

Nowa metoda pomiaru krzywej magnesowania rdzenia dławika

Streszczenie. W pracy zaproponowano metodę pomiaru pętli histerezy rdzenia dławika bazującą na pomiarze i rejestracji czasowych przebiegów prądu i napięcia. Opisano sposób realizacji metody pomiarowej i układ pomiarowy. Przedstawiono i przedyskutowano wyniki badań wpływu wybranych parametrów sygnału pomiarowego na przebieg krzywych magnesowania dla wybranych dławików z rdzeniem ferrytowym.

Abstract. The paper presents a new method of measuring the hysteresis loop of the inductor. The proposed method based on the measurement and recording the current and the voltage time waveforms of inductor. The implementation of the method and the manner of measuring were described. The results of the investigation were presented and discussed especially the influence of selected measurement signal parameters on the waveform of magnetization curves for selected inductors with a ferrite core. **(The measurement method of the magnetization curve of the inductor core)**

Słowa kluczowe: pętla histerezy, krzywa magnesowania, rdzeń ferromagnetyczny, dławik

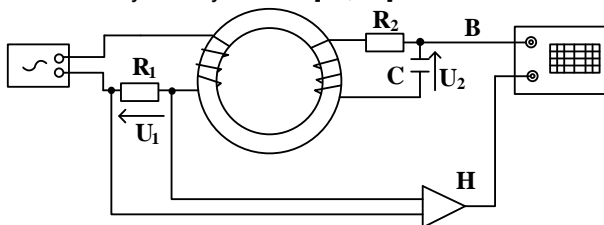
Keywords: hysteresis loop, magnetisation curve, ferromagnetic core, inductor

Wprowadzenie

Większość współczesnych urządzeń elektronicznych i energoelektronicznych zawiera elementy magnetyczne w postaci dławików lub transformatorów [1, 2, 3]. Jednym z najważniejszych parametrów rozważanych urządzeń jest ich sprawność energetyczna [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Na wartość tego parametru w istotny sposób wpływają zarówno straty powstające w elementach półprzewodnikowych, jak i straty w elementach biernych [1, 4, 10].

Podczas projektowania rozważanych układów niezbędny jest dobór odpowiedniego dławika lub transformatora zapewniającego wysoką sprawność energetyczną układu, a tym samym dobór odpowiedniego materiału wykorzystanego do budowy rdzenia elementu magnetycznego. Jak wiadomo z literatury [1, 2, 3, 4, 11, 12, 13] źródłem strat w materiałach magnetycznych wykorzystywanych do budowy rdzeni elementów magnetycznych są m.in. straty wynikające z przemagnesowania rdzenia określane jako straty histerezy. Stąd projektanci układów na podstawie danych katalogowych i znajdujących się w nich krzywych magnesowania dokonują wyboru odpowiedniego materiału do budowy rdzenia dławika dedykowanego konkretnemu rozwiązaniu.

Jedną z najpopularniejszych metod pomiaru krzywej magnesowania opisywana w literaturze jest metoda oscyloskopowa bazująca na obserwacji i rejestracji czasowych przebiegów napięcia po stronie pierwotnej i wtórnej transformatora z rdzeniem ferromagnetycznym. Metoda ta jest realizowana w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 1 [11, 14].



Rys.1. Układ do pomiaru krzywej magnesowania transformatora [3]

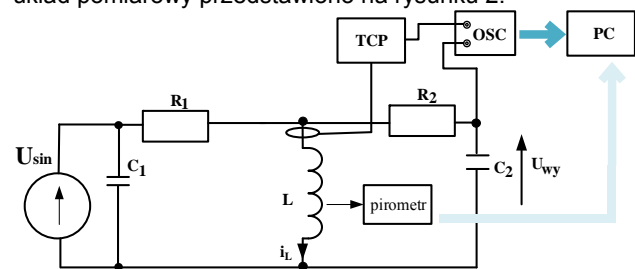
W układzie tym czasowe przebiegi $H(t)$ oraz $B(t)$ wyznaczone są na podstawie zmierzonych przebiegów napięć $u_1(t)$ oraz $u_2(t)$ i wartości elementów układu pomiarowego (R_1 , R_2 , C) oraz wartości parametrów konstrukcyjnych badanego transformatora (liczba zwojów każdego z uzwojeń, długość drogi magnetycznej i pole przekroju rdzenia). Niestety, rozważany układ wymaga obecności dwóch uzwojeń nawiniętych na testowanym

rdzeniu i może być stosowany tylko dla transformatorów, natomiast nie nadaje się do badania dławików.

W niniejszej pracy opisano metodę pomiaru krzywej magnesowania rdzenia dławika uwzględniającą także zjawiska cieplne zachodzące w rdzeniu rozważanego elementu oraz przedstawiono uzyskane wyniki pomiarów.

Metoda pomiaru pętli histerezy dławika

W niniejszym rozdziale opisano nową metodę pomiaru krzywej magnesowania rdzenia dławika, a zastosowany układ pomiarowy przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Układ do pomiaru krzywej magnesowania rdzenia dławika

W układzie zaprezentowanym na rysunku 2 wykorzystano źródło napięcia sinusoidalnego U_{sin} , dwa rezystory R_1 i R_2 , badany dławik L , kondensatory C_1 oraz C_2 , sondę prądową (TCP), oscyloskop (OSC). Dodatkowo opcjonalnie można zastosować pirometr pozwalający na rejestrowanie zmian temperatury ze zmianą parametrów sygnału pomiarowego. Rezystor R_1 ogranicza wartość prądu płynącego ze źródła napięcia U_{sin} , a kondensator C_1 filtruje zakłócenia wysokich częstotliwości indukowane w układzie pomiarowym. Sonda prądowa umożliwia przekształcenie prądu dławika i_L w napięcie mierzone przez oscyloskop. Zaś elementy R_2 i C_2 reprezentują układ całkujący napięcie na dławiku. Oscyloskop rejestruje przebieg czasowy prądu dławika i_L oraz napięcia U_{wy} na kondensatorze C_2 . Stała czasowa układu całkującego R_2C_2 musi być znacznie krótsza niż okres sygnału pobudzającego [15]. Pirometr mierzy temperaturę rdzenia dławika [16].

Pomiary wykonuje się dla stałej wartości częstotliwości f sygnału sinusoidalnego generowanego przez źródło napięcia U_{sin} . W stanie ustalonym termicznie rejestrowane są przebiegi prądu i_L i napięcia U_{wy} . Uzyskanie stanu ustalonego termicznie weryfikuje się za pomocą pirometru. Jeżeli wskazanie w ustalonym czasie (około 5 minut) nie zmieni się więcej niż o 1°C , to można stwierdzić, że rdzeń dławika osiągnął stan stabilny termicznie. Następnie zmierzone przebiegi czasowe prądu dławika i_L i napięcia na

kondensatorze U_{wy} są rejestrowane za pomocą oscyloskopu. Przebiegi te są przesyłane do komputera, gdzie wykonywane są odpowiednie obliczenia natężenia pola magnetycznego H z zależności (1) oraz indukcji pola magnetycznego B z zależności (2).

$$(1) \quad H(t) = \frac{z \cdot i_L(t)}{l_{Fe}}$$

$$(2) \quad B(t) = \frac{V_{out}(t) \cdot R_2 \cdot C}{z \cdot S_{Fe}}$$

gdzie z to liczba zwojów, l_{Fe} to długość drogi magnetycznej, zaś S_{Fe} to pole przekroju czynnego rdzenia.

Uzyskane wyniki pomiarów

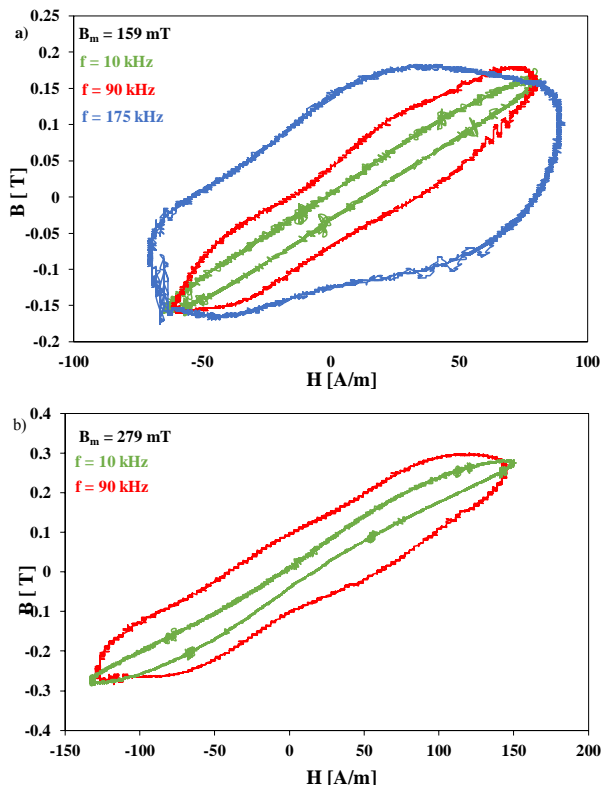
Wykorzystując układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 2 zmierzono zależność indukcji magnetycznej od natężenia pola magnetycznego oraz przeprowadzono badania wpływu parametrów sygnału pomiarowego generowanego przez źródło U_{sin} , takich jak częstotliwość f na przebieg krzywej magnesowania dławika.

Do badań wykorzystano dławik zawierający rdzeń ferrytowy kubkowy wykonany z materiału F2001 o średnicy 18 mm i wysokości 11mm, na który nawinięto dwa zwoje drutu miedzianego w emalii o średnicy 0,8 mm. Parametry rdzenia rozważanego dławika zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Wartości parametrów materiału ferrytowego F-2001

parametr	l_{Fe} [cm]	B_{sat} [mT]	S_{Fe} [mm ²]	V_e [mm ³]	H_c [A/m]
wartość	2,56	390	43	1120	40

Na rysunku 3 przedstawiono uzyskane krzywe magnesowania rozważanego dławika dla dwóch wartości amplitudy indukcji pola magnetycznego wynoszącej odpowiednio $B_m = 159$ mT (rys. 3a) oraz $B_m = 279$ mT (rys. 3b) przy różnych wartościach częstotliwości f sygnału pomiarowego.

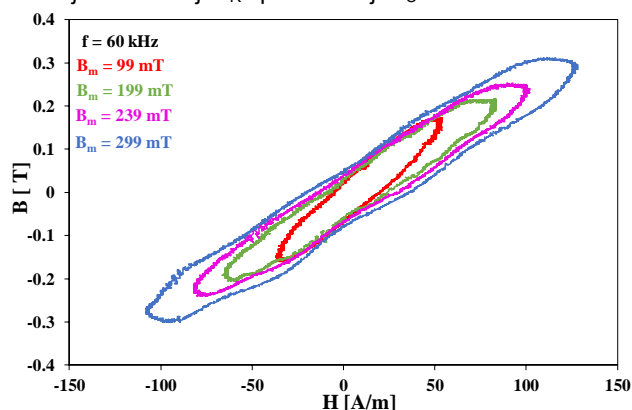


Rys. 3. Zmierzone zależności indukcji magnetycznej B od natężenia pola magnetycznego H dla amplitudy indukcji magnetycznej wynoszącej B_m równej a) 159 mT oraz b) 279 mT

Jak można zauważyć przy amplitudzie indukcji magnetycznej $B_m = 159$ mT (rys.3a) wzrost częstotliwości powoduje ponad trzykrotny wzrost indukcji remanencji B_R i nawet pięciokrotny wzrost pola koercji H_C rdzenia rozważanego dławika, zaś dla wyższej wartości amplitudy indukcji magnetycznej $B_m = 279$ mT ze wzrostem częstotliwości obserwuje się prawie czterokrotny wzrost indukcji remanencji B_R i ponad sześciokrotny wzrost pola koercji H_C , co w efekcie w obu rozważanych przypadkach skutkuje uzyskaniem większej powierzchni pola pętli histerezy, a w konsekwencji większymi stratami mocy w rozważanym elemencie.

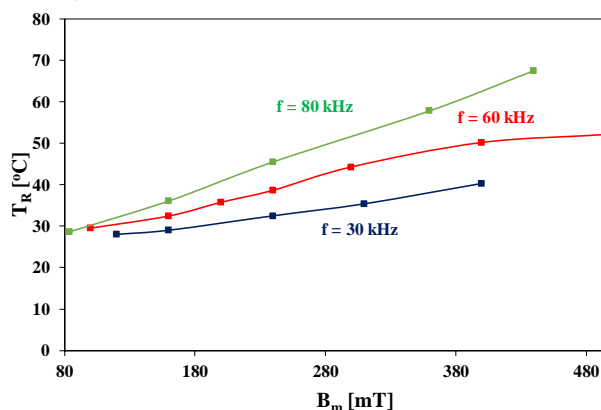
Z kolei, na rysunku 4 przedstawiono krzywe magnesowania B_m rdzenia dławika przy częstotliwości równej 60 kHz dla czterech wartości amplitudy indukcji magnetycznej B_m wynoszących odpowiednio 99 mT, 199 mT, 239 mT oraz 299 mT.

Zgodnie z oczekiwaniem wzrost amplitudy indukcji magnetycznej rdzenia powoduje zwiększenie pola powierzchni pętli histerezy. W rozważanym przypadku przy stałej wartości częstotliwości wynoszącej $f = 60$ kHz, trzykrotny wzrost amplitudy indukcji magnetycznej B_m z 99 mT do 299 mT powoduje dwukrotny wzrost wartości indukcji remanencji B_R i pola koercji H_C .



Rys. 4. Zmierzone zależności indukcji magnetycznej B od natężenia pola magnetycznego H dla częstotliwości f równej 60 kHz.

Na rysunku 5 przedstawiono zależność temperatury rdzenia T_R od amplitudy indukcji magnetycznej B_m dla trzech wartości częstotliwości f wynoszących odpowiednio 30 kHz, 60 kHz oraz 80 kHz.



Rys. 5. Zmierzone zależności temperatury rdzenia T_R od amplitudy indukcji magnetycznej B_m przy trzech wartościach częstotliwości

Z przedstawionej na rysunku 5 zależności można zauważyć, że wraz ze wzrostem amplitudy indukcji magnetycznej B_m oraz częstotliwości f rośnie temperatura rdzenia rozważanego dławika. Przy czym największe

zmiany odpowiadające ponad dwukrotnemu wzrostowi temperatury obserwuje się przy częstotliwości $f = 80$ kHz.

Podsumowanie

W pracy zaprezentowano nową metodę i układ do pomiaru krzywej magnesowania rdzenia dławika. Opisana metoda pozwala na obserwację wpływu częstotliwości i amplitudy indukcji magnetycznej na kształt i pole powierzchni uzyskiwanych krzywych magnesowania. Dodatkowo, zaproponowany układ pomiarowy umożliwia rejestrację temperatury rdzenia dławika dla różnych wartości częstotliwości i amplitudy indukcji magnetycznej, która może być przydatna do określenia strat mocy w rdzeniu dławika metodami termicznymi.

Uzyskane wyniki badań dławika z rdzeniem ferrytowym wykazały, że zaproponowany układ działa poprawnie w szerokim zakresie zmian częstotliwości i amplitudy indukcji. Na obserwowanych wykresach $B(H)$ można zauważyć wzrost powierzchni pętli histerezy przy wzroście częstotliwości. Widać też, że uzyskane krzywe magnesowania odbiegają od wykresów prezentowanych w podręcznikach, gdyż dotyczą także wyższych częstotliwości pracy.

Zaprezentowane wyniki badań mogą być przydatne dla projektantów układów elektronicznych i energoelektronicznych, a także projektantów elementów magnetycznych. Uzyskane wyniki badań mogą być zastosowane także w dydaktyce do zilustrowania wpływu wybranych czynników na właściwości rdzeni ferromagnetycznych wykorzystywanych w dławikach.

Autorzy: dr inż. Kalina Detka, prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, Wydział Elektryczny, Uniwersytet Morski w Gdyni, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia, E-mail: k.detka@we.umg.edu.pl, k.gorecki@we.umg.edu.pl

LITERATURA

- [1] Van den Bossche A., Valchev V.C., Inductors and transformers for Power Electronics. CRC Press, Taylor & Francis Group Boca Raton, (2005).
- [2] Barlik R., Nowak M., Energoelektronika - elementy, podzespoły, układy, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, (2014).
- [3] Kazimierczuk M.K., High-Frequency Magnetic Components. John Wiley & Sons, (2014).
- [4] Detka K., Górecki K., Modelling power losses in an inductor contained in the boost converter, Proceedings 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-Powereng 2018), Doha, Katar, doi: 10.1109/CPE.2018.8372564
- [5] Ericson R., Maksimovic D.: Fundamentals of power electronics, Kluwer, New York, (2001)
- [6] Shaltout A. H., Gregori S., Layout optimization of planar inductors for high-efficiency integrated power converters, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 102 (2020), 155-167
- [7] Somnath P., Bhim S., Shrivastava A., A Highly Efficient Coupled-Inductor SEPIC Topology Based PFC DC-DC Converter for Low Power LED Lighting Systems, *IETE Technical Review*, 36 (2019), 94-105
- [8] Górecki K., Detka K., Influence of Power Losses in the Inductor Core on Characteristics of Selected DC-DC Converters, *Energies*, 12 (2019), 1991, doi: 10.3390/en12101991
- [9] Górecki K., Zarębski J., Detka K., Application of the Electrothermal Average Inductor Model for Analyses of Boost Converters, 22nd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits & Systems (Mixdes) Toruń, (2015), 417-421
- [10] Górecki K., Detka K., Application of Average Electrothermal Models in the SPICE-Aided Analysis of Boost Converters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(2019),n.4, 2746-2755
- [11] Tumański S., Handbook of Magnetic Measurements, Taylor and Francis Group, Boca Raton, (2011)
- [12] Detka K., Górecki K., Modelling the power losses in the ferromagnetic materials, *Materials Science-Poland* 35(2017), n.2, 398-404
- [13] Maksimovic D., Stankovic A.M., Thottuvelil V.J., Modeling and simulation of power electronic converters, *Proceedings of the IEEE*, 89(2001), 898-912
- [14] Detka K., Górecki K., The methods of measurement the power losses in the core of inductor, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95 (2019), n.8, 150-153
- [15] Tietze U., Schenk Ch., Gamm E.: Electronic Circuits - Handbook for Design and Applications, Springer, (2015)
- [16] Optex Product Information <http://www.dewetron.cz/optex/katlisty/PT-3S.pdf>.
- [17] <https://www.aet.com.pl/RDZENIE-FERRYTOWE/W%C5%81A%C5%9ACIWO%C5%9ACI-MATERIA%C5%81%C3%93W-FILTROWYCH/CHARAKTERYSTYKI/Charakterystyki-F-2001>