

## Wpływ samonagrzewania w dławiku na charakterystyki przetwornicy typu boost

**Streszczenie.** W pracy rozważany jest wpływ zjawiska samonagrzewania w dławiku na charakterystyki przetwornicy boost. Zaprezentowano elektrotermiczny model dławika dla programu SPICE oraz wyniki obliczeń charakterystyk rozważanej przetwornicy uzyskane przy uwzględnieniu oraz pominięciu zjawiska samonagrzewania w tym elemencie. Wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów uzyskanymi dla przetwornicy z dławikiem zawierającym rdzeń wykonany ze sproszkowanego żelaza.

**Abstract.** This paper refers to considerations of the influence of self-heating in the choking-coil on characteristics of a boost converter. The electrothermal model of the choking-coil dedicated for SPICE is presented. Some results of calculations of characteristics of the boost converter obtained with self-heating in the choking-coil taking into account and at omitting this phenomenon are shown. Results of calculations are compared with results of measurements. Investigations are performed for choking-coils made from powdered iron. (The influence of self-heating in a choking-coil on characteristics of boost converters).

**Słowa kluczowe:** przetwornica boost, dławik, samonagrzewanie, modelowanie, pomiary.

**Keywords:** boost converter, choking-coil, self-heating, modelling, measurements.

doi:10.12915/pe.2014.09.06

### Wprowadzenie

Przetwornice dc-dc są powszechnie wykorzystywane w impulsowych układach zasilających urządzenia elektroniczne. Jedną z najpowszechniej stosowanych konfiguracji układowych jest dławikowa przetwornica boost podwyższająca napięcie [1, 2]. Istotnym składnikiem tego układu jest dławik z rdzeniem ferromagnetycznym. Właściwości tego układu analizowano w licznych pracach [3, 4, 5], ale skupiono uwagę na właściwościach elementów półprzewodnikowych, natomiast pominięto właściwości elementów indukcyjnych.

W wcześniejszych pracach autorów rozważano wpływ nieliniowości modelu dławika na charakterystyki rozważanej przetwornicy [6] oraz zaproponowano elektrotermiczny nieliniowy model dławika [7, 8]. Jak wykazano w pracy [9], stosowanie liniowego modelu dławika może powodować istotne rozbieżności między wynikami obliczeń i pomiarów charakterystyk rozważanej przetwornicy.

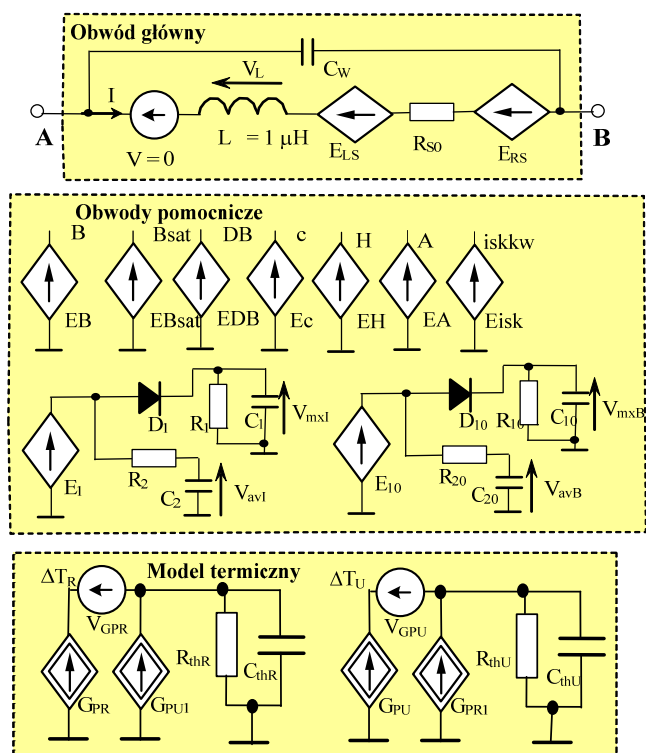
W niniejszej pracy zaproponowano modyfikację elektrotermicznego modelu dławika z pracy [8]. Model ten uwzględnia zjawiska magnetyczne i cieplne w dławiku oraz dodatkowo straty mocy w rdzeniu i zjawisko naskórkowości w uzwojeniu. Opracowany model zastosowano do obliczenia elektrotermicznych charakterystyk rozważanej przetwornicy i porównano uzyskane wyniki obliczeń z wynikami pomiarów.

