

Szacowanie strat mocy w impulsowej przetwornicy obniżającej napięcie

Streszczenie. Scharakteryzowano problemy związane z określeniem strat mocy w impulsowych przetwornicach napięcia stałego. Zaproponowano sposób obliczeń strat mocy w przetwornicy BUCK w trybach ciągłego i nieciągłego przewodzenia. Rozważania ogólne zilustrowano wynikami obliczeń i pomiarów przeprowadzonych w modelu laboratoryjnym przetwornicy BUCK.

Abstract. The problems of estimation of power loss in switching power converters are outlined. New formulas for calculation of power losses in step-down (BUCK) converter working in the continuous conduction mode and discontinuous conduction mode are derived. The exemplary calculations and measurements of power losses in laboratory model of BUCK converter are performed and good consistency of results is observed. **The estimation of power loss in step-down switch-mode power converter**

Słowa kluczowe: przetwornica BUCK, step-down converter, straty mocy, sprawność energetyczna.

Keywords: Switch-mode converter, BUCK, step-down converter, power losses, efficiency

Wstęp

Sprawność energetyczna należy do najważniejszych parametrów przekształtników mocy elektrycznej i jest systematycznie poprawiana. Wynika to z udoskonalień rozwiązań układowych przekształtników oraz postępów w technologii wytwarzania elementów [1, 2]. Sprawność η jest bezpośrednio związana ze stratami mocy P_S , które można interpretować jako różnicę między mocą P_W doprowadzaną do przekształtnika i mocą P_O oddawaną do obciążenia.

$$(1) \quad \eta = \frac{P_O}{P_W} = \frac{P_O}{P_O + P_S}$$

Wielkości P_S , P_W , P_O oznaczają moce średnie w okresie przełączania przekształtnika w stanie ustalonym, (gdy przebiegi czasowe prądów i napięć w przekształtniku w kolejnym okresie przełączania są identyczne z przebiegami w okresie poprzednim). Złożony charakter zjawisk odpowiedzialnych za straty mocy powoduje, że trudne jest ich dokładne obliczenie a dane przedstawione w literaturze należy traktować jedynie jako przybliżone oszacowania. Przyjmowane są w nich z reguły poważne uproszczenia, np. w pracach [3–7] pominięto straty w pasożytniczej rezystancji kondensatora a w [6] i [7] oparto obliczenia na przyjęciu wartości średniej (zamiast skutecznej) prądu cewki.

W niniejszej pracy omówiono sposób szacowania strat mocy i sprawności energetycznej impulsowej przetwornicy obniżającej napięcie. Założono, że przetwornica pracuje w zakresie niewielkich napięć (kilka do kilkunastu woltów) i niewielkich częstotliwości przełączania (poniżej 1 MHz). Pomija się energię emitowaną do otoczenia w formie zakłóceń elektromagnetycznych oraz moc doprowadzoną do przekształtnika przez układ sterujący.

Charakter fizyczny i sposób opisu strat mocy w poszczególnych elementach przetwornicy

Do opisu zachowania rzeczywistych elementów przetwornicy stosuje się zwykle modele złożone z idealnych przełączników oraz idealnych elementów rezystancyjnych, pojemnościowych i indukcyjnych. Straty mocy w takim opisie zachodzą jedynie w elementach rezystancyjnych. Fizyczne przyczyny strat mocy w rzeczywistych elementach są złożone. W rzeczywistych cewkach i kondensatorach występują warstwy lub obszary o charakterze rezystancyjnym ale reprezentowanie ich w modelu przez idealne stałe rezystancje może być niewystarczające. Przykładowo – w przewodzie, z którego zbudowana jest cewka zachodzi efekt naskórkowy a przy budowie wielowarstwowej także efekt zbliżeniowy. Oprócz tego zachodzą straty w rdzeniu

związane ze zjawiskiem histerezy i prądami wirowymi [1]. W kondensatorze, oprócz strat w rezystancji doprowadzeń, zachodzą straty związane ze skończoną konduktywnością dielektryka i ze zmianami polaryzacji dielektryka. Charakterystyki elementów półprzewodnikowych używanych jako przełączniki są w ogólności nieliniowe a rozbudowane modele tych elementów zawierają nieliniowe elementy rezystancyjne i pojemnościowe.

