

Wpływ rdzenia dławika na charakterystyki przetwornicy buck

Streszczenie. W pracy przeanalizowano wpływ właściwości rdzenia dławika zawartego w przetwornicy buck na jej charakterystyki. Przedstawiono i przedyskutowano zależności napięcia wyjściowego i sprawności energetycznej rozważanej przetwornicy oraz temperatury rdzenia od rezystancji obciążenia i częstotliwości sygnału sterującego. W oparciu o uzyskane wyniki pomiarów wskazano zakresy wartości rezystancji obciążenia zapewniające maksymalną sprawność energetyczną rozważanej przetwornicy zawierającej dławiki z rdzeniami wykonanymi z różnych materiałów ferromagnetycznych.

Abstract. In the paper the influence of properties of an inductor core used in a buck converter on its characteristics is analyzed. The dependences of the converter output voltage, watt-hour efficiency and the core temperature on load resistance and frequency of the control signal are presented and discussed. On the basis of the obtained results of measurements the ranges of load resistance values, for which the highest values of watt-hour efficiency for the considered converter with inductors including cores made of different ferromagnetic materials are obtained, are shown. (**The influence of an inductor core on buck converter characteristics**).

Słowa kluczowe: dławik, przetwornica buck, rdzeń ferromagnetyczny, pomiary.

Keywords: inductor, buck converter, ferromagnetic core, measurements.

Wstęp

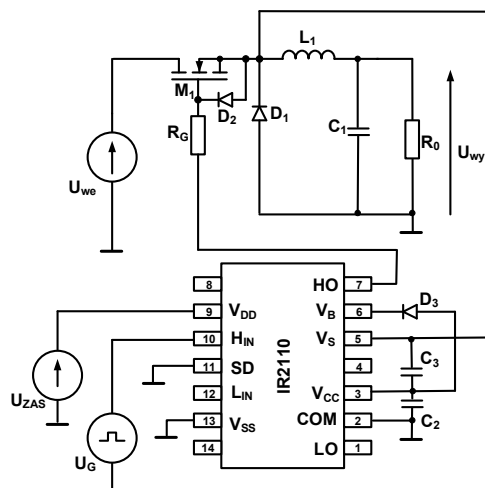
Przetwornice dławikowe, a w szczególności przetwornica buck, są często wykorzystywane do budowy impulsowych układów zasilających [1 - 6]. Jednym z jej elementów składowych jest dławik, który zawiera rdzeń wykonany z materiału ferromagnetycznego [3, 7, 8, 9]. Dobór materiału rdzenia w istotny sposób wpływa na zależność $L(i)$ [8, 10]. W pracach [8, 11, 12] pokazano, że zależność ta istotnie wpływa na przebieg charakterystyk dławikowych przetwornic dc-dc.

We wcześniejszych pracach autorów [7, 10, 13, 14] przeanalizowano wpływ materiału rdzenia dławika na charakterystyki przetwornicy boost. Przedstawione w cytowanych pracach wyniki pomiarów dowodzą, że dobór tego materiału istotnie wpływa na sprawność energetyczną tej przetwornicy oraz na zakres częstotliwości sygnału sterującego, przy której uzyskuje się zadowalającą sprawność energetyczną tej przetwornicy.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki pomiarów trzech przetwornic buck, zawierających dławiki z rdzeniami wykonanymi z różnych materiałów ferromagnetycznych. W rozdziale drugim przedstawiono opis badanego układu, natomiast w rozdziale trzecim zaprezentowano i przedyskutowano uzyskane wyniki pomiarów

Badany układ

Badania przeprowadzono dla przetwornicy buck, której schemat, wraz z układem sterującym, przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Schemat badanej przetwornicy buck z układem sterującym