W rozdziale drugim przedstawiono opracowany model elektrotermiczny. Rozdział trzeci zawiera opis badanego układu przetwornicy boost. W rozdziale czwartym zamieszczono uzyskane wyniki obliczeń i pomiarów rozważanej przetwornicy.

### Elektrotermiczny model dławika

Prezentowany w niniejszej pracy elektrotermiczny model dławika jest udoskonaloną wersją modelu tego elementu prezentowanego przez autorów w pracach [7, 8]. W nowym modelu uwzględniono dodatkowo wpływ częstotliwości na indukcyjność dławika, zmodyfikowano opis rezystancji szeregowej dławika, uwzględniając w nim niesinusoidalny kształt prądu dławika oraz wpływ strat w rdzeniu na rezystancję szeregową dławika, a także zmodyfikowano opis mocy strat w uzwojeniu dławika.

Reprezentację obwodową elektrotermicznego modelu dławika przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Reprezentacja obwodowa elektrotermicznego modelu dławika

W modelu tym występują 3 bloki: obwód główny, obwody pomocnicze oraz model termiczny. Zaciski A oraz B obwodu głównego są zaciskami dławika. Źródło napięciowe  $V$  o zerowej wydajności monitoruje prąd dławika, cewka  $L$  służy do wyznaczenia czasowej pochodnej prądu dławika. Sterowane źródło napięciowe  $E_{LS}$  modeluje zależność indukcyjności dławika od prądu, częstotliwości i temperatury. Napięcie na źródle  $E_{LS}$  opisane jest wzorem [8]

$$(1) \quad E_{LS} = w_s \cdot \frac{V_L}{L \cdot (1 + f/f_g)} \cdot \frac{z^2 \cdot S_{Fe} \cdot B_{sat} \cdot A}{l_{Fe} \cdot (H + A)^2 + A \cdot B_{sat} \cdot l_p / \mu_0}$$

gdzie  $z$  oznacza liczbę zwojów w uzwojeniu dławika,  $V_L$  – napięcie na liniowej cewce  $L$ ,  $S_{Fe}$  – zastępcze pole przekroju

rdzenia,  $B_{sat}$  – indukcję nasycenia rdzenia,  $H$  – natężenie pola magnetycznego w rdzeniu,  $l_{Fe}$  – długość drogi magnetycznej w rdzeniu,  $A$  – parametr pola opisujący nachylenie krzywej pierwotnego magnesowania,  $l_p$  – długość szczeliny powietrznej,  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczną próżni,  $w_s$  – współczynnik sprzężenia,  $f$  – częstotliwość prądu dławika,  $f_g$  – częstotliwość graniczną rdzenia, przy której jego przenikalność magnetyczna maleje dwukrotnie.

Rezystor  $R_{SO}$  reprezentuje rezystancję uzwojenia dla prądu stałego w temperaturze odniesienia  $T_0$ . Kondensator  $C_w$  reprezentuje pojemność uzwojenia, a sterowane źródło napięciowe  $E_{RS}$  opisuje wpływ częstotliwości, temperatury oraz strat w rdzeniu na rezystancję szeregową dławika. Dodatkowy spadek napięcia na dławiku wynikający z wpływu wymienionych wielkości opisany jest wzorem