Zmiany napięć na końcówkach elementu półprzewodnikowego powodują przeładowywanie wewnętrznych pojemności elementu. Straty mocy w takim elemencie nie są bezpośrednim skutkiem tego przeładowywania (gdyż idealny element pojemnościowy jest bezstratny) lecz skutkiem pośrednim, gdyż prądy związane z przeładowywaniem płyną przez rezystancyjne elementy modelu. Dalszą komplikacją w opisie strat mocy w elementach powoduje efekt samonagrzewania [9]. Straty mocy powodują podgrzewanie wnętrza elementu i zmianę wartości ich parametrów, co z kolei pociąga za sobą zmianę wartości traczonej mocy.

Obliczenia strat mocy uwzględniające zasygnalizowane wyżej zjawiska mogą być bardzo skomplikowane, zatem w praktycznych oszacowaniach strat mocy stosuje się różne przybliżenia. Najczęściej stosowane przybliżenie opiera się na przedstawieniu każdego z elementów przetwornicy w postaci szeregowego połączenia elementu idealnego oraz zastępczej rezystancji o stałej wartości [2, 3]. Jednym z czynników komplikujących obliczenia strat mocy są znaczne zmiany wartości prądów i napięć w elementach przetwornicy w obrębie pojedynczego okresu przełączania. W obliczeniu strat mocy w elemencie rezystancyjnym, którego prąd zmienia się okresowo powinna być uwzględniana wartość skuteczna prądu.

Problemy pomiarowe

Straty mocy w impulsowej przetwornicy napięcia mogą być wyznaczone jako różnica między mocą P_W doprowadzoną do wejścia przetwornicy i mocą P_O przekazywaną do obciążenia.

$$(2) \quad P_{SP} = P_W - P_O$$

Z drugiej strony, straty w przetwornicy mogą być obliczone przez zsumowanie strat w poszczególnych elementach:

$$(3) \quad P_{SO} = \sum_{i=1}^N P_{Si}$$

gdzie P_{Si} to straty obliczone na podstawie założonego modelu elementu i założonych przebiegów prądów i napięć.

Sposób wyznaczenia P_{SP} oparty na wzorze (2) jest wrażliwy na błędy ze względu na to, że wielkości P_W i P_O są zbliżone. Jeśli rzeczywista różnica między P_W i P_O wynosi przykładowo 5%, a każdą z nich wyznaczymy z niepewnością $\pm 1\%$ to niepewność wyznaczenia P_S wynosi $\pm 39\%$. Źródłem niedokładności pomiaru mocy wejściowej P_W wielu typów przetwornic (w tym np. w przetwornicy BUCK) jest przerywany charakter prądu wejściowego oraz jego zmiany w trakcie przewodzenia. Niedokładność w ocenie mocy P_O odprowadzonej do obciążenia może wynikać między innymi stąd, że efektywna wartość rezystancji obciążenia w czasie pracy przetwornicy może różnić się od wartości zmierzonej za pomocą odpowiedniego mostka z powodu samonagrzewania i nieliniowości. W celu oszacowania strat mocy przyjmuje się opis każdego z elementów przetwornicy w postaci szeregowego połączenia elementu idealnego i szeregowej rezystancji pasożytniczej o stałej wartości. Każdy ze składników P_{Si} mocy strat we wzorze (3) wynosi zatem:

$$(4) \quad P_{Si} = I_{rmsi}^2 \cdot R_i$$

Błędy w określeniu składników P_{Si} wynikają z niedokładności w wyznaczaniu wartości skutecznych odpowiednich prądów oraz rezystancji pasożytniczych R_i . Niedokładność wyznaczania wartości skutecznych na podstawie zarejestrowanych przebiegów wartości chwilowych poszczególnych prądów wynika między innymi stąd, że na rejestrowane przebiegi nakładają się zakłócenia. Większymi niedokładnościami jest obarczone wyznaczanie rezystancji pasożytniczych R_i . Niedokładność opisu rzeczywistych zjawisk fizycznych w elemencie za pomocą pojedynczej, liniowej rezystancji powoduje, że wyniki pomiaru zastępczej rezystancji pasożytniczej za pomocą typowego mostka zależą od warunków pomiaru. Przykładowo, wartość pasożytniczej rezystancji cewki DL22-10 (10 μ H) zmierzona mostkiem FLUKE PM6306 przy częstotliwości 100 kHz jest około 10-krotnie większa niż dla częstotliwości 1 kHz.

