

Zależności fazowe w małosygnalowym opisie przekształtników napięcia stałego

Streszczenie. W niniejszej pracy rozważa się wpływ różnych czynników na kształt charakterystyk częstotliwościowych w układach przetwornicy napięcia stałego. Jako jeden z czynników wskazuje się błędną interpretację wyników pomiarowych, uzyskanych poprzez uśrednianie napięcia wyjściowego za okres przełączania, co może prowadzić do dużych różnic w charakterystyce fazowej. Przykład błędnej interpretacji wyników pomiarowych przedstawiono wykorzystując symulację w programie PSpice, za pomocą którego generowano przebiegi czasowe przetwornicy BUCK pracującej w trybie CCM i DCM.

Abstract. Influence of various factors on frequency characteristics of DC/DC converters is analyzed. It has been shown that wrong interpretation of measured values can lead to large discrepancies in phase characteristic. In order to show it, the series of simulations have been made. In the simulations the PSpice program had been used to generate voltages in time domain in order to immitate conditions during measurement of real BUCK converter working in CCM and DCM. Next the output voltage has been filtered using averaging over switching cycle in order to eliminate harmonics related to the switching frequency. After that the averaged value of the output voltage has been used to draw phase characteristic. Also alternative phase characteristics have been drawn, based on localization of the points during the averaging, showing that wrong interpretation of analyzed data can lead to large discrepancies in phase characteristic. The discrepancies are larger in discontinuous conduction mode, where the maximum phase shift is smaller than in the same converter working in continuous conduction mode. (*Phase dependencies in small-signal transfer functions of dc-dc converters*).

Słowa kluczowe: BUCK, charakterystyki częstotliwościowe, control-to-output

Keywords: BUCK converter, frequency characteristics, control-to-output

Wstęp

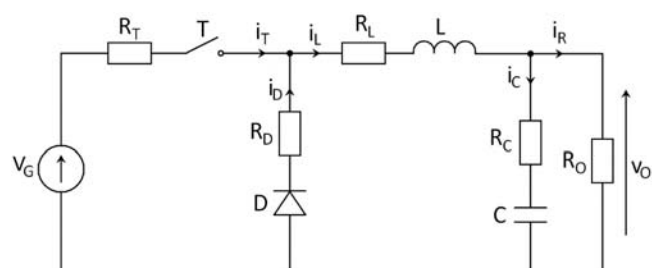
Blok sterowania impulsowego przekształtnika napięcia stałego musi być dobrany w taki sposób, aby utrzymywać wymagane napięcie wyjściowe przekształtnika pomimo zmian napięcia wejściowego i prądu obciążenia. Dobór charakterystyk dynamicznych bloku sterowania odbywa się w oparciu o transmitancje bloku głównego przekształtnika. Dokładna znajomość tych transmitancji jest warunkiem poprawnego zaprojektowania bloku sterującego. Przy wyprowadzaniu wzorów opisujących transmitancje tworzy się najpierw uśredniony model bloku głównego a potem dokonuje się jego linearyzacji [1, 2, 3].

Weryfikacja teoretycznego opisu transmitancji opartych na modelach uśrednionych może być przeprowadzona przez symulacje wykonane na pełnych modelach bloku głównego (bez uśredniania) lub przez odpowiednie pomiary. W przypadku pomiarów należy liczyć się z występowaniem czynników zakłócających, utrudniających interpretację wyników. Głównym celem niniejszej pracy jest analiza wpływu czynników zakłócających na przebieg otrzymywanych charakterystyk fazowych.

Rozważane tu zagadnienia odnoszą się do najważniejszych typów impulsowych przekształtników napięcia, przy czym szczegółowe zależności dotyczą bloku głównego przekształtnika obniżającego napięcie (BUCK), pokazanego na rysunku 1. Uwzględniono pasywnicze rezystancje tranzystora (R_T), diody (R_D), cewki (R_L) i kondensatora (R_C). Podobnie jak w innych pracach opisujących modele uśrednione zakładamy, że przebieg prądu cewki w obrębie jednego okresu przełączania jest funkcją odcinkowo-liniową. Modele otrzymane przy uwzględnieniu rezystancji pasywniczych określamy jako nieidealne zaś bez rezystancji pasywniczych – jako idealne.

