

Marcin Walczak
Katedra Systemów Elektronicznych
Wydział Elektroniki i Informatyki
Politechnika Koszalińska

Badania symulacyjne charakterystyk przetwornic buck i boost z uwzględnieniem rezystancji pasożytniczych

Słowa kluczowe: BUCK, BOOST, przetwornica, Step-down, Step-up, charakterystyki przetwornic, rezystancje pasożytnicze

1. Wstęp

Ciągły rozwój techniki, tworzenie coraz bardziej złożonych i uniwersalnych układów scalonych, a także gwałtowny rozwój urządzeń mobilnych doprowadziły do tego, że coraz większą wagę zaczęto przykładać do ilości zużywanej energii elektrycznej. Pojęcie energooszczędności dotyczy energii pobieranej przez urządzenie, czyli sumy energii wykorzystywanej oraz energii traconej np. podczas zmniejszania, podwyższania lub stabilizacji napięcia. Dodatkowo coraz nowocześniejsze i szybsze układy scalone potrzebowały do prawidłowej pracy coraz mniejszych napięć i coraz większych prądów. To wszystko spowodowało, że wszędzie, gdzie to było możliwe zaczęto stosować układy przetwornic, które charakteryzują się wysoką sprawnością oraz niewielkimi wymiarami w stosunku do ilości przetwarzanej energii. Z drugiej strony przetwornica jest układem nieliniowym, działającym w sposób impulsowy więc jej modelowanie jest bardziej skomplikowane niż w przypadku układów liniowych, pracujących w sposób ciągły. Patrząc na układ przetwornicy pod kątem zasady działania można w niej wyróżnić dwa stany – stan włączenia (ON) oraz wyłączenia (OFF). Stwierdzenie, że przetwornica znajduje się w stanie włączenia oznacza, że jej klucz tranzystorowy jest zwarty i przewodzi prąd elektryczny. Suma czasów ON i OFF nazywana jest okresem kluczkowania. Stosunek czasu włączenia (ON) do całego okresu kluczkowania nazywa się współczynnikiem wypełnienia d_A . Ponieważ przetwornice pracują impulsowo, to ich modele matematyczne odnoszą się do wartości uśrednionych w stosunku do całego okresu kluczkowania. Jedną z możliwości wyznaczenia takiego modelu jest napisanie równań dla obu stanów ON i OFF, korzystając z ogólnej teorii obwodów. Następnie równania te należy uśrednić w odniesieniu do całego okresu kluczkowania [1][2]. Przy pomocy linearyzacji oddziela się wielkości wielkosygnalowe (niezmiennne w czasie) od małosygnalowych (zmiennych w czasie). Uzyskane w ten sposób wzory stanowią

komplet równań opisujących działanie przetwornicy dla dostatecznie małych częstotliwości (tj. poniżej 0,1 częstotliwości kluczowania) [3][4].

Na podstawie matematycznego modelu przetwornicy wyznacza się jej charakterystyki. Najczęściej sprawdzane jest zachowanie amplitudy danego napięcia lub prądu w dziedzinie czasu oraz częstotliwości. Charakterystyka w dziedzinie czasu ma za zadanie odpowiedzieć na pytanie jak zachowa się dane napięcie/prąd po skokowej zmianie np. napięcia zasilania. Zbyt duże wahania sygnału badanego są w niektórych przypadkach wysoko niepożądane. Charakterystyka w dziedzinie częstotliwości pozwala uzyskać informacje o przetwornicy jako filtrze dolnoprzepustowym. W tym przypadku ważna jest szerokość pasma przepustowego, wzmocnienie, tłumienie w paśmie zaporowym, a także przesunięcie fazowe.

W trakcie pracy przetwornicy, w jej elementach zarówno przełączających (tranzystor, dioda) jak i pasywnych (cewka kondensator) generowane są straty mocy. Straty te są wynikiem obecności rezystancji pasożytniczych, które znacząco wpływają na wszystkie charakterystyki przetwornic.

Konieczność uwzględniania tych rezystancji w modelach przetwornic impulsowych zauważono już przy opisie pierwszych technik modelowania [5]. Jednak uwzględniane rezystancje dotyczyły jedynie rezystancji elementów pasywnych (cewki i kondensatora), co na przykład w przypadku przetwornic Ćuk'a prowadziło do błędów przy symulacjach [6]. Model poprawnie opisujący działanie przetwornicy jest podstawą przy projektowaniu bloku sterowania. Blok ten pozwala przetwornicy właściwie reagować na zakłócenia o niskich częstotliwościach (do ok. 0,1 częstotliwości kluczowania). Pomimo tego rezystancje pasożytnicze kluczy (tranzystora i diody) są wciąż pomijane w niektórych pracach [1][7][8]. W pracach [9][10] pokazano, że wpływ tych rezystancji na charakterystyki przetwornicy jest zauważalny i nie powinien być pomijany. Natomiast wpływ poszczególnych rezystancji pasożytniczych na wahania napięcia wyjściowego i prądu wejściowego, w stanie nieustalonym oraz offsetu w stanie ustalonym opisano w pracy [11].

Niniejsza praca jest kontynuacją badań przedstawiających wpływ rezystancji pasożytniczych na charakterystyki częstotliwościowe oraz czasowe przetwornic BUCK oraz BOOST. Przedstawiono w niej symulacje bloku głównego przetwornic, zawierającego rzeczywiste, zmierzone rezystancje pasożytnicze zarówno elementów pasywnych (cewka, kondensator) jak i elementów łączeniowych (tranzystor, dioda). Symulacje zawierają porównanie transmitancji przetwornicy:

- idealnej,
- uwzględniającej rezystancje pasożytnicze elementów biernych,
- uwzględniającej wszystkie rezystancje pasożytnicze.

Drugi rozdział poświęcony jest przetwornicy BUCK. Na początku tego rozdziału przedstawiono definicję oraz wzory na transmitancje $H_g(s)$ oraz $H_d(s)$ wspomnianej przetwornicy. W kolejnych dwóch częściach tego rozdziału przedstawiono

charakterystyki częstotliwościowe oraz symulacje odpowiedzi na uskok jednostkowy, w dziedzinie czasu. Opisano znaczenie tych symulacji.

