

doi:10.15199/48.2015.09.09

Modelowanie charakterystyk przetwornicy półmostkowej

Streszczenie. W pracy rozważany jest problem modelowania charakterystyk przetwornicy półmostkowej w programie SPICE. Przedstawiono wybrane modele transformatora impulsowego, będącego istotnym komponentem rozważanego układu oraz przedstawiono wyniki analiz komputerowych badanej przetwornicy. Analizy wykonano przy wykorzystaniu różnych modeli transformatora impulsowego, a uzyskane wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów. Przedyskutowano zasadność stosowania poszczególnych modeli transformatora oraz oceniono wpływ zastosowanego modelu transformatora na zgodność między wynikami obliczeń i pomiarów.

Abstract. In the paper the problem of the modelling characteristics of a half-bridge converter in the SPICE software is considered. Selected models of the impulse-transformer, being the essential component of considered circuit is presented and results of computer analyses of the investigated converter are discussed. Analyses were performed with the use of different models of the impulse-transformer, and obtained results of calculations are compared with results of measurements. The validity of the use of each models of the transformer is discussed and the influence of applied model of the transformer on the agreement between results of calculations and measurements are evaluated. (**Modelling characteristics of half-bridge converters**).

Słowa kluczowe: transformator impulsowy, modelowanie, przetwornica półmostkowa.

Keywords: pulse transformers, modelling, half-bridge converters.

Wprowadzenie

W impulsowych układach zasilających wymagających izolacji galwanicznej między wejściem a wyjściem często wykorzystuje się półmostkowe przetwornice dc-dc [1]. Ważnym elementem takiej przetwornicy jest transformator impulsowy z dzielnym uzwojeniem wtórnym.

Przy analizie i projektowaniu układów elektronicznych powszechnie wykorzystuje się symulacje komputerowe, które wymagają modeli komputerowych wszystkich elementów analizowanego układu [2]. Modele te powinny uwzględniać wszystkie istotne zjawiska zachodzące w każdym z tych elementów, a jednocześnie powinny być na tyle proste by umożliwić szybkie uzyskanie wyników obliczeń. Dlatego w literaturze można znaleźć wiele modeli elementów elektronicznych dedykowanych do różnych zastosowań i cechujących się zróżnicowaną dokładnością.

W literaturze poświęconej modelowaniu i analizie impulsowych układów zasilających, np. [1, 2], dużo uwagi poświęca się wpływowi właściwości elementów półprzewodnikowych na rozważane układy, a elementy indukcyjne, w tym transformatory, modeluje się za pomocą idealizowanych modeli liniowych. Z drugiej strony, bogata jest literatura opisująca modele nieliniowych rdzeni ferromagnetycznych, np. [3, 4], które są niezbędnym składnikiem transformatorów.

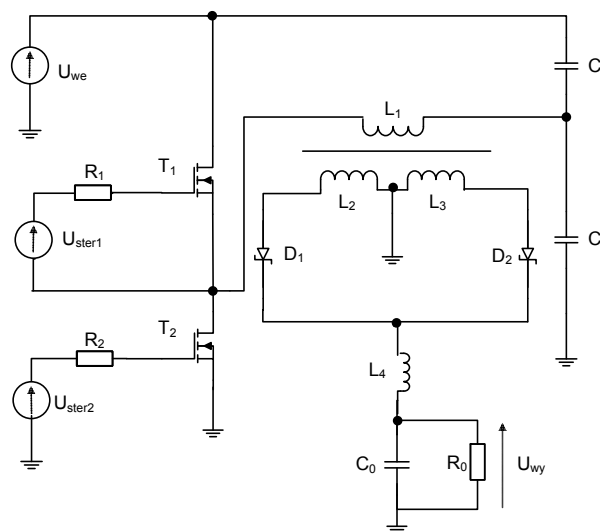
W pracy przedstawiono 4 arbitralnie wybrane modele transformatora i zbadano ich przydatność do modelowania charakterystyk przetwornicy półmostkowej. Wyniki obliczeń, uzyskane przy wykorzystaniu tych modeli porównano z wynikami pomiarów.