$$(2) E_{RS} = \rho \cdot I \cdot \alpha_p \cdot (T_U - T_0) + \frac{l}{d} \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \rho \cdot (1 + \alpha_p \cdot (T_U - T_0))} \cdot x_1 + \frac{P_R}{i_{sk}^2} \cdot I$$

gdzie  $I$  oznacza wartość chwilową prądu dławika,  $d$  – średnicę drutu nawojowego,  $\alpha_p$  – temperaturowy współczynnik zmian rezystywności miedzi,  $\rho$  – rezystywność miedzi,  $l$  – długość uzwojenia,  $T_U$  – temperaturę uzwojenia,  $P_R$  – moc strat w rdzeniu,  $i_{sk}$  – wartość skuteczną prądu dławika.

Drugi składnik we wzorze (2) reprezentuje spadek napięcia na uzwojeniu spowodowany przez zjawisko naskórkowości. Podawane w literaturze, np. [7, 10] wzory opisujące rezystancję uzwojeń wynikającą ze zjawiska naskórkowości są sformułowane przy założeniu, że prąd w uzwojeniu ma przebieg sinusoidalny. Tymczasem, prąd dławika pracującego w przetwornicy dc-dc ma kształt przebiegu trójkątnego o regulowanym czasie narastania, równym iloczynowi okresu  $T_S$  sygnału sterującego przetwornicę oraz współczynnika wypełnienia tego sygnału  $d_1$ . Dlatego zaproponowano w nowym modelu dławika opis naskórkowości wykorzystujący przybliżenie czasowego przebiegu prądu dławika za pomocą szeregu Fouriera. Ze względu na ograniczoną długość ciągu opisującego wydajność źródła sterowanego w programie SPICE, ograniczono liczbę elementów tego szeregu do czterech. Czynniki  $x_1$  dany jest wzorem

$$(3) x_1 = 2 \cdot (V_{mxi} - V_{av}) \cdot \sum_{k=1}^4 (\sqrt{k \cdot f} \cdot (a_k \cdot \cos(2 \cdot k \cdot \pi \cdot f \cdot t) + b_k \cdot \sin(2 \cdot k \cdot \pi \cdot f \cdot t)))$$

gdzie  $V_{mxi}$  oraz  $V_{av}$  oznaczają napięcia w obwodach pomocniczych odpowiadające wartości maksymalnej oraz średniej prądu dławika,  $t$  – czas, zaś  $a_k$  oraz  $b_k$  – współczynniki szeregu Fouriera opisane wzorami

$$(4) a_k = \frac{\cos(2 \cdot k \cdot \pi \cdot (d_1 - 0,5)) - (-1)^k}{2 \cdot k^2 \cdot \pi^2 \cdot d_1 \cdot (1 - d_1)}$$

$$(5) b_k = \frac{\sin(2 \cdot k \cdot \pi \cdot (d_1 - 0,5))}{2 \cdot k^2 \cdot \pi^2 \cdot d_1 \cdot (1 - d_1)}$$

Wartość skuteczną prądu dławika jest wyznaczana ze wzoru definicyjnego w sterowanym źródle napięciowym  $E_{isk}$ . Źródło to znajduje się w bloku obwodów pomocniczych. W bloku tym inne sterowane źródła napięciowe służą do wyliczania wartości natężenia pola magnetycznego  $H$ , indukcji pola magnetycznego  $B$ , pochodnej tej indukcji  $DB$ , indukcji nasycenia  $B_{sat}$ , parametru  $A$  oraz wielkości pomocniczej  $C$ . Opis wydajności tych źródeł podano w pracach [7, 8]. W bloku tym również występują bloki pełniące rolę detektorów wartości szczytowej i średniej

prądu dławika oraz indukcji pola magnetycznego.

