancji, podczas gdy przebieg charakterystyki fazowej sugeruje, że transmitancja jest dwubiegunowa. W pracy [17] pokazano natomiast, że zastosowanie filtracji sygnału mierzonego w trakcie eksperymentalnego wyznaczania charakterystyki fazowej transmitancji, mające na celu eliminację zakłóceń, może dawać różne wyniki zależnie od szczegółów zastosowanego sposobu filtracji.

Poza wymienionymi wyżej głównymi grupami czynników wpływajacych na dokładność wyznaczania transmitancji małosygnałowych można wymienić inne, o mniejszym znaczeniu lub ujawniające się tylko w szczególnych sytuacjach. Jako przykład można wymienić występowanie pasożytniczych oscylacji towarzyszących procesom przełączania elementów półprzewodnikowych lub pojawiajace się w jednej z faz przełaczania przy pracy w trybie DCM [18].

Wnioski

Zadanie projektowania bloku sterującego impulsowego przekształtnika napięcia można sprowadzić do wyznaczania jego transmitancji oznaczonej w tej pracy przez H_s. Takie określenie odnosi się bezpośrednio do projektowania analogowych bloków sterowania ale można je odnieść także do projektowania cyfrowych regulatorów przetwornic napięcia, gdyż regulatory cyfrowe projektowane są najczęściej w oparciu o (wirtualny) prototyp analogowy. Współczesne możliwości techniki cyfrowej pozwalają na bardzo precyzyjne zrealizowanie wymagań stawianych transmitancji bloku sterującego. Jakość procesu projektowania bloku sterującego, a w konsekwencji także parametry zaprojektowanego przekształtnika mogą zależeć od tego, jak dokładnie znane są małosygnałowe transmitancje bloku głównego przekształtnika. Rozważania przedstawione w poprzednim rozdziale pokazują, że dokładność wyznaczenia małosygnałowych transmitancji bloku głównego przekształtnika jest ograniczona. Źródła błędów można rozpoznawać i minimalizować, lecz nie da się ich wyeliminować. Projekt bloku sterującego otrzymany na podstawie wyznaczonych transmitancji małosygnałowych należy traktować jako wstępny. Powinien on być poprawiany na podstawie serii symulacji wielkosygnałowych, uwzględniających pełne przebiegi prądów i napięć w trakcie przełączania.

Autor: *prof. dr hab. inż. Włodzimierz Janke, Faculty of Electronics and Computer Science, Koszalin University of Technology, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin*

LITERATURA

[1] R. W. Erickson, D. Maksimovic, *„Fundamentals of Power Electronics”,* 2-nd Edition, Kluwer, (2002).
[2] M. K. Kazimierczuk, *„Pulse-Width Modulated DC–DC Power Converters”*, J. Wiley, (2008).
[3] D. Maksimowic, A.M. Stankovic, V.J. Thottuvelil and G.C. Verghese, *„Modeling and Simulation of Power Electronic Converters”,* Proc. IEEE 89(6), 898-912 (2001).
[4] E. Niculescu, D. Purcaru, and M. Niculescu, *„Small-Signal Models of Some Basic PWM Converters”,* 12-th WSEAS Intern. Conf. on Circuits, Heraklion, Greece, July 22-24, 321-326 (2008).
[5] W. Janke, *„Averaged models of pulse-modulated DC-DC power converters”*. Part I. Discussion of standard methods, Archives of Electrical Engineering, Vol. 61(4), pp. 609-631 (2012).
[6] W. Janke, *„Averaged Models of Pulse-Modulated DC-DC Converters”*, Part II. Models Based on the Separation of Variables, Archives of Electrical Engineering, Vol. 61, no. 4, pp. 633-654 (2012).
[7] W. Janke, *„Equivalent Circuits for Averaged Description of DC-DC Switch-Mode Power Converters Based on Separation of Variables Approach”*, Bull. of the Polish Academy of Sciences, Vol. 61, no. 3, pp. 711-723 (2013).
[8] W. Janke, A. Hapka, M. Bączek, M. Oleksy, J. Kraśniewski, *„Problemy określania pasozytniczych parametrów impulsowych przetwornic napięcia”*, Przeglad Elektrotechniczny, 9/2016, pp. 125 – 128.
[9] M. Bączek, J. Kraśniewski, Materiały niepublikowane.
[10] R. D. Middlebrook, S. Cuk, *„A General Unified Apprroach To Modelling Switching-Converter Power Stages”*, IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 73-86, (1976).
[11] V. Vorperian, *„Simplified Analysis of PWM Converters using Model of PWM Switch”,* Part I: Continuous Conduction Mode, IEEE Transactions on aerospace and electronic systems VOL. 26, NO. 3, pp. 490-496, (1990).
[12] V. Vorperian, *„Simplified analysis of PWM converters using the model of the PWM switch”,* Part II: Discontinuous Conduction Mode, IEEE Transactions on aerospace and electronic systems VOL. 26, No.3, pp. 497-505, (1990).
[13] W. Janke, *„Small-signal transmittances of DC-DC step-down PWM converter in various operation modes”*, Archives of Electrical Engineering, Vol. 64 n. 3, pp. 505-529 (2015).
[14] W. Janke, *„Characteristic frequencies in averaged description of step-down (Buck) DC-DC power converter”*, Archives of Electrical Engineering, Vol. 65 n. 4, pp. 703-717, (2016).
[15] J. Sun, D. M. Mitchell, M. F. Greuel, P. T. Krein, R. M. Bass, *„Averaged Modeling of PWM Converters Operating in Discontinuous Conduction Mode”*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 16 No. 4, pp. 482-492, (2001).
[16] M. Usman Iftikhar, P. Lefranc, D. Sadarnac, C. Karimi, *„Theoretical and Experimental Investigation of Averaged Modeling of Non-ideal PWM DC-DC Converters Operating in DCM”*, IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), pp. 2257-2263, (2008).
[17] M. Walczak, W. Janke, *„Zależności fazowe w małosygnałowym opisie przekształtników napięcia stałego”*, Przeglad Elektrotechniczny, 8/2017, pp. 95-97
[18] M. Walczak, *„Impact of inductor current ringing in DCM on output voltage of DC-DC buck converter”*. Archives of Electrical Engineering, Vol. 66 n. 2, pp. 313-323, (2017).