

Krzysztof Górecki, Janusz Zarębski

Akademia Morska w Gdyni

Kalina Detka

Pomorska Wyższa Szkoła Nauk Stosowanych w Gdyni

MODELOWANIE ELEMENTÓW MAGNETYCZNYCH W PROGRAMIE SPICE

Artykuł dotyczy modelowania elementów magnetycznych za pomocą programu SPICE. Zaprezentowano tu wybrane modele dławików uwzględniające właściwości zarówno uzwojenia, jak i rdzenia ferromagnetycznego. W szczególności omówiono zjawiska fizyczne uwzględniane w poszczególnych modelach. Wykorzystując rozważane modele, obliczono charakterystyki wybranego dławika. Uzyskane wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów i przedyskutowano uzyskane rozbieżności.

Słowa kluczowe: elementy magnetyczne, modelowanie, SPICE.

WPROWADZENIE

Dławiki i transformatory są niezbędnymi składnikami wielu urządzeń elektronicznych, np. układów zasilających. Wymienione elementy elektroniczne wykorzystują wzajemne oddziaływanie wielkości elektrycznych i magnetycznych, a na właściwości tych elementów w istotny sposób wpływają nieliniowe charakterystyki zastosowanego rdzenia ferromagnetycznego [1, 2, 4].

Często w analizach układów elektronicznych wykorzystuje się liniowe modele pasywnych elementów elektronicznych, do których należy induktor, oraz modele idealnego transformatora. Modele te umożliwiają sprawdzenie funkcjonalnej poprawności działania układu, lecz nie uwzględniają nieliniowości rozważanych elementów, które są istotne przy pracy elementów magnetycznych w szerokim zakresie zmian natężenia pola magnetycznego. Taki szeroki zakres zmian tej wielkości jest obserwowany m.in. w dławikach występujących w przetwornicach dc-dc pracujących ze zmiennym obciążeniem lub w samowzbudnych przetwornicach dc-dc pracujących z rdzeniami nasycającymi się [7, 8, 11]. Nieliniowość rdzenia ferromagnetycznego powoduje, że przy zmianach prądu dławika w szerokim zakresie obserwowane są znaczące zmiany indukcyjności tego elementu [5, 7, 19]. Skutkiem zmian wartości indukcyjności może być m.in. zmiana granicy zakresu pracy przetwornicy dc-dc między trybami CCM oraz DCM [8].

W literaturze przedmiotu można znaleźć dużo modeli elementów magnetycznych, które uwzględniają nieliniowości charakterystyk tych elementów oraz inne ich nieidealności, np. [3, 5–7, 10, 11, 20]. W pracy przedstawiono wybrane modele

literaturowe dławików i transformatorów dedykowane programowi SPICE oraz porównano i przedyskutowano rozbieżności między wynikami obliczeń uzyskanych przy wykorzystaniu tych modeli. Rozważano zarówno modele wbudowane w programie SPICE, jak i makromodele dedykowane temu programowi.

1. MODELE WBUDOWANE W PROGRAMIE SPICE

Użytkownik programu SPICE może wykorzystać wbudowane w tym programie liniowe i nieliniowe modele dławika i transformatora. Modele te opisano m.in. w pracy [22]. Dławik może być reprezentowany przez idealny induktor, którego indukcyjność jest stała (model liniowy) lub przez induktor, którego indukcyjność L opisana jest funkcją kwadratową prądu oraz temperatury. Modele induktora wbudowane w programie SPICE nie uwzględniają strat energii w tym elemencie ani zjawiska samonagrzewania. Tymczasem, jak pokazano m.in. w pracach [5–7, 9, 10], samonagrzewanie w dławiku może w istotny sposób zmieniać przebieg zależności $L(i)$ [5, 6, 10] oraz wpływać na przebieg charakterystyk zaciskowych układów zawierających dławiki, np. przetwornic dc-dc [7, 9].

W programie SPICE wbudowany jest nieliniowy model rdzenia ferromagnetycznego, opisujący zależność indukcji pola magnetycznego B od natężenia pola magnetycznego H . Opis ten obejmuje histerezę krzywej magnesowania $B(H)$. Wykorzystując wzmiankowany model rdzenia, można modelować dławik lub transformator przy uwzględnieniu nieliniowości rdzenia. Niestety, model rdzenia nie bierze pod uwagę wpływu temperatury, która w istotny sposób wpływa na charakterystyki magnesowania oraz przenikalność magnetyczną rdzenia [2, 6, 12].

Z kolei transformator może być modelowany z zastosowaniem sprzężonych induktorów. Sprzężenie to może być liniowe (wówczas opisywany element zachowuje się jak idealny transformator) lub nieliniowe – przy wykorzystaniu modelu rdzenia ferromagnetycznego (wówczas uwzględnia się nieliniowość krzywej magnesowania). Ten sposób modelowania nie umożliwia uwzględnienia strat w uzwojeniach i w rdzeniu, inercji transformatora ani wpływu temperatury na jego właściwości.

2. PRZYKŁADY MODELI DŁAWIKA I TRANSFORMATORA W LITERATURZE PRZEDMIOTU

Jak wspomniano powyżej, modele elementów magnetycznych wbudowane w programie SPICE nie uwzględniają wielu istotnych zjawisk zachodzących w tych elementach. Dlatego w literaturze przedmiotu ostatnich kilkunastu lat można znaleźć informacje na temat makromodeli induktorów i transformatorów dla programu SPICE.

Przykładowo, w pracy [17] zaprezentowano analog obwodowy modelu rdzenia ferromagnetycznego uwzględniający nasycanie się rdzenia, ale pomijający historię charakterystyki jego magnesowania. Model ten zawiera 2 sterowane źródła prądowe, 1 sterowane źródło napięciowe, 3 niezależne źródła napięciowe, 3 rezystory, 2 diody i 1 kondensator. Model uwzględnia straty w rdzeniu i nieliniową zależność tych strat od strumienia pola magnetycznego. Zastosowano go do opisu charakterystyk dławika i transformatora. Uzyskano jakościowo poprawny przebieg charakterystyk rozważanych elementów [17].

W pracy [16] zaproponowano 2 wersje makromodeli dławika dla programu SPICE. Pierwszy z tych modeli opisuje bezstratny dławik z rdzeniem o nieliniowej krzywej magnesowania pozbawionej histerezy. Model ten umożliwia uzyskanie nieliniowej zależności $L(i)$ oraz wyznaczenie wartości natężenia pola magnetycznego, a także indukcji pola magnetycznego. Z kolei drugi z prezentowanych modeli jest bardziej rozbudowany. Uwzględnia on dodatkowo wielkość szczeliny powietrznej w magnetowodzie oraz straty w rdzeniu spowodowane przez prądy wirowe. Pokazane w pracy [16] wyniki obliczeń charakterystyk dławika z rdzeniem blaszanym ze stali krzemowej przy częstotliwościach 50 i 250 Hz mają jakościowo poprawny kształt.

W pracy [19] opisano model induktora zawierający jedynie 4 elementy biernie – kondensator reprezentujący pojemność międzywojową połączony równolegle z rezystorem reprezentującym straty w rdzeniu oraz z szeregowym połączeniem cewki o indukcyjności opisanej wielomianem drugiego stopnia z rezystorem modelującym straty w uzwojeniu. Opisany tu model umożliwia uzyskanie dobrej zgodności obliczonej i zmierzonej zależności $L(i)$ w zakresie prądów do około 100 mA. Również charakterystyki częstotliwościowe $Z(f)$ induktora, opisujące zależność jego impedancji od częstotliwości, wykazują dobrą zgodność wyników obliczeń i pomiarów przy składowej stałej prądu równej zeru.

W pracy [21] zaproponowano nieliniowy model dławika, wykorzystujący wielomianowy opis czasowej zależności strumienia pola magnetycznego. W celu uproszczenia procedury obliczeniowej zastosowano układ równań drugiego stopnia zamiast wielomianu wysokiego stopnia. Prezentowany w cytowanej pracy model uwzględnia zjawisko nasycenia w rdzeniu oraz straty energii w rdzeniu. Przedstawione tu wyniki obliczeń czasowych przebiegów napięć i prądów na zaciskach transformatora uzyskanych przy wykorzystaniu nieliniowego modelu dławika w charakterze indukcyjności magnesującej wykazały jakościowo poprawne kształty.

W pracy [15] zaprezentowano model dławika, uwzględniający nieliniowość charakterystyk rdzenia ferromagnetycznego oraz prądy wirowe w rdzeniu. W modelu tym uwzględniono analogię wielkości magnetycznych i elektrycznych. W szczególności charakterystykę magnesowania rdzenia zamodelowano, opisując reluktancję rdzenia za pomocą funkcji sklejaną (odcinkami liniowej). W modelu nie uwzględniono histerezy krzywej magnesowania, natomiast ujęto rezystancję uzwojenia. Model przetestowano przy pobudzeniu napięciowym sygnałem harmonicznym niskiej częstotliwości, uzyskując jakościowo poprawne czasowe przebiegi prądu dławika przy zerowej wartości składowej stałej prądu.

W pracy [20] zaproponowano nieliniowy makromodel dławika w postaci ży-ratora obciążonego nieliniową pojemnością. W modelu tym pominięto histerezę rdzenia ferromagnetycznego, a krzywą pierwotnego magnesowania opisano za pomocą funkcji odcinkami liniowej, wykorzystując dostępne w programie SPICE sterowane źródło napięciowe typu ETABLE. Rozważany model nadaje się do stosowania w częstotliwościowej analizie małosygnalowej, natomiast przy analizie stanów przejściowych wykazuje istotne rozbieżności z wynikami pomiarów [20].

W pracy [17] omówiono nieliniowy model dławika dla programu SPICE, uwzględniający histerezę krzywej magnesowania opisaną modelem Jilesa-Athertona [14], prądy wirowe w rdzeniu oraz straty mocy w rdzeniu wywołane zjawiskiem histerezy, a także obecność szczeliny powietrznej w magnetowodzie. Przedstawione w cytowanej pracy wyniki obliczeń wykazały poprawność kształtu uzyskiwanych przebiegów czasowych napięć i prądów zaciskowych dławika, a także krzywych magnesowania dla dławików z blaszanym rdzeniem, wykonanym ze stali krzemowej przy częstotliwościach z zakresu od 50 do 1000 Hz.

Praca [13] dotyczy modelowania właściwości rdzeni ferromagnetycznych w programie SPICE. Autorzy zaproponowali tu model rdzenia w postaci podukładu, będącego połączeniem kaskadowym statycznego nieliniowego modelu krzywej magnesowania oraz liniowego filtra dolnoprzepustowego drugiego rzędu. Tak sformułowany model rdzenia został wykorzystany jako komponent nieliniowego modelu dławika i transformatora. Wyniki obliczeń czasowych przebiegów napięć i prądów zaciskowych transformatora oraz pętli histerezy rdzenia wykazały dobrą zgodność z wynikami pomiarów w zakresie częstotliwości do kilkudziesięciu kHz.

W pracy [23] zaproponowano elektrotermiczny model transformatora dla programu SPICE. Model ten wykorzystuje sposób modelowania charakterystyki magnesowania zaproponowany przez Jilesa i Athertona, uwzględniając dodatkowo wpływ temperatury na przebieg pętli histerezy. W prezentowanym tu modelu wzięto również pod uwagę prądy wirowe oraz straty energii w rdzeniu i w uzwojeniu. Samonagrzewanie uwzględniono przy wykorzystaniu skupionego modelu termicznego w postaci sieci Cauera, przy czym pominięto wzajemne sprzężenia termiczne między rdzeniem a uzwojeniami. Przedstawione w cytowanej pracy wyniki analiz transformatora z rdzeniem ferrytowym, pracującego przy częstotliwości 80 Hz, wykazały poprawność modelowania krzywej magnesowania rdzenia w szerokim zakresie temperatur oraz niewielkie rozbieżności między obliczonymi i zmierzonymi przebiegami napięcia na uzwojeniu wtórnym transformatora.

Praca [3] zawiera opis sposobu modelowania zjawiska histerezy krzywej magnesowania za pomocą programu SPICE przy wykorzystaniu wbudowanych w tym programie modeli diod półprzewodnikowych oraz zestawu źródeł sterowanych. Model ten ma złożoną strukturę, ale umożliwia modelowanie charakterystyk induktora także w zakresie nasycania się rdzenia.

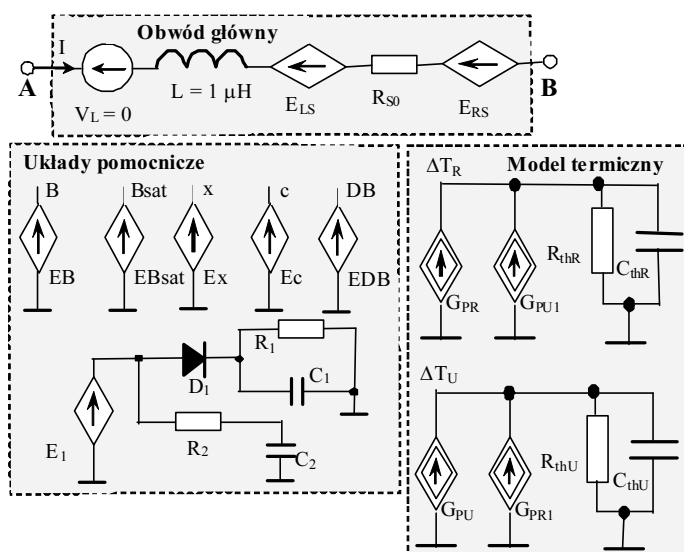
We wcześniejszych pracach autorów [5–7, 10, 11] przedstawiono elektrotermiczne modele transformatora [10, 11] oraz dławika [5–7]. W modelach tych uwzględniono samonagrzewanie w rdzeniu i w uzwojeniach oraz wzajemne sprzężenia termiczne między rdzeniem a uzwojeniami. Modele opisane w pracach

[5, 7, 11] nie uwzględniają histerezy rdzenia ferromagnetycznego, natomiast modele przedstawione w pracach [6, 10] zawierają opis pętli histerezy $B(H)$ zgodny z modelem Jilesa-Athertona [14, 22].

3. NIELINIOWY ELEKTROTHERMICZNY MODEL DŁAWIKA

Omówiony w pracy [7] elektrotermiczny model dławika dla programu SPICE przeznaczony jest do analizy stanów przejściowych układów impulsowego przetwarzania energii.

Reprezentację obwodową tego modelu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Reprezentacja obwodowa elektrotermicznego modelu dławika [7]

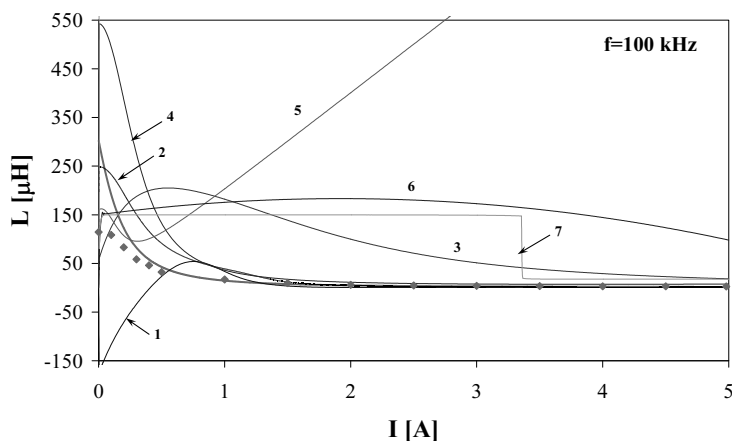
Fig. 1. Network representation of the electrothermal model of a choking-coil [7]

W opracowanym modelu można wyróżnić 3 bloki: obwód główny, układy pomocnicze oraz model termiczny. W obwodzie głównym występuje 5 szeregowo połączonych elementów: źródło napięciowe V_L o zerowej wydajności, cewka L o indukcyjności $1 \mu\text{H}$, sterowane źródło napięciowe E_{LS} , rezystor R_{SO} oraz sterowane źródło napięciowe E_{RS} . Źródło napięciowe V_L służy do monitorowania wartości prądu dławika. Cewka L umożliwia wyznaczenie wartości czasowej pochodnej prądu dławika, występującej w opisie źródła napięciowego E_{LS} , reprezentującego spadek napięcia na nieliniowej indukcyjności dławika. Rezystor R_{SO} reprezentuje rezystancję szeregową dławika przy temperaturze uzwojenia równej temperaturze otoczenia dla składowej stałej prądu. Źródło napięciowe E_{RS} przedstawia spadek napięcia na rezystancji szeregowej wynikający ze zjawiska naskórkowości oraz samonagrzewania. Z modelu termicznego wyznaczone są wartości temperatury

rdzenia T_R oraz uzwojenia T_U . W obwodzie pomocniczym wyznaczone są wartości natężenia pola magnetycznego i indukcji w rdzeniu, pochodnej tej indukcji oraz wartości międzyszczytowej prądu dławika oraz indukcji w rdzeniu.

4. WYNIKI OBLICZEŃ

Wykorzystując opisane w poprzednich rozdziałach modele, obliczono charakterystyki $L(i)$ dławika z rdzeniem ferrytowym typu B65671WR67 firmy EPCOS wykonanym z materiału N67 oraz porównano je z wynikami pomiarów na rysunku 2. Na rysunku tym punkty oznaczają wyniki pomiarów, natomiast linie – wyniki obliczeń uzyskanych przy wykorzystaniu modeli opisanych odpowiednio w pracy [23] (krzywa 1), w pracy [3] (krzywa 2), w pracy [13] (krzywa 3), w pracy [16] (wersja złożona – krzywa 4, wersja uproszczona – krzywa 5), w pracy [19] (krzywa 6) oraz w pracy [18] (krzywa 7).



Rys. 2. Zależności indukcyjności dławika od prądu uzyskane z obliczeń i z pomiarów

Fig. 2. The measured and calculated dependences of the inductance of a choking-coil on the current

W obliczeniach wykonanych przy wykorzystaniu modeli opisanych w pracach [3, 7, 13, 23] wykorzystano identyczne wartości parametrów materiałowych, opisujących rdzeń ferromagnetyczny oraz wartości liczby zwojów, odpowiadające badanemu dławikowi. Z kolei parametry pozostałych modeli [16, 18, 19] dobrano w taki sposób, aby uzyskać możliwie dobrą zgodność wyników obliczeń i pomiarów.

Warto zauważyć, że uzyskano dobrą zgodność charakterystyk obliczonych za pomocą modeli opisanych w pracach [3, 7, 13, 23] z charakterystyką zmierzoną tylko w zakresie prądów induktora przekraczających 1 A. Modele z prac [16, 18, 19] wykazują kształt inny niż charakterystyki zmierzone. W szczególności uproszczona wersja modelu z pracy [16] wykazuje wzrost indukcyjności dławika ze wzrostem prądu w zakresie prądów dławika przekraczających 1,5 A.

Charakterystyki $L(i)$ uzyskane za pomocą modeli z prac [13, 23] posiadają maksimum przy prądzie poniżej 1 A, a z modelu zaproponowanego w pracy [23] uzyskuje się нефизyczne ujemne wartości indukcyjności dla małych wartości prądu dławika. Model z pracy [19] wykazuje słabą zmienność indukcyjności w funkcji prądu, a model z pracy [18] jest praktycznie funkcją dwuwartościową.

PODSUMOWANIE

W pracy scharakteryzowano wybrane literaturowe modele elementów magnetycznych dla programu SPICE. Modele te różnią się zbiorem zjawisk fizycznych uwzględnianych w modelu oraz jego przeznaczeniem. Wiele z prezentowanych modeli zostało zweryfikowanych przez ich autorów jedynie przy pobudzeniu sygnałem sinusoidalnym. Niektóre z nich nie pozwalają na prawidłowe zamodelowanie charakterystyki $L(i)$ dławika w szerokim zakresie zmian prądu tego elementu.

Opracowany przez autorów model dławika umożliwia uzyskanie charakterystyk $L(i)$ zgodnych zarówno jakościowo, jak i ilościowo z charakterystykami zmierzonymi. Dalszych badań wymaga jeszcze poprawa zgodności rozważanych charakterystyk w zakresie małych prądów.

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

LITERATURA

1. Borkowski A., *Zasilanie urządzeń elektronicznych*, WKiŁ, Warszawa 1990.
2. Bossche van den A., Valchev V.C., *Inductors and transformers for power electronics*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 2005.
3. Brachtendorf H.G., Eck C., Laur R., *Macromodeling of hysteresis phenomena with SPICE*, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, Vol. 44, 1997, No. 5, s. 378–388.
4. Ericson R., Maksimovic D., *Fundamentals of power electronics*, Norwell, Kluwer Academic Publishers, 2001.
5. Górecki K., *Elektrotermiczny model cewki z rdzeniem ferrytowym do analizy przetwornic dc-dc*, „Elektronika”, 2008, nr 4, s. 194–198.
6. Górecki K., *Modelowanie cewki z rdzeniem ferrytowym w programie SPICE z uwzględnieniem samonagrzewania*, Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji, Vol. 49, 2003, nr 3, s. 389–404.
7. Górecki K., Detka K., *The Electrothermal Model of the Choking-Coil for the Analysis of Switching Networks*, IX International Conference on Microtechnology and Thermal Problems in Electronics Microtherm 2011, Łódź 2011, s. 71–76.
8. Górecki K., Stepowicz W.J., *Comparison of Inductor Models Used in Analysis of the Buck and Boost Converters*, Informacje MIDEM, Vol. 38, 2008, No. 1, s. 20–25.

9. Górecki K., Stepowicz W.J., *Wpływ zjawiska samonagrzewania w dławiku na charakterystyki przetwornicy buck*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 85, 2009, nr 11, s. 145–148.
10. Górecki K., Zarębski J., *Elektrotermiczny model transformatora impulsowego dla programu SPICE*, Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji, Vol. 51, 2005, nr 3, s. 421–437.
11. Górecki K., Zarębski J., *Electrothermal analysis of the self-excited push-pull dc-dc converter*, Microelectronics Reliability, Vol. 49, 2009, No. 4, s. 424–430.
12. Górecki K., Zarębski J., Krupa J., *Wpływ temperatury na właściwości cewki z rdzeniem ferromagnetycznym*, „Elektronizacja, Not-Sigma”, 2002, nr 11, s. 21–29.
13. Jia-Tzer Hsu, Khai D.T. Ngo, *Subcircuit modeling of magnetic cores with hysteresis in PSpice*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 38, 2002, No. 4, s. 1425–1434.
14. Jiles D.C., Thoelke J.B., Devine M.K., *Numerical determination of hysteresis parameters for the modeling of magnetic properties using the theory of ferromagnetic hysteresis*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, 1992, No. 1, s. 27–35.
15. Mandache L., Al-Haddad K., *An accurate design tool for filter inductors*, 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON, Taipei 2007, Taiwan, s. 1414–1419.
16. Mandache L., Topan D., Iordache M., Dumitriu L., Sirbu I.G., *On the time-domain analysis of analog circuits containing nonlinear inductors*, 20th European Conference on Circuit Theory and Design ECCTD 2011, Linköping 2011, Sweden, s. 98–101.
17. Mandache L., Topan D., Sirbu I.G., *Accurate time-domain simulation of nonlinear inductors including hysteresis and eddy-current effects*, World Congress on Engineering WCE 2011, Vol. 2, London 2011, England, s. 1327–1332.
18. Meares L.G., Hymowitz C.E., *SPICE Models for Power Electronics*, www.intusoft.com.
19. O'Hara M., *Modeling Non-Ideal Inductors in SPICE*, www.intusoft.com.
20. Rozanov E., Ben-Yaakov S., *A SPICE behavioral model for current-controlled magnetic inductors*, 23rd IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, Tel-Aviv 2004, Israel, s. 338–341.
21. Stefanopoulos G.K., Cokkinides G.J., Meliopoulos A., *Quadratized model of nonlinear saturable-core inductor for time-domain simulation*, IEEE Power & Energy Soc. General Meeting PES '09, Calgary 2009, Canada, s. 1–8.
22. Wilamowski B.M., Jaeger R.C., *Computerized circuit analysis using SPICE programs*, McGraw-Hill, New York 1997.
23. 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, 2002, No. 1, s. 55–65.

MODELLING OF MAGNETIC DEVICES IN SPICE

Summary

This paper is devoted to the problem of modelling of magnetic devices with the use of SPICE. Some selected models of choking-coils taken into account the most important properties of the windings and ferromagnetic cores are presented. The physical phenomena modelled in described models are shown. With the use of the considered models the $L(i)$ characteristics are calculated for selected choking-coil and the obtained results are compared with results of measurements and discussed.

Keywords: magnetic devices, modelling, SPICE.