

## Problemy określania pasożytniczych parametrów impulsowych przetwornic napięcia

**Streszczenie.** W pracy omówiono wpływ efektów pasożytniczych na wybrane właściwości impulsowych przetwornic napięcia typu BUCK. Omówiono sposoby wyznaczania rezystancji pasożytniczych poszczególnych elementów składowych przetwornic. Pokazano, że bezpośredni pomiar za pomocą mostka RLC daje wyniki niejednoznaczne. Zaproponowano postępowanie oparte na pomiarach modułu impedancji elementów i użyciu procedury optymalizacyjnej.

**Abstract.** In the paper, influence of parasitics effects on chosen properties of pulse voltage BUCK converters is described. Also, methods used for obtaining values of parasitic resistances of individual elements used in the converter are discussed. It is shown, that direct measurements obtained with RLC meter give ambiguous results. Proposed method is based on impedance modulus measurements, and use of optimisation procedure. (Issues in determining parasitic parameters of pulse voltage converters).

**Słowa kluczowe:** przetwornice impulsowe, parametry pasożytnicze, modele elementów nieidealnych.

**Keywords:** power converters, parasitic parameters, non-ideal elements models.

### Wstęp

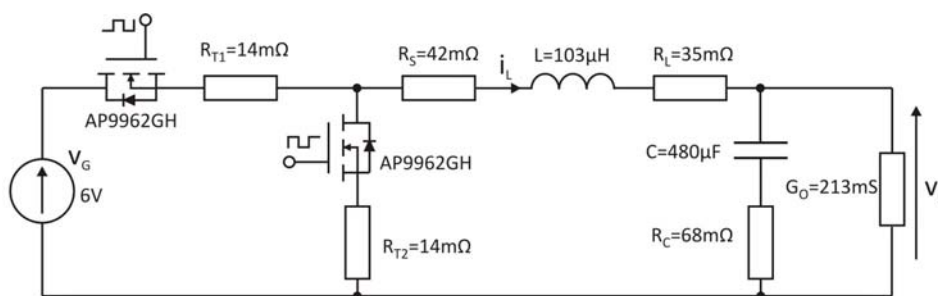
Konstrukcje, sposoby projektowania i wynikające stąd parametry użytkowe impulsowych przetwornic napięcia są systematycznie poprawiane. Uzyskanie wymaganych parametrów użytkowych przetwornicy wymaga między innymi starannego projektowania i starannego doboru elementów składowych [1–5]. Konieczna jest w związku z tym dokładna znajomość parametrów elementów przewidzianych do użycia w przetwornicy. Projektowanie układu sterującego przetwornicy polega na takim kształtowaniu jego charakterystyki, aby transmitancja pętli sterowania spełniła określone wymagania (wartość modułu dla małych częstotliwości, położenie częstotliwości odcięcia, margines fazy) [1, 6, 7]. Cyfrowe techniki sterowania przetwornic pozwalają na bardzo precyzyjne kształtowanie transmitancji układu sterującego. Dla pełnego wykorzystania tych możliwości, zwłaszcza w projektowaniu nowych rozwiązań układów przetwornic, niezbędna jest dokładna znajomość parametrów poszczególnych elementów przetwornicy oparta na odpowiednich pomiarach. Dane techniczne producentów należy traktować jedynie jako orientacyjne.

Wstępną wersję projektu zarówno układu głównego przetwornicy jak też układu sterowania, przygotowuje się na podstawie modelu przetwornicy idealnej, jednak dla

dokładnego przewidywania właściwości danej wersji, konieczne jest uwzględnienie efektów pasożytniczych w elementach. Jest to szczególnie istotne przy określaniu sprawności energetycznej, obliczaniu transmitancji małosygnałowych i wyznaczaniu stanów przejściowych przy skokowych zmianach wielkości zewnętrznych. Omówienie wpływu efektów pasożytniczych na wymienione właściwości przetwornicy zawarto w rozdziale drugim. Dwa kolejne rozdziały poświęcono omówieniu sposobów wyznaczania pasożytniczych rezystancji w opisie elementów przetwornicy.