Badany układ

Badania przeprowadzono dla półmostkowej przetwornicy dc-dc obniżającej napięcie, której schemat pokazano na rysunku 1.

Rozważana przetwornica zasilana jest napięciem stałym U_{we} , a jej obciążenie stanowi rezystor R_0 . Rozpatrywana przetwornica zawiera następujące elementy składowe: tranzystory MOS mocy typu IRF 540, diody Schottky'ego 1N5822, kondensatory elektrolityczne C_1 i C_2 o pojemności 47 μF , dławik L_4 o indukcyjności 220 μH oraz transformator impulsowy z rdzeniem proszkowym RTP-26,9x14,5x11 (T106-26). Transformator ten zawiera trzy uzwojenia po 20 zwojów wykonane drutem miedzianym w emalii o średnicy 0,8 mm. Kondensator C_0 filtruje tętnienia napięcia wyjściowego. Źródła napięciowe U_{ster1} oraz U_{ster2} wytwarzają

sygnały prostokątne sterujące oba tranzystory, zaś rezystory R_1 i R_2 ograniczają wartości chwilowe prądów bramek obu tranzystorów.

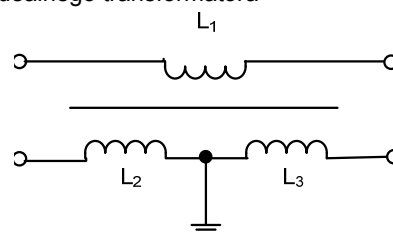


Rys. 1. Schemat transformatorowej przetwornicy półmostkowej

Wybrane modele transformatorów

W niniejszym rozdziale przedstawiono wybrane modele transformatorów dedykowane dla programu SPICE. Prezentowane w pierwszych dwóch podrozdziałach modele tego elementu wykorzystują liniowe modele cewek sprzężonych liniowo, natomiast w kolejnych dwóch podrozdziałach opisano wybrane elektrotermiczne modele transformatorów.

Model idealnego transformatora

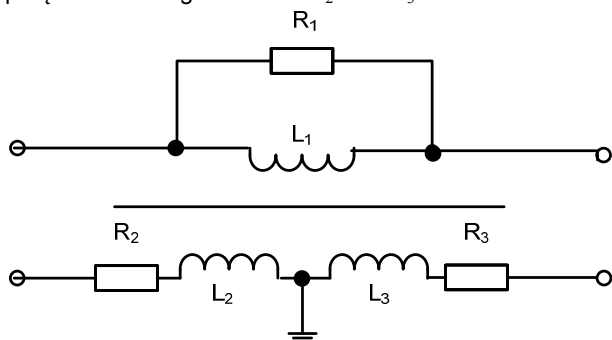


Rys. 2. Reprezentacja obwodowa modelu idealnego transformatora z dzielnym uzwojeniem wtórnym

Na rysunku 2 przedstawiono reprezentację obwodową modelu idealnego transformatora złożonego ze sprzężonych liniowo cewek liniowych. Uzwojenie pierwotne reprezentuje cewka L_1 , a uzwojenia wtórne cewki L_2 oraz L_3 . Wartości indukcyjności tych cewek zależą od rodzaju wykorzystywanego rdzenia i liczby zwojów.

Model liniowego stratnego transformatora

Rysunek 3 przedstawia reprezentację obwodową liniowego, stratnego modelu transformatora. Model ten złożony jest ze sprzężonych cewek oraz rezystorów opisujących straty w uzwojeniach wtórnych R_2 i R_3 oraz straty w rdzeniu R_1 . Wartości rezystancji tych rezystorów oraz indukcyjności cewek zależą od materiału użytego rdzenia oraz parametrów uzwojeń. Uzwojenie pierwotne reprezentuje cewka L_1 , a uzwojenia wtórne reprezentują połączone szeregowo cewki L_2 oraz L_3 .