Modele uśrednione opisują związki między wartościami prądów i napięć w bloku głównym przekształtnika uśrednionymi na okres przełączania. Uśrednione modele impulsowych przekształtników napięcia opisywane w literaturze (np. [2, 4, 5]) otrzymywano różnymi metodami. Najwcześniej przedstawiono metodę uśredniania równań stanu [4, 5], później – technikę wykorzystującą uśredniony submodel pary przełączników określaną jako „switch-

averaging-method [1, 6], która jest obecnie częściej stosowana. Inne podejście do tworzenia modeli uśrednionych opiera się na tzw. separacji zmiennych [7, 8].



Rys.1. Przetwornica BUCK z uwzględnieniem rezystancji pasywniczych

Modele uśrednione idealnego przekształtnika napięcia (np. przekształtnika BUCK) pracującego w trybie CCM, otrzymane trzema wymienionymi metodami są identyczne i są modelami drugiego rzędu. Modele dla trybu DCM otrzymane techniką „switch averaging” również są modelami drugiego rzędu [6, 9]. Uśrednione modele dla trybu DCM otrzymane pozostałymi metodami są modelami pierwszego rzędu [4, 7]. W niektórych pracach przedstawiono sugestię, że wyznaczanie modeli uśrednionych techniką „state-space-averaging” jest niepoprawne [5, 6, 10] jednak podane tam uzasadnienia nie są przekonujące.

Transmitancje małosygnalowe

Z punktu widzenia zastosowania w projektowaniu bloku sterującego, najważniejszą jest transmitancja określona jako „control-to-output” zdefiniowana wzorem:

$$(2) \quad H_d = \frac{V_o}{\theta} \Big|_{V_g=0}$$

gdzie V_g , V_o , θ , reprezentują odpowiednio składowe zmienne napięcia wejściowego, wyjściowego oraz współczynnika wypełnienia w dziedzinie s .

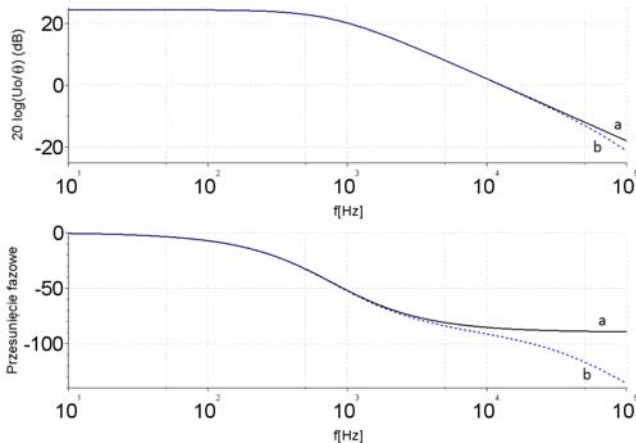
Postać tej transmitancji dla przekształtnika BUCK zależy od trybu pracy przekształtnika i metody wyznaczania modelu

uśrednionego i może być funkcją dwubiegunową lub jednobiegunową.

$$(3) \quad H_{dd} = H_{od} \cdot \frac{1 + s / \omega_z}{1 + B \cdot s + A \cdot s^2}$$

$$(4) \quad H_{dj} = H_{oj} \cdot \frac{1 + s / \omega_z}{1 + s / \omega_o}$$

Pulsacja zera ω_z w zależnościach (3) i (4) wiąże się z pasożytniczą rezystancją R_C kondensatora wyjściowego [10, 11]. Różnice między transmitancją dwubiegunową i jednobiegunową są lepiej widoczne na charakterystyce fazowej niż amplitudowej, co zilustrowano na rysunku 2 przy założonej częstotliwości przełączania $f_s = 100$ kHz i częstotliwości biegunów: f_{p1} (biegun zależności (4) i „dolny” biegun zależności (3)) = 772 Hz; f_{p2} („górny” biegun zależności (3)) = 94 951 Hz.