### Wpływ rezystancji pasożytniczych na wybrane właściwości przetwornic BUCK

Przetwornica BUCK (obniżająca napięcie) należy do najpopularniejszych impulsowych przetwornic napięcia stałego i została tu wybrana jako przykład prezentowanych rozważań. Schemat układu głównego podstawowej wersji tej przetwornicy, z uwzględnieniem pasożytniczych rezystancji:  $R_T$  tranzystora,  $R_D$  diody (lub dodatkowego tranzystora w przetwornicy synchronicznej),  $R_L$  cewki i  $R_C$  kondensatora, pokazano na rysunku 1. Symbol  $v_G$  reprezentuje źródło napięcia wejściowego,  $G_O$  – konduktancję obciążenia.



Rys. 1. Nieidealna przetwornica BUCK

Przedstawiony schemat oznacza, że każdy z elementów układu głównego jest traktowany jako połączenie elementu idealnego i pasożytniczej rezystancji szeregowej. Należy podkreślić, że wiele opisów przetwornic, łącznie z opisem technik sterowania, opiera się na idealnym modelu przetwornicy, w którym powyższe rezystancje są

przyjmowane jako równe zero [1, 7, 8].

Dla wskazania roli elementów pasożytniczych rozważymy straty mocy, stosunek napięcia wyjściowego do wejściowego, małosygnałową transmitancję „control-to-output” oraz przejściowe przebiegi napięcia wyjściowego po skokowej zmianie napięcia wejściowego. W przykładach

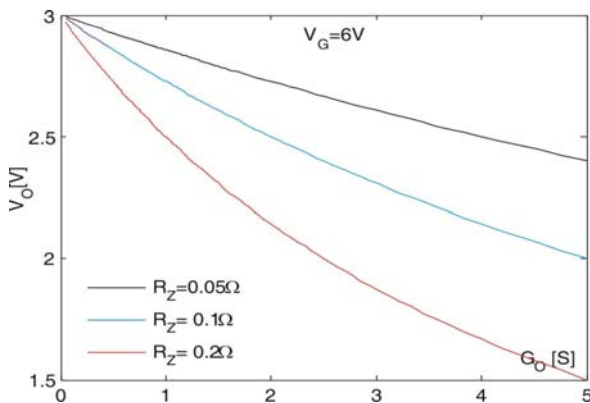
rachunkowych przyjmujemy zestaw parametrów laboratoryjnego modelu przetwornicy, którego podstawowe elementy mają wartości:  $R_O = 4,7 \Omega$ ,  $L = 103 \mu\text{H}$ ,  $R_L = 35 \text{ m}\Omega$ ,  $C = 500 \mu\text{F}$ ,  $R_C = 68 \text{ m}\Omega$ ,  $R_T = R_D = 14 \text{ m}\Omega$ , rezystancje ścieżek  $R_S = 42 \text{ m}\Omega$ . Rola elementów pasozytniczych w określaniu strat mocy jest oczywista, gdyż dla przetwornicy idealnej te straty są równe zero. Stosunek napięcia wyjściowego do wejściowego w przetwornicy BUCK można przedstawić wzorem [3, 4]:

$$(1) \quad M_V(BUCK) = \frac{V_O}{V_G} = \frac{D_A}{1 + G_O \cdot R_Z}$$

gdzie:

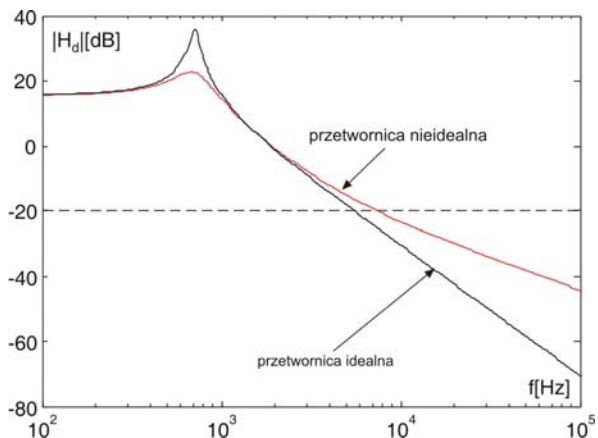
$$(2) \quad R_Z = R_L + D_A \cdot R_T + (1 - D_A) \cdot R_D$$