Sposób obliczeń strat mocy w przetwornicy BUCK

Wyznaczanie strat mocy w oparciu o wzory (3) i (4), dla znanych wartości rezystancji pasożytniczych wymaga obliczenia kwadratu wartości skutecznej prądu każdego elementu. Przyjmując, że w okresie przełączania T_S przetwornicy występują dwie lub trzy fazy (tryb CCM lub DCM) można napisać:

$$(5) \quad I_{rms}^2 = \frac{1}{T_S} [C(0, t_{ON}) + C(t_{ON}, t_x) + C(t_x, T_S)]$$

Wzór (5) dotyczy bezpośrednio trybu DCM. Przyjęto, że okres przełączania zaczyna się w chwili 0, faza ON kończy się w chwili t_{ON} , a faza OFF1 – w chwili t_x . Dla trybu CCM należy we wzorze (5) pominąć trzeci składnik, a w drugim wstawić T_S zamiast t_x . Wielkości $C(t_1, t_2)$ we wzorze (5) oznaczają całki obliczane dla poszczególnych faz:

$$(6) \quad C(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} i^2(t) \cdot dt$$

Przebieg prądów w elementach przetwornicy w poszczególnych fazach można przybliżyć zależnościami liniowymi (rys. 1)

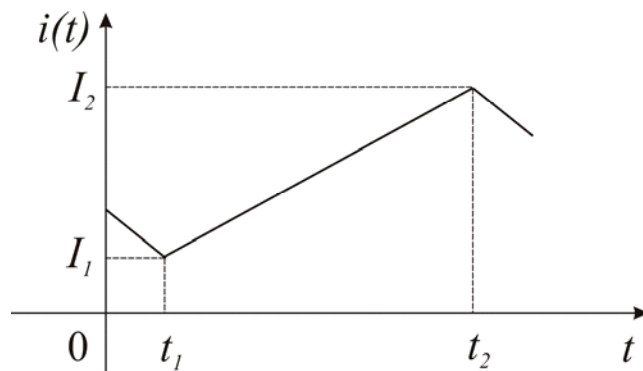
$$(7) \quad i(t) = I_1 + \alpha(t - t_1) \quad \text{dla } t \in (t_1, t_2)$$

gdzie

$$(8) \quad \alpha = \frac{I_2 - I_1}{t_2 - t_1}$$

I_1 i I_2 oznaczają wartości prądu $i(t)$ na początku i na końcu danej fazy, czyli w chwilach t_1 i t_2 . Wstawiając (7) i (8) do (6), po wykonaniu całkowania otrzymujemy:

$$(9) \quad C(t_1, t_2) = \frac{t_2 - t_1}{3} (I_1^2 + I_1 \cdot I_2 + I_2^2)$$



Rys. 1. Charakter przebiegu prądu poszczególnych elementów w układzie przetwornicy

W celu obliczenia strat mocy za pomocą wzorów (3), (4), (5) i (9) należy wyznaczyć wartości prądów I_1 i I_2 dla punktów czasu t_1 i t_2 dla każdego z elementów i każdej fazy pracy. W przedstawionym sposobie obliczeń nie uwzględnia się strat mocy w elementach półprzewodnikowych w momentach przełączania. Udział tych strat w ogólnym bilansie zależy od tego, jaki jest stosunek czasu trwania procesów przejściowych do okresu przełączania T_S . W laboratoryjnym modelu przetwornicy zastosowano częstotliwość przełączeń $f_S = 100$ kHz, tranzystor AP4410AGM i diodę Schottky'ego MBR340T3. Pomierzono przebiegi przejściowe i oszacowano czasy przełączania na około 50 ns.

Wynikowa zależność opisująca straty mocy w przetwornicy BUCK w trybie CCM ma postać [8]:

$$(10) \quad P_{SO} = V_O^2 \cdot \left[G^2 \cdot R_Z + \frac{1}{3} (1 - D_A)^2 \cdot G_Z^2 \cdot (R_C + R_Z) \right]$$

gdzie

$$(11) \quad R_Z = R_L + D_A \cdot R_T + (1 - D_A) \cdot R_D$$

$$(12) \quad G_Z = T_S / 2L$$

R_T, R_D, R_L, R_C – pasożytnicze rezystancje tranzystora, diody, cewki i kondensatora.

W obliczeniach dla trybu DCM należy najpierw określić wartości I_1 i I_2 dla poszczególnych faz i poszczególnych elementów, korzystając z przybliżonych przebiegów pokazanych na rysunku 1. Przebiegi prądu tranzystora i_T i diody i_D są związane z prądem cewki (faza ON: $i_T = i_L$; $i_D = 0$; faza OFF1: $i_T = 0$; $i_D = i_L$; faza OFF2: $i_T = i_D = i_L = 0$).