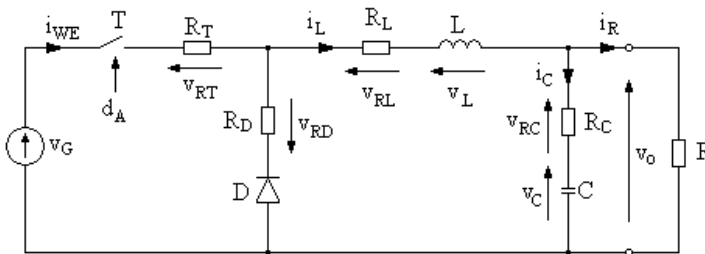
Trzeci rozdział poświęcono przetwornicy BOOST. Podobnie jak w poprzednim przypadku pierwszy podpunkt tego rozdziału zawiera wyrażenia na transmitancje $H_g(s)$ oraz $H_d(s)$, a w dwóch pozostałych zamieszczono charakterystyki częstotliwościowe oraz wyniki symulacji odpowiedzi na uskok jednostkowy, w dziedzinie czasu.

Rozdział czwarty zawiera podsumowanie pracy.

2. Przetwornica BUCK

2.1. Postacie transmitancji H_d oraz H_g

Blok główny przetwornicy BUCK, zawierającej wszystkie rezystancje pasozytnicze, przedstawiono na rys. 1. Do elementów kluczujących zalicza się tranzystor przedstawiony jako łącznik „T” oraz diodę „D”. Odpowiadające im rezystancje pasozytnicze, to odpowiednio R_T oraz R_D . Pozostałe rezystancje pasozytnicze R_L oraz R_C dotyczą strat w cewce i kondensatorze. Sygnałem sterującym pracą tranzystora jest sygnał d_A .



Rys. 1. Blok główny przetwornicy BUCK zawierający wszystkie rezystancje pasozytnicze

W tabeli 1 zamieszczono parametry symulacji. Pojemność kondensatora, indukcyjność cewki oraz wszystkie rezystancje pasozytnicze, wraz z rezystancją obciążenia, zostały określone w drodze pomiaru i odnoszą się do elementów przetwornicy, wykonanej w rzeczywistości.

Tabela 1. Parametry elementów bloku głównego przetwornicy BUCK

$V_G=12\text{ V}$	$R=5\ \Omega$
$D_A=0,5$	$R_T=28\text{ m}\Omega$
$L=92,2\ \mu\text{H}$	$R_D=300\text{ m}\Omega$
$C=487,23\ \mu\text{F}$	$R_L=40,1\text{ m}\Omega$
	$R_C=42,8\text{ m}\Omega$

Wpływ zmian napięcia wejściowego na napięcie wyjściowe opisuje transmitancja $H_g(s)$. Transmitancję tę określa się jako stosunek małosygnałowej wartości napięcia wyjściowego $V_o(s)$ do małosygnałowej wartości napięcia wejściowego $V_g(s)$ przy stałym współczynniku wypełnienia, zgodnie z poniższym wzorem:

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

gdzie:

$\theta(s)$ – składowa zmienna współczynnika wypełnienia, w dziedzinie „s”

W przypadku układu z rys. 1 transmitancja $H_g(s)$ wynosi [4]:

$$H_g(s) = \frac{D(1 + sCR_C)}{LC_Zs^2 + (GL + R_ZC_Z + CR_C)s + GR_Z + 1} \quad (2)$$

gdzie:

D – składowa stała współczynnika wypełnienia

$$R_Z = D_A(R_T - R_D) + R_D + R_L$$

$$C_Z = C(1 - R_C G)$$

$$G = \frac{1}{R}$$

Gdy układ sterowania przetwornicy wykryje zmianę napięcia wyjściowego spowodowaną np. zmianą napięcia wejściowego, to odpowiednio zareaguje modyfikując współczynnik wypełnienia sygnału kluczującego. Reakcję tę opisuje transmitancja $H_d(s)$, którą rozumie się jako stosunek małosygnałowej wartości napięcia wyjściowego $V_o(s)$ i małosygnałowej wartości współczynnika wypełnienia $\theta(s)$ przy stałej wartości napięcia wejściowego $V_g(s)$, zgodnie ze wzorem:

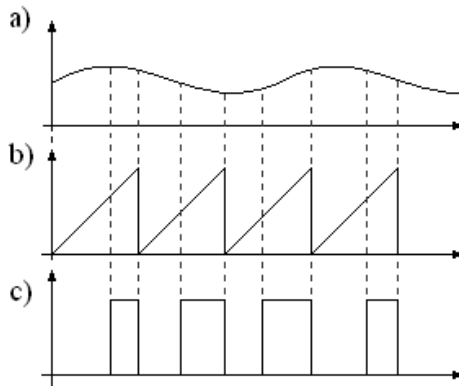
$$H_d(s) = \left. \frac{V_o(s)}{\theta(s)} \right|_{V_g(s)=0} \quad (3)$$

W rzeczywistym układzie skokowa zmiana np. napięcia wejściowego może być przyczyną dużych oscylacji napięcia na wyjściu przetwornicy. Amplituda oraz czas trwania tych oscylacji zależy głównie od typu przetwornicy oraz elementów jej bloku głównego. Szybsze stłumienie oscylacji jest możliwe poprzez zastosowanie pętli sprzężenia zwrotnego z układem sterującym. Jak wspomniano układ ten steruje współczynnikiem wypełnienia tj. czasem włączenia łącznika tranzystorowego.

Sam układ sterujący jest projektowany między innymi na podstawie transmitancji $H_d(s)$, dzięki temu potrafi on prawidłowo zareagować na wszelkie zmiany pojawiające się w napięciu wyjściowym przetwornicy. Źle wyznaczona transmitancja $H_d(s)$ spowoduje, że układ sterowania nie będzie w stanie prawidłowo sterować pracą przetwornicy, co

w ostateczności może doprowadzić do pojawienia się długotrwałych oscylacji napięcia wyjściowego.

W najprostszy sposób reakcję układu sterowania w przetwornicy BUCK można przedstawić za pomocą rys. 2. Napięcie wyjściowe (rys. 2a) podawane jest na komparator wraz z sygnałem piłokształtnym (rys. 2b). Na wyjściu komparatora otrzymuje się sygnał prostokątny o różnym współczynniku wypełnienia. Jeżeli napięcie wyjściowe było zbyt duże, to układ sterowania zmniejsza współczynnik wypełnienia, aby je obniżyć. Jeżeli napięcie na wyjściu było zbyt małe, to współczynnik wypełnienia zostaje zwiększony (rys. 2c).



Rys. 2. Wpływ sygnału wejściowego (a), na kształtowanie współczynnika wypełnienia (c) w przetwornicy BUCK

W przypadku układu z rys. 1 transmitancja $H_d(s)$ wynosi [4]:

$$H_d(s) = \frac{(V_G - I_L(R_T - R_D)) \cdot (1 + sCR_C)}{LC_Z s^2 + (GL + R_Z C_Z + CR_C)s + GR_Z + 1} \quad (4)$$

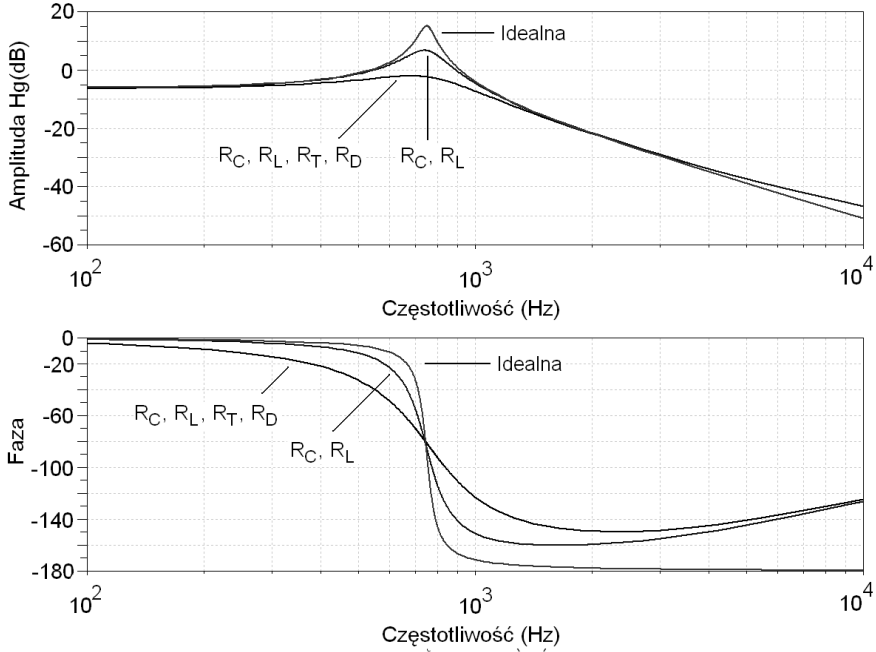
gdzie składowa stała prądu cewki wynosi:

$$I_L = G \frac{D_A V_G}{1 + R_Z G}$$

2.2. Symulacje w dziedzinie częstotliwości

Symulacja transmitancji $H_g(s)$ w dziedzinie częstotliwości pozwala określić jak częstotliwość sygnału wejściowego wpływa na przeniesienie tego sygnału z wejścia na wyjście przetwornicy. W praktyce oznacza to informację o przenoszeniu zakłóceń o różnych częstotliwościach z wejścia na wyjście układu. Na rys. 3 przedstawiono wyniki symulacji amplitudy i fazy transmitancji $H_g(s)$. Wyniki dotyczą trzech przypadków: przetwornicy idealnej, przetwornicy z rezystancjami pasozytniczymi elementów pasywnych (R_C , R_L) oraz przetwornicy z uwzględnieniem wszystkich

rezystancji pasożytniczych (R_C , R_L , R_T , R_D). W programie *Scilab* do wygenerowania charakterystyki częstotliwościowej służy komenda *bode(h)*, gdzie w miejsce litery *h* należy wstawić badaną transmitancję.



Rys. 3. Charakterystyka amplitudy i fazy transmitancji $H_g(s)$ przetwornicy BUCK (opis w tekście)

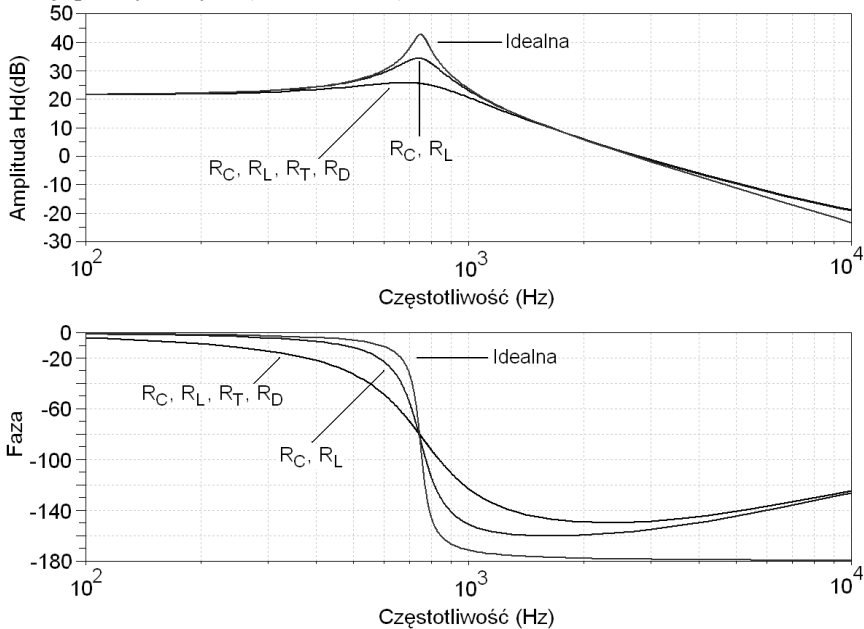
Aby lepiej zrozumieć wykres amplitudy z rys. 3, można posłużyć się przykładem. Na wejście przetwornicy podano napięcie, które posiada składową stałą $V_G=12V$ oraz składową zmienną $v_g(t)$. Składowa zmienna posiada amplitudę 50mV i oscyluje z częstotliwością f . Współczynnik wypełnienia d_A jest stały i wynosi 0,5. Jeżeli częstotliwość f składowej $v_g(t)$ będzie równa częstotliwości rezonansowej przetwornicy $f=f_r$, to napięcie wyjściowe będzie oscylować z amplitudą:

- ok. 560mV – dla przetwornicy idealnej
- ok. 224mV – dla przetwornicy uwzględniającej tylko niektóre rezystancje pasożytnicze (R_C , R_L)
- ok. 79mV – dla przetwornicy uwzględniającej wszystkie rezystancje pasożytnicze (R_C , R_L , R_T , R_D)

Powyższy przykład wyraźnie pokazuje różnice pomiędzy modelami przetwornicy, opisywanymi w niniejszej pracy. Oczywiście model uwzględniający wyłącznie rezystancję kondensatora i cewki lepiej opisuje działanie przetwornicy, niż model przetwornicy idealnej. Jednak zgodnie z rys. 3 po uwzględnieniu wszystkich rezystancji

pasożytniczych uzyskuje się prawie trzykrotnie mniejszą amplitudę wahań napięcia wyjściowego niż w przypadku uwzględnienia tylko rezystancji kondensatora i cewki.

Analiza częstotliwościowa transmitancji $H_d(s)$ pozwala określić wpływ zmian współczynnika wypełnienia na napięcie wyjściowe przetwornicy w szerokim spektrum częstotliwości. Na rys. 4 przedstawiono wynik symulacji częstotliwościowej transmitancji $H_d(s)$ dla przypadków przetwornicy: idealnej, z rezystancjami pasożytniczymi elementów pasywnych (R_C , R_L) oraz z uwzględnieniem wszystkich rezystancji pasożytniczych (R_C , R_L , R_T , R_D).



Rys. 4. Charakterystyka amplitudy i fazy transmitancji $H_d(s)$ przetwornicy BUCK (opis w tekście)

Analizując charakterystyki z rys. 4 można dojść do podobnych wniosków co w przypadku rys. 3. Według rys. 4 amplituda napięcia wyjściowego dla modelu uwzględniającego wszystkie rezystancje pasożytnicze byłaby ok. 2,5 razy mniejsza niż w przypadku modelu uwzględniającego tylko rezystancję kondensatora i cewki. Oznacza to, że użycie układu sterowania zaprojektowanego na podstawie niepełnego opisu przetwornicy mogłoby powodować większe oscylacje napięcia wyjściowego niż pierwotna przyczyna, tj. wahania współczynnika wypełnienia.

Analiza częstotliwościowa transmitancji $H_d(s)$ oraz $H_g(s)$ pokazuje widoczne różnice pomiędzy transmitancją uwzględniającą jedynie rezystancje pasożytnicze elementów biernych (cewka, kondensator), a transmitancją uwzględniającą wszystkie rezystancje pasożytnicze. Należy zauważyć, że w przypadku uwzględnienia wszystkich rezystancji

pasżytycznych podbicie amplitudy, dla częstotliwości rezonansowej, jest bardzo małe (rys. 3 i 4). W rzeczywistych przetwornicach podbicie amplitudy w charakterystyce częstotliwościowej jest niepożądane ponieważ oznacza, że przetwornica wzmacnia zakłócenia o wyższych częstotliwościach.

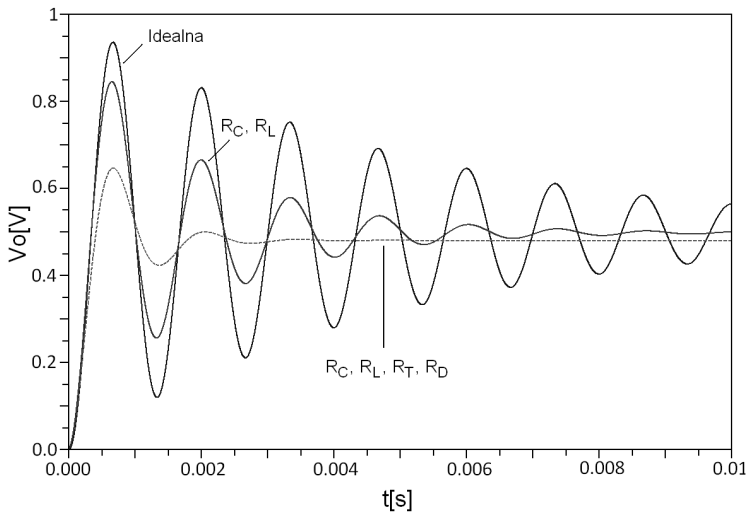
2.3. Symulacje w dziedzinie czasu

W niektórych przypadkach ważne jest aby poznać jak przy pewnych założeniach układ zareaguje np. na skokową zmianę napięcia zasilania. W rzeczywistym obwodzie taka sytuacja może się pojawić, gdy bateria słoneczna bądź turbina wiatrowa nagle zaczną wytwarzać większą moc, czy chociażby przy włączeniu zasilania. Aby uzyskać odpowiedź na to pytanie należy pomnożyć transmitancję $H_g(s)$ przez reprezentację sygnału pobudzającego (uskok jednostkowy) w dziedzinie „s”, a następnie wyznaczyć odwrotną transformatę Laplace’a [12](rozdz. 14.5).

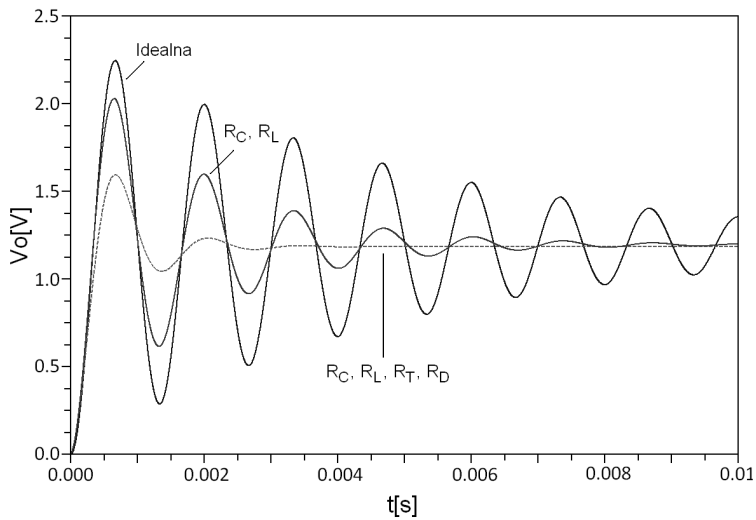
Przy pomocy transmitancji $H_g(s)$ uzyskano odpowiedź napięcia wyjściowego na skokową zmianę napięcia wejściowego o 1V. Wynik symulacji przedstawiono na rys. 5 i dotyczy ona trzech przypadków: przetwornicy idealnej, przetwornicy z uwzględnieniem rezystancji pasżytycznych elementów biernych (R_C , R_L) oraz z uwzględnieniem wszystkich rezystancji pasżytycznych (R_C , R_L , R_T , R_D). W programie *Scilab* do wygenerowania wektora odpowiedzi układu na uskok jednostkowy służy komenda `csim('step',t,h)`, gdzie t jest wektorem czasu, a h oznacza badaną transmitancję.

Na rys. 5 widać znaczną różnicę zarówno w amplitudzie jak i czasie oscylacji napięcia wyjściowego. Różnica w amplitudzie pomiędzy transmitancją uwzględniającą część i transmitancją uwzględniającą wszystkie rezystancje pasżytyczne stanowi ok. 20% amplitudy sygnału pobudzającego co w terminologii miernictwa jest błędem grubym.

Korzystając z transmitancji $H_d(s)$ można uzyskać informację o zachowaniu się napięcia wyjściowego układu po skokowej zmianie współczynnika wypełnienia. Taki przypadek może mieć miejsce, gdy układ sterowania będzie chciał zareagować np. na skokową zmianę obciążenia przetwornicy. Na rys. 6 przedstawiono odpowiedź napięcia wyjściowego na skokową zmianę współczynnika wypełnienia o wartość równą 0,1.



Rys. 5. Odpowiedź napięcia wyjściowego przetwornicy BUCK na skokową zmianę napięcia wejściowego o 1V



Rys. 6. Odpowiedź napięcia wyjściowego przetwornicy BUCK na skokową zmianę współczynnika wypełnienia o wartość 0,1

W przypadku rys. 6 wartość międzyszczytowa wahań napięcia wyjściowego wynosi:

- ok. 2V – dla przetwornicy idealnej
- ok. 1,37V – dla przetwornicy uwzględniającej tylko niektóre rezystancje pasożytnicze (R_C , R_L)
- ok. 0,6V – dla przetwornicy uwzględniającej wszystkie rezystancje pasożytnicze (R_C , R_L , R_T , R_D)

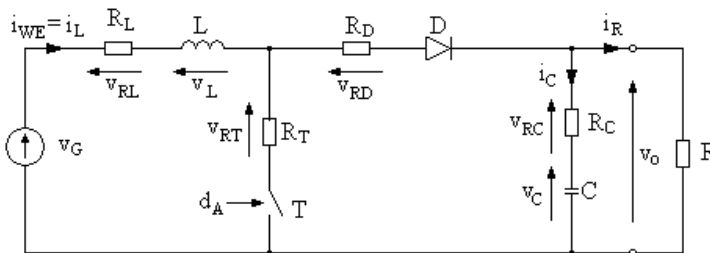
Amplituda wahań napięcia wyjściowego dla przypadku transmitancji uwzględniającej wszystkie rezystancje pasożytnicze jest dwa razy mniejsza niż w przypadku symulacji uwzględniającej jedynie rezystancję kondensatora i cewki. Należy także zauważyć, że również czas trwania oscylacji znacząco różni się pomiędzy wszystkimi wynikami symulacji. W przypadku modelu uwzględniającego wszystkie rezystancje pasożytnicze czas ten jest ponad dwa razy krótszy niż w przypadku modelu uwzględniającego tylko niektóre rezystancje pasożytnicze (R_C , R_L).

W rzeczywistej przetwornicy dąży się do wyeliminowania wszelkich oscylacji, ponieważ mogą one powodować nieprawidłową pracę i wzbudzenie się układów odbiorczych.

3. Przetwornica BOOST

3.1. Postacie transmitancji Hd oraz Hg

Schemat ideowy przetwornicy BOOST, uwzględniający wszystkie rezystancje pasożytnicze, przedstawiono na rys. 7. Parametry elementów przetwornicy zamieszczono w tabeli 2.



Rys. 7. Przetwornica BOOST zawierająca wszystkie rezystancje pasożytnicze

Tabela 2. Parametry elementów przetwornicy BOOST

$V_G=3$ V	$R=5$ Ω
$D_A=0,5$	$R_T=28$ m Ω
$L=50$ uH	$R_D=300$ m Ω
$C=487,23$ uF	$R_L=20$ m Ω
	$R_C=42,8$ m Ω

Transmitancje $H_g(s)$ oraz $H_d(s)$ są definiowane w taki sam sposób jak w przypadku przetwornicy BUCK (1), (3) i dla układu z rys. 7 wynoszą odpowiednio [4]:

$$H_g(s) = \frac{(1-D)(1+sCR_C)}{LC_Zs^2 + (GL + R_ZC_Z + (1-D)^2CR_C)s + GR_Z + (1-D)^2} \quad (5)$$

$$H_d(s) = \frac{-LCR_C I_L s^2 + (V_A CR_C - LI_L - CR_C R_Z I_L)s + V_A - I_L R_Z}{LC_Zs^2 + (GL + R_ZC_Z + (1-D)^2CR_C)s + GR_Z + (1-D)^2} \quad (6)$$

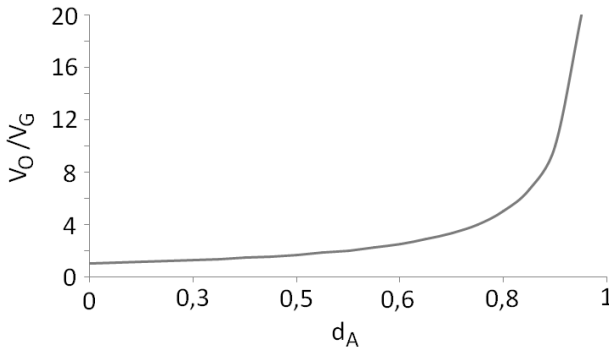
gdzie:

$$V_A = (1-D)(V_O - I_L(R_T - R_D))$$

$$V_O = \frac{(1-D)V_G}{(1-D)^2 + GR_Z}$$

$$I_G = I_L \frac{GV_O}{1-D}$$

W idealnej przetwornicy BOOST zależność wzmocnienia napięcia wejściowego od współczynnika wypełnienia sygnału kluczującego jest nieliniowa (rys. 8). W związku z tym niewielka zmiana współczynnika wypełnienia może powodować duże zmiany napięcia wyjściowego (transmitancja $H_d(s)$).

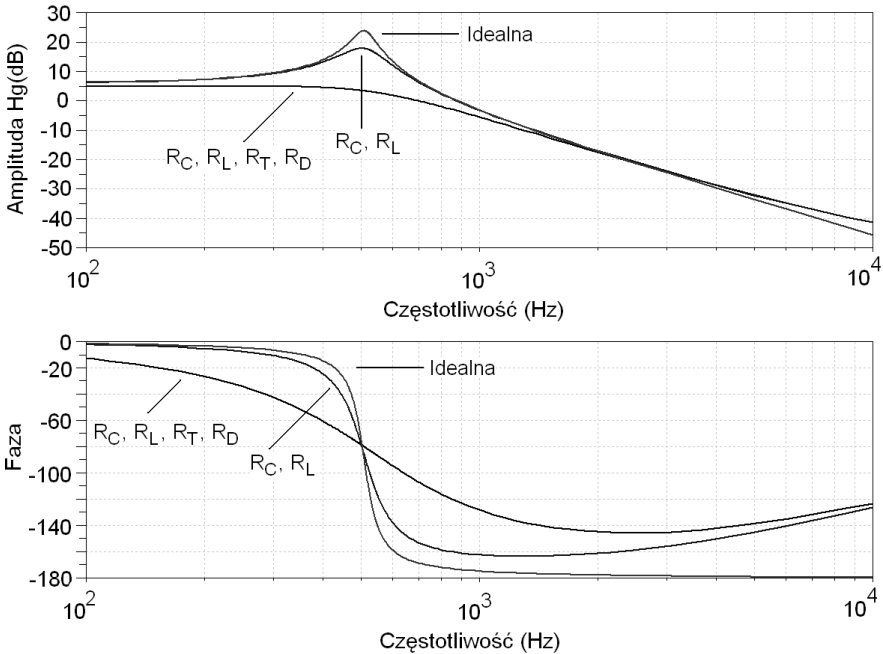


Rys. 8. Zależność wzmocnienia napięcia wejściowego od współczynnika wypełnienia w idealnej przetwornicy BOOST

W rzeczywistym układzie duży współczynnik wypełnienia nie będzie miał takiego wpływu na napięcie wyjściowe jak to przedstawiono na rys. 8. Powodem tego są straty występujące w elementach przetwornicy. Jednak wciąż wpływ współczynnika wypełnienia na napięcie wyjściowe będzie miał charakter nieliniowy i będzie większy niż w przypadku przetwornicy BUCK.

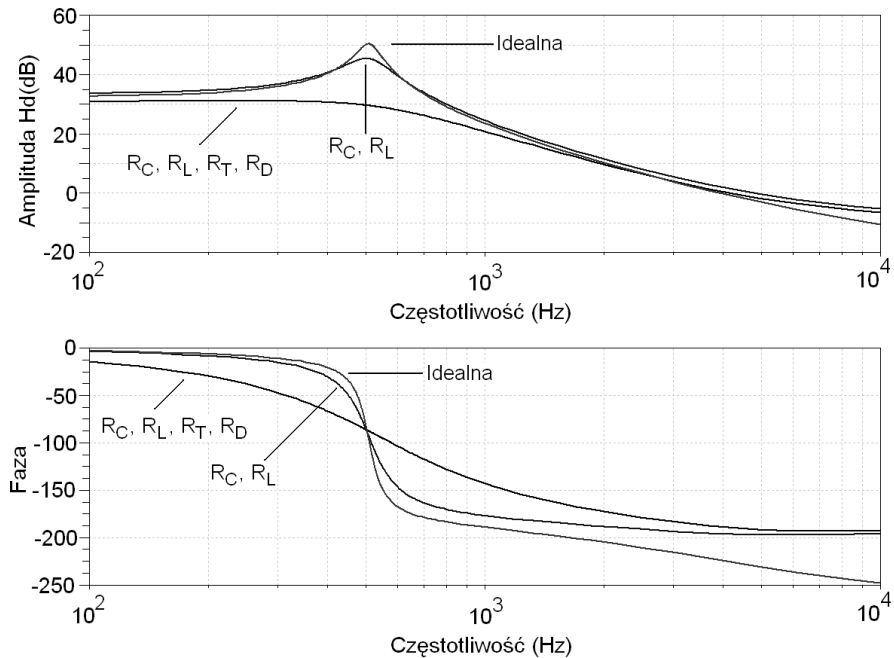
3.2. Symulacje w dziedzinie częstotliwości

Na rys. 9 przedstawiono symulacyjną charakterystykę częstotliwościową transmitancji $H_g(s)$. W symulowanej przetwornicy BOOST indukcyjność cewki została zmniejszona dwukrotnie w stosunku do indukcyjności w przetwornicy BUCK. To powinno spowodować zwiększenie częstotliwości rezonansowej przetwornicy. Tymczasem podbicie amplitudy występuje dla częstotliwości mniejszej w porównaniu z charakterystykami przetwornicy BUCK (rys. 3). W praktyce oznacza to, że przetwornica BOOST jest bardziej podatna na zakłócenia o niskiej częstotliwości niż przetwornica BUCK.



Rys. 9. Charakterystyka amplitudy i fazy transmitancji $H_g(s)$ przetwornicy BOOST (opis w tekście)

Rysunek 10 przedstawia charakterystykę amplitudy i fazy transmitancji $H_d(s)$. W tym przypadku częstotliwość rezonansowa również jest mniejsza niż w przetwornicy BUCK. Niemniej zarówno na rys. 9 jak i na rys. 10 widać znaczną różnicę w kształcie charakterystyk pomiędzy transmitancją uwzględniającą wszystkie rezystancje pasożytnicze (R_C, R_L, R_T, R_D), a pozostałymi transmitancjami, uwzględniającymi tylko część, lub nieuwzględniającymi żadnych rezystancji pasożytniczych. Na obu rysunkach różnica między przypadkiem idealnym, a uwzględniającym wszystkie rezystancje pasożytnicze wynosi ok 20dB, co w przeliczeniu daje 10-krotną różnicę w amplitudzie napięcia.



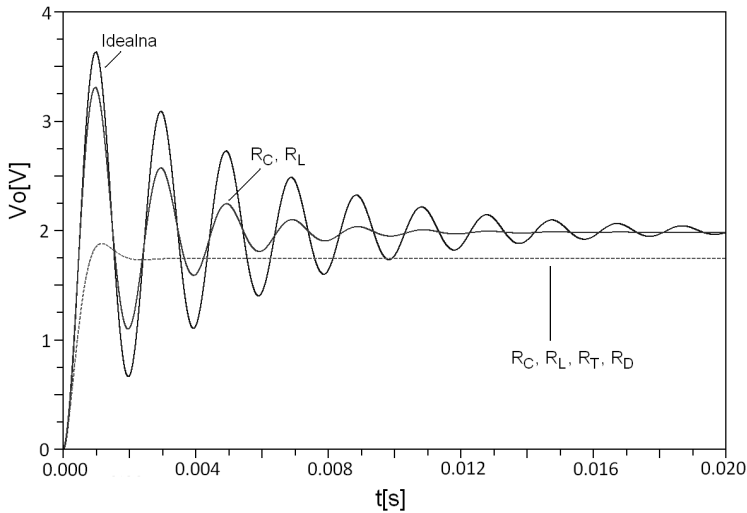
Rys. 10. Charakterystyka amplitudy i fazy transmitancji $H_d(s)$ przetwornicy BOOST (opis w tekście)

Należy również zauważyć, że uwzględnienie wszystkich rezystancji pasożytniczych daje w wyniku zupełnie inny charakter przebiegu amplitudy - zarówno w rys. 9 jak i rys. 10 nie występuje podbicie amplitudy, co jest efektem pożądanym. Dodatkowo na obu rysunkach różnica pomiędzy charakterystykami amplitudowymi uwzględniającymi tylko niektóre oraz wszystkie rezystancje pasożytnicze wynosi ok. 15dB, co w przeliczeniu daje ponad pięciokrotną różnicę w amplitudzie. Niniejszy przykład po raz kolejny pokazuje konieczność uwzględniania rezystancji pasożytniczych w modelach przetwornic.

3.3. Symulacje w dziedzinie czasu

W niniejszym rozdziale wykorzystano transmitancje $H_g(s)$ oraz $H_d(s)$ przetwornicy BOOST do wyznaczenia odpowiedzi napięcia wyjściowego w dziedzinie czasu na skokową zmianę napięcia wejściowego oraz współczynnika wypełnienia.

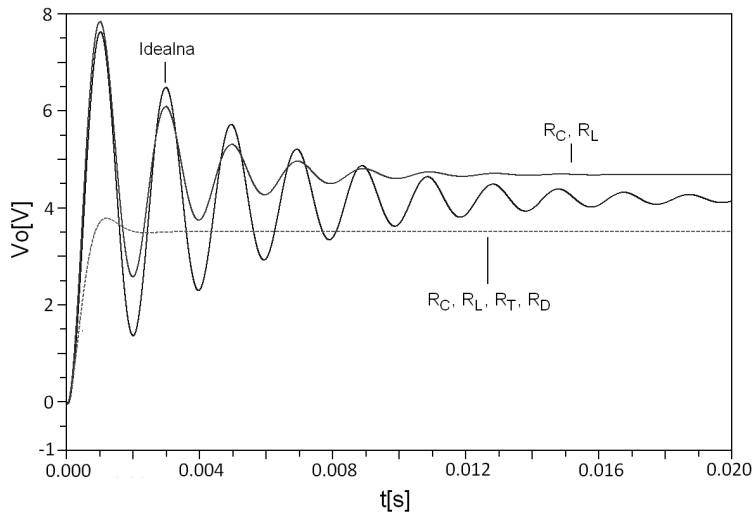
Wpływ skokowej zmiany napięcia wejściowego na napięcie wyjściowe w przetwornicy BOOST przedstawiono na rys. 11. Rysunek ten przedstawia symulację dla trzech przypadków: przetwornicy idealnej, przetwornicy z uwzględnieniem rezystancji pasożytniczych elementów biernych (R_C , R_L) oraz z uwzględnieniem wszystkich rezystancji pasożytniczych (R_C , R_L , R_T , R_D)



Rys. 11. Odpowiedź napięcia wyjściowego przetwornicy BOOST na skokową zmianę napięcia wejściowego o 1V

Z rysunku 11 widać, że uwzględnienie rezystancji kluczy w przetwornicy BOOST w większym stopniu wpływa na kształt jej charakterystyki niż miało to miejsce w przetwornicy BUCK. Dzieje się tak ponieważ w przetwornicy BOOST w fazie przewodzenia łącznika tranzystorowego prąd wejściowy płynie jedynie przez rezystancję cewki oraz rezystancję tranzystora. Jeżeli rezystancje te są tego samego rzędu, to pominięcie którejkolwiek z nich powoduje duże zmiany w wynikach symulacji.

Korzystając z transmitancji $H_d(s)$ uzyskano przebieg czasowy odpowiedzi napięcia wyjściowego przetwornicy BOOST na skokową zmianę współczynnika wypełnienia o wartość 0,1. Wynik symulacji przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Odpowiedź napięcia wyjściowego przetwornicy BOOST na skokową zmianę współczynnika wypełnienia o 0,1

W przetwornicy BOOST jakiegokolwiek zmiany współczynnika wypełnienia bardziej wpływają na napięcie wyjściowe niż ma to miejsce w przetwornicy BUCK. Wynika to z faktu, że w przetwornicy BOOST zależność wzmocnienia napięcia wejściowego od współczynnika wypełnienia jest nieliniowa, co zilustrowano na rys. 8 dla przypadku idealnego. Dlatego niewielkie zmiany współczynnika wypełnienia w pewnym obszarze skutkują dużymi zmianami napięcia wyjściowego.

4. Podsumowanie

Przedstawione w powyższych rozdziałach symulacje dotyczą przetwornic BUCK i BOOST zawierających rezystancje pasozytne wszystkich elementów - zarówno aktywnych jak i pasywnych. Otrzymane charakterystyki dowodzą, że uwzględnianie jedynie części rezystancji pasozytnych powoduje znaczną różnicę w odniesieniu do przebiegów uwzględniających wszystkie rezystancje pasozytne. Opisano znaczenie symulacji w dziedzinie częstotliwości i w dziedzinie czasu. Jednym z kolejnych etapów pracy będzie zbadanie wpływu poszczególnych rezystancji pasozytnych na częstotliwość rezonansową przetwornicy oraz zbadanie wpływu rezystancji pasozytnych na pracę przetwornicy znajdującej się w trybie nieciągnięgo prądu cewki DCM.

Bibliografia

1. Erickson R.W., Maksimovic D., *Fundamentals of Power Electronics Second Edition*, University of Colorado, Boulder
2. Biolkova V., Kolka Z., Biolek D., *State-Space Averaging (SSA) Revisited: On the Accuracy of SSA-Based Line-To-Output Frequency Responses of Switched DC-DC Converters*, WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS and SYSTEMS , Issue 2, VOL. 9, February 2010
3. Janke W., *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)
4. 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), pp. 633-654 (2012)
5. Middlebrook R.D., Čuk S., *A General Unified Approach To Modelling Switching-Converter Power Stages*, IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 8-10, 1976, Cleveland, OH.
6. 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. 24, NO. 3 May 1990
7. Dijk E., Spruijt J.N., Sullivan M.O., *PWM-switch modeling of DC-DC converters*, IEEE Transactions On Power Electronics, VOL. 10, NO. 6, November 1995
8. Jinno M., Chen P., Lai Y., Harada K., *Investigation on the Ripple Voltage and the Stability of SR Buck Converters With High Output Current and Low Output Voltage*, IEEE Transactions On Industrial Electronics. VOL. 57. NO3. March 2010
9. Janke W., Bączek M., Walczak M., *Output characteristics of step-down (Buck) power converter*,
10. Janke W., Walczak M., Bączek M., *Wpływ elementów pasożytniczych na charakterystyki wejściowe i wyjściowe impulsowych przetwornic napięcia*, Modelowanie, Symulacja I Zastosowania W Technice, Kościelisko, 18-22 czerwca 2012r.
11. Walczak M., *Symulacje charakterystyk wejściowych i wyjściowych impulsowych przetwornic napięcia stałego w trybie CCM*, XIV International PhD Workshop OWD 2012, 20-23 October 2012
12. Bolkowski S., *Teoria Obwodów Elektrycznych*, wyd. ósme, Warszawa, WNT. 2005

Abstract

Two popular DC-DC power converters (BUCK and BOOST) have been discussed. Models of line-to-output and control-to-output transfer functions, considering all parasitic resistances, have been recalled. Based on those models examples of simulations corresponding to characteristics in frequency and time domain have been presented. The simulations have been performed with free of charge program called *Scilab*. All parameters of converters' elements used for the simulations, including parasitic resistances, have been acquired during measurements. It means that simulated converters refer to a good approximation of real device which has been built and tested. Practical meaning of every simulation has been explained.

The paper reveals differences between simulations of models considering three types of mathematical models which include: all, some of and none of a parasitic resistances. It is shown that simulations generated according to models considering only parasitic resistances of inductor and capacitor are substantially different from simulations achieved based on model, which additionally considers parasitic resistances of switching elements (transistor and diode).

Key words: BUCK, BOOST, Step-down, Step-up, DC-DC converter, characteristics of converters, parasitic resistance.

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono transmitancje opisujące wpływ zmian napięcia wejściowego oraz współczynnika wypełnienia na amplitudę napięcia wyjściowego dwóch popularnych przetwornic BUCK i BOOST. Wspomniane transmitancje są modelami małosygnałowymi przebiegów uśrednionych na okres kluczowania wyżej wymienionych przetwornic. Przy pomocy programu *Scilab* wykonano symulacje tych modeli w dziedzinie częstotliwości i czasu. Przedstawione wyniki symulacji stanowią odpowiedź układu na skokowe oraz okresowe zmiany zarówno napięcia wejściowego jak i współczynnika wypełnienia oraz przedstawiają różnice pomiędzy trzema modelami przetwornic, które uwzględniają: wszystkie, część lub nie uwzględniają żadnych rezystancji pasozytniczych. Znaczenie poszczególnych charakterystyk przetwornic zostało wyjaśnione w tekście pracy.

Słowa kluczowe: BUCK, BOOST, przetwornica, Step-down, Step-up, charakterystyki przetwornic, rezystancje pasozytnicze.