zaś  $D_A$  oznacza współczynnik wypełnienia przebiegu sterującego. Przyjmując wartości  $R_Z = 0,05 \Omega$ ,  $R_Z = 0,1 \Omega$  oraz  $R_Z = 0,2 \Omega$ , obliczono  $M_V$  dla konduktancji obciążenia zmieniającej się w zakresie od 50 mS do 5 S, a następnie wyznaczono przebiegi  $v_O$  w funkcji  $G_O$  (rys. 2).  $M_V$  dla idealnej przetwornicy wynosi 0,5. Dla zestawu danych przyjętych w modelu przetwornicy nieidealnej,  $R_Z$  wynosi 49 m $\Omega$ , przy uwzględnieniu rezystancji ścieżek – 91 m $\Omega$ .

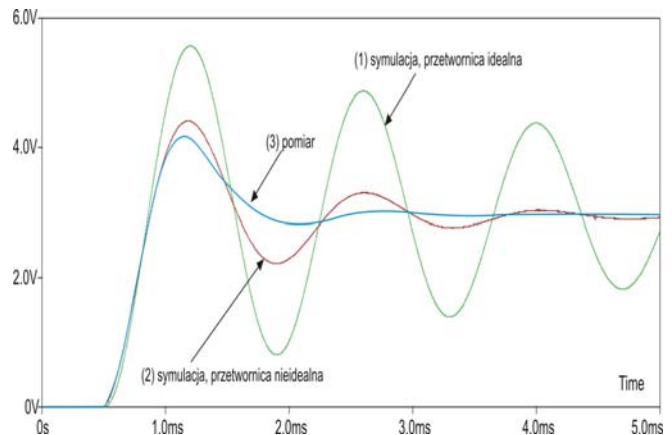


Rys. 2. Napięcie wyjściowe przetwornicy z uwzględnionymi efektami pasozytniczymi w funkcji konduktancji obciążenia, obliczone z zależności (1), dla trzech wartości  $R_Z$ .

Na rysunku 3 pokazano przebiegi małosygnalowej transmitancji „control-to-output” dla przetwornicy idealnej i przy uwzględnieniu rezystancji pasozytniczych. Rezystancja  $R_C$  wprowadza dodatkowe zero w analitycznym opisie transmitancji, co ma praktyczne znaczenie przy projektowaniu układu sterującego.



Rys. 3. Moduł małosygnalowej transmitancji „control-to-output”



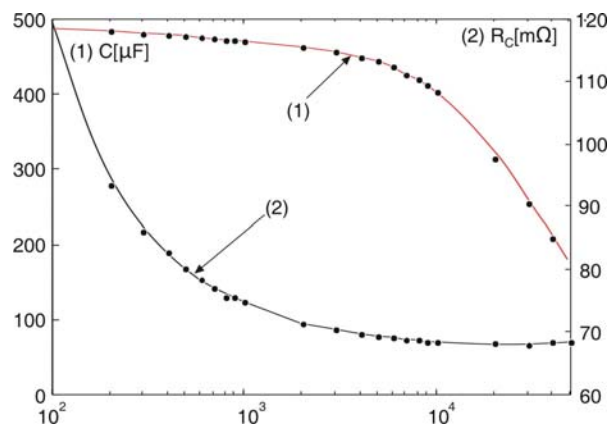
Rys. 4. Przebiegi odpowiedzi napięcia wyjściowego na skok napięcia wejściowego

Rysunek 4 przedstawia czasowe przebiegi odpowiedzi napięcia wyjściowego przetwornicy z otwartym układem sterowania na uskok napięcia wejściowego obliczone dla przypadku idealnego (1) i przy uwzględnieniu rezystancji pasozytniczych (2) skonfrontowane z przebiegiem pomierzonym (3). Częstotliwość przełączania wynosiła 200 kHz.