W rozpatrywanym układzie zastosowano tranzystor MOSFET typu IRF540, diodę Schottky'ego 1N5822 oraz elementy bierne o następujących wartościach: $R_G = 30 \Omega$, $C_1 = 47 \mu F$, $C_2 = 22 nF$. Badany układ zasilany jest ze źródła napięciowego U_{we} , a jego obciążenie stanowi rezystor R_0 . W rozważanej przetwornicy wykorzystano dławik L_1 zawierający kolejno pierścieniowe rdzenie ferromagnetyczne wykonane z różnych materiałów. Wymiary tych rdzeni są identyczne, a rozważane dławiki zawierają identyczne uzwojenia. Sygnał sterujący bramkę tranzystora jest uzyskiwany z drivera IR2110, pełniącego funkcję wzmacniacza mocy i przesuwnika poziomu napięcia. Driver zasilany jest ze źródła napięciowego U_{zas} o wydajności 15 V i sterowany z generatora sygnału prostokątnego U_G wytwarzającego sygnał o poziomach TTL. Dioda D_2 zabezpiecza wejście tranzystora M_1 przed uszkodzeniem napięciowym. Dioda D_3 wraz z kondensatorem C_3 pracuje w układzie boots-trap.

Wyniki badań

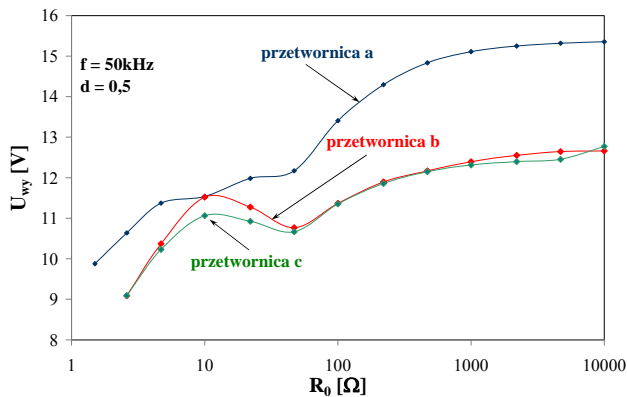
Zmierzone charakterystyki układu z rys.1 zawierającego odpowiednio rdzeń proszkowy, ferrytowy oraz nanokrystaliczny. W przeprowadzonych badaniach rozważano wpływ rezystancji obciążenia R_0 , współczynnika wypełnienia i częstotliwości sygnału sterującego tranzystor oraz rodzaju materiału ferromagnetycznego wykorzystanego do budowy rdzenia dławika na napięcie wyjściowe przetwornicy buck oraz jej sprawność energetyczną, a także na temperaturę rdzenia dławika (mierzoną pirometrem). Badania przeprowadzono przy napięciu wejściowym równym 25 V.

Na rysunkach 2 – 8 przedstawiono wyniki badań rozważanej przetwornicy, przy czym na rysunkach tych przetwornica a oznacza układ zawierający dławik z rdzeniem proszkowym, przetwornica b – układ zawierający dławik z rdzeniem ferrytowym, przetwornica c – układ zawierający dławik z rdzeniem nanokrystalicznym.

Rysunki 2 - 5 przedstawiają zależności odpowiednio napięcia wyjściowego i sprawności energetycznej rozważanych przetwornic buck oraz temperatury rdzenia dławika i temperatury tranzystora w funkcji rezystancji obciążenia R_0 przy częstotliwości sygnału sterującego $f = 50 \text{ kHz}$ i współczynniku wypełnienia d równym 0,5.

Jak widać na rys.2, zależność $U_{wy}(R_0)$ jest funkcją rosnącą dla przetwornicy a, natomiast dla pozostałych dwóch przetwornic obserwowane jest maksimum przy $R_0 \approx 10 \Omega$ oraz minimum przy $R_0 \approx 47 \Omega$. Minimum to wynika ze zmiany zakresu pomiarowego amperomierzy i związanej z

