

doi:10.15199/48.2022.09.30

## Analiza przydatności metody histerezy do wyznaczania strat mocy w rdzeniu ferromagnetycznym

**Streszczenie.** W pracy przeanalizowano przydatność metody wyznaczania strat mocy w materiałach magnetycznych bazującej na pomiarze pola powierzchni pętli histerezy. Dodatkowo zastosowano model Steinmetza w celu weryfikacji zakresu częstotliwości i amplitudy indukcji, dla których model ten pozwala na poprawne wyznaczenie strat mocy w materiale magnetycznym. Wykorzystując straty mocy w rdzeniu wyznaczone przy zastosowaniu metody histerezy zbadano wpływ amplitudy indukcji magnetycznej na rezystancję termiczną rdzenia ferromagnetycznych. Do badań wykorzystano 2 rdzenie toroidalne o podobnych rozmiarach wykonane z różnych materiałów ferromagnetycznych, tj. sproszkowanego żelaza (-26) oraz ferrytu SM-100. Z przeprowadzonych badań wynika, że zastosowanie metody histerezy powoduje nawet siedmiokrotne zawyżenie wartości strat mocy w rdzeniu. Obliczenia przy zastosowaniu modelu Steinmetza pozostają w dobrej zgodności z danymi katalogowymi dla rdzenia wykonanego ze sproszkowanego żelaza.

**Abstract.** The paper analyzes the usefulness of the method of determining power losses in magnetic materials based on the measurement of the hysteresis loop surface area. Additionally, the Steinmetz model was used to verify the range of frequency and the induction amplitude, for which this model allows for the correct determination of power losses in the magnetic material. Using the power losses in the core determined with the hysteresis method, the influence of the magnetic flux density on the thermal resistance of ferromagnetic cores was investigated. Two similar-sized toroidal cores made of different ferromagnetic materials (powdered iron (-26) and SM-100 ferrite) were used for the investigation. The obtained results show that the application of the hysteresis method causes even a sevenfold increase in the value of the power dissipated in the core. Calculations using the Steinmetz model are in good agreement with the catalog data for a core made of powdered iron. (**Analysis the usefulness of the method of determining power losses in magnetic materials based on the measurement of the hysteresis loop surface area**)

**Słowa kluczowe:** rdzenie ferromagnetyczne, straty mocy, pętla histerezy, transformator, rezystancja termiczna  
**Keywords:** ferromagnetic cores, power losses, hysteresis loop, transformer, thermal resistance

### Wstęp

Materiały ferromagnetyczne są powszechnie stosowane do budowy rdzeni elementów magnetycznych wykorzystywanych w różnego typu układach elektronicznych [1, 2, 3]. Oferowane przez producentów materiały magnetyczne cechują się różnymi właściwościami, które decydują o tym w jakiego typu układzie elektronicznym czy energoelektronicznym zostaną one zastosowane [1]. W przypadku układów przekształcania energii elektrycznej jednym z podstawowych parametrów technicznych tej klasy urządzeń jest sprawność energetyczna [1, 4]. Wartość tego parametru zależy od strat mocy zarówno w przyrządach półprzewodnikowych, jak i elementach pasywnych, np. dławikach [5]. Straty mocy w dławikach zależą od strat występujących w uzwojeniach i strat w rdzeniu [5]. Problem pomiaru strat mocy w rdzeniu i uzwojeniu dławika nie jest zagadnieniem prostym. Wiele prac poświęconych jest pomiarom tylko strat mocy występujących w uzwojeniu, zwłaszcza w zakresie wysokich częstotliwości, gdzie wymagane jest uwzględnienie efektu zbliżeniowego i zjawiska naskórkowości [1]. Często odrębnym zagadnieniem jest opis strat mocy w rdzeniach ferromagnetycznych, który także jest przedmiotem dyskusji i badań prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych [5].

Straty mocy występujące w materiałach magnetycznych można podzielić na straty histerezy, wiropądowe i pozostałościowe, czy relaksacyjne [6]. Jak wynika z literatury w układach przekształcania energii elektrycznej dominującym składnikiem strat mocy w rdzeniach ferromagnetycznych, a przede wszystkim ferrytowych są straty histerezy [1, 6]. W celu wyznaczenia wartości tych strat wykorzystuje się znany z literatury układ służący do wyznaczania pętli histerezy rdzenia [2].