Wyraźny wpływ rezystancji pasozytniczych na omawiane charakterystyki podkreśla potrzebę dokładnej znajomości tych rezystancji w analizie i projektowaniu przetwornic.

### Standardowe pomiary rezystancji pasozytniczych

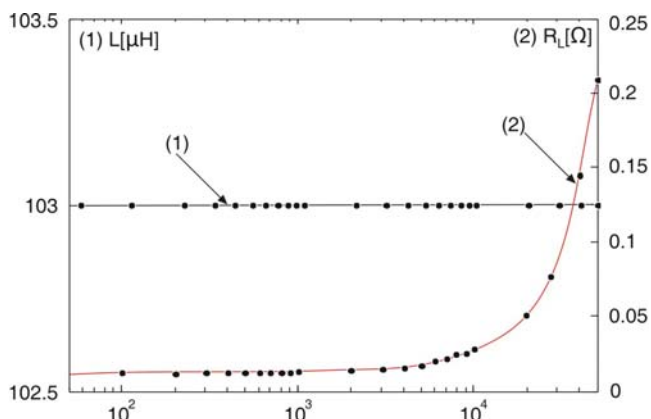
Naturalnym sposobem określenia parametrów cewek i kondensatorów w tym rezystancji pasozytniczych, wydaje się być pomiar za pomocą odpowiedniego mostka RLC. Przykładowo, model PM6306 produkcji firmy FLUKE umożliwiał pomiar zarówno parametrów podstawowych (pojemność kondensatora, indukcyjność cewki) jak też ich rezystancji pasozytniczych.



Rys. 5. Pojemność i szeregową rezystancję pasozytniczą kondensatora w funkcji częstotliwości – według wskazań mostka RLC

Pomiary mogą być realizowane w zakresie częstotliwości od 50 Hz do 1 MHz. Przykładowe wyniki pomiarów parametrów kondensatora elektrolitycznego SM85°C(M) oraz cewki DTMSS-27/0.10/8 przy różnych częstotliwościach pokazano na rysunkach 5 i 6. Jak widać, wartości rezystancji pasozytniczych  $R_L$  i  $R_C$  odczytywane z mostka zależą wyraźnie od częstotliwości pomiaru. Trudno byłoby powiedzieć jaka powinna być częstotliwość pomiarowa aby otrzymać miarodajną wartość.  $R_L$  i  $R_C$ . W układzie przetwornicy występują złożone przebiegi czasowe prądów i napięć o bardzo szerokim widmie. Otrzymane

zależności można jakościowo uzasadnić tym, że modele kondensatora i cewki, w postaci szeregowego połączenia elementu idealnego i rezystancji pasożytniczej, stanowią poważne uproszczenia, a uwzględnienie rzeczywistych zjawisk występujących w tych elementach wymagałoby użycia bardziej złożonych modeli.



Rys. 6. Indukcyjność i szeregową rezystancję pasożytniczą cewki w funkcji częstotliwości – według wskazań mostka RLC

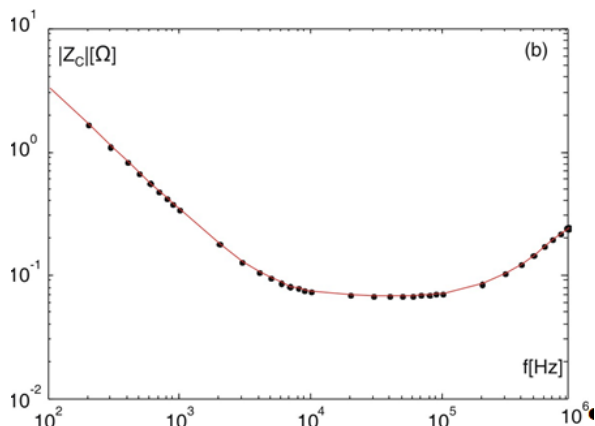
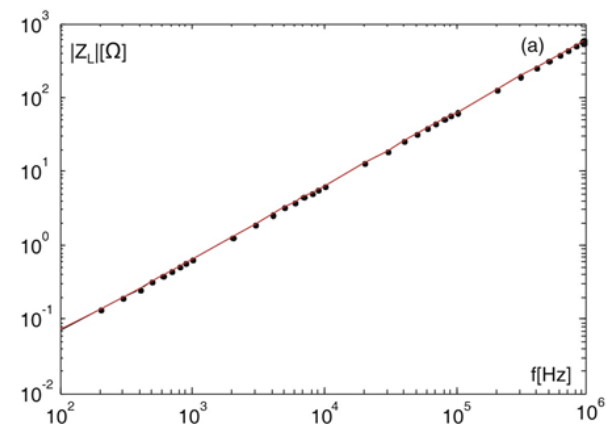
### Dobór parametrów modelu kondensatora i cewki metodą optymalizacyjną

Sposób określania pasożytniczych rezystancji cewek i kondensatorów przez bezpośredni pomiar mostkiem RLC daje wyniki niejednoznaczne. Lepszym rozwiązaniem wydaje się być wyznaczanie parametrów modelu elementu na podstawie pomiaru modułu jego impedancji w szerokim zakresie częstotliwości (na przykład za pomocą mostka RLC). Do tego celu, po założeniu dwu- lub trój-elementowego schematu zastępczego [9], można wykorzystać techniki optymalizacyjne. Przykładowo, dla trój-elementowego modelu kondensatora wykorzystuje się zależność:

$$|Z| = \sqrt{R_c^2 + \left( \omega \cdot L_c - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2} \quad (3)$$

W prezentowanych przykładach moduł impedancji opisany równaniem (3) wyznaczany jest analitycznie i dopasowywany do zmierzonych wartości impedancji przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych oraz ważonej metody najmniejszych kwadratów.

Porównanie wyników pomiarów (czarne punkty) z wynikami identyfikacji (czerwone krzywe) pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Moduły impedancji w funkcji częstotliwości dla: (a) cewki, (b) kondensatora

W zależności od zastosowanego modelu (dwu lub trój-elementowego) wyznaczone wartości zastępcze mogą się różnić. Przykładowo, dla cewki o nominalnej indukcyjności 100 μH dla modelu R-L parametry zastępcze wynosiły odpowiednio:  $R_L = 20 \text{ m}\Omega$ ,  $L = 108 \text{ }\mu\text{H}$ , zaś dla modelu RLC (z pojemnością międzyzwojową dołączoną równolegle)  $R_L = 35 \text{ m}\Omega$ ,  $L = 103 \text{ }\mu\text{H}$  oraz  $C_L = 0,02 \text{ nF}$ .

### Podsumowanie

W analizie i projektowaniu przetwornic niezbędny jest dokładny opis elementów składowych tych układów. W każdym ze stosowanych komponentów mogą występować efekty pasożytnicze różnego typu, ale w modelach symulacyjnych najczęściej są one przedstawiane jako rezystancje strat, rzadziej uwzględnia się indukcyjności pasożytnicze czy pojemności międzyzwojowe lub złączowe. Często spotyka się jednak podejścia projektowe, w których rola rezystancji pasożytniczych jest pomijana. Są to podejścia niewłaściwe, gdyż, jak pokazano w Rozdziale 2 niniejszej pracy, efekty pasożytnicze bardzo silnie wpływają na właściwości układów przetwornic. W szczególności należy zwrócić uwagę na oscylacje napięcia wyjściowego w przetwornicy po skoku napięcia wejściowego (rys. 4) – w przypadku uwzględnienia rezystancji pasożytniczych ich amplituda jest zdecydowanie niższa, a czas trwania krótszy niż przy założeniu idealności elementów.