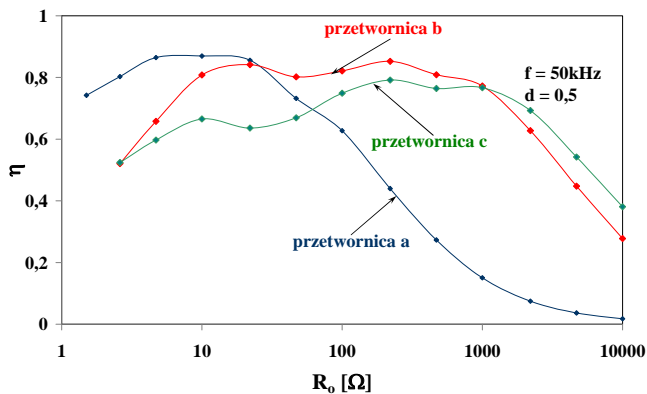
tym zmiany ich rezystancji wewnętrznej oraz ze wzrostu strat energii w rdzeniu dławika spowodowanej wzrostem amplitudy indukcji. Na skutek różnic w przenikalności magnetycznej zastosowanych rdzeni, występują istotne różnice w indukcyjności dławików zawierających te rdzenie – indukcyjność w przetwornicy a jest ponad 20 razy mniejsza od indukcyjności pozostałych dławików. Przetwornice b i c w całym zakresie mierzonych rezystancji pracują w trybie CCM, natomiast przetwornica a pracuje w trybie DCM, gdy $R_0 > 47 \Omega$.



Rys. 2. Zależność napięcia wyjściowego przetwornicy buck od rezystancji obciążenia R_0 przy $f = 50 \text{ kHz}$

W zakresie małych wartości rezystancji R_0 obserwuje się spadek wartości napięcia U_{wy} wynikający ze spadków napięcia na włączonych elementach półprzewodnikowych oraz na rezystancji szeregowej dławika.

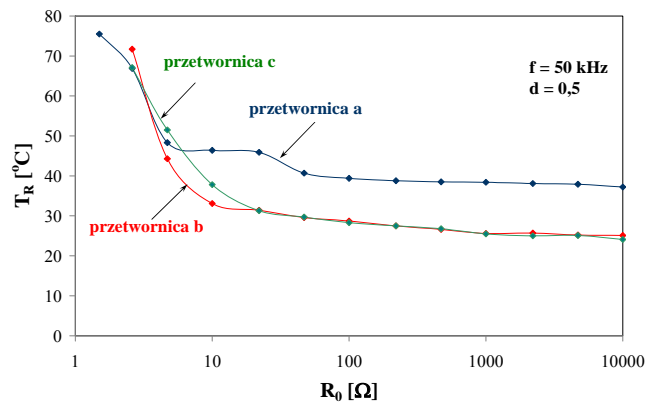
Rys. 3 ilustruje wpływ materiału rdzenia na zależność sprawności energetycznej od rezystancji obciążenia. Dla każdej z rozważanych przetwornic widoczne jest maksimum zależności $\eta(R_0)$. Dla przetwornicy a maksimum występuje przy $R_0 \approx 10 \Omega$ i wynosi prawie 90%. Dla pozostałych przetwornic maksimum występuje przy $R_0 \approx 220 \Omega$, a jego wartość przekracza 80% dla przetwornicy b i 75% - dla przetwornicy c. Warto zauważyć, że przetwornice b i c zachowują wysoką sprawność (ponad 75%) dla $R_0 < 1 \text{ k}\Omega$, natomiast przetwornica a uzyskuje sprawność powyżej 75% dla $R_0 < 47 \Omega$. Porównując charakterystyki uzyskane dla rozważanych przetwornic widać, że w zakresie małych rezystancji obciążenia $R_0 < 22 \Omega$ najwyższą sprawność uzyskano dla przetwornicy z rdzeniem proszkowym dla $R_0 \in (22 \Omega; 1 \text{ k}\Omega)$ – dla przetwornicy z rdzeniem ferrytowym, a dla $R_0 > 1 \text{ k}\Omega$ - dla przetwornicy z rdzeniem nanokrystalicznym



Rys. 3. Zależność sprawności energetycznej przetwornicy buck od rezystancji obciążenia przy $f = 50 \text{ kHz}$

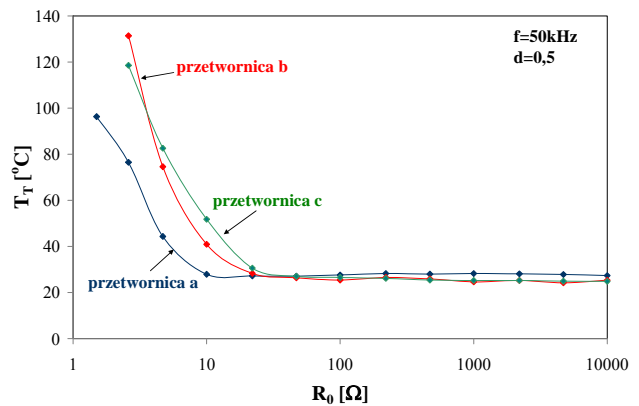
Przedstawione na rys. 4 zależności temperatury rdzenia T_R od rezystancji obciążenia R_0 są dla wszystkich rozważanych przetwornic funkcjami monotonicznie

malejącymi. Warto zauważyć, że temperatura rdzenia dławika z rdzeniem proszkowym jest o kilkanaście stopni Celsjusza wyższa od temperatury pozostałych rdzeni w zakresie rezystancji $R_0 > 10 \Omega$. Wynika to z faktu, że rdzeń proszkowy cechuje się znacznie wyższą stratnością niż pozostałe rdzenie wykonane z rozważanych materiałów magnetycznych [7]. Jak wiadomo, praca elementów elektronicznych przy podwyższonej wartości ich temperatury przyspiesza procesy degradacyjne i zwiększa prawdopodobieństwo uszkodzenia [15].



Rys. 4. Zależność temperatury rdzenia dławika w funkcji rezystancji obciążenia przy $f = 50 \text{ kHz}$

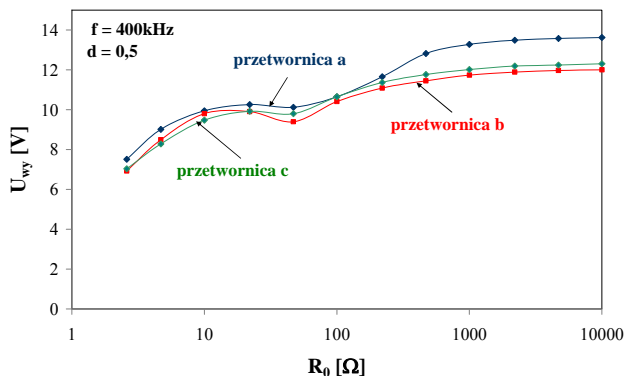
Rys. 5 ilustruje wpływ rezystancji obciążenia na temperaturę obudowy T_T tranzystora zawartego w przetwornicy. Temperatura ta jest proporcjonalna do temperatury wnętrza rozważanego tranzystora. Jak można zauważyć, zależność $T_T(R_0)$ jest funkcją malejącą dla przetwornic z każdym z rozważanych dławików. Materiał dławika wpływa na rozważaną zależność w widoczny sposób dla rezystancji $R_0 < 20 \Omega$. Najwyższą temperaturę tranzystora uzyskano dla przetwornicy z rdzeniem ferrytowym, a najniższą – dla przetwornicy z rdzeniem proszkowym.



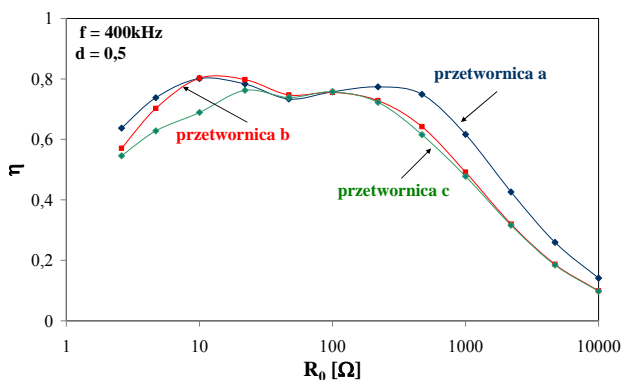
Rys. 5. Zależność temperatury obudowy tranzystora w funkcji rezystancji obciążenia przy $f = 50 \text{ kHz}$

Rysunki 6 – 8 prezentują wyniki badań przeprowadzonych przy częstotliwości sygnału sterującego równej 400 kHz oraz współczynnika wypełnienia $d = 0,5$. Jak można łatwo zauważyć, charakter zależności przedstawionych na rys. 6 – 8 jest identyczny, jak wykresów pokazanych na rys. 2–4. Porównując rozważane zależności uzyskane przy obu wymienionych wartościach częstotliwości sygnału sterującego można stwierdzić, że wzrost częstotliwości sygnału sterującego powoduje, obniżenie wartości napięcia wyjściowego i sprawności energetycznej przetwornicy buck. Zmiany wartości wymienionych wielkości są widoczne zarówno w zakresie małych, jak i dużych wartości rezystancji obciążenia. W

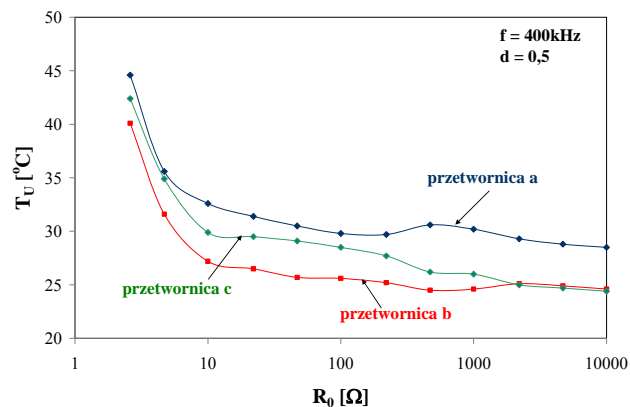
zakresie małych wartości R_0 istotny wpływ na przebieg rozważanych charakterystyk może mieć zjawisko naskórkowości w uzwojeniu dławika, powodujące wzrost wartości jego rezystancji przy wzroście częstotliwości. Ze względu na jednakową liczbę zwojów w uzwojeniach wszystkich rozważanych dławików, wpływ tego zjawiska na charakterystyki wszystkich badanych przetwornic jest jakościowo podobny.



Rys. 6. Zależność napięcia wyjściowego przetwornicy buck od rezystancji obciążenia R_0 przy $f = 400$ kHz



Rys. 7. Zależność sprawności energetycznej przetwornicy buck od rezystancji obciążenia przy $f = 400$ kHz



Rys. 8. Zależność temperatury uzwojenia dławika od rezystancji obciążenia R_0 przy $f = 400$ kHz

Z kolei, w zakresie dużych wartości rezystancji R_0 obserwuje się wzrost mocy strat w rdzeniu dławika, powodujący wzrost jego temperatury oraz obniżenie wartości napięcia wyjściowego i sprawności energetycznej badanych przetwornic. Przy podwyższonej częstotliwości ($f = 400$ kHz), w zakresie dużych wartości rezystancji obciążenia obserwuje się istotny wzrost sprawności przetwornicy a.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych charakterystyk przetwornicy buck zawierającej dławik z rdzeniami wykonanymi z różnych materiałów ferromagnetycznych. Z uzyskanych wyników badań widać, że materiał rdzenia w istotny sposób wpływa na sprawność energetyczną rozważanej przetwornicy oraz napięcie na jej wyjściu. W zakresie małych rezystancji obciążenia najwyższą sprawność zapewnia stosowanie dławika z rdzeniem proszkowym, w zakresie średnich rezystancji obciążenia – dławika z rdzeniem ferrytowym, a w zakresie dużych rezystancji obciążenia – dławika z rdzeniem nanokrystalicznym. Wzrost częstotliwości powoduje obniżenie wartości napięcia wyjściowego i sprawności energetycznej przetwornicy. Wpływ częstotliwości na charakterystyki przetwornicy jest najsilniej widoczny dla przetwornicy zawierającej dławik z rdzeniem proszkowym, a najslabszy – dla przetwornicy zawierającej dławik z rdzeniem ferrytowym.

Autorzy: dr hab. inż. Krzysztof Górecki, prof. nadzw. AMG, dr inż. Kalina Detka, prof. dr hab. inż. Janusz Zarębski, inż. Artur Wierszyło, Akademia Morska w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mails: k.gorecki@we.am.gdynia.pl; k.detka@we.am.gdynia.pl; zarebski@am.gdynia.pl; artur.wierszylo@interia.eu

LITERATURA

- [1] Górecki K., Zarębski J.: Modeling Nonisothermal Characteristics of Switch-Mode Voltage Regulators. IEEE Transactions on Power Electronics, 23, (2008), No. 4, pp. 1848 - 1858.
- [2] Ericson R., Maksimovic D.: *Fundamentals of Power Electronics*. Norwell, Kluwer Academic Publisher, (2001).
- [3] Borkowski A.: *Zasilanie urządzeń elektronicznych*. WKŁ. Warszawa, (1990).
- [4] Górecki K., Detka K.: Electrothermal Model of Choking-coils for the Analysis of DC-DC Converters. Materials Science & Engineering B, 177, (2012), No. 15, pp. 1248-1253.
- [5] Kazimierczuk M. K.: *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters*. John Wiley & Sons, (2008).
- [6] Rashid M.H.: *Power Electronic Handbook*. Academic Press, Elsevier, 2007.
- [7] Górecki K., Zarębski J., Detka K.: Materiały magnetyczne wykorzystywane w przetwornicach dc-dc. Elektryka, 58, (2012), Z. 2 (222), s. 7-18
- [8] Van der Bossche A., Valchev V.C.: *Inductors and Transformers for Power Electronics*. Taylor & Francis, Boca Raton, (2005).
- [9] Chwastek K., Szczygłowski J., Wilczyński W., Maroin R., Raulet M., Zitouni Y., Krahenbuhl L.: Modelowanie pętli histerezy nieosiągających nasycenia dla blach elektrotechnicznych o podwyższonej zawartości krzemu przy użyciu zmodyfikowanego modelu Jilesa – Athertona. Przegląd Elektrotechniczny, 85, (2009), Nr 1, s. 68 – 70.
- [10] Górecki K., Detka K.: The Parameter Estimation of the Electrothermal Model of Inductors. Informacje MIDE M – Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials, 45, (2015), No.1, pp. 29-38.
- [11] Górecki K., Stepowicz W.J.: Comparison of Inductor Models Used in Analysis of the Buck and Boost Converters. Informacje MIDE M – Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials, 38, (2008), No.1, pp. 20-25.
- [12] Wilson P.R., Ross J. N., Brown A. D.: Simulation of Magnetics Components Models in Electric Circuits Including Dynamic Thermal Effects. IEEE Transactions on Power Electronics, 17, (2002), No 1, pp. 55 – 65.
- [13] Detka K., Górecki K.: Wpływ samonagrzewania w dławiku na charakterystyki przetwornicy typu boost. Przegląd Elektrotechniczny, 90, (2014), Nr 9, s. 19-21.
- [14] Górecki K., Rogalska M., Zarębski J., Detka K.: Modelling Characteristics of Ferromagnetic Cores with the Influence of Temperature. Journal of Physics: Conference Series, 494, (2014), 012016, doi:10.1088/1742-6596/494/1/012016.
- [15] Narendran N., Gu Y.: Life of LED-based White Light Sources. Journal of Display Technology, 1, (2005), No. 1, pp. 167- 171.