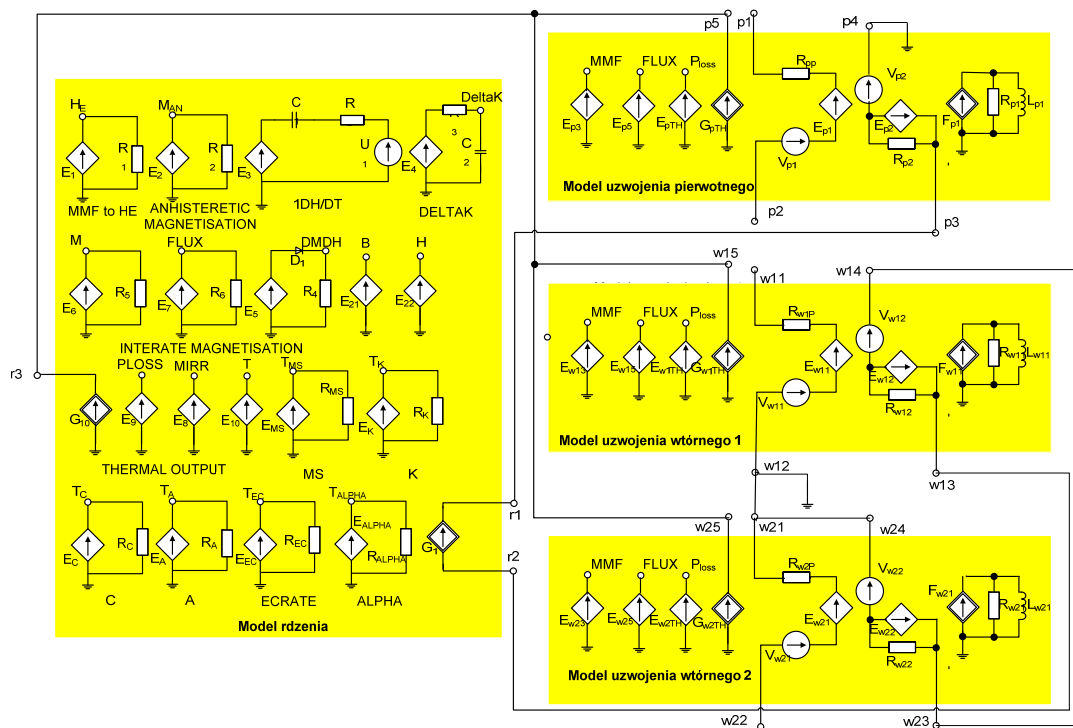
Rys. 3. Reprezentacja obwodowa liniowego stratnego modelu transformatora z dzielnym uzwojeniem wtórnym

Nieliniowy elektrotermiczny model transformatora z pracy [3]

Opisane w poprzednich dwóch podrozdziałach modele pomijają zjawiska cieplne w rdzeniu i w uzwojeniu oraz samonagrzewanie. W pracy [3] zaproponowano

elektrotermiczny model rdzenia ferromagnetycznego i uzwojeń elementów magnetycznych, a jak wynika m.in. z prac [5, 6] zjawiska cieplne mogą w istotny sposób wpływać na charakterystyki transformatorów. Rysunek 4 przedstawia reprezentację obwodową modelu transformatora dla programu SPICE, stanowiącego połączenie elektrotermicznych modeli rdzenia ferromagnetycznego i uzwojeń przedstawionych w pracy [3]. W modelu tym występują sterowane źródła napięciowe, prądowe oraz elementy biernie. Pierwszy obwód składający się z szeregowo połączonego sterowanego źródła napięciowego E_1 oraz rezystora R_1 , służy do wyznaczenia efektywnego natężenia pola magnetycznego H_e . Obwód składający się ze sterowanego źródła napięciowego E_2 oraz rezystancji R_2 służy do wyznaczenia wartości nieodwracalnej magnetyzacji M_{an} .

Kolejny obwód składający się ze sterowanego źródła napięciowego E_3 , kondensatora C_1 , rezystora R_D oraz źródła napięciowego V_1 służy do wyznaczenia czasowej pochodnej natężenia pola magnetycznego dH/dt . Obwód złożony z szeregowo połączonych sterowanego źródła napięciowego E_4 , rezystora R_2 oraz kondensatora C_2 odpowiada za opóźnienie sygnału analizowanego układu, spowolnienie zboczy sygnału lub ograniczenie wartości pochodnej dH/dt . Cztery kolejne obwody złożone ze sterowanego źródła napięciowego E_6 oraz rezystora R_5 , obwód z elementami E_7 i R_6 oraz sterowane źródło napięciowe E_5 połączone szeregowo z diodą D_1 i rezystorem R_4 , a także sterowane źródło prądowe G_1 , służą do wyznaczenia całkowitej magnetyzacji M . Sterowane źródła napięciowe E_{21} oraz E_{22} służą do wyznaczenia krzywej magnesowania rdzenia $B(H)$. Sterowane źródło prądowe G_1 podłączone jest między zaciski wyjściowe modelu rdzenia oznaczone cyframi r_1 i r_2 .



Rys. 4. Reprezentacja obwodowa transformatora z pracy [3]

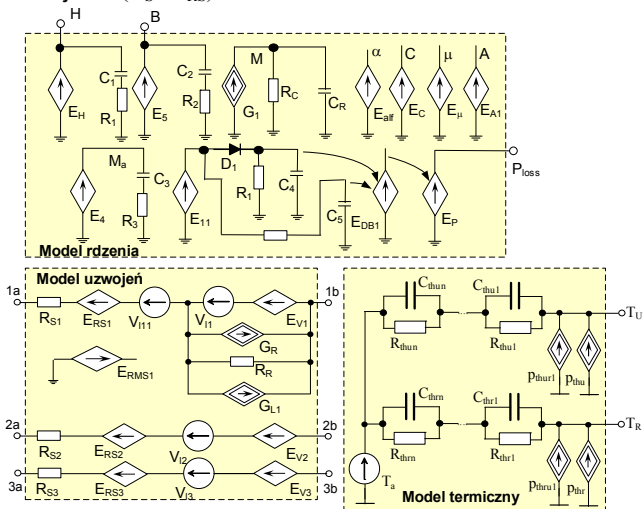
Kolejny blok złożony ze źródeł napięciowych E_8, E_9, E_{10} oraz źródła prądowego G_{10} służy do wyznaczenia mocy generowanej w rdzeniu oraz wyznaczenia temperatury jego wnętrza, odpowiadającej napięciu w węźle r_3 . Do tego węzła dołączana jest zewnętrzna sieć RC reprezentująca przejściową impedancję termiczną rdzenia. Obwody składające się z szeregowo połączonych sterowanych źródeł napięciowych E oraz rezystorów R , służą do wyznaczenia kolejno wartości parametrów modelu rdzenia $MS, K, C, A, ECRATE, ALPHA$ przy uwzględnieniu wpływu temperatury.

Modele wszystkich uzwojeń mają identyczną strukturę. Zawierają one obwody reprezentujące siłę elektromotoryczną indukcyjną i rezystancję uzwojeń oraz obwody modelujące siłę magnetymotoryczną wytwarzaną przez prąd każdego z uzwojeń, a także źródła sterowane umożliwiające wyznaczenie mocy strat w uzwojeniu. W rozważanym modelu jednakową temperaturę wnętrza mają uzwojenia i rdzeń transformatora.

Model autorski

Rysunek 5 przedstawia reprezentację obwodową elektrotermicznego modelu transformatora dla programu SPICE, przedstawionego przez autorów w pracy [7]. Model ten składa się z trzech bloków: modelu rdzenia, modelu uzwojeń oraz modelu termicznego. Model rdzenia oparty jest o zmodyfikowany model Jilesa-Athertona. W modelu tym sterowane źródło napięciowe E_H szeregowo połączone z kondensatorem C_1 oraz rezystorem R_1 służą do wyznaczenia pola magnetycznego H . Indukcja odpowiada napięciu na zacisku wyjściowym B . Straty mocy w rdzeniu są równe napięciu na zacisku P_{loss} .