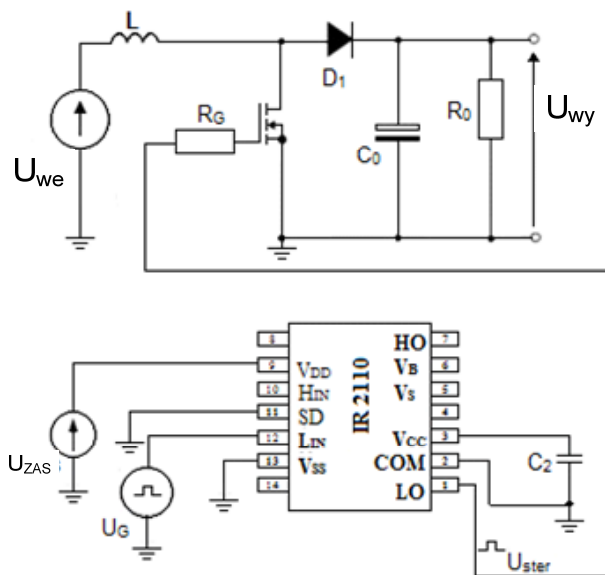
Model termiczny umożliwia obliczenie nadwyżek temperatury rdzenia  $\Delta T_R$  oraz uzwojenia  $\Delta T_U$  ponad temperaturę otoczenia  $T_a$ . Do wyznaczania tych nadwyżek wykorzystuje się skupiony model termiczny, w którym sterowane źródła prądowe reprezentują moce wydzielane w rdzeniu ( $G_{PR}$  oraz  $G_{PRI}$ ) i w uzwojeniu ( $G_{PU}$  oraz  $G_{PUI}$ ), zaś elementy  $RC$  – przejściową impedancję termiczną rdzenia lub uzwojenia. Źródła  $G_{PR}$  oraz  $G_{PU}$  są wykorzystywane do modelowania samonagrzewania, zaś źródła  $G_{PRI}$  oraz  $G_{PUI}$  – wzajemnych sprzężeń termicznych między rdzeniem a uzwojeniem. W modelu przyjęto  $G_{PRI} = 0,8 G_{PR}$  oraz  $G_{PUI} = 0,8 G_{PU}$ . Opis wydajności źródła  $G_{PR}$  zawarto w pracy [8], natomiast moc traconą w uzwojeniu można wyrazić wzorem

$$(6) G_{PU} = \rho \cdot I^2 \cdot [1 + \alpha_p \cdot (T_U - T_0)] + l/d \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \rho \cdot (1 + \alpha_p \cdot (T_U - T_0))} \cdot x_1 \cdot (I - I_{av})$$

gdzie  $I_{av}$  oznacza wartość średnią prądu dławika.

## Badany układ

W celu badania wpływu zjawiska samonagrzewania w dławiku na charakterystyki przetwornicy boost, skonstruowano układ, którego schemat pokazano na rysunku 2. W rozpatrywanym układzie zastosowano tranzystor MOSFET typu IRF540, diodę Schottky'ego 1N5822 oraz elementy biernie o następujących wartościach:  $R_G = 33 \Omega$ ,  $C_O = 47 \mu F$ ,  $C_2 = 22 nF$ . Rezystor  $R_0$  stanowi obciążenie przetwornicy, a źródło napięciowe  $U_{WE}$  – źródło zasilania. Sygnał sterujący bramkę tranzystora jest uzyskiwany ze sterownika IR2110, pełniącego funkcję wzmacniacza mocy, zasilanego ze źródła napięciowego  $U_{ZAS}$  o wydajności 15 V i sterowanego z generatora sygnału prostokątnego  $U_G$  o poziomach TTL.