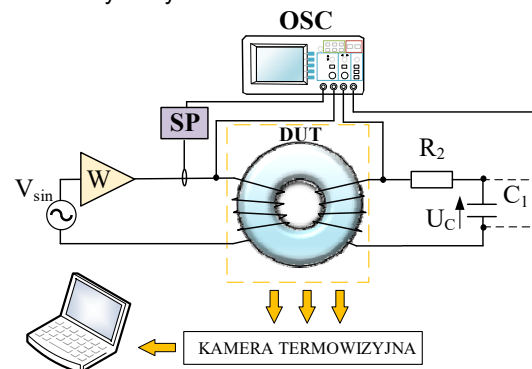
Często do szacowania mocy traconej w materiale magnetycznym wykorzystuje się popularny model Steinmetza [6, 7]. Jednak model ten pozwala na właściwe wyznaczenie strat mocy w materiale magnetycznym tylko dla ograniczonego zakresu częstotliwości. Przykładowo w pracy [8] wykazano, że dla częstotliwości powyżej 30 kHz wyniki uzyskane z modelu Steinmetza są zaniżone o około

15% w stosunku do danych katalogowych dla materiału ferrytowego F2001. Dodatkowo, biorąc pod uwagę, że zarówno model Steinmetza, jak i straty wyznaczone na podstawie obliczania pola powierzchni pętli histerezy uzyskuje się dla sinusoidalnego przebiegu indukcji magnetycznej uzyskane wyniki mogą okazać się obarczone dużym błędem w przypadku rozważania strat mocy w rdzeniach elementów magnetycznych pracujących w układach impulsowego przekształcania energii elektrycznej, gdzie przebieg czasowy indukcji magnetycznej ma kształt trójkątny [8, 9, 10].

Celem niniejszej pracy jest analiza przydatności metody wyznaczania strat w materiałach ferromagnetycznych bazującej na pomiarze pola powierzchni pętli histerezy. W dalszej części pracy metoda ta będzie nazywana metodą histerezy. W rozdziale 2 omówiono analizowaną metodę pomiarową w rozdziale 3 omówiono badane rdzenie ferromagnetyczne natomiast w rozdziale 4 przedstawiono uzyskane wyniki pomiarów.

### Metoda pomiarowa

Do wyznaczenia strat mocy w materiałach ferromagnetycznych zastosowano układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 1.



Rys.1. Układ do pomiaru pętli histerezy

Układ ten składa się z generatora przebiegu sinusoidalnego  $V_{\sin}$  typu JC5620P, wzmacniacza mocy (W) typu AETECHRON 7228 służącego do wzmocnienia generowanego sygnału, sondy prądowej (SP) Tektronix TCPA 300, która zawiera przetwornik pomiarowy z napięciowym sygnałem wyjściowym proporcjonalnym do prądu. Elementy  $R_1$  i  $C_1$  tworzą układ całkujący napięcie na uzwojeniu wtórnym badanego transformatora. Z kolei, za pomocą oscyloskopu (OSC) typu RIGOL MSO5104 o częstotliwości próbkowania w jednym kanale wynoszącej 8 GSa/s rejestruje przebieg czasowy prądu uzwojenia pierwotnego transformatora  $i_p$ , napięcia po stronie pierwotnej transformatora, napięcie po stronie wtórnej transformatora oraz napięcia  $U_C$  na kondensatorze  $C_1$ , które w przybliżeniu jest proporcjonalne do strumienia indukcji w rdzeniu.

Wartość rezystancji rezystora  $R_1$  i pojemności kondensatora  $C_1$  zostały tak dobrane by stała czasowa  $R_1C_1$  była dużo mniejsza niż okres generowanego sygnału [8]. Dodatkowo w przedstawionym na rysunku 1 układzie zastosowano kamerę termowizyjną FLIR ETS320 połączoną z komputerem do rejestracji rozkładu temperatury badanego elementu magnetycznego. Pomiar wykonano dla różnych wartości amplitudy indukcji  $B_m$  przy stałej wartości częstotliwości  $f$  oraz dla różnych wartości częstotliwości przy stałej wartości amplitudy indukcji magnetycznej.

Zarejestrowane za pomocą oscyloskopu przebiegi czasowe prądu uzwojenia pierwotnego transformatora  $i_p$  i napięcia na kondensatorze  $U_C$  są przesyłane do komputera, gdzie wykonywane są odpowiednie obliczenia natężenia pola magnetycznego  $H$  oraz indukcji pola magnetycznego  $B$  z zależności [8].

$$(1) \quad H(t) = \frac{z_1 \cdot i_p(t)}{l_{Fe}}$$

$$(2) \quad B(t) = \frac{U_C(t) \cdot R_2 \cdot C_1}{z_2 \cdot S_{Fe}}$$

gdzie  $z_1$  oznacza liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego transformatora, a  $l_{Fe}$  to długość drogi magnetycznej rdzenia,  $S_{Fe}$  to pole przekroju czynnego rdzenia transformatora,  $z_2$  – liczba zwojów uzwojenia wtórnego.

Stosując metodę histerezową wartość gęstości mocy strat w rdzeniu wyznaczono z zależności [8]

$$(3) \quad P_H = f \cdot \oint HdB$$

gdzie  $f$  to częstotliwość przebiegu  $B(t)$ .

### Badane elementy

W celu weryfikacji użyteczności omówionej w poprzednim rozdziale metody pomiaru strat mocy w materiałach ferromagnetycznych zastosowano 2 rdzenie toroidalne o podobnych rozmiarach, istotnie różniące się między sobą właściwościami magnetycznymi. Wykonane są one odpowiednio z materiału ferrytowego SM-100 oraz ze sproszkowanego żelaza (-26) nazywanego w dalszej części pracy rdzeniem sproszkowanym. Przy wyznaczaniu strat mocy w rozważanych materiałach ferromagnetycznych wykorzystując metodę histerezową na oba rdzenie nawinięto dwa identyczne uzwojenia składające się z 10 zwojów z drutu miedzianego w emalii o średnicy 0,8 mm. Parametry rozważanych materiałów ferromagnetycznych zestawiono w Tabeli 1, natomiast w Tabeli 2 zestawiono parametry geometryczne rdzeni toroidalnych wykonanych ze wspomnianych materiałów.

Z zebranych w Tabeli 1 parametrów materiałów magnetycznych rozważanych rdzeni obserwuje się, że wartość przenikalności magnetycznej rdzenia z materiału ferrytowego SM-100 jest ponad 130 razy wyższa od

przenikalności magnetycznej rdzenia ze sproszkowanego żelaza typu (-26). Obserwuje się także, że wyższą wartością indukcji nasycenia ma rdzeń ze sproszkowanego żelaza. Dodatkowo, w danych katalogowych rdzeni wykonanych ze sproszkowanego żelaza podano informację o wartościach strat mocy dla różnych wartości częstotliwości i różnych wartości amplitudy indukcji, podczas gdy brak takich informacji w notach katalogowych rdzenia wykonanego z materiału ferrytowego. Obserwuje się także, że temperatura Curie dla materiału (-26) jest o ponad 600°C wyższa niż dla materiału SM-100.

Tabela 1. Wartości wybranych parametrów zastosowanych materiałów ferromagnetycznych [13, 14]

Parametr	Materiał	
	SM-100	(-26)
Względna przenikalność magnetyczna	10000	75
Indukcja nasycenia $B_{sat}$ [T]	0,4	1,38
Stratność $P_v$ [mW/cm <sup>3</sup> ] przy $f = 100$ kHz	Brak danych	75
Temperatura Curie [°C]	120	750

Tabela 2. Wartości wybranych parametrów geometrycznych zastosowanych rdzeni ferromagnetycznych [13, 14]

Parametr	Materiał	
	SM-100	(-26)
Długość drogi magnetycznej $l_{Fe}$ [mm]	62,8	64,99
Pole przekroju czynnego rdzenia $S_{Fe}$ [cm <sup>2</sup> ]	0,5	0,682
Objętość efektywna rdzenia $V_e$ [cm <sup>3</sup> ]	3,14	4,43

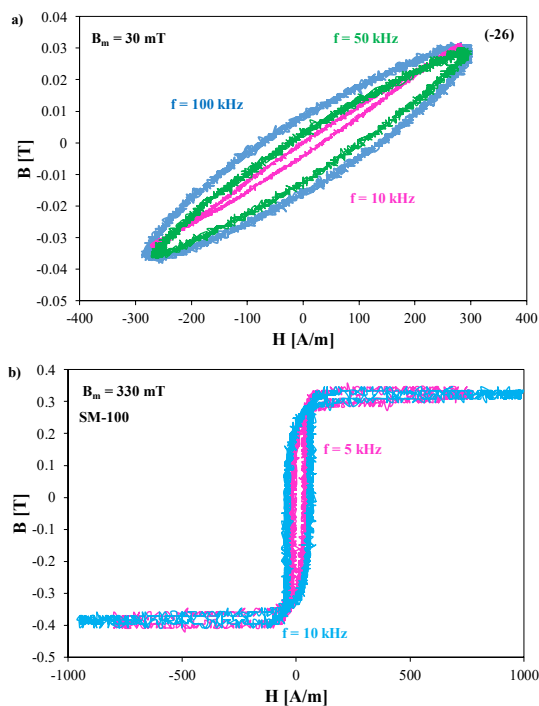
Z danych przedstawionych w Tabeli 2 można zauważyć, że rozmiary zastosowanych do badań rdzeni są podobne. Długość drogi magnetycznej rdzenia wykonanego ze sproszkowanego żelaza jest zaledwie o 3% dłuższa od długości drogi magnetycznej rdzenia ferrytowego. Natomiast pole przekroju czynnego rdzenia ferrytowego jest mniejsze o 0,18 cm<sup>2</sup> od pola przekroju czynnego rdzenia (-26). Z kolei, objętość ekwiwalent rdzenia ze sproszkowanego żelaza jest większa o 1,29 cm<sup>3</sup> od wartości tego parametru dla rdzenia ferrytowego.

### Wyniki badań

Wykorzystując układ pomiarowy przedstawiony w rozdziale 2 oraz rdzenie ferromagnetyczne omówione w rozdziale 3 wykonano pomiar pętli histerezy dla transformatorów z rdzeniem ze sproszkowanego żelaza oraz ferrytowym w szerokim zakresie częstotliwości sygnału pobudzającego (od 1 kHz do 100 kHz) oraz amplitudy indukcji magnetycznej zmieniającej się od 0,03 do 0,25 T.

Na rysunku 2 przedstawiono zależność indukcji magnetycznej od natężenia pola magnetycznego rdzenia ze sproszkowanego żelaza (rys.2a) oraz rdzenia ferrytowego (rys.2b).

Jak można zauważyć na rysunku 2, ze wzrostem częstotliwości zwiększa się pole powierzchni pętli histerezy, co skutkuje wzrostem strat mocy w obu rozpatrywanych rdzeniach. Na uwagę zasługuje fakt, że ze względu na większą wartość przenikalności magnetycznej rdzenia ferrytowego oraz małą wartość indukcji nasycenia na rys.2b widoczne jest nasycenie rdzenia, co koresponduje z danymi podawanymi przed producenta rdzenia. Z kolei, zależność  $B(H)$  przedstawiane na rys.2a są cząstkowymi pętlami histerezy. Ze względu na ograniczenia układu pomiarowego oraz fakt, że na obu rdzeniach nawinięto taką samą liczbę zwojów nie uzyskano wartości natężenia pola, przy której rdzeń ze sproszkowanego żelaza osiąga nasycenie.



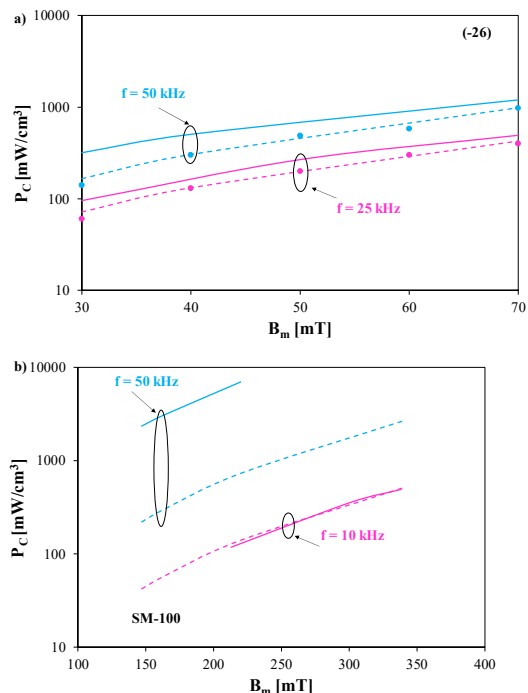
Rys.2. Zależność indukcji magnetycznej od natężenia pola magnetycznego rdzenia wykonanego ze sproszkowanego żelaza (a) oraz rdzenia ferrytowego (b)

Na rysunku 3 przedstawiono zależność gęstości strat mocy wydzielanej w rdzeniu wykonanym z materiału ze sproszkowanego żelaza (rys.3a) oraz ferrytu (rys.3b) od amplitudy indukcji magnetycznej  $B_m$  przy częstotliwości sygnału pobudzającego  $f = 50 \text{ kHz}$  i  $f = 25 \text{ kHz}$  dla rdzenia proszkowego oraz  $f = 50 \text{ kHz}$  i  $10 \text{ kHz}$  dla rdzenia ferrytowego. Punktami oznaczono wyniki pochodzące z danych katalogowych (tolerancja stratności wskazana przez producenta  $\pm 25\%$ ), linią ciągłą wyniki uzyskane przy zastosowaniu opisanej metody pomiarowej, a linią przerywaną obliczenia przy zastosowaniu modelu Steinmetza. Parametry występujące w modelu dla Steinmetza dla materiału (-26) wynoszą:  $\alpha = 1,2$ ,  $\beta = 2,1$ ,  $k = 0,6 \text{ W}\cdot\text{s}^\alpha/\text{m}^3\cdot\text{T}^\beta$ , a dla materiału SM-100:  $\alpha = 1,025$ ,  $\beta = 2,97$ ,  $k = 1 \text{ W}\cdot\text{s}^\alpha/\text{m}^3\cdot\text{T}^\beta$ . Obliczono je wykorzystując procedurę estymacji parametrów opisaną w pracy [15].

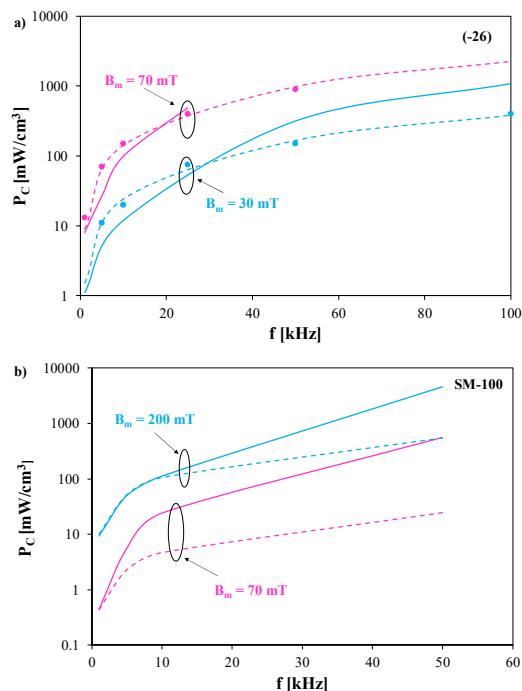
Z zależności przedstawionej na rysunku 3 można zauważyć, że ze wzrostem amplitudy indukcji magnetycznej rosną straty mocy w obu rozważanych materiałach ferromagnetycznych. Na uwagę zasługuje fakt, że wyniki obliczeń uzyskane dla rdzenia wykonanego z materiału proszkowego (-26) (rys.3a) przy zastosowaniu modelu Steinmetza pozostają w dobrej zgodności z wynikami pochodzącymi z danych katalogowych. Z kolei wyniki obliczeń strat mocy w rdzeniu wykonanym z materiału SM-100 przy zastosowaniu zależności (3) są ponad siedmiokrotnie zawyżone w stosunku do obliczeń przy zastosowaniu modelu Steinmetza dla częstotliwości sygnału pobudzającego równej  $50 \text{ kHz}$ . Natomiast dla częstotliwości  $f = 10 \text{ kHz}$  w całym rozważanym zakresie indukcji magnetycznej wyniki obliczeń z modelu Steinmetza oraz metody histerezy pozostają w dobrej zgodności.

Na rysunku 4 przedstawiono zależność gęstości mocy strat wydzielanej w rdzeniu wykonanym z materiału ze sproszkowanego żelaza (rys.4a) oraz ferrytu (rys.4b) od częstotliwości sygnału pobudzającego dla amplitudy indukcji magnetycznej wynoszącej odpowiednio  $30 \text{ mT}$  dla materiału (-26) oraz  $200 \text{ mT}$  dla materiału SM-100. Linią ciągłą oznaczono wyniki uzyskane przy zastosowaniu

metody histerezy, natomiast linią przerywaną wyniki obliczeń z modelu Steinmetza.



Rys.3. Zależność gęstości mocy strat w materiale ze sproszkowanego żelaza (a) oraz materiale ferrytowym (b) od amplitudy indukcji magnetycznej



Rys.4. Zależność gęstości mocy strat w materiale ze sproszkowanego żelaza (a) oraz materiale ferrytowym (b) od częstotliwości sygnału pobudzającego

Jak można zauważyć, wzrost częstotliwości sygnału pobudzającego w obu rozważanych przypadkach powoduje wzrost strat mocy w rdzeniu, co koresponduje z zależnościami  $B(H)$  zaprezentowanymi na rysunku 2. Obserwuje się także, że wyniki (rys.4a) uzyskane przy zastosowaniu modelu Steinmetza dla rdzenia wykonanego z materiału (-26) pozostają w dobrej zgodności z wynikami pochodzącymi z danych katalogowych w całym rozważanym zakresie częstotliwości. Natomiast wyniki

uzyskane przy zastosowaniu metody omówionej w rozdziale 2 są zawyżone nawet dwukrotnie w zakresie wysokich wartości częstotliwości ( $f = 100$  kHz).

Z kolei, wyniki obliczeń strat mocy w materiale proszkowym uzyskane z zależności (3) dla niskich wartości amplitudy indukcji magnetycznej ( $B_m = 30$  mT) są ponad dwukrotnie zawyżone w porównaniu z wynikami pochodzącymi z danych katalogowych oraz około 20% zawyżone w zakresie wyższych wartości indukcji magnetycznej ( $B_m = 70$  mT).

Dodatkowo widać, że ze wzrostem częstotliwości sygnału pobudzającego rośnie różnica pomiędzy wynikami pochodzącymi z danych katalogowych a wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu metody histerezy.

Z kolei, straty mocy uzyskane dla materiału ferrytowego przy zastosowaniu modelu Steinmetza oraz metody histerezy pozostają w dobrej zgodności dla częstotliwości do 10 kHz. Powyżej tej częstotliwości obserwuje się, że straty mocy wyznaczone metodą histerezy są prawie pięciokrotnie wyższe od obliczonych przy użyciu modelu Steinmetz'a.

Wykorzystując wyznaczone zależności gęstości mocy strat  $P_C$ , katalogową objętość rdzenia oraz zmierzone za pomocą kamery termowizyjnej wartości rezystancji termicznej badanych rdzeni ze wzoru

$$(4) \quad R_{thC} = \frac{T_C - T_a}{P_C \cdot V_e}$$

gdzie  $T_a$  oznacza temperaturę otoczenia.

Uzyskane wyniki pomiarów porównano z wynikami uzyskanymi za pomocą metody stałoprądowej opisanej w pracy [8]. W przypadku transformatora z rdzeniem z materiału (-26) uzyskano wartości  $R_{thC}$  o około 30 % większe niż dla metody z pracy [8], a dla transformatora z rdzeniem SM-100 wartości  $R_{thC}$  są mniejsze od wartości zmierzonych metodą z pracy [8] aż o 80 %. Uzyskane rozbieżności wskazują, że metoda histerezy wymaga jeszcze dopracowania, aby uzyskane za jej pomocą wyniki mogłyby być użyteczne w szacowaniu przyrostu temperatury rdzenia w czasie pracy dławików lub transformatorów.

### Podsumowanie

W pracy przeanalizowano przydatność metody histerezy do mierzenia strat mocy wydzielanej w rdzeniach elementów magnetycznych. Przeprowadzono badania wykorzystując metodę pomiaru pętli histerezy, której pole powierzchni odpowiada stratom mocy wydzielanej w rdzeniu. Dodatkowo zastosowano model Steinmetza do zbadania zakresu użyteczności wspomnianego modelu. Zbadano także wpływ amplitudy indukcji magnetycznej na parametry termiczne rdzenia wykorzystując uzyskaną zależność  $P_C(B_m)$ .

Uzyskane wyniki badań wskazują, że wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału pobudzającego oraz amplitudy indukcji magnetycznej rosną straty mocy wydzielanej w rdzeniu transformatora.

Dodatkowo z przeprowadzonych badań wynika, że w przypadku transformatora z rdzeniem z materiału (-26) uzyskano wartości  $R_{thC}$  o około 4 K/W większe niż dla metody z pracy [8], a dla transformatora z rdzeniem SM-100 wartości  $R_{thC}$  są mniejsze od wartości zmierzonych metodą z pracy [8] aż o 80 %.

Z przeprowadzonych badań można zauważyć, że omówiona w niniejszej pracy metoda wyznaczania strat mocy w materiałach magnetycznych bazująca na pomiarze

pętli histerezy pozwala na oszacowanie strat mocy w materiałach ferromagnetycznych w zakresie wyższych wartości amplitudy indukcji magnetycznej dla materiału (-26) oraz niskich wartości częstotliwości sygnału pobudzającego (do 10 kHz). Obserwuje się, że wartości strat mocy w rdzeniu wykonanym z materiału (-26) wyznaczone metodą histerezy są ponad dwukrotnie zawyżone w stosunku do danych pochodzących z not katalogowych oraz siedmiokrotnie dla rdzenia ferrytowego w stosunku do danych uzyskanych z modelu Steinmetza. Natomiast model Steinmetza może być z powodzeniem stosowany do wyznaczania strat mocy w materiałach ze sproszkowanego żelaza w szerokim zakresie zmian częstotliwości i amplitudy indukcji magnetycznej.

Uzyskane wyniki dowodzą zasadności kontynuowania prac nad poszukiwaniem nowych metod pomiaru strat mocy w materiałach magnetycznych.

**Autorzy:** dr inż. Kalina Detka, prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: k.detka@we.umg.edu.pl, k.gorecki@we.umg.edu.pl.

### LITERATURA

- [1] Barlik R., Nowak M., Energoelektronika elementy podzespoły układy, Politechnika Warszawska, 2014
- [2] Tumański S., Handbook of Magnetic Measurements, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2011
- [3] Kazimierczuk M., High-Frequency Magnetic Components, Wiley, 2014
- [4] Górecki K., Zarębski J., Detka K.: Application of the Electrothermal Average Inductor Model for Analyses of Boost Converters, 2015 22<sup>nd</sup> International Conference Mixed Design of Integrated Circuits & Systems (Mixdes), 2015, 417 – 421.
- [5] Górecki K., Detka K., Górski K.: Compact Thermal Model of the Pulse Transformer Taking into Account Nonlinearity of Heat Transfer, Energies, 13 (2020), nr.11, 2766, doi: 10.3390/en13112766
- [6] Van den Bossche A., Valchev V.C., Inductor and Transformers for Power Electronic, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005.
- [7] Steinmetz Ch.: On the law of hysteresis, Proceedings of the IEEE, Vol.: 72, No. 2, 1984, pp. 197 – 221, doi: 10.1109/PROC.1984.12842
- [8] Górecki K., Detka K.: Improved method for measuring power losses in the inductor core, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 70 (2021), 1500710, doi: 10.1109/TIM.2020.3031977.
- [9] Van den Bossche A., Valchev V.C., Van den Sype D. M., Van den Bossche L.P.: Ferrite losses of cores with square wave voltage and dc bias. Journal of Applied Physics No. 99, 2006, pp. 08M908-1 - 08M908-3.
- [10] Górecki K., Detka K.: Influence of Power Losses in the Inductor Core on Characteristics of Selected DC-DC Converters, Energies, 12 (2019), doi: 10.3390/en12101991
- [11] Barlik R., Nowak M., Grzejszczak P., Zdanowski M.: Estimation of power losses in a high-frequency planar transformer using a thermal camera. Archives of Electrical Engineering Vol. 65, No. 3, 2016, pp.613-627.
- [12] Dane katalogowe materiału SM-100 [https://en.aet.com.pl/Portals/en/ZelNet\\_HermesNet/ProductFile/s/W%C5%81A%C5%9ACIWO%C5%9ACI%20MATERIA%C5%81U%20SM-100.pdf](https://en.aet.com.pl/Portals/en/ZelNet_HermesNet/ProductFile/s/W%C5%81A%C5%9ACIWO%C5%9ACI%20MATERIA%C5%81U%20SM-100.pdf) dostęp 22.04.2022
- [13] Dane katalogowe materiały (-26) <https://feryster.pl/rdzenie-proszkowe-rtp>, Dostęp 22.04.2022.
- [14] Górecki K., Detka K.: The parameters estimations of the electrothermal model of inductors, Informacje MIDEM, 45 (2015), nr. 1, 29-38.