Model uzwojenia zawiera trzy obwody: uzwojenie pierwotne – z wyjściami na zaciskach 1a i 1b, a także dwa wtórne uzwojenia – z wyjściami na zaciskach 2a i 2b oraz 3a i 3b. W modelu uzwojenia pierwotnego rezystor R_{S1} reprezentuje rezystancję szeregową tego uzwojenia w temperaturze odniesienia T_0 , sterowane źródło napięciowe E_{RS1} opisuje zmiany tej rezystancji przy zmianie temperatury uzwojenia T_U . Sterowane źródło napięciowe E_V wyznacza napięcie indukowane w uzwojeniu pierwotnym, sterowane źródło prądowe G_{L1} reprezentuje prąd magnesowania, a sterowane źródło prądowe G_R – straty energii w rdzeniu. Napięcie V_{RMS1} oblicza się za pomocą sterowanego źródła napięciowego E_{RMS1} . Źródła napięciowe V_{L1} i V_{I11} mają zerową wartość napięcia wyjściowego i są wykorzystywane do monitorowania wartości ich prądów. Z kolei, model uzwojenia wtórnego zawiera tylko elementy modelujące napięcia na uzwojeniu (E_V) i rezystancję szeregową tego uzwojenia (R_S i E_{RS}).



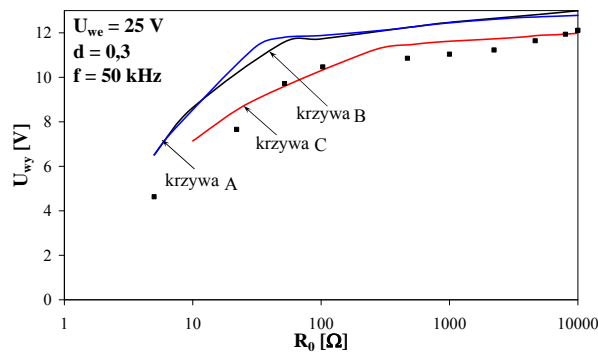
Rys. 5. Reprezentacja obwodowa modelu transformatora z pracy [7]

Model termiczny umożliwia obliczenie temperatury T_R rdzenia i temperatury uzwojenia T_U przy uwzględnieniu samonagrzewania i wzajemnych sprzężeń cieplnych pomiędzy rdzeniem a uzwojeniami. Model ten ma postać sieci RC Fostera pobudzonej przez źródła reprezentujące wartości mocy wydzielanej w rdzeniu P_{thr} oraz w uzwojeniach P_{thu} . W celu uwzględnienia sprzężenia termicznego pomiędzy rdzeniem i uzwojeniami zastosowano sterowane źródła prądowe P_{thn1}, P_{thr1} . Źródła napięciowe T_a modeluje temperaturę otoczenia.

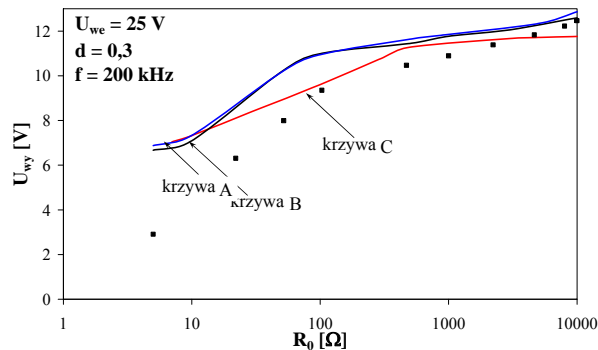
Wyniki badań

W celu oceny przydatności przedstawionych w rozdziale 3 modeli transformatora do analizy układów impulsowych, przeprowadzono obliczenia charakterystyk rozważanej przetwornicy półmostkowej i porównano je z wynikami pomiarów. Pomimo wielu prób dobrania odpowiednich wartości opcji analizy nie udało się uzyskać zbieżności obliczeń dla rozważanej przetwornicy wykorzystującej model z pracy [3]. Struktura tego modelu jest bardzo złożona, dzięki czemu umożliwia dokładne wyznaczenie charakterystyk transformatora, ale uniemożliwia wyznaczenie charakterystyk rozważanej przetwornicy.

Na rysunku 6 przedstawiono obliczone i zmierzone zależności napięcia wyjściowego rozważanej przetwornicy od rezystancji obciążenia dla dwóch wybranych częstotliwości sygnału sterującego 50 kHz (rys. 6a) oraz 200 kHz (rys. 6b) oraz dla współczynnika wypełnienia d równego 0,3. Na rysunku tym punkty oznaczają wyniki pomiarów, natomiast linie – wyniki obliczeń, przy czym krzywa A dotyczy modelu idealnego transformatora, krzywa B – modelu liniowego stratnego transformatora, zaś krzywa C – modelu autorskiego.



a)



b)

Rys. 6. Obliczone i zmierzone zależności napięcia wyjściowego przetwornicy od rezystancji obciążenia dla częstotliwości równych: a) 50 kHz, b) 200 kHz

Jak widać, stosowanie modeli liniowych transformatora nie pozwala na uzyskanie dobrej zgodności między

wynikami obliczeń i pomiarów, a różnice między tymi wynikami przekraczają nawet 30%. Z kolei, model z pracy [7] zapewnia dobrą zgodność między wynikami obliczeń i pomiarów przy niższej z rozważanych częstotliwości, natomiast w zakresie wyższych częstotliwości widać, że obliczone wartości napięcia U_{wy} są zawyżone w stosunku do wyników pomiaru.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wybrane modele transformatorów i przetestowano przydatność tych modeli do analizy charakterystyk przetwornicy półmostkowej. Przeprowadzone badania dowiodły, że wykorzystanie powszechnie stosowanych liniowych modeli tego elementu umożliwia uzyskanie jedynie jakościowej zgodności między wynikami obliczeń i pomiarów.

Z kolei, autorski elektrotermiczny model transformatora umożliwia poprawę dokładności obliczeń charakterystyk przetwornicy półmostkowej. Model ten wymaga jeszcze uzupełnienia o zjawiska modelujące straty w uzwojeniu w zakresie wysokich częstotliwości. Jednak wyniki badań elektrotermicznego modelu transformatora z pracy [3] dowodzą, że nadmierny stopień złożoności modelu transformatora uniemożliwia uzyskanie zbieżności obliczeń i wyznaczenie charakterystyk rozważanego układu.

LITERATURA

- [1] Ericson R., Maksimovic D., *Fundamentals of Power Electronics*. Norwell, Kluwer Academic Publisher, 2001
- [2] Basso C., *Switch – Mode Power Supply SPICE Cookbook*, McGraw – Hill, New York, 2001
- [3] Wilson P.R., Ross J.N., Brown A.D., Simulation of Magnetic Component Models in Electric Circuits Including Dynamic Thermal Effects, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 17, No. 1, (2002), 55-65
- [4] Van den Bossche A., Valchev V.C., *Inductors and transformers for Power Electronics*. CRC Press, Taylor & Francis Group Boca Raton, 2005
- [5] Górecki K., Zarębski J., Electrothermal analysis of the self-excited push-pull dc-dc converter. *Microelectronics Reliability*, Vol. 49, No. 4, (2009), 424-430
- [6] Górecki K., Rogalska M., Zarębski J., Parameter estimation of the electrothermal model of the ferromagnetic core. *Microelectronics Reliability*, Vol. 54, No. 5, (2014), 978-984
- [7] Górecki K., Górski K., Rogalska M., Estimation of parameters of the electrothermal model of the impulse-transformer, *38th International Conference of IMAPS-CPMT Poland*, 21-24 September 2014

Autorzy: mgr inż. Małgorzata Godlewska, Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia; dr hab. inż. Krzysztof Górecki, prof. nadzw. AMG, Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia, E-mail: k.gorecki@we.am.gdynia.pl.