Obliczenia prowadzone w sposób opisany wyżej prowadzą do następującego wyrażenia na sumę mocy P_L, P_T i P_D w cewce, tranzystorze i diodzie:

$$(13) \quad P_{S1} = P_L + P_T + P_D = \frac{D_A \cdot M_I}{3} \cdot I_{MX}^2 \cdot R_{ZD}$$

gdzie

$$(14) R_{ZD} = R_L + M_V \cdot R_T + (1 - M_V) \cdot R_D$$

Wielkość I_{MX} jest wartością maksymalną prądów cewki, tranzystora i diody w okresie przełączania i wynosi:

$$(15) I_{MX} = K \cdot I_O$$

gdzie

$$(16) K = 2G_Z \cdot R \cdot (M_2 - 1) \cdot D_A$$

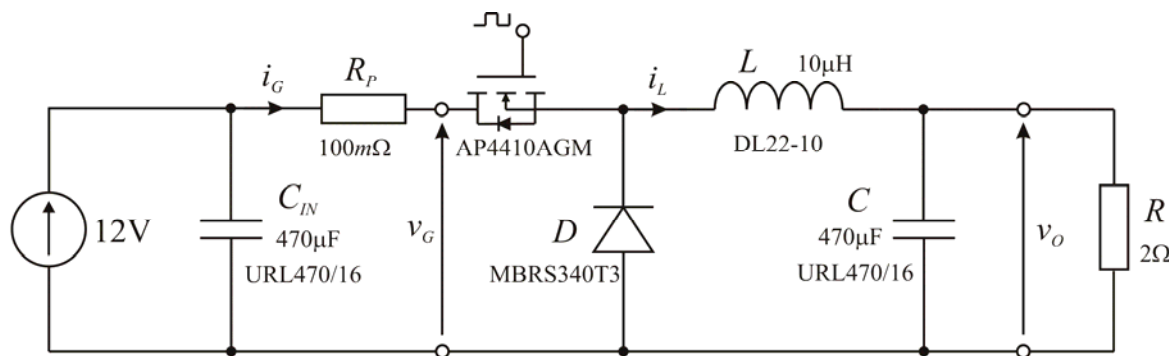
Straty mocy w rezystancji pasożytniczej kondensatora można zapisać w formie:

$$(17) P_{SZ} = I_O^2 \cdot \left[\frac{D_A}{3} \cdot M_I \cdot (K^2 - K - 2) + 1 \right] \cdot R_C$$

Wyprowadzone w tym rozdziale wzory pozwalają na ocenę poszczególnych składników strat mocy i mogą być użyteczne przy projektowaniu przetwornic i doborze elementów.

Przykładowe obliczenia i pomiary

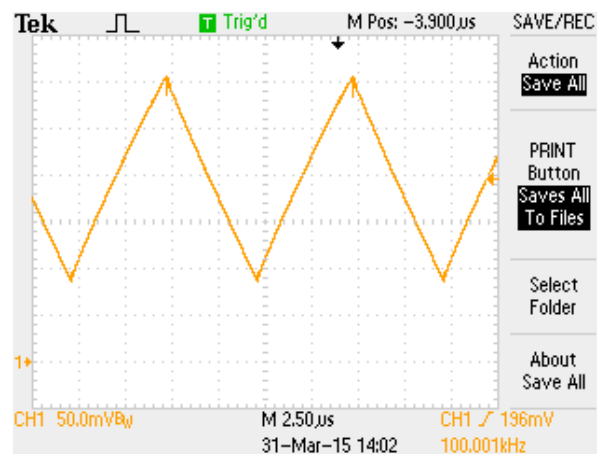
Wykonano model laboratoryjny przetwornicy BUCK przedstawiony schematycznie na rysunku 2.



Rys. 2. Laboratoryjny model przetwornicy BUCK



(a)



(b)

Rys. 3. Oscylogramy prądu wejściowego (a) oraz prądu cewki (c) przetwornicy BUCK w trybie CCM

Do przełączenia tranzystora z częstotliwością $f_s = 100$ kHz zastosowano driver IR2125. Przyjęto współczynnik wypełnienia $D_A = 0,5$. Dla podanych wartości przetwornica pracuje w trybie CCM. Pomierzone wartości rezystancji pasożytniczych wynoszą $R_T = 13,5$ mΩ, $R_D = 200$ mΩ, $R_L = 51$ mΩ, $R_C = 9,2$ mΩ. Wartości R_T i R_D wyznaczono z charakterystyk statycznych, R_L pomierzono mostkiem FLUKE PM6306 przy częstotliwości $f = 20$ kHz a R_C wyznaczono z charakterystyki modułu impedancji metodą optymalizacji. R_P jest opornikiem pomiarowym do rejestracji prądu wejściowego. W celu wyznaczenia strat mocy według wzoru (2) zarejestrowano przebiegi prądu i napięcia wejściowego, $i_G(t)$, $v_G(t)$. Przykładowe oscylogramy prądu wejściowego i_G oraz prądu cewki i_L pokazano na rysunku 3. Do wyznaczenia mocy wejściowej P_W potrzebna jest wartość całki z iloczynu przebiegów $v_G(t)$ i $i_G(t)$. Obliczenie numeryczne na podstawie zarejestrowanych próbek prądu i napięcia (50000 próbek na okres) daje wartość $P_W = 17,526$ W.

Moc P_O odprowadzona do obciążenia wynosi $P_O = V_O^2 / R = 16,003$ W stąd moc strat $P_{SP} = P_W - P_O = 1,523$ W.

Wyznaczenie strat mocy z wzoru (10) otrzymanego przez zsumowanie składników strat według wzoru (1) daje wartość $P_{SO} = 1,328$ W, która wykazuje dobrą zgodność z wyznaczoną powyżej wartością P_{SP} . Trzeba jednak dodać, że przyjęcie do obliczeń P_{SO} wartości rezystancji pasożytniczych mierzonych w innych warunkach, daje inny wynik oszacowania, np. przyjmując R_L zmierzone przy $f = 1$ kHz otrzymuje się $P_{SO} = 1,146$ W.

Podsumowanie

W pracy dokonano krótkiego przeglądu problemów związanych z wyznaczeniem strat mocy w impulsowych przetwornicach napięcia. Rozważania szczegółowe odniesiono do przetwornicy obniżającej napięcie (BUCK). Przeprowadzono porównanie strat mocy wyznaczonych

jako różnica mocy wejściowej i wyjściowej oraz jako suma strat w poszczególnych elementach. Warunki pracy i dobór elementów w wykonanym modelu laboratoryjnym przetwornicy BUCK pozwalają na pominięcie strat mocy związanej ze stanami przejściowymi przy przełączaniu elementów półprzewodnikowych. Przedstawione w pracy wzory opisujące straty w pasożytniczych rezystancjach poszczególnych elementów przetwornicy dla trybu CCM i DCM uwzględniają zmiany prądów w elementach w obrębie okresu przełączania. Opisy efektów pasożytniczych w postaci stałych szeregowych rezystancji tranzystora, diody, cewki i kondensatora stanowią przybliżenie, gdyż nie uwzględniają szeregu rzeczywistych efektów. Przyjęte opisy pozwalają jednak na dobre oszacowanie strat mocy, co zostało potwierdzone w przedstawionym przykładzie.

LITERATURA

- [1] Erickson R.W., Maksimovic D., Fundamentals of Power Electronics, 2-nd Edition, Kluwer, 2002
- [2] Kazimierczuk M.K., Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters, J. Wiley, 2008
- [3] Sizikov G., Kolodny A., Fridman E.G., Zelikson M., Efficiency Optimization of Integrated DC-DC Buck Converters, *ICECS*

- 2010, 1215-1218
- [4] Gragger J.V., Haumer A., Einhorn M., Averaged Model of a Buck Converter for Efficiency Analysis, *Engineering Letters*, 18:1, EL_18_1_06, 1 February 2010
- [5] Peng C., Wang C.J., An Analysis of Buck Converter Efficiency in PWM/PFM Mode with Simulink, *Energy and Power Engineering*, 2013, 5, 64-69
- [6] Eichhorn T., Boost Converter Efficiency Through Accurate Calculations, *Power Electronics Technology*, September 2008, 30-35
- [7] Nota aplikacyjna układu AN1471 firmy MICROCHIP
- [8] Janke W., Impulsowe przetwornice napięcia stałego, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2014
- [9] Janke W., Zjawiska termiczne w elementach i układach półprzewodnikowych, WNT, Warszawa, 1992

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