Rys.2. Schemat badanej przetwornicy boost z układem sterującym

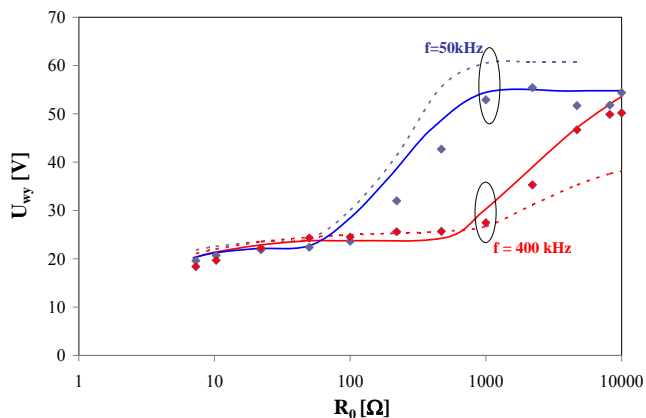
W rozważanym układzie wykonano pomiary stosując dławik zawierający 20 zwojów drutu miedzianego w emalii o średnicy 0,8 mm nawiniętego na rdzeniu ze sproszkowanego żelaza RTP-26,9x14,5x11 z materiału T106-26. Rdzeń ten ma kształt toroidu o średnicy zewnętrznej równej około 27 mm, średnicy wewnętrznej – około 15 mm i wysokości – około 11 mm.

## Wyniki obliczeń i pomiarów

Dla układu z rysunku 2 wykonano pomiary i obliczenia jego charakterystyk w stanie ustalonym. Obliczenia

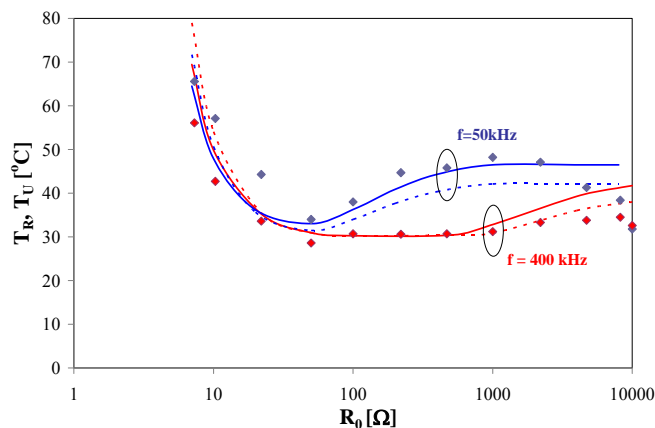
wykonano przy uwzględnieniu samonagrzewania w diodzie i w tranzystorze MOS, stosując hybrydowe elektrotermiczne modele tych elementów przedstawione m.in. w pracy [3]. Właściwości generatora sygnału sterującego wraz ze sterownikiem zamodelowano za pomocą źródła sygnału trapezoidalnego o poziomach -0,4 V oraz 11,6 V, czasie narastania 420 ns, czasie opadania 110 ns. Dławik zamodelowano przy wykorzystaniu modelu elektrotermicznego przedstawionego w rozdziale 2.

Wyniki obliczeń (linie) i pomiarów (punkty) rozważanej przetwornicy przedstawiono na rysunkach 3 – 4. Na rysunku 3 przedstawiono obliczone i zmierzone zależności napięcia wyjściowego badanej przetwornicy od rezystancji obciążenia przy ustalonej wartości współczynnika wypełnienia sygnału sterującego  $d = 0,5$  przy dwóch wartościach częstotliwości sygnału sterującego równych kolejno 50 kHz oraz 400 kHz. Wyniki obliczeń przeprowadzonych przy wykorzystaniu elektrotermicznego modelu dławika oznaczono liniami ciągłymi. Dla porównania, wykonano również obliczenia przy wykorzystaniu klasycznego liniowego modelu dławika. Wyniki tych obliczeń oznaczono liniami kreskowymi.



Rys.3. Obliczone i zmierzone zależności napięcia wyjściowego przetwornicy boost od rezystancji obciążenia

Jak można zauważyć, zastosowanie elektrotermicznego modelu dławika umożliwia uzyskanie znacznie lepszej zgodności między wynikami obliczeń i pomiarów niż przy zastosowaniu liniowego modelu dławika. Warto zauważyć, że uwzględnienie strat w dławiku oraz zależności indukcyjności od częstotliwości powoduje zmniejszenie wartości napięcia wyjściowego badanego układu. Stosowanie liniowego modelu dławika może powodować zawiżenie wyników obliczeń nawet o 50%.