Rys.2. Charakterystyka amplitudowa i fazowa dla modelu jednobiegunowego (krzywe a) i dwubiegunowego (krzywe b)

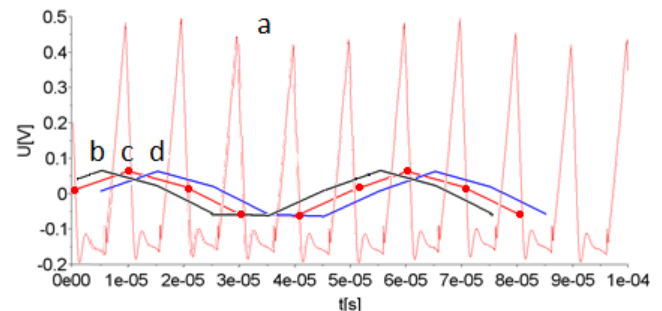
Według niektórych prac (np. [5, 6, 10]), zależności fazy transmitancji H_d od częstotliwości otrzymywane eksperymentalnie dla trybu DCM mają przebieg odpowiadający funkcji o postaci dwubiegunowej, czyli (3). Według pracy [6] obserwowane przebiegi modułu sugerowały zależność jednobiegunową zaś przebiegi fazy – dwubiegunową. Z drugiej strony, na podstawie wyprowadzeń opartych o uśrednianie równań stanu lub uśrednianie metodą separacji zmiennych dla przekształtnika w trybie DCM, otrzymuje się tylko jeden element reaktancyjny w modelu, zatem transmitancja H_d jest jednobiegunowa, czyli ma postać (4). Może być kilka przyczyn tej rozbieżności:

- 1) Model uśredniony, przy przyjętych założeniach jest obiektem drugiego rzędu zgodnie z pracami [5, 6, 9, 10], a rozważania prowadzące do modelu jednobiegunowego są błędne.
- 2) Założenia przyjmowane tutaj i w pracach [5, 6, 9, 10] są nieuzasadnione: a) przebiegi prądu cewki nie są odcinkowo liniowe lub b) należy przyjmować bardziej złożone modele elementów.
- 3) Na wyniki pomiarów wpływają czynniki nieuwzględniane w modelu uśrednionym.

Symulacje

Pomiary charakterystyki fazowej transmitancji małosygnałowej przy dużych częstotliwościach są zakłócanie przez składową zmienną napięcia wyjściowego wywołaną zmianami prądu cewki w obrębie okresu przełączania. Efekt ten ulega nasileniu wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału i może być zredukowany przez

odpowiednią filtracją. Błędnie dobrany filtr lub nieprawidłowa interpretacja wyników filtracji mogą wpływać na rozbieżności między pomiarem, a symulacją. Przykładem takiej filtracji jest uśrednianie przebiegu za okres przełączania. Skutki tego zabiegu zilustrowano na rysunku 3, gdzie założono częstotliwość przełączania $f_s = 100$ kHz oraz częstotliwość zmian współczynnika wypełnienia, stanowiącego sygnał wejściowy, $f_p = 20$ kHz. Każdy z punktów otrzymanych w wyniku uśredniania (rys.3 krzywa a, b, c) odpowiada wartości średniej napięcia wyjściowego w okresie przełączania.



Rys.3. Przebieg napięcia wyjściowego (a) oraz uśrednionych krzywych otrzymanych z punktów, które umieszczano na początku (b), na środku (c), na końcu okresu przełączania (d)

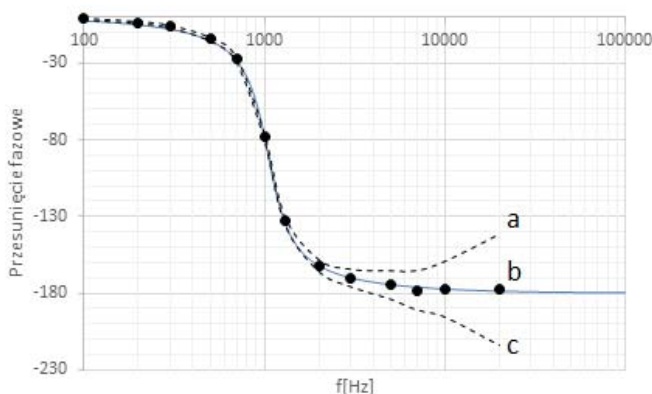
Punkty będące wynikiem uśredniania można umieścić na początku, w środku lub na końcu uśrednianego okresu, czego skutkiem będzie otrzymanie trzech krzywych przedstawionych na rysunku 3, odpowiednio b, c, d, które są przesunięte względem siebie o kąt:

$$(5) \quad \Delta\varphi = \pm \frac{f_{we}}{2f_s} \cdot 360^\circ$$

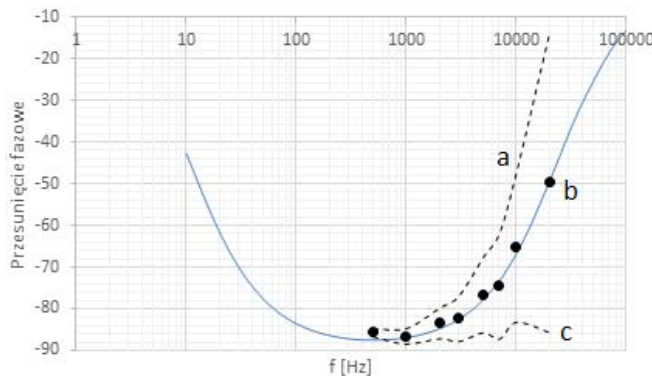
Rozbieżności w przesunięciu fazowym, opisane wzorem (5) będą miały znaczący wpływ na pomiar charakterystyki fazowej danej przetwornicy. Aby to potwierdzić wykonano symulacje idealnej przetwornicy BUCK pracującej w trybie CCM. Jako cel przyjęto wyznaczenie charakterystyki fazowej transmitancji H_d , której modele matematyczne, obliczone przy pomocy różnych technik, są znane i liczbowo zgodne [2, 7, 8]. Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano program PSpice, w którym generowano przebiegi czasowe napięcia wyjściowego. Napięcie to było następnie uśredniane za okres przełączania, a każdy punkt będący wynikiem uśredniania był umieszczany na początku, na środku lub na końcu uśrednianego okresu. Otrzymane krzywe porównywano z napięciem modulującym współczynnik wypełnienia w celu wyznaczenia przesunięcia fazowego. Do wyznaczenia teoretycznej charakterystyki fazowej na podstawie modelu matematycznego opisanego w pracach [3, 7, 11] wykorzystano program Scilab. Parametry przetwornicy, zgodne ze schematem z rysunku 2 wynoszą: $V_G = 24$ V; $L = 68$ μ H; $C = 340$ μ F; $R_O = 1$ Ω ; $f_s = 100$ kHz; $D = 0,5$; $\Delta D = 0,04$. Wartości rezystancji pasożytniczych przyjęto równe zero. Wynik symulacji przedstawiono na rysunku 4.

W przetwornicy pracującej w trybie DCM różnice w przesunięciu fazowym będą bardziej widoczne niż w trybie CCM, ze względu na mniejszą wartość maksymalnego przesunięcia fazowego. Taką sytuację przedstawiono w kolejnym przykładzie. Do dalszych symulacji przyjęto przetwornicę BUCK pracującą w trybie DCM, co zapewniono, przyjmując rezystancję obciążenia $R_O = 120$ Ω i współczynnik wypełnienia 0,2. Uwzględniono rezystancje pasożytnicze $R_T = 44$ m Ω ; $R_L = 50$ m Ω ; $R_C = 20$ m Ω ; $R_D = 344$ m Ω . Do wykreślenia teoretycznej charakterystyki

fazowej wykorzystano jednobiegunowy model matematyczny, wyprowadzony techniką separacji zmiennych [7, 11]. Wynik symulacji przedstawiono na rysunku 5.



Rys.4. Charakterystyka fazowa idealnej przetwornicy BUCK w trybie CCM, na podstawie: modelu (linia ciągła), poprzez uśrednianie za okres przełączania, gdzie punkty umieszczano na początku (a), na środku (b) i na końcu okresu przełączania (c)



Rys.5. Charakterystyka fazowa nieidealnej przetwornicy BUCK w trybie DCM, na podstawie: modelu jednobiegunowego (linia ciągła), poprzez uśrednianie za okres przełączania, gdzie punkty umieszczano na początku (a), na środku (b) i na końcu okresu przełączania (c)

Na charakterystykach z rysunku 4 i rysunku 5 można zauważyć, że umieszczanie uśrednionej wartości za okres przełączania na początku lub na końcu tego okresu prowadzi do dużych różnic w przesunięciu fazowym. Różnice te są szczególnie widoczne przy wyższych częstotliwościach. Umieszczając wynik uśredniania na środku okresu przełączania można otrzymać bardzo dobrą zgodność z wartością teoretyczną nawet przy częstotliwościach wynoszących 0,1 częstotliwości przełączania. Pomiar dla wyższych częstotliwości może być obarczony dużym błędem ze względu na zmniejszający się stosunek liczby okresów przełączania do okresu sygnału badanego. W związku z tym ilość punktów będących wynikiem uśredniania maleje, co w rezultacie prowadzi do zniekształcenia sinusoidy. Przykład takiego zniekształcenia można zauważyć na rysunku 3, krzywa b, c d.

Wnioski

Zagadnienia poruszane w tej pracy dotyczą impulsowych przekształtników napięcia stałego, przy czym rozważania szczegółowe przeprowadzono dla przekształtnika obniżającego napięcie (BUCK). Na charakterystyki częstotliwościowe modułu i fazy małosygnalowych transmitancji impulsowych

przekształtników wpływają między innymi czynniki zakłócające, które utrudniają interpretację wyników pomiarów i symulacji. Ma to szczególne znaczenie w przypadku przebiegu fazy transmitancji przekształtnika w trybie DCM. Z jednej strony występują różnice między charakterystykami wyznaczonymi teoretycznie z zastosowaniem różnych technik tworzenia modeli uśrednionych. Z drugiej strony, na wyniki pomiarów lub symulacji przeprowadzonych na pełnych modelach przekształtnika (bez uśredniania) może wpływać sposób obróbki sygnału wyjściowego (składowej zmiennej napięcia na obciążeniu) zmierzający do ograniczenia wahań napięcia wyjściowego, wynikających ze zmian prądu cewki w obrębie pojedynczego okresu.

Jak pokazano w rozdziale 3, zależnie od sposobu dokonywania filtracji przebiegu wyjściowego otrzymuje się różne przebiegi charakterystyki fazowej. W efekcie trudno jest rozstrzygać, które z zależności wyznaczonych teoretycznie na podstawie modeli uśrednionych, otrzymywanych różnymi metodami, są poprawne. Zakłócenia w wyznaczanych przebiegach transmitancji mogą być spowodowane także innymi czynnikami, które w tej pracy nie były analizowane. Może to być przykładowo nieliniowy charakter zmian prądu cewki w czasie.

Autorzy: mgr inż. Marcin Walczak, prof. dr hab. inż. Włodzimierz Janke, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, ul. JJ Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, E-mail: marcin.walczak@tu.koszalin.pl, wjanke@ie.tu.koszalin.pl.

LITERATURA

- [1] Vorperian V., Simplified Analysis of PWM Converters using Model of PWM Switch Part I: Continuous Conduction Mode, *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems* Vol. 26 (1990), No. 3, 490-496
- [2] Kazimierzczuk M.K., Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters, J. Wiley, (2008)
- [3] Janke W., Averaged models of pulse-modulated DC-DC power converters. Part I. Discussion of standard methods, *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 61 (2012), No. 4, 609-631
- [4] Middlebrook R.D., Cuk S., A General Unified Approach To Modelling Switching-Converter Power Stages, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, (1976), 73-86
- [5] Sun J., Mitchell D.M., Greuel M.F., Krein P.T., Bass R.M., Averaged Modeling of PWM Converters Operating in Discontinuous Conduction Mode, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 16 (2001), No. 4, 482-492
- [6] Vorperian V., 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 (1990), No.3, 497-505
- [7] Janke W., Averaged Models of Pulse-Modulated DC-DC Converters, Part II. Models Based on the Separation of Variables, *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 61 (2012), No. 4, 633-654
- [8] Janke W., 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 (2013), No. 3, 711-723
- [9] Erickson R.W., Maksimovic D., Fundamentals of Power Electronics, 2-nd Edition, Kluwer, (2002)
- [10] Usman Iftikhar M., Lefranc P., Sadarnac D., Karimi C., Theoretical and Experimental Investigation of Averaged Modeling of Non-ideal PWM DC-DC Converters Operating in DCM, *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, (2008), 2257-2263
- [11] Janke W., Walczak M., Influence of output conductance on characteristic frequencies of switch mode BUCK and BOOST converter, *Archives Of Electrical Engineering*, Vol. 66 (2017), No. 1, 165-178