W Rozdziale 3 wykazano, że standardowe i dość oczywiste metody pomiarowe, nawet jeśli są oparte o wykorzystanie wysokiej klasy mostków pomiarowych, mogą prowadzić do poważnych błędów w szacowaniu wartości zarówno parametrów użytecznych (pojemność kondensatora, indukcyjność cewki), jak i pasożytniczych. Przykładowo, jak widać na rysunku 5, pojemność kondensatora zmierzona za pomocą mostka dla częstotliwości  $f = 300 \text{ Hz}$  wynosi 480 μF, a dla  $f = 50 \text{ kHz}$ : 80 μF, rezystancja pasożytnicza zaś dla  $f = 300 \text{ Hz}$  wynosi 84 mΩ, a dla  $f = 50 \text{ kHz}$ : 68 mΩ.

W pracy zaprezentowano i zilustrowano przykładami technikę wyznaczania parametrów rzeczywistych modeli elementów na podstawie modułu impedancji. Zasugerowany sposób nie zamyka jednak problemu, gdyż do rozwiązania pozostaje zagadnienie doboru typu, konstrukcji i złożoności modeli zastępczych. W notach katalogowych spotyka się modele dwuelementowe (R-L, R-C), rzadziej trój-elementowe kondensatorów (R-C-L), a nierzadko brakuje nawet jakiegokolwiek informacji o rezystancjach strat [10].

Kolejnym zagadnieniem jest uwzględnienie w modelach nieliniowości zjawisk elektrycznych zachodzących w elementach. Przykładowo – wartości parametrów cewki zmierzone mostkiem, przy niewielkiej amplitudzie sygnału

pomiarowego będą inne niż wartości parametrów tego samego elementu pracującego z sygnałami o dość dużych wartościach średnich (prąd cewki w przetwornicy w trybie CCM). Ostatni aspekt nie został uwzględniony w poprzednich rozdziałach i może być obiektem dalszych prac.

**Autorzy:** prof. dr hab.inż. Włodzimierz Janke, dr inż. Aneta Hapka, mgr inż. Maciej Bączek, dr inż. Maciej Oleksy, dr inż. Jarosław Krasniewski, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, ul. J.J. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, E-mail: [wlodzimierz.janke@tu.koszalin.pl](mailto:wlodzimierz.janke@tu.koszalin.pl), [aneta.hapka@tu.koszalin.pl](mailto:aneta.hapka@tu.koszalin.pl), [info@maciejoleksy.pl](mailto:info@maciejoleksy.pl), [jaroslaw.krasniewski@ie.tu.koszalin.pl](mailto:jaroslaw.krasniewski@ie.tu.koszalin.pl).

#### LITERATURA

- [1] Erickson R.W. and Maksimovic D., Fundamentals of Power Electronics, 2-nd Edition, Kluwer, 2002
- [2] Kazmierczuk M.K., Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters, J. Wiley, 2008
- [3] Janke W., Averaged Models of Pulse-Modulated DC-DC Converters, Part I. Discussion of standard methods, *Archives of Electrical Engineering*, 61 (4), (2012), 609-631
- [4] Janke W., Averaged Models of Pulse-Modulated DC-DC Converters, Part II. Models Based on the Separation of Variables, *Archives of Electrical Engineering* 61 (4), (2012), 633-654
- [5] Tajuddin M.F.N., and Rahim N.A., Small-signal AC modeling Technique of Buck Converter with DSP Based Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller, IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, Kuala Lumpur, Malaysia, October 4-6, 2009
- [6] Cao L., Type III Compensator Design for Power Converters, *Power Electronics Technology*, Jan. 2011, 20-25
- [7] Geethanjali P., Vijaya P., Kowsalya M., Raju J., Design and Simulation of Digital PID Controller for Open Loop and Closed Loop Control of Buck Converter, *International Journal of Computer Science and Technology*, (2010), 202-208
- [8] Niculescu E., Purcaru D., Niculescu M., Small-Signal Models of Some Basic PWM Converters, 12-th WSEAS Intern. Conf. on Circuits, Heraklion, Greece, July 22-24, (2008), 321-326
- [9] Hapka A., Modelowanie efektów pasożytniczych w kondensatorach polimerowych, *Przegląd Elektrotechniczny* 9/2014, DOI:10.12915/pe.2014.09.23.
- [10] Panasonic, Aluminum Electrolytic Capacitors/ M, <http://www.farnell.com/datasheets/1907780.pdf>