Rys.4. Obliczone i zmierzone zależności temperatury rdzenia od rezystancji obciążenia

Z kolei, rysunek 4 ilustruje zależność temperatury rdzenia (linie ciągłe) oraz temperatury uzwojenia (linie kreskowe) od rezystancji obciążenia odpowiadające charakterystykom z rysunku 3. Jak widać, dla obu rozważanych częstotliwości uzyskano malejącą zależność  $T_R(R_0)$  oraz  $T_U(R_0)$ , przy czym wzrost częstotliwości powoduje spadek wartości temperatury dławika. Z faktu, że temperatura uzwojenia jest niższa od temperatury rdzenia wynika, że głównym źródłem strat jest rdzeń dławika.

## Podsumowanie

W pracy zaproponowano modyfikację elektrotermicznego modelu dławika dla programu SPICE. Model ten uwzględnia wpływ częstotliwości na indukcyjność dławika oraz jego rezystancję szeregową.

Przedstawione wyniki badań dowodzą, że stosowanie nieliniowego elektrotermicznego modelu dławika w analizach przetwornicy boost jest zasadne. Zastosowanie tego modelu, zamiast typowo stosowanego modelu liniowego, pozwala na uzyskanie znacznie lepszej zgodności między wynikami obliczeń i pomiarów. Poprawę zgodności między obliczonymi i zmierzonymi charakterystykami badanej przetwornicy uzyskano zarówno przy pracy tej przetwornicy w trybie ciągłego, jak i nieciągłego przepływu prądu.

Obecnie trwają badania nad weryfikacją poprawności opracowanego modelu dławika dla różnych materiałów magnetycznych wykorzystywanych na rdzenie dławików.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/B/ST7/06738.

## LITERATURA

- [1] Ericson R., Maksimovic D., Fundamentals of Power Electronics, Norwell, Kluwer Academic Publisher, 2001
- [2] Rashid M.H., Power Electronic Handbook, Academic Press, Elsevier, 2007
- [3] Górecki K., Zarębski J., Modeling Nonisothermal Characteristics of Switch-Mode Voltage Regulators. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 4, (2008), 1848-1858
- [4] Górecki K., Zarębski J., The method of a fast electrothermal transient analysis of single-inductance dc-dc converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No. 9, (2012), 4005-4012
- [5] Basso C., Switch-Mode Power Supply SPICE Cookbook. McGraw-Hill, New York 2001
- [6] Górecki K., Stepowicz W.J., Comparison of Inductor Models Used in Analysis of the Buck and Boost Converters, *Informacje MIDEM*, Vol. 38, No.1, (2008), 20-25
- [7] Górecki K., Detka K., Electrothermal model of choking-coils for the analysis of dc-dc converters, *Materials Sciences & Engineering B*, Vol. 177, No. 15, (2012), 1248-1253
- [8] Górecki K., Detka K., The electrothermal model of the choking-coil for SPICE. *Elektronika*, nr 1, 2014, 9-11
- [9] Górecki K., Detka K., Wpływ doboru rdzenia dławika na nieizotermiczne charakterystyki przetwornicy buck. *Elektronika*, Nr 10, (2011), 76-78
- [10] Barlik R., Nowak M., Energoelektronika – elementy, podzespoły, układy. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2014

Autorzy: mgr inż. Kalina Detka, E-mail: [kala.45@wp.pl](mailto:kala.45@wp.pl), dr hab. inż. Krzysztof Górecki, E-mail: [gorecki@am.gdynia.pl](mailto:gorecki@am.gdynia.pl), prof. nadzw. AMG, Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia.